

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФРАСТРУКТУРИ ТА ТЕХНОЛОГІЙ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ГУСАК ІРИНА ЛЕОНІДІВНА

656.6.08:656.615

ДИСЕРТАЦІЯ

**МЕТОДИ СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕННЯ
БЕЗПЕКИ СУДНОВОДІННЯ В ПОРТОВІЙ АКВАТОРІЇ**

Спеціальність: 271 Морський та внутрішній водний транспорт

Галузь знань: 27 транспорт

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

І.Л. Гусак

Науковий керівник: Нікітін Павло Володимирович

кандидат економічних наук, доцент

Київ – 2024

АНОТАЦІЯ

Гусак І.Л. Методи системи підтримки прийняття рішення безпеки судноводіння в портовій акваторії. Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 271 Морський та внутрішній водний транспорт. Державний університет інфраструктури та технологій, Київ, 2024.

Складність навігації, забезпеченість порту радіоелектронними засобами управління і контролю інформаційного навантаження судноводія поділяють захід судна в порт призначення на низку фаз суднозаходу. На кожній з них висуваються вимоги до точності визначення місця розташування судна, що заходить у порт, оцінювання впливу людського чинника на безпеку суднозаходу та можливі заходи щодо зниження його впливу на можливі аварійні ситуації. Такий поділ передбачено в ухваленій 1983 р. ІМО Резолюції А.529(13) «Стандарти точності судноводіння». Відмічені особливості та практика судноводіння в портових водах дозволяють виділити чотири фази суднозаходу.

Рейс судна складається зі входу до гавані та підходів до неї, а також вод, в яких обмежено свободу маневру, та інші вод. Тому практично вся дистанція першої фази суднозаходу належить до стадії «інші води». Для цієї ділянки маршруту руху навігаційна точність має бути не гіршою за 4% відстані від небезпеки, але не більше 4 морських миль, тобто йдеться про дистанції до небезпеки, що обчислюються десятками миль.

Для кожного порту розрахунок і практика суднопроводки показують точність визначення місця за допомогою наземних і космічних засобів навігації. Саме на цій фазі суднозаходу у морських районах А3 і А4 відбувається від 3-5% від кількості всіх пригод і катастроф, а в морських районах А2 і А1 – решта 97-95%.

На практиці перераховані системи мають обмеження: з роздільної здатності за дальністю берегових РЛС, наявність зон і «радіотіні», а також екранування великим судном близько розташованого малого судна.

Таким чином, у першій інформаційній фазі суднозаходу вказані засоби навігації за умови їхньої ідеальної роботи задовільно забезпечують необхідну точність визначення місця розташування судна, яке заходить у порт.

Друга фаза суднозаходу належить до стадії рейсу «вхід у гавань і підходи до неї, а також води, в яких обмежена свобода маневру, а ... величина допустимої похибки місця залежить від місцевих умов і її визначення є функцією відповідних Адміністрацій».

Підхід до воріт фарватеру – це умови обмеженого маневру, де потрібна більша точність визначення місця розташування (принаймні в кілька разів) у порівнянні з першою фазою. Однак, берегові та супутникові засоби навігації залишаються тими самими, що й у першій фазі: РЛС системи управління рухом судна; навігаційні системи GPS і ГЛОНАСС; диференціальні підсистеми GPS і ГЛОНАСС.

Аналіз наведеної інформації і судових засобів навігації щодо другої фази показує, що наявні засоби навігації здатні за ідеальних умов експлуатації забезпечити вхід у ворота фарватеру, але без належного запасу безпеки. На випадок позаштатного функціонування наявних систем рекомендується мати на судні засоби, які дають змогу автономно визначати дистанцію до воріт фарватеру та до потенційно небезпечних плавзасобів, які перебувають поблизу воріт фарватеру.

Вимоги до точності судноплавства у третій фазі суднозаходу є порівнянними, а в окремих районах і більш жорсткими, ніж у другій фазі. Однак, засоби навігації залишаються тими самими, але можуть виявитися нові особливості РЛС системи управління рухом судна порту, наприклад, "засвічення" низькою хмарністю частини бухти; неможливість визначення радіуса дрейфу судна на якірній стоянці; екранування великими суднами.

Отже, у третій фазі суднозаходу наявні системи задовільно виконують

свої функції, однак у критичних ситуаціях їхнього позаштатного функціонування на судні необхідно мати резервний засіб автономного визначення місця з кращою точністю.

Через низьку точність визначення місця морських рухомих об'єктів сучасними системами управління рухом судна за допомогою РЛС з усіх пригод і катастроф у морських районах А1 та А2 понад 80% припадає на морський район А2, а у районі А1 більша їхня частина трапляється на акваторіях та фарватерах каналів, у припортових та портових водах, у місцях відстою та стоянки суден, на жвавому перетині морських транспортних і пасажирських шляхів, тобто саме на другій і третій фазах суднозаходу).

Для надійного навігаційного забезпечення суден і підвищення безпеки плавання саме в цих морських районах, а також запобігання екологічним лихам у прибережних водах, на підходах до портів, у портових водах, у вузькостях, де свобода маневрування обмежена, ІМО у 1995 р. прийняла похибку місця розташування судна не більше 10 м для довірчої ймовірності її реалізації 95%, за частоти оновлення інформації про місцезнаходження судна з інтервалом не більше 10 с.

Четверта фаза суднозаходу визначає, що процес швартування судна відрізняється тим, що зближення судна з причалом здійснюється зазвичай із вимкненим двигуном судна, що швартується, що призводить до його практично повної некерованості. Тому завдання безаварійного швартування багато в чому визначається лоцманом, який контролює технологію причалювання, але не має важелів управління, а також екіпажами буксирів. Отже, саме на цій фазі суднозаходу суттєву роль відіграє людський фактор, коли виникає складний і мало керований ланцюг виконавців, де можливе спотворення або втрата інформації і, як наслідок, створення аварійної ситуації.

Більшість аварійних ситуацій під час швартування стається через відсутність технічних засобів об'єктивного контролю зближення судна з причалом і через здійснення швартування лоцманом візуально, що залежить від його психофізичного стану. Аналіз навалів суден на причали та їхні

спороди свідчить, що безпечне швартування досягається необхідними знаннями місця розташування судна відносно причалу з високою точністю й врахуванням впливу людського фактору.

Таким чином, забезпечення безпеки мореплавства в кожній із фаз суднозаходу припускають вдосконалення технічних засобів суден, посилення технічного контролю за діями, особливо в прибережних водах портів і національних економічних зонах держав, а також зниження участі людини в процесах пошуку й розв'язання завдань оптимального керування та маневрування судна на портових фарватерах та акваторіях швартування суден.

Впровадження на морському флоті автоматичної ідентифікаційної системи, що є морською навігаційною системою, в якій використовується взаємний автоматизований інформаційний радіообмін як між суднами, так і між судном і береговими службами, під час якого передають інформацію про позивний і назву кожного судна (для їхнього розпізнавання), їхні координати, параметри (розміри, вантаж, осадку та ін.), мету рейсу, параметри руху (курс, швидкість тощо) для розв'язання завдань запобігання зіткненням суден, контролю за дотриманням ними режиму плавання і загального моніторингу.

Доповнення глобальних навігаційних супутникових систем контрольно-коригувальними станціями розв'язує проблему високоточного визначення місця судна із субметровою точністю. Це забезпечить безпечніше плавання суден в умовах поганої видимості; виконання спеціальних робіт (поглиблення каналів, будівництво хвилеломних і портових споруд, нафтових терміналів); точніше виставляння плавучих засобів навігаційного обладнання для покращення якості обслуговування суден у порту.

Таким чином, незважаючи на широке впровадження систем високоточної навігації і засобів АІС, залишається актуальність вирішення наукового завдання розроблення моделей та методів системи підтримки прийняття рішення безпеки судноводіння в стиснутих водах (портовій акваторії) для підвищення ефективності системи безпеки судноводіння.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами.

Дисертаційна робота відповідає Національній транспортній стратегії України на період до 2030 року (розпорядження Кабінету Міністрів України №430-р від 30 травня 2018 року) і Морській доктрині України на період до 2035 року (Постанова №1307 Верховної Ради України від 07.10.2009 року, зі змінами від 18.12.2018 року, №1108). Дослідження виконано у рамках планових науково-дослідних робіт (НДР) Державного університету інфраструктури і технологій, в яких здобувачка є автором окремих розділів.

Використання наукових та прикладних результатів досліджень.

Отримані в дисертації результати доцільно використовувати при розробці систем підтримки прийняття рішень для вирішення завдань управління при розходженні та обгоні суден; у науково-дослідних організаціях – для забезпечення безпеки судноводіння в портовій акваторії; у вищих навчальних закладах – для вдосконалення системи підготовки фахівців зі спеціальності морський та внутрішній водний транспорт.

Результати дисертаційного дослідження будуть корисними при вдосконаленні існуючого та розробці перспективного програмного забезпечення систем підтримки прийняття рішень засобів водного транспорту.

– модель автоматичного управління рухом судна при маневруванні у стиснутих водах, що дозволяє автоматично підстроювати параметри управління у відповідь на зміну умов плавання судна, використовувалася в навчальному процесі факультету судноводіння на кафедрі навігації і управління суднами при викладанні дисциплін «Забезпечення навігаційної безпеки плавання» та «Управління морехідними якостями судна» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю 271 Морський та внутрішній водний транспорт (акт від 28.02.2024 року № 183/01-11);

– метод управління рухом судна в портовій акваторії, що дозволяє описувати програмні рухи судна гладкими кривими у портовій акваторії, у ході апробації результатів дисертаційної роботи Гусак І.Л. у круїзній компанії «Червона Рута» було підтверджено практичну значущість та доцільність

подальшого впровадження у процес підвищення безпеки судноплавства (акт від 04.03.2024 року).

– метод обчислення програмного значення курсу судна за наявності перешкод, що дозволяє змінюватиме раніше запланований курс судна, відводячи його від перешкоди, що знаходиться поблизу запланованої траєкторії, і повертаючи судно на вихідну заплановану траєкторію у процесі обходу перешкоди та віддаленні від неї, використовувався в навчальному процесі факультету судноводіння на кафедрі навігації і управління суднами при викладанні дисципліни «Управління морехідними якостями судна» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю 271 Морський та внутрішній водний транспорт (акт від 28.02.2024 року № 183/01-11).

Мета і завдання досліджень. *Метою* дисертаційної роботи є підвищення оперативності й обґрунтованості прийняття рішень щодо забезпечення безпеки судноводіння в районі порту.

Для досягнення поставленої мети необхідне вирішення таких *часткових наукових завдань*:

- проведення аналізу факторів, які впливають на безпеку судноводіння у портовій акваторії;
- розробка моделей системи підтримки прийняття рішень безпеки судноводіння в портовій акваторії;
- розробка методу управління рухом судна в портовій акваторії;
- оцінювання ефективності розроблених методів та розроблення рекомендацій щодо їх впровадження.

Об'єктом дослідження є процеси обробки інформації в системі підтримки прийняття рішень безпеки судноводіння

Предметом дослідження є методи і моделі системи підтримки прийняття рішення безпеки судноводіння в портовій акваторії.

Наукова новизна отриманих результатів обумовлена новим рішенням наукового завдання розроблення моделей та методів системи підтримки прийняття рішення безпеки судноводіння в стиснутих водах (портовій

акваторії) для підвищення ефективності системи безпеки судноводіння.

Отримані такі наукові результати:

1) *вперше розроблено* метод управління рухом судна в портовій акваторії, який базується на застосуванні апроксимуючої сигмоїдальної траєкторної функції, що описує режими зміни кінематичних параметрів (курс, швидкість, кут дрейфу) руху судна за певною траєкторією при заданих початкових умовах і дозволяє описувати програмні рухи судна гладкими кривими у портовій акваторії:

2) *удосконалено* модель автоматичного управління рухом судна при маневруванні у стиснутих водах, яка, на відміну від існуючих, відрізняється застосуванням адаптивного авторульового, який реалізує пропорційно-інтегрально-диференціальний закон управління та дозволяє автоматично підстроювати параметри управління у відповідь на зміну умов плавання судна;

3) *одержав подальший розвиток* метод обчислення програмного значення курсу судна за наявності перешкод, який на відміну від відомих, базується на використанні допоміжної штрафної функції, асоційованої з перешкодою і дозволяє змінюватиме раніше запланований курс судна, відводячи його від перешкоди, що знаходиться поблизу запланованої траєкторії і повертаючи судно на вихідну заплановану траєкторію у процесі обходу перешкоди та віддаленні від неї.

Методи дослідження. У ході виконання роботи використані:

– методи системного аналізу – для аналізу предметної області і обґрунтування методів формалізації завдання безпеки судноплавства в районі порту;

– методи проєктування інформаційного забезпечення та побудови моделей штучного інтелекту – для автоматичного керування судном по траєкторії в районі порту;

– теорія побудови систем підтримки прийняття рішення – для побудови системи підтримки прийняття рішень забезпечення безпеки судноводіння в портовій акваторії;

– методи математичного моделювання – для визначення траєкторій руху суден в портовій акваторії;

– методи теорії ймовірності – для проведення моделювання й оцінювання його результатів під час апробування роботи системи підтримки прийняття рішення управління рухом судна за траєкторією при наявності перешкод у портовій акваторії;

– теорія множин – для формалізації навігаційної обстановки в портовій акваторії;

– теорія графів – для опису перешкод і вільних областей, побудови алгоритмів автоматизованого пошуку, вибору й оптимізації маршруту руху суден;

– методи оцінювання безпеки судноводіння та маневрування суден – для побудови алгоритмів систем підтримки прийняття рішення в портовій акваторії.

Обґрунтованість і достовірність одержаних у роботі наукових результатів, висновків і рекомендацій підтверджується коректною постановкою наукового завдання; комплексним використанням відомих, перевірених практикою теоретичних та емпіричних методів дослідження, а саме методів системного аналізу, проєктування інформаційного забезпечення та побудови моделей штучного інтелекту, побудови систем підтримки прийняття рішення, математичного моделювання, теорії ймовірності, теорії множин, теорія графів, оцінювання безпеки судноводіння та маневрування суден на етапах розробки моделей і методів, моделювання й аналізу результатів досліджень; задовільним збігом одержаних результатів з відомими даними у розглянутій області наукових знань, вільним обговоренням результатів на наукових конференціях і їх публікацією у визнаних наукових виданнях; впровадженням результатів дисертаційного дослідження у виробничу діяльність круїзної компанії «Червона рута» та у навчальний процес Державного університету інфраструктури і технологій.

Практичне значення роботи полягає у подальшому вдосконаленні системи підтримки прийняття рішення безпеки судноводіння в портовій

акваторії на базі розроблених моделей і методів, що дозволяють підвищити ефективність маневрування і безпеку судноводіння в портовій акваторії.

Ключові слова: судно, керування судном, судноводіння, морські перевезення, формалізація, руху судна, безпека, безпека судноводіння, безпека мореплавства, безпека судноплавства технічний стан, засіб водного транспорту, морський транспорт, навігаційна ситуація, нейронна мережа, траєкторія руху судна, безпека на морі, безпека навігації, супутникова навігація, рух судна, метод, порт, технічне обслуговування, технічний стан

ANNOTATION

Husak I.L. Methods of the decision support system for safety of navigation in port waters. – Qualifying scientific work as a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 271 – Maritime and inland water transport. – The State University of Infrastructure and Technologies, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2024.

The complexity of navigation, the port's provision with electronic control and monitoring equipment and the navigator's information load divide the vessel's call at the port of destination into a number of call phases. Each of these phases has requirements for the accuracy of determining the location of the vessel entering the port, assessing the impact of the human factor on the safety of the call and possible measures to reduce its impact on possible emergencies. This division is stipulated in IMO Resolution A.529(13) "Standards of Navigation Accuracy" adopted in 1983. The noted peculiarities and practice of navigation in port waters allow us to distinguish four phases of a ship call.

A vessel's voyage consists of the harbour entrance and approaches, as well as waters with restricted freedom of manoeuvre and other waters. Therefore, almost the entire distance of the first phase of the call is classified as "other waters". For this part of the route, the navigational accuracy should be no worse than 4% of the distance from the hazard, but no more than 4 nautical miles, i.e. the distance to the hazard is tens of miles.

For each port, the calculation and practice of ship navigation show the accuracy of positioning with the help of land and space-based navigation aids. It is during this phase of a ship call that 3-5% of all accidents and disasters occur in sea areas A3 and A4, and the remaining 97-95% in sea areas A2 and A1.

In practice, the above systems have limitations: the range resolution of shore-based PLCs, the presence of zones and "radio shadows", and the screening of a large vessel by a nearby small vessel.

Thus, in the first information phase of a ship call, these navigation aids, provided they operate perfectly, satisfactorily provide the required accuracy in determining the location of the vessel entering the port.

The second phase of a ship call refers to the voyage stage "entering and approaching a harbour and waters where freedom of manoeuvre is restricted and ... the magnitude of the permissible position error depends on local conditions and its determination is a function of the relevant Administrations".

The fairway gate approach is a restricted manoeuvre condition where greater position accuracy (at least several times) is required compared to the first phase. However, shore-based and satellite-based navigation aids remain the same as in phase one: Radar ship traffic control systems; GPS and GLONASS navigation systems; differential GPS and GLONASS subsystems.

The analysis of the above information and the ship's navigation aids for the second phase shows that the available navigation aids are capable of providing entry to the fairway gate under ideal operating conditions, but without an adequate safety margin. In the event of a malfunction of the existing systems, it is recommended that the vessel be equipped with means to autonomously determine the distance to the fairway gate and to potentially dangerous vessels in the vicinity of the fairway gate.

The requirements for navigational accuracy in the third phase of a ship call are comparable and, in some areas, more stringent than in the second phase. However, the means of navigation remain the same, but new features of the port's ship traffic control radar system may be revealed, for example, «illumination» of a part of the bay by low cloud cover; inability to determine the drift radius of a vessel at anchorage; screening by large vessels.

Thus, in the third phase of a ship call, the existing systems perform their functions satisfactorily, but in critical situations of their abnormal functioning, the ship must have a backup means of autonomous positioning with better accuracy.

Due to the low accuracy of marine moving objects detection by modern ship traffic control systems using radar, more than 80% of all accidents and disasters in maritime areas A1 and A2 occur in maritime area A2, and in A1, most of them occur

in the water areas and channel fairways, in port and harbour waters, in places of vessel mooring and berthing, at the busy intersection of sea transport and passenger routes, i.e. during the second and third phases of a ship call).

In order to ensure reliable navigation support for ships and improve safety of navigation in these maritime areas, as well as to prevent environmental disasters in coastal waters, on approaches to ports, in port waters, in narrow waters where freedom of manoeuvre is limited, in 1995 IMO adopted a ship position error of no more than 10 m for a 95% confidence probability of its realisation, with a frequency of updating information on the ship's position at intervals of no more than 10 s.

The fourth phase of the ship call determines that the process of mooring a vessel is distinguished by the fact that the vessel's approach to the berth is usually carried out with the mooring vessel's engine switched off, which leads to its almost complete uncontrollability. Therefore, the task of trouble-free mooring is largely determined by the pilot, who controls the mooring technology but has no control levers, as well as by the tug crews. Therefore, it is at this stage of the call that the human factor plays a significant role, when a complex and poorly controlled chain of actors emerges, where information can be distorted or lost and, as a result, an emergency situation can occur.

Most mooring emergencies occur due to the lack of technical means to objectively monitor the vessel's approach to the berth and because the pilot performs mooring visually, which depends on his psychophysical state. The analysis of vessel collisions with berths and their structures shows that safe mooring is achieved by the necessary knowledge of the vessel's location relative to the berth with high accuracy and taking into account the influence of the human factor.

Thus, ensuring the safety of navigation in each phase of a ship call involves improving the technical means of ships, strengthening technical control over actions, especially in the coastal waters of ports and national economic zones of states, as well as reducing human participation in the processes of finding and solving problems of optimal control and manoeuvring of ships in port fairways and mooring areas.

Implementation of an automatic identification system in the maritime fleet, which is a maritime navigation system that uses mutual automated radio information exchange between ships and between ships and coastal services, during which information is transmitted on the call sign and name of each ship (for their recognition), their coordinates, parameters (size, cargo, draft, etc.), the purpose of the voyage, and movement parameters (course, speed, etc.) to prevent collisions, control compliance with the navigation regime, and general monitoring.

The addition of control and correction stations to global navigation satellite systems solves the problem of high-precision positioning of ships with sub-metre accuracy. This will ensure safer navigation in poor visibility conditions; performing special works (deepening of channels, construction of breakwater and port facilities, oil terminals); more accurate positioning of floating navigation equipment to improve the quality of ship services in the port.

Thus, despite the widespread introduction of high-precision navigation systems and AIS tools, there is still a need to solve the *scientific task* of developing models and methods of a decision support system for navigation safety in compressed waters (port area) to improve the efficiency of the navigation safety system.

Relationship of the work with scientific programmes, plans, topics, grants.

The dissertation is in line with the National Transport Strategy of Ukraine for the period up to 2030 (Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine № 430-r of 30 May 2018) and the Maritime Doctrine of Ukraine for the period up to 2035 (Resolution № 1307 of the Verkhovna Rada of Ukraine of 07.10.2009, as amended on 18.12.2018, № 1108). The research was carried out as part of the planned research work of the State University of Infrastructure and Technologies, in which the applicant is the author of certain sections.

Use of scientific and applied research results. The results obtained in the thesis should be used in the development of decision support systems for solving control problems when diverging and overtaking ships; in research organisations - to ensure the safety of navigation in port waters; in higher education institutions - to

improve the system of training specialists in the speciality of maritime and inland waterway transport.

The results of the dissertation research will be useful in improving the existing and developing advanced software of decision support systems for water transport:

- the model of automatic control of ship motion during manoeuvring in compressed waters, which allows to automatically adjust control parameters in response to changes in the ship's navigation conditions, was used in the educational process of the Faculty of Navigation at the Department of Navigation and Ship Management in teaching the disciplines «Navigation and Location» and «Ensuring Navigation Safety» for applicants for the first (bachelor's) level of higher education (Act of 28.02.2024 p. №183/01-11);

- a method for controlling ship traffic in the port area, which allows describing the ship's programmed movements by smooth curves in the port area, during the testing of the results of the dissertation work of Husak I.L. in the Cruise company Chervona Ruta, the practical significance and feasibility of further implementation in the process of improving the safety of navigation was confirmed (Act of 04.03.2024);

- the method of calculating the programme value of the ship's course in the presence of obstacles, which, unlike the known ones, is based on the use of an auxiliary penalty function associated with the obstacle, and allows changing the previously planned course of the ship, taking it away from the obstacle located near the planned trajectory, and returning the ship to the original planned trajectory in the process of bypassing the obstacle and moving away from it, was used in the educational process of the Faculty of Navigation at the Department of Navigation and Ship Management in teaching disciplines «Ship seaworthiness management» and «Ensuring Navigation Safety» for applicants of the first (bachelor) level of higher education in the specialty 271 Maritime and Inland Water Transport (act dated 02/28/2024 № 183/01-11).

The purpose and objectives of the research. The *purpose* of the dissertation is to increase the efficiency and validity of decision-making to ensure the safety of

navigation in the port area.

To achieve this goal, it is necessary to solve the following *partial scientific tasks*:

- to analyse the factors that affect the safety of navigation in the port area;
- development of models of the decision support system for navigation safety in the port area;
- development of a method for controlling ship traffic in the port area;
- evaluating the effectiveness of the developed methods and developing recommendations for their implementation.

The *object of research* is the processes of information processing in the decision support system of navigation safety.

The *subject of the study* is methods and models of the decision support system for navigation safety in the port area.

The *scientific novelty of the results obtained* is due to a new solution to the scientific task of developing models and methods of a decision support system for navigation safety in compressed waters (port area) to improve the efficiency of the navigation safety system.

The following scientific results were obtained:

1) for the first time, a method for controlling ship motion in the port area has been developed, based on the use of an approximating sigmoidal trajectory function that describes modes of change in the kinematic parameters (course, speed, drift angle) of ship motion along a certain trajectory under given initial conditions and allows describing the ship's programmed movements by smooth curves in the port area;

2) the model of automatic control of ship motion during manoeuvring in compressed waters was improved, which, unlike the known ones, is distinguished by the use of an adaptive autosteering system that implements the proportional-integral-differential control law and allows to automatically adjust control parameters in response to changes in the ship's navigation conditions;

3) a method for calculating the programmed value of the ship's course in the presence of obstacles has been further developed, which, unlike the known ones, is based on the use of an auxiliary penalty function associated with the obstacle and allows changing the previously planned course of the ship, diverting it away from the obstacle located near the planned trajectory and returning the ship to the original planned trajectory in the process of avoiding the obstacle and moving away from it.

Research methods. In the course of the work, the following methods were used:

- methods of system analysis - for analysing the subject area and substantiating the methods of formalising the task of safety of navigation in the port area;
- methods of designing information support and building artificial intelligence models - for automatic ship control along the trajectory in the port area;
- the theory of building decision support systems - for building a decision support system for ensuring the safety of navigation in the port area;
- methods of mathematical modelling - to determine the trajectories of vessels in the port area;
- methods of probability theory - for modelling and evaluation of its results during testing of the decision support system for controlling ship traffic along the trajectory in the presence of obstacles in the port area;
- set theory - to formalise the navigation situation in the port area;
- graph theory - to describe obstacles and free areas, to build algorithms for automated search, selection and optimisation of the vessel route;
- methods for assessing the safety of navigation and manoeuvring - to build algorithms for decision support systems in the port area.

The validity and reliability of the scientific results, conclusions and recommendations obtained in the work is confirmed by the correct formulation of the scientific task; comprehensive use of well-known theoretical and empirical research methods proven by practice, namely methods of system analysis, information support design and construction of artificial intelligence models, construction of decision support systems, mathematical modeling, probability theory, set theory, graph theory, assessment of navigation and maneuvering safety

vessels at the stages of development of models and methods, modeling and analysis of research results; satisfactory coincidence of the obtained results with known data in the considered area of scientific knowledge, free discussion of the results at scientific conferences and their publication in recognized scientific publications; implementation of the results of the dissertation research in the production activity of shipping company «Chervona Ruta» and in the educational process of the State University of Infrastructure and Technologies.

The practical significance of the work consists in the further improvement of the support system for making decisions about the safety of navigation in the port water area based on the developed models and methods that allow to increase the efficiency of maneuvering and the safety of navigation in the port water area.

Keywords: ship, ship management, navigation, sea transportation, formalization, ship movements, safety, safety of navigation, safety of navigation, safety of navigation, technical condition, means of water transport, sea transport, navigational situation, neural network, trajectory of the ship, safety at sea, safety navigation, satellite navigation, ship movement, method, port, maintenance, technical condition

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Статті у наукових виданнях, включених до переліку
наукових фахових видань України:*

1. Гусак І.Л., Замана А. Методика визначення критеріїв безпечної швидкості суден при експлуатації суден внутрішнім водним транспортом. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*. 2023. Т. 4, № 74. С. 34–39. URL: <https://doi.org/10.26906/sunz.2023.4.034>
2. Гусак І. Л., Нікітін П. В. Метод управління ризиками надзвичайних ситуацій при виконанні морських перевезень. *Збірник наукових праць «Водний транспорт»*. 2023. № 2(38). С. 108–114. <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.12> .
3. Гусак І.Л., Аросланкін О.О., Шапіро Г.В., Саф'ян О.С., Постніков Є.Є. Нейромережева модель прогнозування параметрів руху судна в системі формування надводної обстановки ближньої морської зони. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. 2021. № 3(69). С. 116-25. <https://doi.org/10.30748/zhups.2021.69.15> .
4. Гусак І.Л. Дослідження факторів ризику плавання судна в акваторії морського порту. *Вісник Приазовського Державного технічного університету*. 2023. № 47. С. 280–286. https://journals.urau.ua/vestnikpgtu_tech/article/view/300114/292591
doi: 10.31498/2225-6733.47.2023.300114
5. Гусак І.Л., Ярмач В. Пропозиції щодо розробки методів управління рухом судна в портовій акваторії. *Збірник наукових праць «Водний транспорт»*. 2023. № 1 (39). С. 5968. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.06
<https://vt.duit.in.ua/index.php/home/article/view/319/276> doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.06

Публікації за доповідями та матеріалами міжнародних та всеукраїнських науково-практичних конференцій:

1. Гусак І.Л., Боріна М.В. Метод управління ризиками надзвичайних ситуацій при виконанні морських перевезень. Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції м. Київ, 7 грудня 2023 р. – Київ: вид-во Київського інституту водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Державного університету інфраструктури та технологій. – С. 17-19.
2. Гусак І.Л., Ярмач В. Дослідження методів управління рухом судна в портовій акваторії. Матеріали II Всеукраїнської науково-практичної конференції «Виклики та перспективи розвитку транспортної інфраструктури». 29.03.2024-05.04.2024 р. м. Київ.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	2
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ОДИНИЦЬ, ТЕРМІНІВ	24
ВСТУП	26
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ФАКТОРІВ, ЯКІ ВПЛИВАЮТЬ НА БЕЗПЕКУ СУДНОВОДІННЯ У ПОРТОВІЙ АКВАТОРІЇ	36
1.1 Змістовний опис організації безпеки на морі	36
1.2 Дослідження методів формалізації навігаційної обстановки	43
1.2.1 Класифікація та формалізація множин районів плавання	43
1.2.2 Класифікація та формалізація множин умов плавання	45
1.2.3 Класифікація та формалізація множин умов судноплавства ...	46
1.2.4 Класифікація та формалізація множин навігаційної обстановки ..	50
1.3 Дослідження математичних моделей опису навігаційної обстановки. Постановка наукового завдання	53
1.3.1 Інформаційні масиви та елементи навігаційної обстановки	53
1.3.2 Граф моделі навігаційної обстановки й маршруту судна	56
Висновки до розділу 1	56
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ БЕЗПЕКИ СУДНОВОДІННЯ В ПОРТОВІЙ АКВАТОРІЇ	62
2.1 Математичні моделі руху судна	62
2.1.1 Загальна математична модель руху судна	62
2.1.2 Спрощені математичні моделі руху судна за курсом	65
2.1.3 Математичні моделі рульової машини	69
2.2 Модель руху судна з використанням градієнта допоміжної функції ...	70
2.3 Математичні моделі прогнозування зміну курсу судна при маневруванні у стиснутих водах	79

2.4 Математичні моделі прогнозування зміну курсової швидкості при маневруванні у стиснутих водах	90
2.5 Модель автоматичного управління рухом судна при маневруванні у стиснутих водах	93
2.6 Математичні моделі морського хвилювання	95
2.6.1 Модель морського хвилювання на основі формуючого фільтра ...	95
2.6.2 Модель морського хвилювання, що розвивається	96
2.6.3 Модель морського хвилювання з дискретним спектром	98
Висновки до розділу 2	101
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА МЕТОДУ УПРАВЛІННЯ РУХОМ СУДНА В ПОРТОВІЙ АКВАТОРІЇ	102
3.1 Особливості автоматичного управління судном за траєкторією в стиснутих водах	102
3.1.1 Формування програмної траєкторії	102
3.1.2 Завдання принципу управління	103
3.2 Метод автоматичного управління судном за траєкторією в портовій акваторії	104
3.3 Автоматичне управління рухом судна за криволінійною ламаною траєкторією у стиснутих водах	108
3.3.1 Автоматичне управління рухом судна у річковій акваторії	108
3.3.2 Автоматичне управління рухом судном за гладкою криволінійною траєкторією в припортовій акваторії	111
Висновки до розділу 3	113
РОЗДІЛ 4. ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗРОБЛЕНИХ МЕТОДІВ ТА РОЗРОБЛЕННЯ РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО ЇХ ВПРОВАДЖЕННЯ	115
4.1 Формування допоміжних штрафних функцій	115
4.2 Метод обчислення програмного значення курсу судна за наявності перешкод	118

4.3 Метод розходження та обгону суден в стиснутих водах з застосуванням векторів градієнта допоміжної штрафної функції	125
4.3.1 Пряма побудова допоміжної штрафної функції	125
4.3.2 Застосування розробленого методу при розходженні та обгоні суден	128
Висновки до розділу 4.....	133
ВИСНОВКИ	135
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	140
ДОДАТКИ	151

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ОДИНИЦЬ, ТЕРМІНІВ

AIS	— автоматична ідентифікація судна
AP	— авторульовий
Б	— затока, бухта
БЗ	— база знань
ВПО	— виносне причальне обладнання
ГД	— головний двигун
ГСП	— гарантована смуга проводки
ЗВП	— зона вільного простору
ІМО	— Міжнародна морська організація
МВІД	— море відкрите
МЗА	— море закрите
МПЗЗС-72	— Міжнародні правила запобігання зіткнень суден у морі 1972 року
МПХ	— малий передній хід
НВВ	— нафтові вишки
НБ	— навігаційна небезпека
НБП	— навігаційна безпека плавання
НДР	— науково-дослідна робота
НО	— навігаційна обстановка
О	— океан
П	— портова акваторії, рейд
ПЗС	— попередження зіткнень суден
ПД	— пропорційно-інтегрально- диференціальний
ППХ	— повний передній хід
ПР	— вузькості, фіорди, протоки
РМ	— рульова машина
РДПС	— район, доступний для плавання судна
РО	— рульове обладнання

РОП	– район обмеження плавання
РПл	– район плавання
САУ	– система автоматичного управління
САУКС	– система автоматичного управління курсом судна
СБС	– система безпеки судноводіння
СП	– система інтелектуальної підтримки
СМПХ	– самий малий передній хід
СППР	– система підтримки прийняття рішень
СПХ	– середній передній хід
СРР	– система розділення руху
СТФ	– сигмоїдальна траєкторна функція
СУБ	– система управління безпекою
УП	– умова плавання
ФП	– функція приналежності
ХТ	– характерна точка

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Складність навігації, забезпеченість порту радіоелектронними засобами управління і контролю інформаційного навантаження судноводія поділяють захід судна в порт призначення на низку фаз суднозаходу. На кожній з них висувуються вимоги до точності визначення місця розташування судна, що заходить у порт, оцінювання впливу людського чинника на безпеку суднозаходу і можливі заходи щодо зниження його впливу на можливі аварійні ситуації. Такий поділ передбачено в ухваленій 1983 р. ІМО Резолюції А.529(13) «Стандарти точності судноводіння» але він стосується лише точності визначення місця розташування [1]. Водночас безпека суднозаходу залежить від великої кількості чинників, включно з діями судноводія, або людським фактором. Виходячи зі сказаного вище та практики судноводіння в портових водах, можна виділити чотири фази суднозаходу.

Перша фаза суднозаходу

Відповідно до [1] рейс судна складається зі входу до гавані та підходів до неї, а також вод, в яких обмежено свободу маневру, та інші вод. Тому практично вся дистанція першої фази суднозаходу належить до стадії "інші води". Для цієї ділянки маршруту руху навігаційна точність має бути не гіршою за 4% відстані від небезпеки, але не більше 4 морських миль, тобто йдеться про дистанції до небезпеки, що обчислюються десятками миль.

Для кожного порту розрахунок і практика суднопроводки показують точність визначення місця за допомогою наземних і космічних засобів навігації. Саме на цій фазі суднозаходу, за статистикою, виявлена порівняно невисока ймовірність пригод і катастроф: у морських районах А3 і А4 відбувається від 3 до 5% від кількості всіх пригод і катастроф, а в морських районах А2 і А1 – решта 97-95% [1].

На практиці існують обмеження перерахованих систем: роздільної здатності за дальністю берегових РЛС, наявності зон і «радіотіні», а також екранування великим судном близько розташованого малого судна.

Таким чином, у першій інформаційній фазі суднозаходу вказані засоби навігації за умови їхньої ідеальної роботи задовільно забезпечують необхідну точність визначення місця розташування судна, яке заходить у порт.

Друга фаза суднозаходу

Дана інформаційна фаза належить до стадії рейсу "вхід у гавань і підходи до неї, а також води, в яких обмежена свобода маневру, а ... величина допустимої похибки місця залежить від місцевих умов, і її визначення є функцією відповідних Адміністрацій" [1].

Підхід до воріт фарватеру – це умови обмеженого маневру, де потрібна більша точність визначення місця розташування (принаймні в кілька разів) у порівнянні з першою фазою. Однак, берегові та супутникові засоби навігації залишаються тими самими, що й у першій фазі: РЛС СУДС; навігаційні системи GPS і ГЛОНАСС; диференціальні підсистеми GPS і ГЛОНАСС; РЛС СУРС. Крім того, залишаються чинними й особливості технічних засобів навігації, описані під час розгляду першої фази суднозаходу.

Аналіз наведеної інформації і судових засобів навігації щодо другої фази показує, що наявні засоби навігації здатні за ідеальних умов експлуатації забезпечити вхід у ворота фарватеру, але без належного запасу безпеки. На випадок позаштатного функціонування наявних систем рекомендується мати на судні засоби, які дають змогу автономно визначати дистанцію до воріт фарватеру, а також до потенційно небезпечних плавзасобів, які перебувають поблизу воріт фарватеру.

Третя фаза суднозаходу

Вимоги до точності судноплавства в цій фазі, як і в попередній, визначаються місцевою Адміністрацією та є порівнянними, а в окремих районах і більш жорсткими, ніж у другій фазі. Однак, засоби навігації залишаються тими самими, але можуть виявитися нові особливості РЛС СУДС порту, наприклад, «засвічення» низькою хмарністю частини бухти; неможливість визначення радіуса дрейфу судна на якірній стоянці; екранування великими суднами.

Отже, з погляду інформаційного модуля визначення точності навігації в третій фазі суднозаходу, як і в другій, наявні системи задовільно виконують свої функції, однак у критичних ситуаціях їхнього позаштатного функціонування на судні необхідно мати резервний засіб автономного визначення місця з кращою точністю.

З усіх пригод і катастроф у морських районах A1 та A2 понад 80% припадає на морський район A2, а аналогічний розгляд статистики подій і катастроф у районі A1 свідчить, що більша їхня частина трапляється на акваторіях та фарватерах каналів, у припортових та портових водах, у місцях відстою та стоянки суден, на жвавому перетині морських транспортних і пасажирських шляхів, тобто саме на другій і третій фазах суднозаходу. Це пояснюється низькою точністю визначення місця морських рухомих об'єктів сучасними СУРС за допомогою РЛС.

Для надійного навігаційного забезпечення суден і підвищення безпеки плавання саме в цих морських районах, а також запобігання екологічним лихам у прибережних водах, на підходах до портів, у портових водах, у вузькостях, де свобода маневрування обмежена, ІМО у 1995 р. ухвалила Резолюцію A.815 (19) [2], відповідно до якої похибка місця розташування судна не повинна перевищувати 10 м для довірчої ймовірності її реалізації 95%, за частоти оновлення інформації про місцезнаходження судна з інтервалом не більше 10 с).

Четверта фаза суднозаходу

Ця фаза характеризує процес швартування судна відрізняється тим, що зближення судна з причалом здійснюється зазвичай із вимкненим двигуном судна, що швартується, що призводить до його, практично, повної некерованості. Тому завдання безаварійного швартування багато в чому визначається лоцманом, який контролює технологію причалювання, але не має важелів управління, а також екіпажами буксирів. Отже, саме на цій фазі суднозаходу суттєву роль відіграє людський фактор, коли виникає складний і мало керований ланцюг виконавців, де можливе спотворення або втрата

інформації і, як наслідок, створення аварійної ситуації [3, 4].

Більшість аварійних ситуацій під час швартування стається через відсутність технічних засобів об'єктивного контролю зближення судна з причалом, і через здійснення швартування лоцманом візуально, що залежить від його психофізичного стану. Аналіз навалів суден на причали та їхні споруди свідчить, що безпечне швартування досягається необхідними знаннями місця розташування судна відносно причалу з високою точністю й врахуванням впливу людського фактору.

Таким чином, забезпечення безпеки мореплавства в кожній із фаз суднозаходу припускають вдосконалення технічних засобів суден, посилення технічного контролю за діями, особливо в прибережних водах портів і національних економічних зонах держав, а також зниження участі людини в процесах пошуку й розв'язання завдань оптимального керування та маневрування судна на портових фарватерах та акваторіях швартування суден. Тому ІМО та Адміністрації морських портів світу останніми роками проводять активну роботу зі створення та введення в дію:

- поділу шляхів судноплавства в місцях з інтенсивним рухом;
- зон з обов'язковим або добровільним радіозв'язком між суднами під час наближення одне до одного або проходження повз них;
- дедалі досконаліших СУРС у портах і на підходах до них з автоматизацією контролю за якістю судноплавства в морських районах А2;
- районів, забезпечених засобами високоточного самовизначення суден у прибережних водах, що використовують контрольно-коригувальні диференціальні станції ГНСС типу ГЛОНАСС і GPS;
- суцільного радіопокриття прибережних смуг морських районів Глобальної морської системи зв'язку під час лиха і для забезпечення безпеки з цілодобовим надійним УКХ-зв'язком;
- супутникової морської системи зв'язку ІНМАРСАТ для забезпечення глобального та оперативного зв'язку із суднами, що перебувають у будь-якому районі світу.

Впровадження на морському флоті автоматичної інформаційної (ідентифікаційної) системи (AIS), що є морською навігаційною системою, в якій використовується взаємний автоматизований інформаційний радіообмін як між суднами, так і між судном і береговими службами, під час якого передають інформацію про позивний і назву кожного судна (для їхнього розпізнавання), їхні координати, параметри (розміри, вантаж, осадку та ін.), мету рейсу, параметри руху (курс, швидкість тощо) для розв'язання завдань запобігання зіткненням суден, контролю за дотриманням ними режиму плавання і загального моніторингу [5].

Найважливішим компонентом мережевого розвитку AIS є введення служби Диференціальної підсистеми глобальних навігаційних супутникових систем (ДГНСС), доповнення яких диференційними підсистемами (встановлення контрольно-коригувальних станцій (ККС)) розв'язує проблему високоточного визначення місця судна із субметровою точністю. Це забезпечить безпечніше плавання суден в умовах поганої видимості; виконання спеціальних робіт (поглиблення каналів, будівництво хвилеломних і портових споруд, нафтових терміналів); точніше виставляння плавучих засобів навігаційного обладнання для покращення якості обслуговування суден у порту.

Таким чином, незважаючи на широке впровадження систем високоточної навігації і засобів AIS, на останній, найскладнішій і найвідповідальнішій, фазі суднозаходу залишається проблема забезпечення безпеки швартовних робіт.

Наявність зазначених невідповідностей визначає актуальність вирішення *наукового завдання* розроблення моделей та методів системи підтримки прийняття рішення безпеки судноводіння в портовій акваторії для підвищення ефективності системи безпеки судноводіння.

Метою дисертаційної роботи є підвищення оперативності й обґрунтованості прийняття рішень щодо забезпечення безпеки судноводіння в районі порту.

Для досягнення поставленої мети необхідне вирішення таких часткових наукових завдань:

- проведення аналізу факторів, які впливають на безпеку судноводіння у портовій акваторії;
- розробка моделей системи підтримки прийняття рішень безпеки судноводіння в портовій акваторії;
- розробка методу управління рухом судна в портовій акваторії;
- оцінювання ефективності розроблених методів та розроблення рекомендацій щодо їх впровадження.

Об'єкт дослідження – процеси обробки інформації в системі підтримки прийняття рішень безпеки судноводіння.

Предмет дослідження – методи і моделі системи підтримки прийняття рішення безпеки судноводіння в портовій акваторії.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що:

1) Вперше розроблено метод управління рухом судна в портовій акваторії, який базується на застосуванні апроксимуючої сигмоїдальної траєкторної функції, що описує режими зміни кінематичних параметрів (курс, швидкість, кут дрейфу) руху судна за певною траєкторією при заданих початкових умовах і дозволяє описувати програмні рухи судна гладкими кривими у портовій акваторії;

2) Удосконалено модель автоматичного управління рухом судна при маневруванні у стиснутих водах, яка, на відміну від існуючих, відрізняється застосуванням адаптивного авторульового, який реалізує пропорційно-інтегрально-диференціальний закон управління і дозволяє автоматично підстроювати параметри управління у відповідь на зміну умов плавання судна;

3) Одержав подальший розвиток метод обчислення програмного значення курсу судна за наявності перешкод, який на відміну від відомих, базується на використанні допоміжної штрафної функції, асоційованої з перешкодою і дозволяє змінюватиме раніше запланований курс судна, відводячи його від перешкоди, що знаходиться поблизу запланованої

траєкторії і повертаючи судно на вихідну заплановану траєкторію у процесі обходу перешкоди та віддаленні від неї.

Методи дослідження. При виконанні дисертаційної роботи для вирішення поставлених завдань використовувалися:

методи системного аналізу – для аналізу предметної області і обґрунтування методів формалізації завдання безпеки судноплавства в районі порту [6];

методи проектування інформаційного забезпечення та побудови моделей штучного інтелекту – для автоматичного керування судном по траєкторії в районі порту [7-9];

теорія побудови систем підтримки прийняття рішення – для побудови системи підтримки прийняття рішень забезпечення безпеки судноводіння в портовій акваторії [10-12];

методи математичного моделювання – для визначення траєкторій руху суден в портовій акваторії [13, 14];

методи теорії ймовірності – для проведення моделювання й оцінювання його результатів під час апробування роботи системи підтримки прийняття рішення управління рухом судна за траєкторією при наявності перешкод у портовій акваторії [15];

теорії множин – для формалізації навігаційної обстановки в портовій акваторії [16, 17];

– *теорії графів* – для опису перешкод і вільних областей, побудови алгоритмів автоматизованого пошуку, вибору й оптимізації маршруту руху суден;

методи оцінювання безпеки судноводіння та маневрування суден – для побудови алгоритмів систем підтримки прийняття рішення в портовій акваторії [18-21].

Емпіричною базою дослідження є результати моделювання, експертні оцінки складності різних навігаційних ситуацій та значущості їх компонент, звіти з розслідування морських аварій та інцидентів у портовій акваторії.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дослідження спрямоване на реалізацію Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року (розпорядження Кабінету Міністрів України №430-р від 30 травня 2018 року) [22] і виконане відповідно до положень Морської доктрини України на період до 2035 року (Постанова №1307 Верховної Ради України від 07.10.2009 року, зі змінами від 18.12.2018 року, №1108) [23]. Дисертаційна робота виконана у рамках планових наукових досліджень Державного університету інфраструктури та технологій: науково-дослідна робота «Моделі та методи прогнозування довговічності обладнання засобів річкового та морського транспорту в умовах експлуатації за технічним станом». № ДР (РК) 0120U104335 [24], науково-дослідна робота «Розробка методів запобігання зіткнення суден для підвищення безпеки судноплавства на основі формалізації навігаційних ситуацій». № ДР (РК) 0119U103754 [25].

Практична значимість результатів дослідження полягає у подальшому вдосконаленні системи підтримки прийняття рішення безпеки судноводіння в портовій акваторії на базі розроблених моделей і методів, що дозволяють підвищити ефективність маневрування і безпеку судноводіння в портовій акваторії.

Використання наукових та прикладних результатів досліджень. Отримані в дисертації результати доцільно використовувати при розробці систем підтримки прийняття рішень для вирішення завдань управління при розходженні та обгоні суден; у науково-дослідних організаціях – для забезпечення безпеки судноводіння в портовій акваторії; у вищих навчальних закладах – для вдосконалення системи підготовки фахівців зі спеціальності морський та внутрішній водний транспорт.

Результати дисертаційного дослідження будуть корисними при вдосконаленні існуючого та розробці перспективного програмного забезпечення систем підтримки прийняття рішень засобів водного транспорту.

Обґрунтованість та достовірність отриманих результатів дослідження забезпечується:

- коректною постановкою наукового завдання;
- комплексним використанням відомих, перевірених практикою теоретичних та емпіричних методів дослідження, а саме методів системного аналізу, проєктування інформаційного забезпечення та побудови моделей штучного інтелекту, побудови систем підтримки прийняття рішення, математичного моделювання, теорії ймовірності, теорії множин, оцінювання безпеки судноводіння та маневрування суден;
- задовільним збігом одержаних результатів з відомими даними у розглянутій області наукових знань;
- вільним обговоренням результатів на наукових конференціях і їх публікацією у визнаних наукових виданнях;
- впровадженням результатів дисертаційного дослідження у виробничу діяльність судноплавної компанії «Червона Рута»(Додаток Б);
- впровадженням результатів дисертаційного дослідження у навчальний процес Державного університету інфраструктури і технологій, факультету судноводіння на кафедрі навігації і управління суднами при викладанні дисциплін «Забезпечення навігаційної безпеки плавання» та «Управління морехідними якостями судна» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю 271 Морський та внутрішній водний транспорт рівня вищої освіти (Додаток В).

Апробація результатів роботи. Результати дисертаційного дослідження були обговорені та підтримані на міжнародних та всеукраїнських конференціях, у тому числі IV Міжнародна науково-практична конференція «Дніпровські читання» (м. Київ) та II Всеукраїнська науково-практичної конференції «Виклики та перспективи розвитку транспортної інфраструктури» (м. Київ).

Особистий внесок автора. Отримані наукові результати сформульовані та отримані автором самостійно. Окремі етапи досліджень було проведено у співавторстві, їх результати відображені у відповідних публікаціях:

у роботі [26] автором запропонована методика визначення критеріїв безпечної швидкості суден при експлуатації суден внутрішнім водним транспортом;

у роботі [27] автором розроблено метод управління ризиками надзвичайних ситуацій при виконанні морських перевезень;

у роботі [28] автором запропонована структура нейромережевої моделі прогнозування параметрів руху судна в системі формування надводної обстановки ближньої морської зони;

робота [29] автором виконана самостійно;

у роботі [30] автором запропонував підходи щодо розробки методів управління рухом судна в портовій акваторії

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковано у 5 наукових працях у наукових фахових виданнях України. Матеріали дисертації опубліковані у 2 тезах доповідей на всеукраїнських та науково-практичних конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дослідження складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації містить 150 сторінок друкованого комп'ютерного тексту. Основний зміст дисертаційної роботи викладено на 134 сторінках. Робота містить 6 таблиць, 86 рисунків, список використаних джерел із 97 найменувань, що розміщено на 140-150 сторінках, 3 додатки на 3 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ФАКТОРІВ, ЯКІ ВПЛИВАЮТЬ НА БЕЗПЕКУ СУДНОВОДІННЯ У ПОРТОВІЙ АКВАТОРІЇ

У даному розділі дисертаційної роботи розкривається сутність категорії безпеки на морі. Досліджуються методи формалізації навігаційної обстановки. Доводиться необхідність формалізації навігаційної обстановки із застосуванням теорії множин та операцій над множинами. Досліджуються математичні моделі для опису навігаційної обстановки. Доводиться необхідність використання теорії графів та операцій над графами. Формулюється наукове завдання. Основними результатами, отриманими у розділі, є моделі формалізації навігаційної обстановки та постановка наукового завдання.

1.1 Змістовний опис організації безпеки на морі

Складність умов навігації при русі судна у стиснених умовах – каналах, протоках, фарватерах, на мілководді та в районах з обмеженою акваторією – обумовлена впливом різноманітних факторів: навігаційний запас, ширина і глибина фарватеру (каналу), течії, вітер, топографія місцевості, стан головного двигуна (ГД) та рульового обладнання (РО), взаємне розташування суден тощо. Вони визначають типи навігаційних ризиків, які впливають на появу загроз і є передвісником інцидентів і катастроф [1]. Поява загроз обумовлена низкою об'єктивних (ризики відмов складних технічних систем судна, зіткнення з небажаними умовами і т. д.) і суб'єктивних (ризики неадекватної оцінки обстановки і, відповідно, вироблення некоректного рішення) ризиків. Отже, навігаційна безпека судноводіння забезпечується цілеспрямованою роботою щодо управління, попередження та мінімізації ризиків [2].

До складу системи безпеки судноводіння (СБС) входять такі основні елементи: забезпечення внутрішньої та зовнішньої цілісності судна, навігаційної безпеки плавання (НБП) та попередження зіткнень суден (ПЗС) (рис. 1.1).

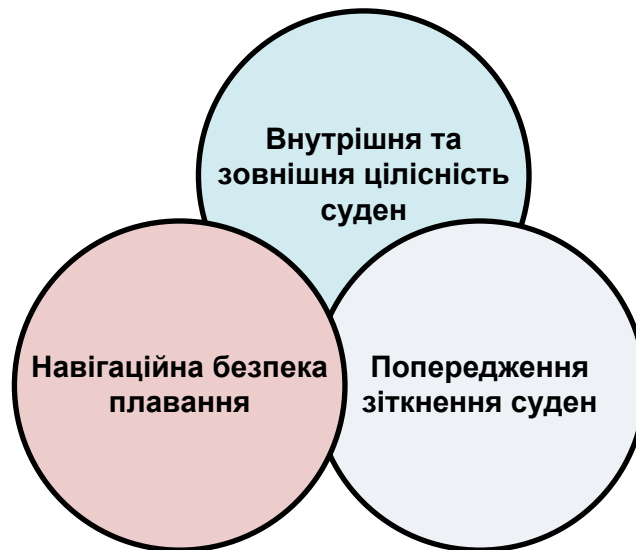


Рисунок 1.1 – Складові системи безпеки судноводіння
(Джерело: розроблено автором)

Основним змістом елементів СБС, що забезпечують безпеку, є таке:

1) НБП суден розуміють в широкому і вузькому сенсі. У широкому сенсі НБП – це комплексна характеристика судноводіння, що визначає можливість суден плавати без загрози для життя людей і цілісності суден. У вузькому сенсі НБП – це положення судна на водній поверхні, в якому відсутня можливість торкання ґрунту або неприпустимого зближення з навігаційною небезпекою.

2) ПЗС – це множина елементів, правил та обмежень, що визначені “звичайною” й “ефективною морською практикою” і взаємодіють між собою й оточуючим середовищем для усунення ризику зіткнення суден та безпечного плавання у будь-яких умовах.

3) Внутрішня та зовнішня цілісність судна забезпечуються штучним інтегративним механізмом управління з енергетичними можливостями, що підтримує необхідний рівень кореляції причинно-наслідкових зв'язків між актуалізацією цих можливостей та досягненням поставлених цілей. Даний аспект регулюється стандартами у вигляді обов'язкових експлуатаційних та правових документів: посібників, конвенцій, кодексів, правил, настанов тощо.

У СБС використовуються людино-машинні принципи управління основними елементами системи «судно-судноводій- навколишнє середовище».

Судно – це будь-який засіб, який спроможний пересуватися по воді, має позначати присутність (несення вогнів, знаків, подача звукових сигналів) і характер дій (організація спостереження і забезпечення безпеки), визначені Міжнародними правилами запобігання зіткнень суден у морі 1972 р. (МППЗС-72) [3].

Судноводій, як об'єкт впливу середовища, сформованих навичок та здібностей, є керуючим елементом судна [4].

Навколишнє середовище – це множина різноманітних факторів, що негативно впливають на судно та судноводія і можуть призвести до небезпеки зіткнення або загибелі людей.

Провівши ідентифікацію елементів системи, СБС можна змістовно описати як взаємопов'язані елементи – судно, судноводій та навколишнє середовище, – що мають прогнозувати виникнення небезпечних ситуацій, наслідком яких може бути руйнування судна, та формувати заходи щодо їх запобігання. Фактично таке розуміння ототожнює поняття СБС із поняттям її структури, під якою розуміється взаємозв'язок перерахованих елементів, відношення між якими породжують синергетичну системну властивість [5].

Таку елементну діяльність, спрямовану на забезпечення безпеки судноводіння, можна віднести до класичної людино-машинної системи. Основним завданням системи є забезпечення безпеки, що визначається взаємодією трьох різних середовищ:

- внутрішнього (внутрішньосуднового), що знаходиться під впливом та контролем екіпажу;
- зовнішнього (ближнього оточення судна), в якому формуються впливи на судно;
- макросередовища (дальнього оточення судна), в якому формуються загальні вимоги до безпеки плавання суден: МППЗС-72, рекомендації, настанови та інші обов'язкові закони, конвенції тощо, які впливають на забезпечення безпеки суден на морі [33, 34].

Судноводії матимуть уявлення про судно та зовнішнє середовище (інтегроване відображення) для прийняття адекватних рішень. У STSW-78/95),

МПЗС-72 та ін. викладені обов'язкові мінімальні вимоги, висунуті до капітанів, вахтових помічників та осіб рядового складу, що несуть вахту на містку, з організації та забезпечення безпеки мореплавання [34].

Технічна сторона охорони людського життя на морі регламентується єдиними технічними вимогами, висунутими до суден для забезпечення безпечного плавання (SOLAS-74/94, Chapter V), стандартами маневрених якостей суден [33], вимогами до заглибленості вантажної марки 66/69.

Щодо запобігання забруднення моря із суден була прийнята Міжнародна конвенція з запобігання забруднення із суден 73/78 (MARPOL 73/78) [35].

Управління безпечною експлуатацією суден регламентується (ISM Code) (SOLAS-74/94 Chapter IX) [33]; мірами безпеки для високошвидкісних суден (SOLAS-74/94 Chapter X) [33] та іншими міжнародними й національними вимогами.

Для запобігання, зниження або усунення всіх видів ризиків, пов'язаних з безпекою судноплавства ІМО запропонувала Систему управління безпекою (СУБ), яка є інструментом, що дає змогу судновласнику та екіпажу судна ефективно виконувати вимоги в галузі безпеки судноплавства та захисту довкілля і забезпечує здатність судновласника реагувати на небезпеки, нещасні випадки та аварійні ситуації, пов'язані з його суднами.

Для зниження аварійності на флоті фахівці запропонували побудувати процедури управління таким чином, щоб максимально знизити ймовірність появи помилок, усунути вплив "людського фактору".

Для недопущення аварій та інцидентів через порушення та помилки з боку людини будуються захисні бар'єри у вигляді різноманітних Процедур Компанії в області безпеки та захисту навколишнього середовища (рис. 1.2). Загальна політика Компанії складається з таких основних напрямків:

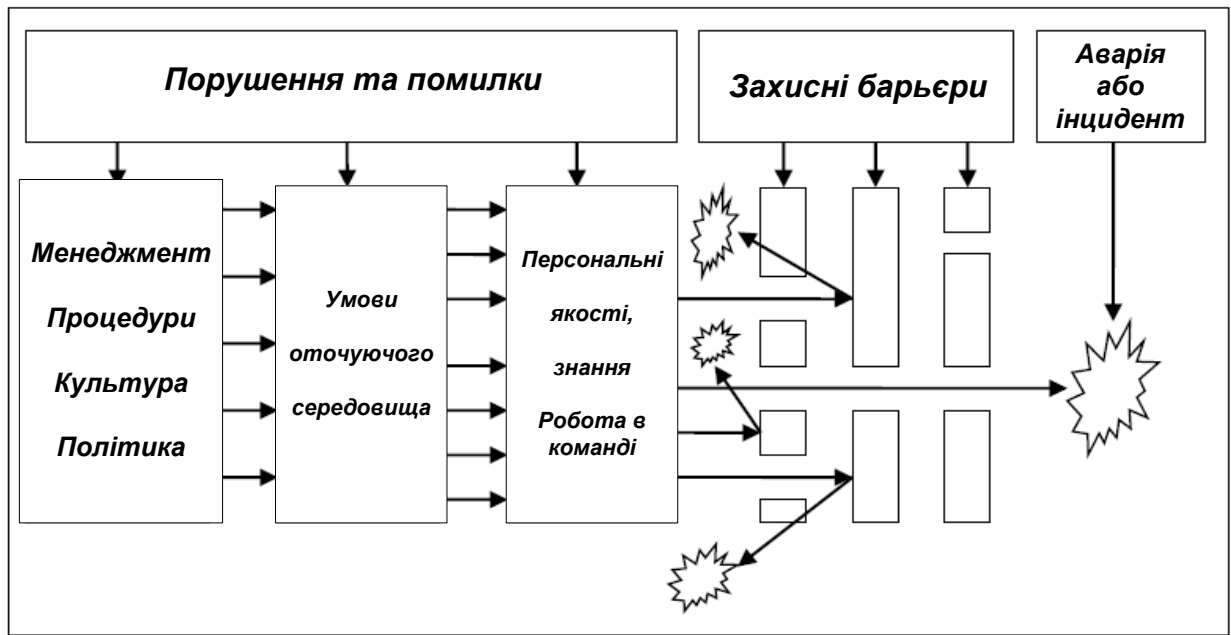


Рисунок 1.2 – Традиційна схема запобігання аваріям та інцидентам
(Джерело: розроблено автором)

- забезпечення безпеки судноводіння (Safe Navigation Policy);
- попередження забруднення навколишнього середовища (Pollution Prevention Policy);
- забезпечення належного технічного стану судна (Technical Management Policy);
- забезпечення безпечного перевезення вантажів (Safe Cargo Operations Policy);
- забезпечення особистої безпеки (Personal Safety Policy);
- політика в області наркотиків та алкоголю (Drug and Alcohol Policy);
- кадрова політика (Personnel Policy);
- структурно-управлінська політика (Managerial Policies).

Таким чином, основу СУБ складають кодекси, конвенції, постанови, інші законодавчі акти, методи і засоби досягнення безпечної експлуатації суден і запобігання забруднення навколишнього середовища.

Вважається, чим більше бар'єрів є на шляху помилок судноводія, тим меншою є ймовірність виникнення аварії або інциденту. Від послідовності та ефективності реалізації процедур безпеки залежить успіх або невдача СУБ.

Попередження зіткнень суден як одна з важливіших складових забезпечення безпеки на морі постійно знаходиться у центрі уваги ІМО. Діючі принципи розходження суден описані у МПЗЗС-72 і є обов'язковими для всіх моряків. Алгоритмом попередження зіткнення суден називається сувора логічна послідовність дій судноводіїв.

Правила маневрування як складова частина МППЗС визначають своєчасні дії судна, що відповідають хорошій морській практиці, для безпечної розбіжності його на заданій відстані з деякою кінцевою кількістю суден.

Однак добре прописані правила і порядок їх застосування тим не менш не стали заслоном на шляху невиконання МПЗЗС-72. Проведений UK Marine Accident Reporting Scheme (MARS) ретельний аналіз навігаційних аварій показав, що основною причиною 75% з них є саме невиконання МППЗС-72.

Проведене опитування показало, що судноводії найчастіше порушували МППЗС-72 за трьома групами причин (за даними Captain Francois Baillod the initiator of the UK (MARS) (рис. 1.3) [36-40].

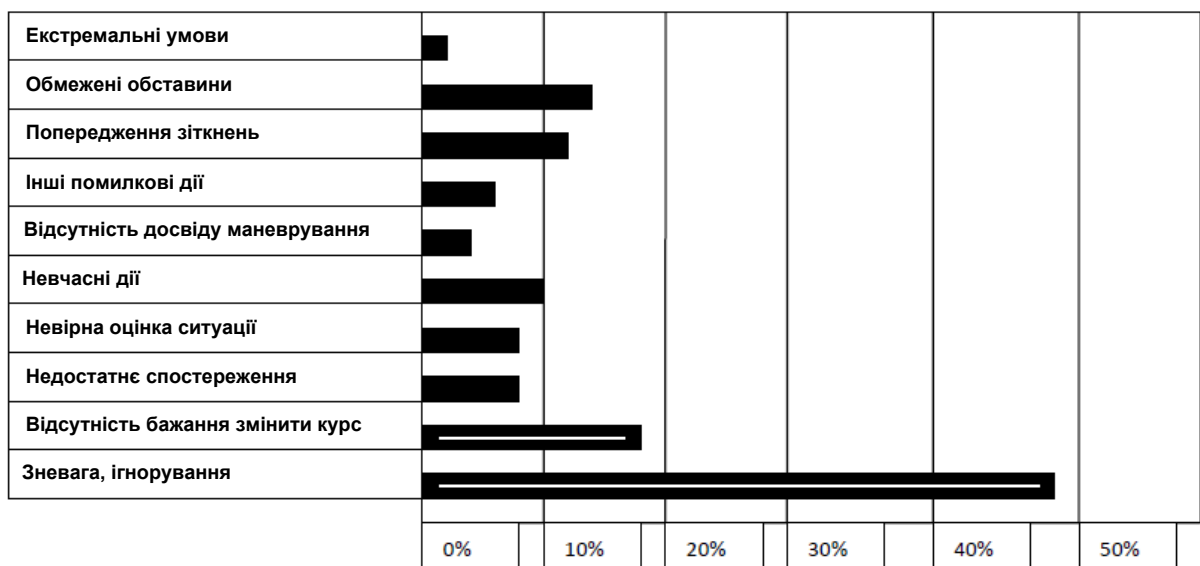


Рисунок 1.3 – Причини невиконання МПЗЗС-72

(Джерело: розроблено автором)

1. Помилки судноводіїв при застосуванні МПЗЗС-72, як правило, є не

поодинокими, а представляють собою ланцюг помилок. Вони є суб'єктивним фактором і викликані, в основному, недостатньо якісним навчанням, а також проблемами у психічному, фізичному і фізіологічному стані судноводія.

2. Змушений відступ від Правил, викликаний рядом об'єктивних і суб'єктивних причин, які заблокували можливість виробити судноводієм адекватне рішення з попередження зіткнення суден відповідно до МПЗЗС-72.

3. Дії за домовленістю або ігнорування Правил судноводієм полягають у відмові їх виконувати і зневажанні принципами МПЗЗС-72. Переслідуючи будь-які комерційні, технічні або технологічні цілі, судноводій у випадку небезпеки зіткнення суден свідомо домовляється з судноводієм іншого судна про маневр, не запропонований МПЗЗС-72, і свідомо йде на порушення своїх посадових обов'язків, інструкцій і Правил.

Для подолання проблеми невиконання МПЗЗС-72 з боку судноводіїв конструктори та інженери поклали чимало зусиль щодо впровадження передових досягнень у проектування суден, суднобудування і судноводіння. Однак значний розвиток електронної картографії, супутникової навігації, апаратури автоматичної ідентифікації судна (АІС), берегових систем управління суднами тощо, завдяки яким точність визначення координат судна досягла декількох метрів, не призвів до скорочення кількості зіткнень суден, і залишив проблему аварійності на морі актуальним науковим завданням.

Отже, сучасна система управління безпекою судноводіння потребує суттєвого доопрацювання для підвищення ефективності безпеки судноводіння, особливо у стиснутих водах і портах. Сучасні тенденції розвитку науки та техніки однозначно вказують, що досягнення необхідних показників безпеки судноплавства можливо лише шляхом автоматизації навігаційних комплексів, доповнених системою інтелектуальної підтримки (СІП). Звідси впливає найважливіша задача щодо формалізації математичної моделі навігаційної обстановки (НО) шляхом цілеспрямованої систематизації та розробки базових принципів взаємодії елементів цієї моделі.

1.2 Дослідження методів формалізації навігаційної обстановки

1.2.1 Класифікація та формалізація множин районів плавання

Традиційно у судноводінні весь маршрут переходу ділять на характерні райони з умовами плавання, що суворо різняться [41]. А при побудові моделей НО спираються на принципи і методи саме традиційного судноводіння.

На верхньому рівні планування [41] отримують й обробляють інформацію про райони плавання (РПл) з виділенням районів а) водного простору (океани (О), моря відкриті (МВІД) та закриті (МЗА), бухти і затоки (Б), протоки, вузькості і фіорди (ПР), ріки, портові акваторії і рейди (П)) і б) суші (материки, острови, півострови, порти, хвилеломи, причали, нафтові вишки (НВВ), виносне причальне обладнання (ВПО)) (рис. 1.4):

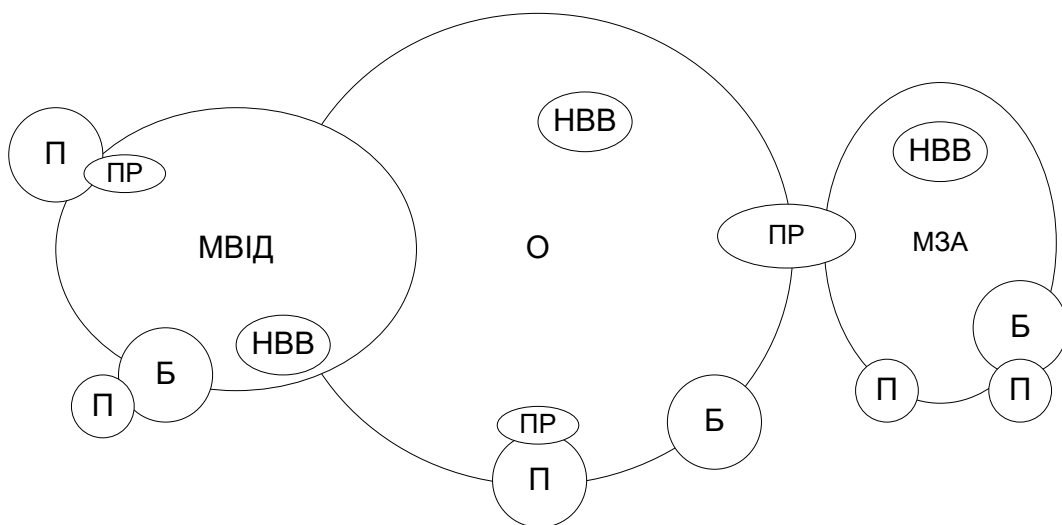


Рисунок 1.4 – Взаємодія елементів множин районів плавання
(Джерело: розроблено автором)

Географічне розташування типових районів водних просторів взаємопов'язано з особливостями маршрутів плавання (переходу) судна.

Відомі декілька підходів зі своїми позитивними і негативними сторонами щодо представлення районів плавання за маршрутом руху судна у

СП. Однак багато дослідників [42, 43] небезпідставно пропонують на теперішній час представляти райони плавання за маршрутом руху судна множинами, а універсальне представлення формулюють у вигляді ієрархії окремих елементів цих множин. За такого підходу можна широко застосовувати операції над множинами [7, 16] як вихідний математичний апарат алгоритмів СП у судноводінні. У сукупності даний математичний апарат дозволяє сформулювати логіко-математичні моделі НО.

Таким чином, область (множину) поточного району плавання ($РПл_k$) можна представити комбінаціями логічних операцій над множинами [7], використовуючи знаки приналежності \in , включення \supset , об'єднання \cup , перетинання \cap , віднімання \setminus множин, а також знаки прямого \rightarrow , зворотного \leftarrow і двостороннього \leftrightarrow переходу:

$$\begin{aligned}
 РПл_k \supset \begin{cases} РПл_i \cap РПл_j; \\ РПл_i \cup РПл_j; \\ РПл_i \setminus РПл_j; \\ РПл_i \in РПл_j; \end{cases} & (1.1) \\
 РПл_i \rightarrow РПл_j; \\
 РПл_i \leftarrow РПл_j; \\
 РПл_i \leftrightarrow РПл_j,
 \end{aligned}$$

де i, j – індекси $РПл_k$.

Використовуючи вказані логічні операції над множинами районів та описуючи умови плавання (УП), можна розробити багаторівневі моделі множин $РПл_k$ на наступному рівні ієрархії та спланувати оптимальний маршрут руху судна. Тому окремо обговоримо формалізацію множин УП.

1.2.2 Класифікація та формалізація множин умов плавання

За прийнятою у гідрографії й навігації [18-21] класифікацією характеристики УП судна можна представити типовими групами (встановлені шляхи, правові обмеження, регульовані, спеціальні райони тощо), які відбивають певні види діяльності й обмеження (рисунок 1.5).

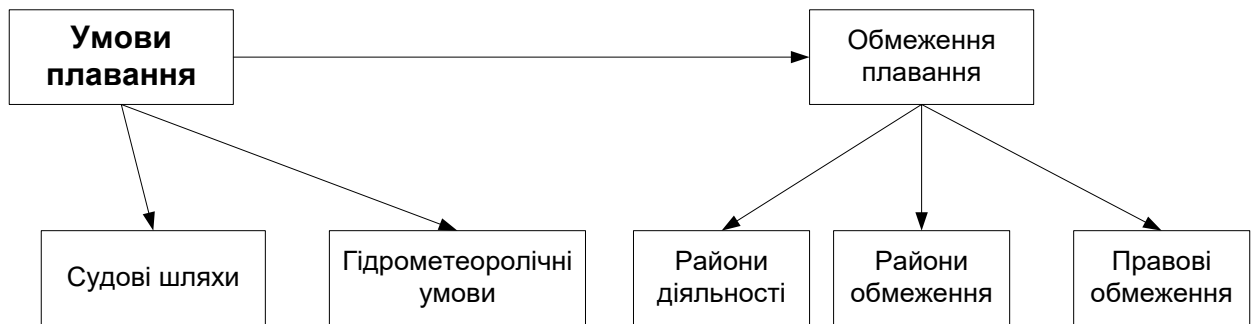


Рисунок 1.5 – Структура типових груп умов плавання в районі

(Джерело: розроблено автором на основі [18-21])

Поточні умови плавання $УП_i$ при описі маршруту руху судна представляється виразом:

$$УП_i \supset \begin{cases} УП_i \cap УП_j; \\ УП_i \cup УП_j; \\ УП_i \in УП_j; \\ УП_i \setminus УП_j, \end{cases} \quad (1.2)$$

де i, j – індекси умов плавання.

Множина комбінацій навігаційної обстановки $НО_i$ (узагальнена модель НО) для формування маршруту судна є результатом взаємодії моделей (1.1) і (1.2) з використанням логічних операцій над множинами $РПл_k$ і $УП_i$:

$$НО_i \equiv РПл_i \cup УП_i. \quad (1.3)$$

Однак, для отримання повноцінної картини НО опис районів плавання та умов плавання необхідно доповнити формалізацією умов судноплавства.

1.2.3 Класифікація та формалізація множин умов судноплавства

Умови судноплавства визначаються відстанями до небезпек $d(F_i, O_j)$, небезпечною глибиною $H_{\text{неб}}$ та частотою зустрічей $T_{\text{зустр}}$ з іншими суднами [18].

Тому вирази (1.1)-(1.3) доповнимо трьома ознаками умов судноплавства:

1) райони відкритого моря (необмежений судноплавний простір):

$$d(F_i, O_j) \geq 50 \text{ миль}; \quad H_{\text{неб}} \geq 2T_{\text{дин}}; \quad T_{\text{зустр}} \geq 60 \text{ хв}, \quad (1.4)$$

де $T_{\text{зустр}}$ – частота зустрічей з іншими суднами, хв (щільність суднопотоку);

O_j – район небезпек;

$T_{\text{дин}}$ –динамічна осадка судна;

2) райони прибережного плавання:

$$\begin{aligned} 10 \text{ миль} < d(F_i, O_j) &\leq 50 \text{ миль}; \\ 1,5T_{\text{дин}} < H_{\text{неб}} &< 2T_{\text{дин}}; \\ 30 \text{ хв} &\leq T_{\text{зустр}} < 60 \text{ хв}; \end{aligned} \quad (1.5)$$

3) райони стиснутого судноплавства або з особливими умовами плавання за класифікацією (вузькості, підходи до портів, канали тощо):

$$\begin{aligned} d(F_i, O_j) &\leq 10 \text{ миль}; \\ H_{\text{неб}} &\leq 1,5T_{\text{дин}}; \\ 15 \text{ хв} &\leq T_{\text{зустр}} < 30 \text{ хв}. \end{aligned} \quad (1.6)$$

В умовах неповноти або суперечності інформації про стан зовнішнього середовища і рух судна суттєво зростає ймовірність його небезпечного

зближення з іншими суднами. Для запобігання такої ситуації навколо судна необхідно створити зону вільного простору (ЗВП) [19], яка зазвичай являє собою паралелепіпед і враховує:

- а) міжнародні, національні, місцеві правила плавання, звичаї;
- б) звичайну й добру морську практику, особистий досвід;
- в) навігаційну обстановку, у т. ч. працездатність навігаційного обладнання, гідрометеорологічні умови, щільність суднопотоку тощо;
- г) особливості навігації та управління рухом судна.

Умови судноплавства, представлені виразами (1.4)-(1.6), визначають значення кроку дискретизації водного простору і, зрештою, розміри паралелепіпеду ЗВП. Так, на розміри ЗВП необмеженого судноплавного простору, описаного виразом (1.4), впливають довжина гальмового шляху судна і дистанція безпечної розбіжності із суднами:

$$L_f = 15L; \quad B_f = 2D_{on}; \quad H_f = 2T_{дин}, \quad (1.7)$$

де L_f, B_f, H_f – геометричні розміри паралелепіпеду, який представляє ЗВП.

На розміри паралелепіпеду ЗВП для районів прибережного плавання, описаних виразом (1.5), впливають елементи маневрування судна, що залежать від його розміру (табл. 1.1),

Таблиця 1.1 – Характеристика елементів маневрування судна залежно від його розміру (Джерело: розроблено автором)

Довжина судна, м	50	100	150	200	250	300
$(d_1 + d_2 + d_3)/L$	6,6	5,6	5,6	6,5	8,8	9,0

і дистанція безпечної розбіжності із суднами:

$$L_f = d_1 + d_2 + d_3; \quad B_f = D_{on}; \quad H_f = 1,5T_{дин}. \quad (1.8)$$

Причому довжина паралелепіпеда ЗВП складається з трьох відрізків – d_1, d_2 і d_3 . Перший відрізок (d_1) з'являється при зміні курсу судна після перекладки керма і дорівнює довжині переходу судна на наступну ділянку шляху. Довжина другого відрізка (d_2) є мінімальним значенням, необхідним для отримання та збереження стійкого значення курсу. Довжина третього відрізка (d_3) дорівнює шляху стійкого руху перед наступною зміною курсу. Всі ці відрізки виражаються у милях.

При плануванні маршруту в портових водах із застосуванням математичної моделі НО (1.1)-(1.3) враховуються не тільки розміри L_f, B_f, H_f паралелепіпеда зони вільного плавання судна. Важливою є орієнтація за генеральним напрямком кожного елементарного відрізка маршруту, що визначає здатність проходу через нього судна:

$$L_f \geq L + \min(\Delta L); \quad B_f \geq B + \min(\Delta B); \quad H_f \geq T + \min(\Delta T), \quad (1.9)$$

де T – осадка судна, милі; $\min(\Delta L)$;

$\min(\Delta B), \min(\Delta T)$ – мінімальні навігаційні запаси на прохід судном стиснутих вод (каналів, припортових зон тощо).

Виразами (1.7)-(1.9) описуються мінімальні навігаційні запаси для різних умов судноплавства, необхідні для безпечної проводки судна.

Значення кроку дискретизації водного простору (вирази (1.4)-(1.6)) визначають точність та інформативність моделі РПл [18]. Добра морська практика свідчить, що при виборі кроку дискретизації найважливішу роль грає значення ширини ЗВП судна з урахуванням мінімального навігаційного запасу. Тому масштаб карти необхідно обирати таким, щоб об'єкт із розмірами, співставними з шириною ЗВП судна, не вироджувався в точку. Подальше зменшення масштабу карти знижує повноту її змісту [20].

При побудові маршруту близькість судна до небезпек оцінюється з обох бортів судна. Отже, масштаб карти повинен дозволити судноводієві розрізняти ширину ЗВП судна з мінімальними запасами (1.9). Ширина ЗВП відповідатиме

нескінченно малому відрізку, який дорівнює мінімум трьом окремим дискретним елементам (елементарним точкам (1)). Їх розмір (2) (крок дискретизації ε) дорівнює третині ширини ЗВП судна з мінімальними запасами (3) по ширині – B_f , значення якого знаходиться з формули (1.9), від навігаційних небезпек (НБ) (4) (рис. 1.6):

$$\varepsilon = B_f/3. \quad (1.10)$$

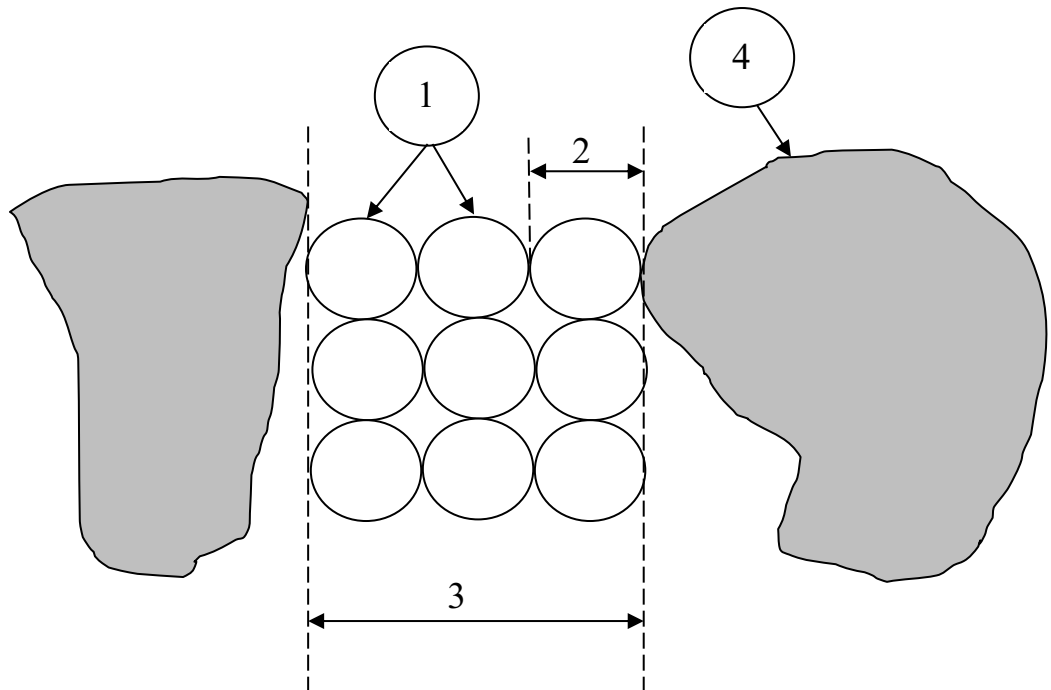


Рисунок 1.6 – Вибір масштабу карти й кроку дискретизації пошуку
(Джерело: розроблено автором)

Аналогічний підхід використовується для відображення інформації на екрані дисплея ECDIS [21].

Мінімальний масштаб зображення району пошуку на карті μ дорівнює

$$\mu = ds/\varepsilon = 3ds/B_f, \quad (1.11)$$

де ds – нескінченно малий відрізок на карті, що відповідає кроку дискретизації пошуку ε на місцевості.

1.2.4 Класифікація та формалізація множин навігаційної обстановки

У робототехнічних системах для опису перешкод і вільних областей широко застосовують граф-моделі. Також на сьогоднішній час теорія графів вважається найкращою для побудови алгоритмів автоматизованого пошуку, вибору й оптимізації маршруту руху суден, який представляється простим орієнтованим графом. Фактично маршрут є спрямованою послідовністю вершин (характерних точок (ХТ) топографічної, геометричної й інформаційної моделей навколишнього середовища), з'єднаних ребрам [21].

Граф – це впорядкована пара множин, що складається з P_g кінцевої непустої множини вершин РПл (1.1), УП (1.2), районів НБ (характерних точок) та довільної підмножини ребер E_g :

$$G = (P_g, E_g). \quad (1.12)$$

Для взаємозв'язку елементів обстановки РПл використовують ребра графа, які з'єднують відрізками шляху судна (локсодромій, ортодромій) характерні точки на траєкторії. Дуги графа, що з'єднує ХТ, описуються напрямком (1.1) (пряме, зворотне або обопільне) і відношенням (1.2) (приналежність, включення, виключення тощо).

Для побудови узагальненої математичної моделі РПл об'єднуються моделі окремих областей (районів). Тоді узагальнена математична модель представляється графом зв'язувань ХТ [21]. Отже, для побудови графа моделі навігаційної обстановки (2.3) для будь-яких двох незбіжних вершин P_{gi} , P_{gj} необхідно проаналізувати зв'язки \mathfrak{Z} між ними:

$$P_{gi} \mathfrak{Z} P_{gj}; \quad \mathfrak{Z} = (\in, \cup, \cap, \notin, \supset, \rightarrow, \leftarrow, \leftrightarrow). \quad (1.13)$$

Характерні точки належать границі будь-якого району або маршруту,

мають відмітні властивості їх розташування щодо інших елементів (точок) і несуть специфічну інформацію.

Для однозначної інтерпретації графа його вершини і ребра задаються певними характеристиками. Так, кожна вершина описується:

- а) координатами ХТ у просторі;
- б) набором суміжних (сусідніх) вузлів i_1, i_2, \dots, M_i ;
- в) додатковими характеристиками, наприклад множиною рухомих об'єктів, що проходять через вузол.

Кожне ребро графа має такі характеристики:

1. Вага, яка може обновлятися у процесі планування маршруту і від якої залежить довжина відрізка шляху між двома суміжними вершинами i та j (ХТ); час переходу; складності переходу, тощо.
2. Напрямок переходу, можливі зв'язки.
3. Відношення (1.13), призначене для логічного зв'язку елементів різних графів.

Проблема високої розмірності району пошуку маршруту судна долається розробкою багаторівневої ієрархічної моделі навігації судна.

Використання методів обчислювальної геометрії дозволяє описувати небезпеки багатокутниками, складові частини яких корегуються у процесі планування [18].

Деталізація району плавання, описана виразами (1.4)-(1.6), визначає кожній вершині графа певні умови плавання для створення баз знань (БЗ) у системі підтримки прийняття рішень (СППР).

Для формалізації інформації про фізичні та інші особливості елементів простору, роботи з одиничними і груповими об'єктами відповідних ХТ концепція графа розширюється введенням поняття гіперграф [18].

Вузли різних графів у гіперграфовій ієрархії з'єднуються через суміжні ХТ, які визначають характер відношень між цими вузлами. При цьому у гіперграфі допускається з'єднання з ХТ більш низького рівня ієрархії. Іншими словами, ХТ різних графів входять до складу ХТ більш високого рівня ієрархії.

Така концепція побудови гіперграфів дозволяє встановлювати взаємозв'язок між множинами окремих районів водного простору, розділених за принципами та методами традиційного судноводіння (рис. 1.7).

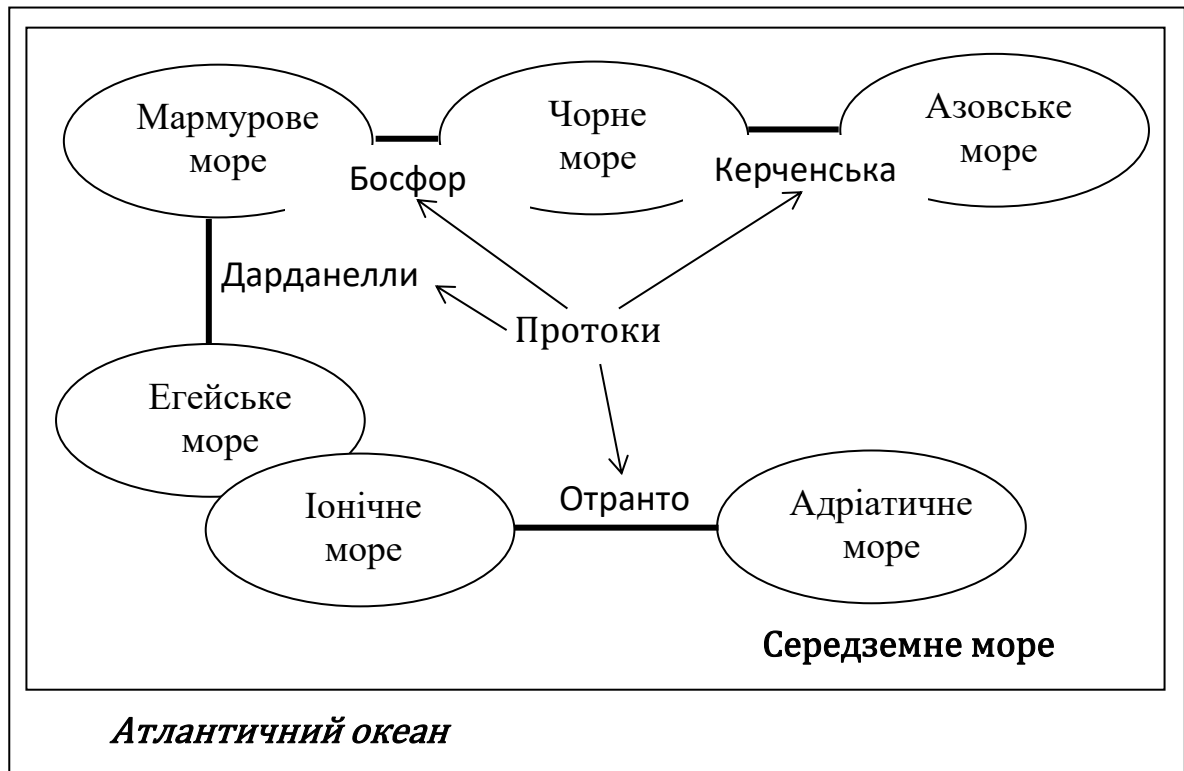


Рисунок 1.7– Взаємозв'язки між множинами водного простору

(Джерело: розроблено автором)

Запропоновані ієрархічні моделі підобластей більшого району наслідують деякі їхні властивості, можуть доповнюватися й деталізуватися, зберігаючи при цьому відносини між властивостями, відображуваними ХТ [18].

Небезпеки за розташуванням, складністю конфігурації, доступністю для плавання, з урахуванням розмірів ЗВП (1.7)-(1.9) ще класифікуються так [20]:

а) точкові: відмітні глибини, невеликі острови, штучні навігаційні й технічні спорудження (буї, знаки, бурові платформи, вишки, розміри ЗВП, тощо);

б) лінійні: причальні спорудження, рекомендовані шляхи, системи розділення руху (СРР), фарватери, які легко формалізуються і без втрат у точності представляються математично або за допомогою умовних позначок

формально представляються на морських навігаційних картах;

в) небезпеки складної форми: ділянки узбережжя, острова з порізаною й складною конфігурацією, небезпечні ізобати (глибини) тощо, – опис яких (вибір ХТ, апроксимація прямими відрізками з втратою точності) вимагає застосування складного математичного, логічного й алгоритмічного апарата. Небезпеки складної форми можуть деталізуватися під час пошуку маршруту;

г) характеристики суші або водної частини;

д) райони, недоступні для плавання судна за будь-яких умов, в якому хоча б один з елементів паралелепіпеда ЗВП судна (1.9) є більшим або дорівнює характерним розмірам водної частини небезпеки;

е) райони, доступні для плавання судна за певних умов, тобто ті, де хоча б один з елементів паралелепіпеда ЗВП судна (1.9) менше мінімальних значень характерних розмірів водної частини в певний час або за певних умов;

є) райони, доступні для плавання судна за будь-яких умовах, тобто ті, де елементи паралелепіпеда ЗВП судна (1.9) менше мінімальних значень характерних розмірів водної частини небезпеки.

Отже, доступністю району для плавання судна вважаються обставини, проміжок часу, коли можливий прохід паралелепіпеда ЗВП судна (1.9). Так, під час припливу можна пройти деякі ділянки мілководдя; а у певний час можна пройти райони стрільб або військових навчань.

1.3 Дослідження математичних моделей опису навігаційної обстановки. Постановка наукового завдання

1.3.1 Інформаційні масиви та елементи навігаційної обстановки

При формальному описі завдання зазвичай виділяють два рівні: первинне представлення РПл (1.1) і модель РПл, яка безпосередньо використовується для планування руху судна.

У сучасних ECDIS IMO A.817 навігаційно-гідрографічна інформація представляється у формалізованому виді, наприклад, контур будь-якої небезпеки задається кінцевим набором точок та відрізків, які їх поєднують:

$$O_i = \{O_{i_1}, O_{i_2}, \dots, O_{i_N}, O_{i_l}\}, \quad (1.14)$$

де N – загальна кількість точок небезпек.

Моделі районів за допомогою графів формуються по-різному. Так, форми представлення картографічної інформації в автоматизованих навігаційних комплексах дозволяють застосувати графові моделі для пошуку оптимального маршруту [14, 18, 20]. При цьому маршрут судна пропонується будувати по ХТ топографічній, інформаційній й геометричній моделям РПл. Тому компоненти, що відповідають моделям НО (1.3), УП (1.2), РПл (1.1) та шуканого маршруту руху судна, представляються такими інформаційними масивами й елементами: U_i – район можливого проходження оптимального маршруту; O_{ij} – ХТ небезпеки O_i ; GO_i – граф небезпеки O_i ; F_j – район, доступний для плавання судна (РДПС); F_{ij} – ХТ РДПС; GF_i – граф маршруту; Dl_i – район мілководдя; Dl_{ij} – ХТ району мілководдя Dl_i ; GDl_i – граф району мілководдя Dl_i ; W_i – район впливу вітру; W_{ij} – ХТ району впливу вітру W_i ; GW_i – граф району впливу вітру W_i ; RP_i – район обмеження плавання (РОП), до яких відносяться заборонені, режимні, з особливими умовами плавання; RP_{ij} – ХТ РОП; GRP_i – граф РОП; Fd_j – ХТ (поворотні точки) рекомендованих шляхів, фарватерів; GFd_j – граф рекомендованих шляхів, фарватерів у РОП; Ww_i – район хвилювання; Ww_{ij} – ХТ району хвилювання Ww_i ; GWw_i – граф району хвилювання Ww_i ; T_i – район впливу течій; T_{ij} – ХТ району впливу течій T_i ; GT_i – граф району течій T_i , де i, j – індекси і кількісні показники масивів змінних.

Тоді, райони навігаційних небезпек утворюють графову модель у вигляді ХТ, залежно від деталізації району плавання:

$$O_i \equiv GO_i = \{O_{i_1}, \dots, O_{i_j}, \dots, O_{i_1}\}. \quad (1.15)$$

Райони обмеження плавання та їх графи, рекомендовані шляхи, фарватери утворюють модель у вигляді графа їх ХТ:

$$\begin{aligned} RP_i \equiv GRP_i &= \{RP_{i_1}, \dots, RP_{ij}, RP_{i_1}\}; & RP_i &= f(t); \\ GFd_j &= \{Fd_{j1}, \dots, Fd_{jN_{pFd}}\} \in RP_k; & k &= 1, \dots, N_{Fd}, \end{aligned} \quad (1.16)$$

де $f(t)$ – функція часу;

N_{Fd} – кількість характерних (поворотних) точок на рекомендованому шляху, фарватері.

Райони дії вітру, хвилювання, течії й мілководдя та їх графи утворюють узагальнену графову модель гідрометеорологічних УП (див. рис. 1.5), при яких судно змушено знижувати швидкість та виконувати маневри розходження:

$$\begin{aligned} Dl_i \equiv GDl_i &= \{GDl_{i1}, \dots, GDl_{ij}, \dots, GDl_{i1}\}; \\ W_i \equiv GW_i &= \{GW_{i1}, \dots, GW_{ij}, \dots, GW_{i1}\}; \\ Ww_i \equiv GWw_i &= \{GWw_{i1}, \dots, GWw_{ij}, \dots, GWw_{i1}\}; \\ T_i \equiv GT_i &= \{GT_{i1}, \dots, GT_{ij}, \dots, GT_{i1}\}. \end{aligned} \quad (1.17)$$

Тоді узагальнена математична модель району пошуку оптимального маршруту судна представляється у вигляді об'єднання районів або їх моделей:

$$U = \bigcup_{i=1}^N U_i = O \cup F \equiv GO \cup GF. \quad (1.18)$$

1.3.2 Граф моделі навігаційної обстановки й маршруту судна

Представлення навігаційної обстановки графом (1.3) не є дійсною моделлю простору [20]. Причиною цього є не досить повне відображення складної структури РПл (1.1) та УП (1.2) судна. Звідси, рішення на графі не є оптимальним. За допомогою графів інформацію про НО, РПл, УП можна зберігати у компактній формі, що надає додаткові можливості з обробки інформації. А отримані алгоритми є гнучкими з логічної точки зору і теоретично дозволяють обходити перешкод та здійснювати розходження суден будь-якої складності.

Елементи графа маршрутів можна об'єднати у складну багатозв'язну фігуру, топологічною математичною моделлю якої є остов графу. Тому при евристичному пошуку маршруту ціна конструювання графу лінійно зменшується зі збільшенням кількості запитів.

Відомі різні методи побудови графа простору на основі попереднього компактного математичного опису перешкод та вільних областей для планування переміщення судна на площині [14]:

- а) клітинний (елементи розміщуються за завантаженістю, зайнятістю), векторний (перешкоди представляються багатокутниками);
- б) граф-модель (граф видимості, діаграми Вороного, еквідистатні, дотичні);
- в) спеціальні типи: аналітично-предикатний, семантичний тощо.

Інформація про НО (1.3) представляється залежно від деталізації навколишнього середовища й поставлених завдань. Якщо перехід до елементів, зайнятих перешкодами, має нескінченну вартість, то граф простору можна розбити на два:

- 1) граф вільних шляхів, вершини якого цілком перебувають у вільному просторі;
- 2) граф перешкод, що містить елементи з точками перешкод (небезпек, берегової смуги). Якщо простір повністю відомий, то впливає завдання планування відразу найкращого маршруту (оптимального шляху) на графі.

Таким чином, завдання планування траєкторії судна трансформується до завдання пошуку шляху на зваженому графі, де вершини – координати точок двовимірного простору, а ребра – шляхи між ними. Вага ребер визначається відстанню між вузлами, прохідністю шляху, енерговитратами проходження, інтенсивністю руху, часом проходження судном відстані між суміжними вершинами [20].

Результуючий район є конфігураційним простором перешкод, який розширюється на зону безпеки. Тоді частина конфігураційного простору, що залишилася, є вільною і визначається як

$$F = U \setminus O \equiv GU \setminus GO. \quad (1.19)$$

Границі псевдоперешкод будуються так, що точки, які перебувають на них, відповідають зіткненню перешкоди та судна при його незмінній орієнтації.

При клітинному представленні простір розбивається на елементи, кожному з яких ставиться у відповідність ознака залежно від її прохідності. Клітинний граф, як правило, застосовується для представлення незначної області із заданими границями, є особливо актуальним у статичних і динамічних середовищах, характеризується простотою, компактністю і легкістю оновлення інформації. Однак з його допомогою неможливо виділити точний розмір району; граф вимагає значних ресурсів на первинну й повторну обробку інформації про райони. Крім того, шлях, побудований на клітинному графі, характеризується відсутністю певних властивостей:

- а) крива, що з'єднує вузли, не прагне до гладкої оптимальної кривої;
- б) загальна вага множини вузлів може не відповідати вазі смуги, відповідної до цієї множини вузлів;
- в) рівномірне покриття простору неефективно у випадку вузьких проходів (каналів, фарватерів).

Зазначені недоліки можна подолати такими способами:

- а) розробка спеціалізованих обчислювальних засобів і процедур;

б) загрубіння представлення НО (1.3), що зменшує кількість вершин і ребер й обмеження маневреності судна за рахунок збільшення розмірів клітинок, виключення діагональних клітинок з числа сусідів, сегментації району плавання за шарами, в межах яких не змінюється напрямок руху судна;

в) перехід до нерівномірної структури розбивки простору (квадродерево, фреймквадродерево). Представлення простору фреймквадратдеревом передбачає застосування модифікованої структури даних, коли до периметру укрупнених районів додаються елементи менших розмірів, відповідні до кроку дискретизації (1.10). У такому разі можливий будь-який напрямок руху, оскільки, на відміну від регулярних клітин, шлях прокладається між елементами, розташованими по границі, що наближає його до оптимального.

Вершини графа вільних областей при представленні простору узагальненими діаграмами Вороного відповідають центрам опуклих непересічних ділянок, на які він розбитий, а ребра з'єднують видимі точки (рис. 1.8). Простір розбивається регулярно на ділянки, утворені еквідистантними лініями (геометричними місцями точок, рівновіддаленими від границь небезпек).

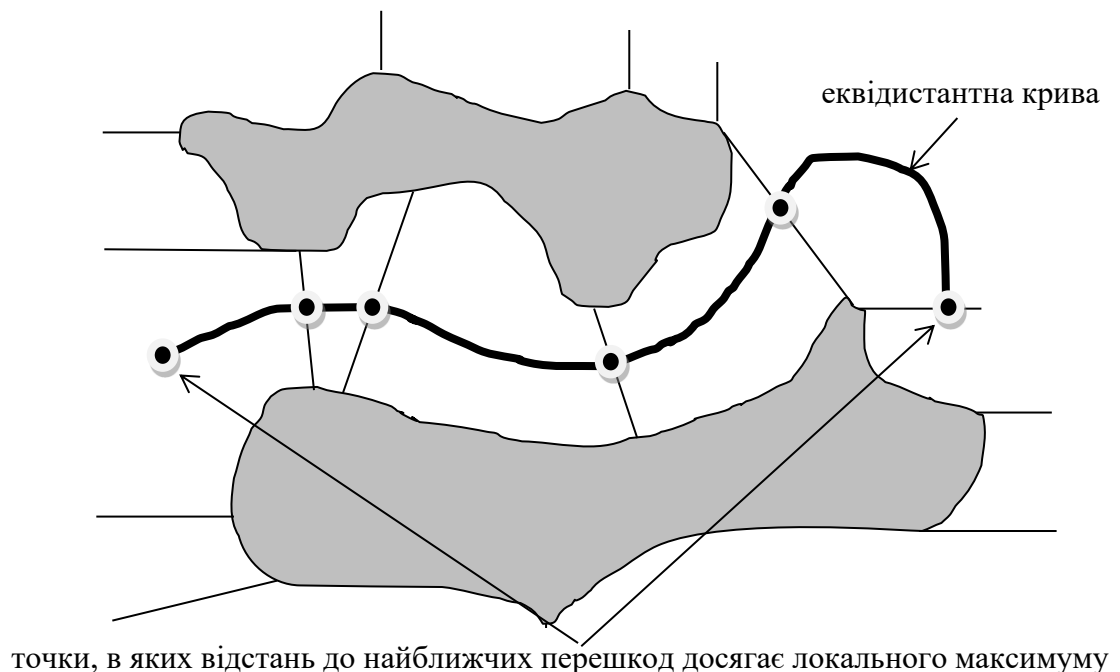


Рисунок 1.8 – Модель стиснутих вод на діаграмі Вороного
(Джерело: розроблено автором)

Метод, побудований на застосуванні діаграми Вороного, забезпечує швидке планування, але є складним у реалізації; видає неоптимальний генерований шлях через проходження судна завжди на найбільшій безпечній відстані від небезпек; потребує відновлення діаграми при переплануванні маршруту; має проблеми у плануванні маршруту в районах відкритого моря.

Розширити можливості алгоритмів планування маршруту дозволяє ймовірнісний граф маршрутів [32]. Суть методу полягає в оцінці ймовірності зіткнення у стиснутих водах при пошуку найкращого шляху. Навігаційна обстановка є відомою й представлена геометричними примітивами, а форма й орієнтація небезпек в навколишньому просторі відома неточно й моделюється як ймовірнісний розподіл можливих форм і орієнтацій (рис. 1.9).

На основі моделі РПл (1.1) здійснюється пошук та корекція безпечного маршруту з урахуванням динамічних властивостей судна. Графи маршрутів та перешкод характеризуються відношеннями дуальності, а графи видимості, гарантованої смуги проводки (ГСП), маршруту переходу є подібними та відрізняються лише вибором вершин. Подібність є найважливішою властивістю моделей графів та дозволяє застосовувати єдину методологію для опису різних елементів РПл та маршруту руху судна.

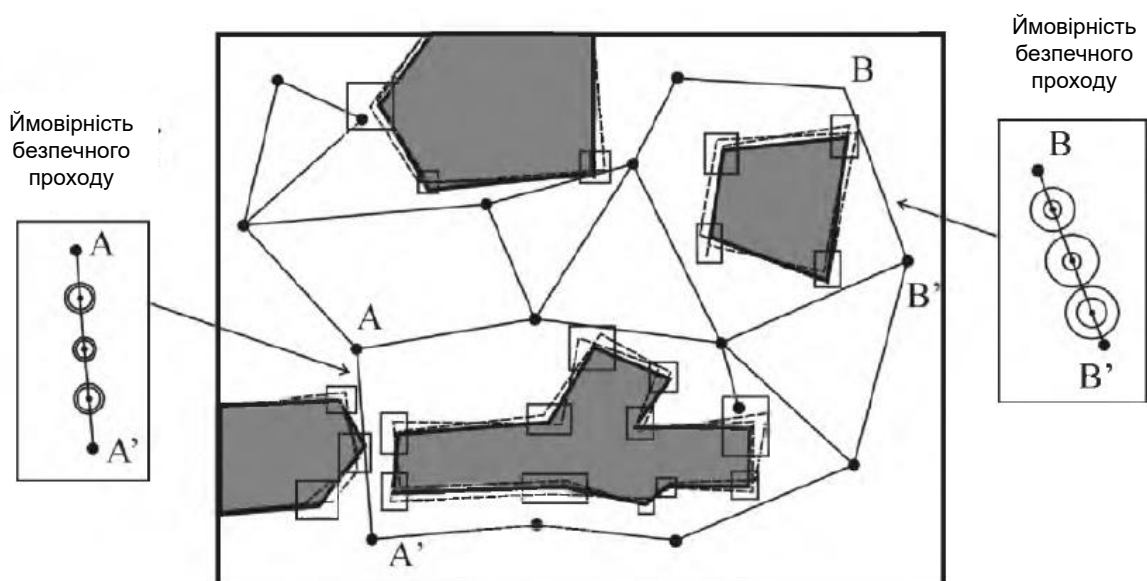


Рисунок 1.9 – Ймовірнісний граф маршрутів судна в портовій акваторії (стиснутих водах) (Джерело: розроблено автором)

Вершинами графів видимості, ГСП є ХТ небезпек, (ізобат), а вершинами графа маршруту – точки, що лежать у межах ГСП. Райони плавання, описані виразом виду (1.1), можна розділяти на підрайони, кожний зі своїм локальним графом видимості [32, 41, 42]. А глобальний граф видимості являє собою об'єднання локальних графів.

При плануванні шляху на основі графа видимості здійснюється надмірне наближення до навігаційних небезпек, а у складному конфігураційному просторі оцінка видимості стає важко затратною операцією, наслідком чого є повільна побудова статичного графа видимості (рис. 1.10).

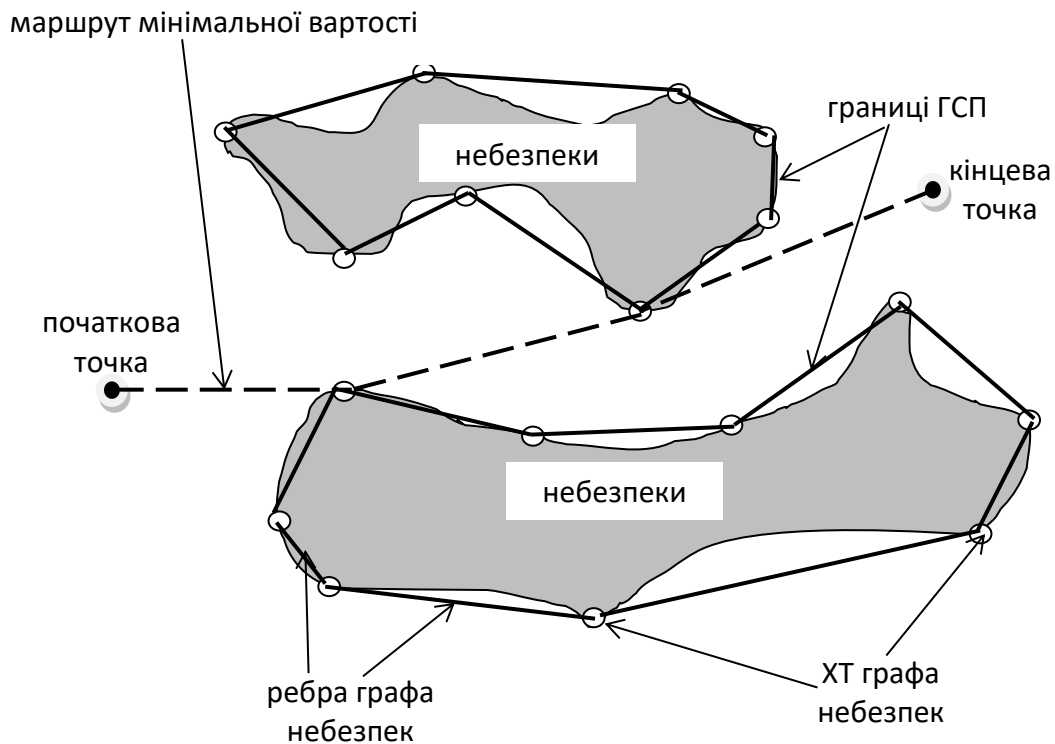


Рисунок 1.10 – Модель проблемного середовища у вигляді графа видимості гарантованої смуги проводки
(Джерело: розроблено автором)

Проведений аналіз властивостей різних моделей графів для планування маршруту судна показує, що кожний з них має певні недоліки [32]:

- а) невизначеність вибору району існування оптимального маршруту судна;
- б) суб'єктивний характер цільової функції;

- в) можливий пропуск небезпек при неповному аналізі РПл;
- г) можливе перекриття ЗВП, побудованих навколо небезпек, і, тим самим, закриття проходів між ними;
- д) неврахування обмежень правового характеру;
- е) неоптимальність маршруту;
- є) неможливість фізичної реалізації автоматичного руху судна за запланованим маршрутом.

Таким чином, виникає необхідність вирішення актуального наукового завдання, яке полягає у розробці моделей та методів системи підтримки прийняття рішення безпеки судноводіння в стиснутих водах (портовій акваторії) для підвищення ефективності системи безпеки судноводіння.

Висновки до розділу 1

1. Дослідження проблем планування руху та управління рухом суден свідчать, що це завдання відноситься до найбільш відповідальних і складних у сучасному судноводінні. Особливе місце займають дослідження безпечного планування маршруту руху судна в портовій акваторії (стиснутих водах).

2. Під завданням управління рухом судна розуміється послідовність дій, які повинні відбутися в результаті управління, наприклад, пересування судна без зіткнень, посадок на мілину, заходів у заборонені для плавання райони, перетинань обгороджувальних ліній.

3. Для рішення завдання автоматизованого управління рухом судна у портовій акваторії (стиснутих водах) необхідно:

формалізувати район та умови плавання, які впливають на вибір траєкторії та встановлення режимів руху;

провести повне обстеження району плавання та сформувати адекватну математичну модель, яка безпосередньо впливає на процес (тривалість) пошуку й оптимальність обраного шляху при побудові маршруту руху.

Основні матеріали розділу викладені у роботі [32].

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ БЕЗПЕКИ СУДНОВОДІННЯ В ПОРТОВІЙ АКВАТОРІЇ

2.1 Математичні моделі руху судна

2.1.1 Загальна математична модель руху судна

На теперішній час розроблено значну кількість математичних моделей руху судна, які представляють собою сукупність математичних залежностей, зокрема диференціальних – від простих лінійних та одновимірних до надзвичайно складних багатовимірних та нелінійних [20, 21]. Характер вирішуваних завдань визначає ступінь деталізації застосовуваних математичних моделей судна. Використання достатньо складної математичної моделі судна може бути заблоковано значними й навіть непереборними труднощами теоретичного характеру та обчислювальними можливостями засобів автоматизації. Тому на практиці широке застосування знайшли спрощені лінеаризовані та нелінійні моделі. Зокрема, математична модель динаміки водотоннажного судна може бути досить адекватною й простою при розв'язанні задачі управління курсом.

У загальному випадку судно рухається у тривимірному просторі, де судно має шість ступенів свободи: три характеризують лінійні переміщення центру мас, й три – обертання об'єкта щодо нього.

Рух судна, як складного об'єкта управління, представляється у різних системах координат, зокрема, пов'язаною із судном системою координат [21]. Так, на рис. 2.1 наведено судно у двох системах координат.

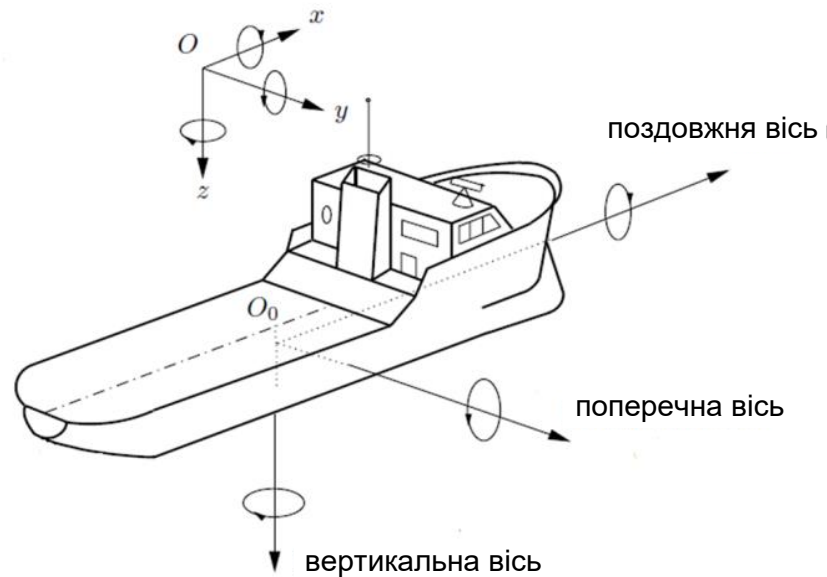


Рисунок 2.1 – Просторовий рух судна у двох системах координат
(Джерело: розроблено автором за матеріалами [21])

Математичне моделювання керованого руху судна у просторі з урахуванням впливу зовнішнього середовища є рух: у кожен момент часу t стан судна $x(t)$ описується набором з трьох просторових координат (поперечне, поздовжнє, вертикальне переміщення центру мас судна) та трьох характерних кутів (диферент, крен, ристання) (рис. 2.2) [21].

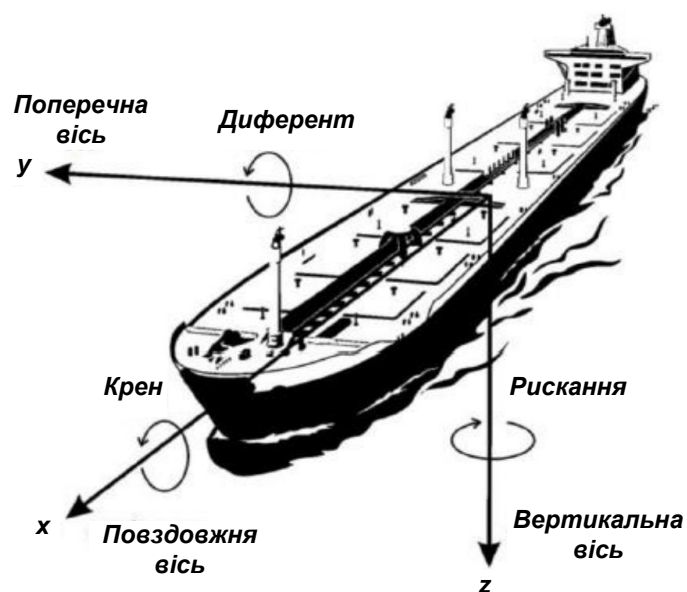


Рисунок 2.2 – Ступені свободи судна
(Джерело: розроблено автором за матеріалами [21])

Динаміка морських рухомих об'єктів описується двома диференціальними рівняннями сил – за поздовжньою X та поперечною Y осями – та рівнянням моментів навколо вертикальної осі Z [21]:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_x \frac{dV_x}{dt} + m_z \omega_y V_z - m_y \omega_z V_y = R_x; \\ m_y \frac{dV_y}{dt} + m_x \omega_z V_x - m_z \omega_x V_z = R_y; \\ m_z \frac{dV_z}{dt} + m_y \omega_x V_y - m_x \omega_y V_x = R_z; \\ J_x \frac{d\omega_x}{dt} = M_x; \\ J_y \frac{d\omega_y}{dt} + \omega_x \omega_z (J_x - J_z) + V_x V_z (m_x - m_z) = M_y; \\ J_z \frac{d\omega_z}{dt} + \omega_x \omega_y (J_y - J_x) + V_x V_y (m_y - m_x) = M_z, \end{array} \right. \quad (2.1)$$

де R_x, R_y, R_z – зовнішні сили щодо відповідних осей координат;

M_x, M_y, M_z – моменти зовнішніх сил відносно відповідних осей координат;

m_x, m_y, m_z – центр мас судна відносно відповідних осей координат з урахуванням приєднаних мас;

J_x, J_y, J_z – моменти інерції щодо відповідних осей координат з урахуванням приєднаних моментів інерції;

V_x, V_y, V_z – лінійна швидкість судна щодо відповідних осей координат;

$\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – кутова швидкість судна щодо відповідних осей координат.

Вплив різних факторів, зокрема зміна завантаження та його розподіл, на динаміку судна фіксується зміною коефіцієнтів диференціальних рівнянь у моделі (2.1). Зміна мас і моментів інерції, у т. ч. й приєднаних коефіцієнтів, відповідних силам і моментам в'язкого опору, які впливають на рух судна, вносять значну невизначеність у динаміку судна і мають враховуватися при побудові систем управління судном, у т. ч. адаптивних [21].

2.1.2 Спрощені математичні моделі руху судна за курсом

Для спрощення завдань судноводіння, полегшення вибору оптимальних рішень при синтезі систем автоматичного управління та спрощення їх аналізу застосовуються часткові моделі руху судна: управління курсом (при розробці та аналізі авторульових (керуючих курсом пристроїв)), бічним зміщенням (систем водіння судна за маршрутом), швидкістю ходу (для опису маневрів швидкістю) та іншими координатами [26].

Нелінійні математичні моделі руху судна за курсом

Теоретичним і практичним підґрунтям математичних моделей руху судна є теорія гідромеханіки. Комп'ютерне моделювання і натурні експерименти у дослідних басейнах на масштабних моделях відповідних суден дозволяють отримати характерні сили, моменти, швидкості, інерційні характеристики та інші динамічні та кінематичні параметри суден й навколишнього середовища і перерахувати їх з урахуванням масштабу для побудови математичних моделей реальних об'єктів [26]. Нелінійний характер сил та моментів сил в'язкого опору враховується у моделі Норбіна (рис. 2.3) [26, 46]:

$$T \frac{d\omega}{dt} + H_N(\omega) = K\delta, \quad (2.2)$$

де T – постійна часу судна, с;

$H_N(\omega)$ – нелінійна функція від ω (кутової швидкості);

δ – кут перекладки керма, град.;

K – коефіцієнт передачі керуючого впливу, що відображає ефективність роботи керма судна, с⁻¹.

Модель Норбіна є нелінійним аналогом лінійної інерційної (аперіодичної) ланки. Негативний зворотний зв'язок представляє момент сили в'язкого опору, що діє на корпус судна.

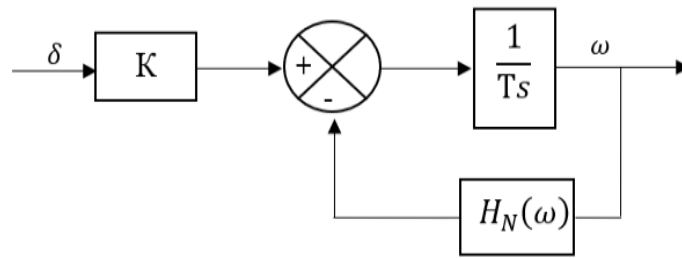


Рисунок 2.3 – Схема моделі Норбіна першого порядку (Джерело: [46])

Часто для опису руху судна за курсом також використовують моделі Номото другого порядку та Беха.

Модель Беха – це нелінійне диференціальне рівняння другого порядку :

$$\ddot{\omega} + \left(\frac{\tau_1 + \tau_2}{\tau_1 \tau_2} \right) \dot{\omega} + \frac{K}{\tau_1 \tau_2} H(\omega) = \frac{K}{\tau_1 \tau_2} (\delta + \tau_3 \dot{\delta}). \quad (2.3)$$

Структурна схема моделі Беха наведена на рис. 2.4

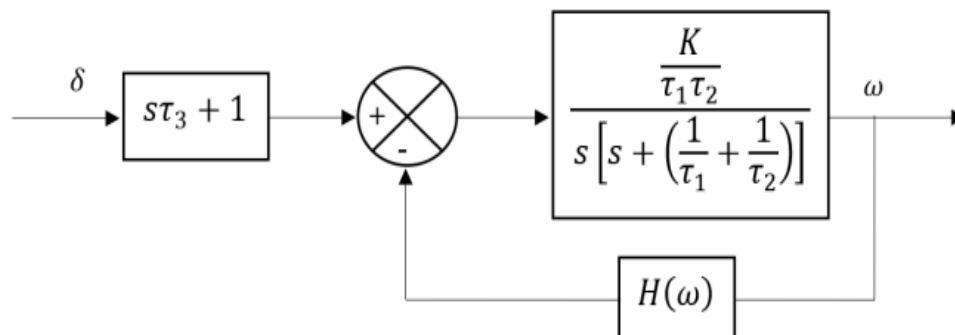


Рисунок 2.4 – Структурна схема моделі Беха (Джерело: [46])

Модель Беха, на відміну від моделі Норбіна, має більш складну лінійну частину, що описується диференціальним рівнянням більш високого порядку.

Для наближеного опису “слабких” маневрів курсом використовується спрощена нелінійна математична модель Номото 2-го порядку:

$$T_1 T_2 \ddot{\omega} + (T_1 + T_2) \dot{\omega} + \omega + H_H(\omega) = K(\delta + T_3 \dot{\delta}), \quad (2.4)$$

де $H_H(\omega) = c_2\omega \cdot |\omega| + c_3\omega^3$ – нелінійна компонента моделі;

T_1, T_2, T_3 – постійні часу, що характеризуються моментами інерції судна;

c_2, c_3 – коефіцієнти, що визначають вплив нелінійних компонентів.

Чисельні значення параметрів моделі (2.4) для конкретного судна розраховуються аналітично або знаходяться на основі виконання маневрів “циркуляція” та “зигзаг”.

Лінійні математичні моделі руху судна за курсом

Нелінійні математичні моделі, що враховують більшість характеристик руху судна, є дуже складними. Тому їх застосовують при аналізі та синтезі систем автоматичного управління нечасто.

12-та Міжнародна конференція випробувальних басейнів (12 МКОБ) рекомендувала у задачах управління курсом судна використовувати математичні моделі Номото 2-го та 1-го порядків, відповідно [46]:

$$T_1 T_2 \frac{d^2 r}{dt^2} + (T_1 + T_2) \frac{dr}{dt} + r = K \left(\delta + T_0 \frac{d\delta}{dt} \right); \quad (2.5)$$

$$T \frac{dr}{dt} + r = K\delta, \quad (2.6)$$

де T_0, T_1, T_2 – константи;

r – кутова швидкість судна (швидкість рискання) [град/с];

δ – кут повороту пера керма [град].

На рис. 2.5, 2.6 наведено схеми моделей Номото 1-го та 2-го порядку відповідно:

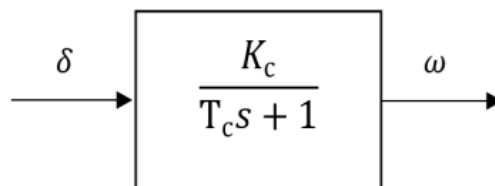


Рисунок 2.5 – Схема моделі Номото 1-го порядку (Джерело: [46])

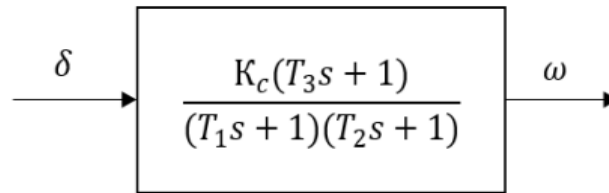


Рисунок 2.6 – Схема моделі Номото 2-го порядку (Джерело: [46])

Представимо рівняння Номото у вигляді передавальних функцій [46]:

$$W(s) = \frac{k(T_0s + 1)}{s(T_1s + 1)(T_2s + 1)}; \quad (2.7)$$

$$W(s) = \frac{k}{s(Ts + 1)}. \quad (2.8)$$

В останні роки вимоги до точності розрахунків характеристик судноплавності, особливо за штормових умов, стали жорсткішими. Це змусило дослідників перейти від лінійних до нелінійних методів, а в останньому випадку уточнити диференціальні рівняння, які описують поведінку судна за екстремальних умов плавання.

Використання передавальних функцій вигляду (2.7) і (2.8) виправдано, в основному, для вирішення завдань управління судном за курсом, а в інших випадках отримується помилковий результат. У рівняннях (2.7) і (2.8) параметри K_c , T_1 , T_2 , k залежать від приєднаних мас води, характеристик гідродинамічного опору, завантаження судна тощо, і тому мають високий ступінь невизначеності.

Моделі Норбіна, Беха, Номото мають низку обмежень, головною з яких є робота лише за умови постійної швидкості [46]. Крім того, перекладки керма понад 5° значно зменшують точність моделювання руху судна. Постійно зростаючі вимоги до точності розрахунків характеристик судноплавності та оцінки надійності безпеки судна в екстремальних умовах вимагають відмови від лінійних методів на користь більш точних нелінійних методів.

2.1.3 Математичні моделі рульової машини

Рульова машина (РМ) призначена для повороту керма судна у задане положення, зміни напрямку руху судна і для його утримання на заданому курсі. Тобто РМ протидіє зовнішнім впливам (вітер, течія тощо), які можуть призвести до відхилення судна від заданої траєкторії руху.

Рульовий пристрій складається з керма, рульового приводу, балера, РМ, рульової передачі та поста управління (рис. 2.7).

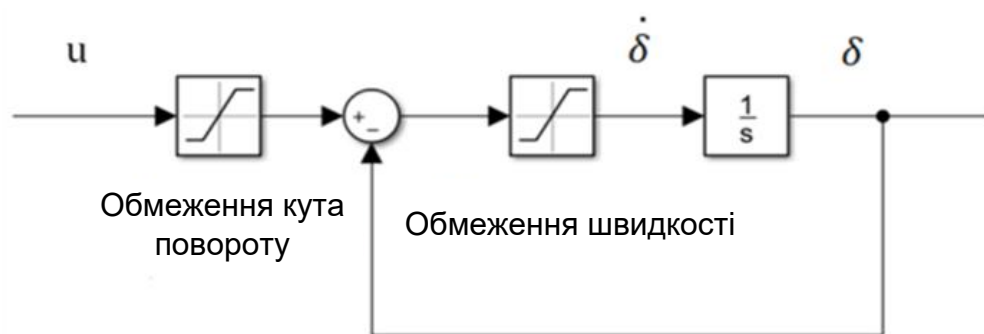


Рисунок 2.7 – Структурна схема рульової машини (Джерело: [46])

Відповідно до вимог Морського Регістру, РМ забезпечуватиме перекидку повністю зануреного керма при максимальній швидкості переднього ходу судна з 35° одного борту на 30° іншого борту за час, що не перевищує 30 с. Допускається похибка кута перекидки не більше 1° .

Математична модель рульової машини описується виразом:

$$\dot{\delta} = Fun[F(u) - \delta], \quad (2.9)$$

де Fun , F – функції, що обмежують швидкість та кут перекидки керма;

u – сигнал, що надходить з регулятора (управління);

δ – кут перекидки керма.

У режимі стабілізації курсу, коли швидкості та кути перекидки керма є незначними, обмеження нелінійних блоків не впливають на динаміку судна.

Робота РМ описується лінійним диференціальним рівнянням або еквівалентною передаточною функцією, яка відповідає інерційній ланці:

$$W_p(s) = \frac{k_p}{T_p s + 1}. \quad (2.10)$$

Найбільш відома лінійна модель рульової машини, динаміка якої описана лінійним диференціальним рівнянням:

$$(T_p s + 1)\dot{\delta} = K_p u, \quad (2.11)$$

де T_p – постійна часу;

u – вихід регулятора (управління);

K_p – коефіцієнт передачі.

На рис. 2.8 наведена структурна схема лінійної РМ.

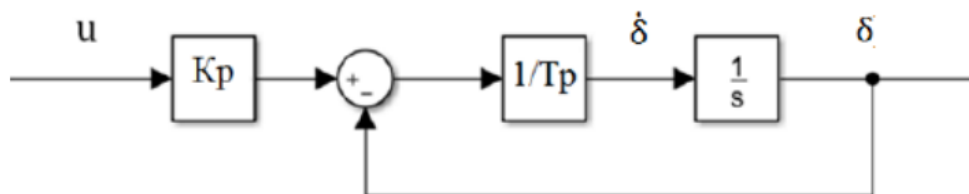


Рисунок 2.8 – Структурна схема лінійної рульової машини (Джерело: [46])

2.2 Модель руху судна з використанням градієнта допоміжної функції

Нехай задана послідовність характеристичних точок з координатами (x_i, y_i) , де $i = 0, 1, \dots, n$. Нехай ця послідовність ХТ утворює заплановану траєкторію руху. Якщо задати запланований маршрут траєкторії руху судна у вигляді кусково-лінійної траєкторії, то рівняння i -го фрагмента маршруту, який з'єднує точку (x_i, y_i) з точкою (x_{i+1}, y_{i+1}) , має такий вигляд:

$$y = k_i x + b_i; \quad (2.12)$$

$$k_i = \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i}; \quad b_i = y_i - k_i x_i, \quad (2.13)$$

де k_i – кутовий коефіцієнт прямої, що визначається через координати ХТ;

b_i – вільний коефіцієнт, що визначає перетин з віссю Oy .

Побудуємо допоміжну функцію, що має екстремум (максимум) на заданій прямолінійній траєкторії (2.12), вигляду:

$$F_i^0(x, y) = -\frac{c}{2} (y - k_i x + b_i)^2. \quad (2.14)$$

Обрана функція (2.14) відрізняється тим, що вектори її градієнта, обчислені у довільній точці (x, y) , спрямовані до заданої програмної траєкторії, на якій допоміжна функція має максимум. Врахуємо дану властивість при розробці методів управління рухом судна за бажаною програмною траєкторією у портовій акваторії. Для реалізації метода необхідно не тільки наближення судна до самої траєкторії, а його рух уздовж конкретної ділянки маршруту шляхом сумування векторів запропонованого градієнту допоміжної функції та напрямного вектора (що визначає напрямок руху на конкретній ділянці маршруту).

На рис. 2.9 наведена 3D-поверхня, що відповідає функції $F_i^0(x, y)$ при $c = 1$. Вертикальний переріз цієї поверхні є параболами, максимум яких знаходиться на i -ій ділянці заданої траєкторії руху судна.

Поле векторів градієнта функції $F_i^0(x, y)$ при різних значеннях параметра c наведено на рис. 2.10 (при $c = 0,5$) і на рис. 2.11 (при $c = 5$). Усі вектори спрямовані до i -го фрагменту запланованої траєкторії руху судна.

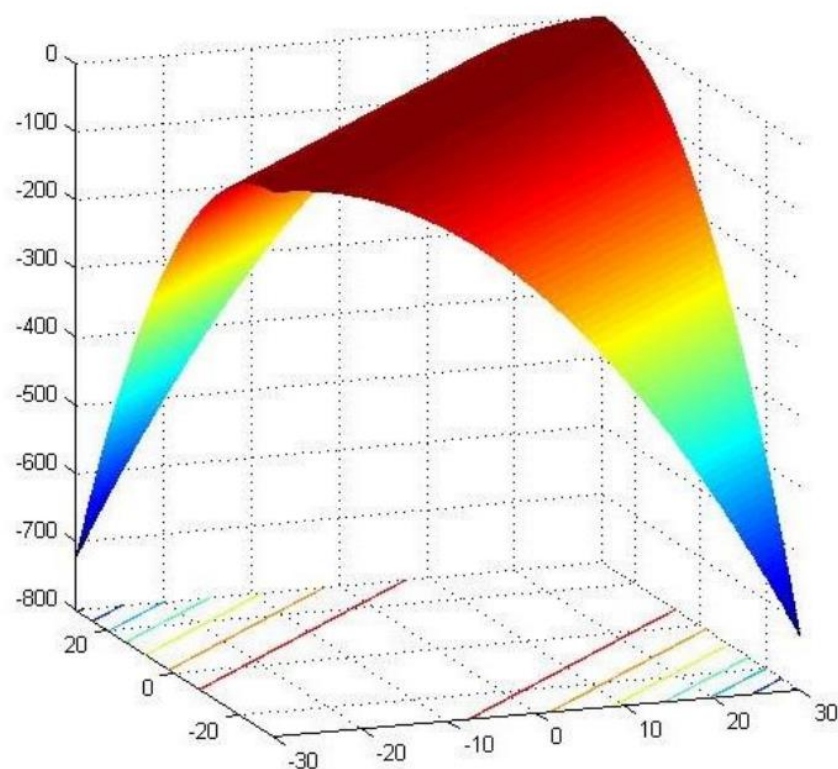


Рисунок 2.9 – Поверхня, яка відповідає функції $F_i^0(x, y)$
(Джерело: розроблено автором)

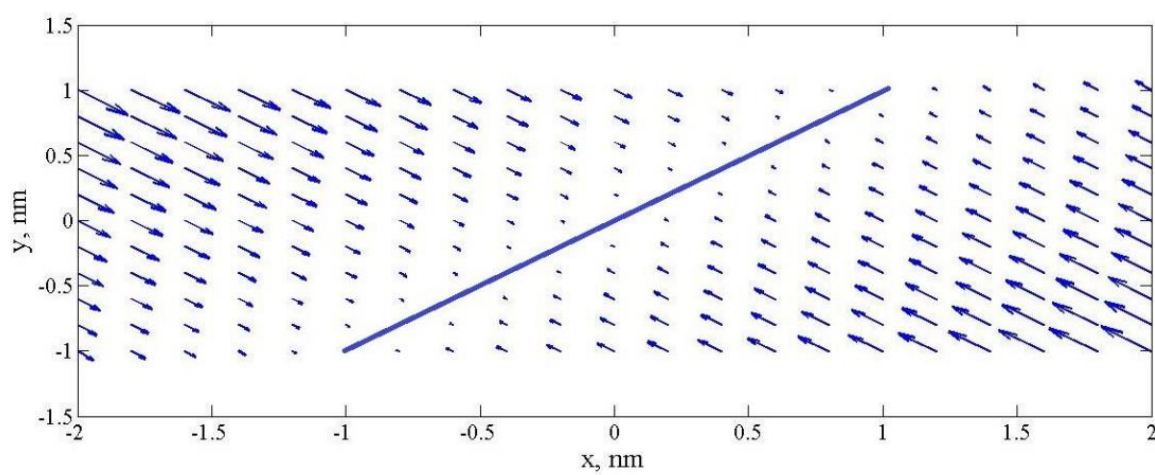


Рисунок 2.10 – Поле векторів градієнта функції $F_i^0(x, y)$ при $c = 0,5$
(Джерело: розроблено автором)

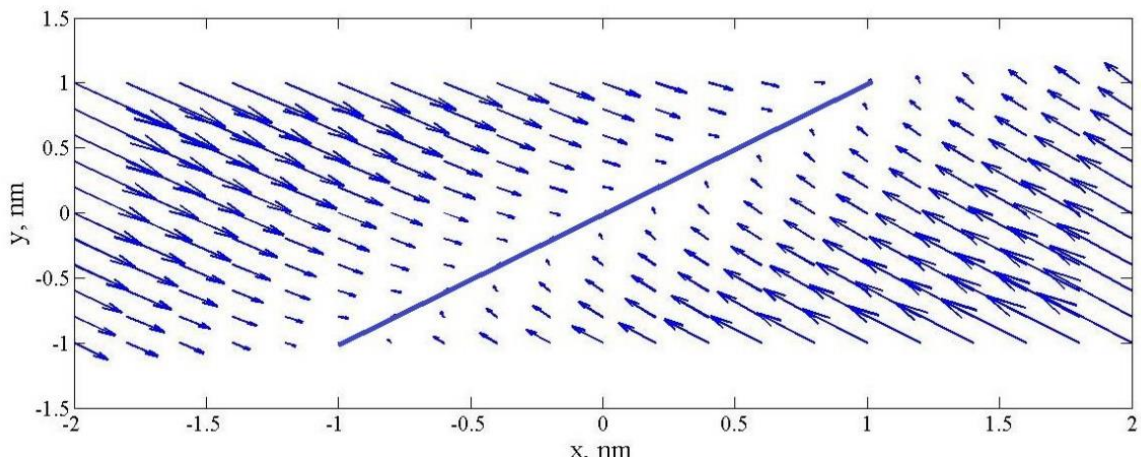


Рисунок 2.11 – Поле векторів градієнта функції $F_i^0(x, y)$ при $c = 5$

(Джерело: розроблено автором)

Сумування вектора градієнта і напрямного вектора гарантуватиме рух судна уздовж конкретної ділянки маршруту. Для цього сформуємо допоміжну функцію $F_i(x, y)$:

$$F_i(x, y) = F_i^0(x, y) + \alpha(w_{xi}x + w_{yi}y), \quad (2.15)$$

де α – коефіцієнт;

w_{xi}, w_{yi} – компоненти, що визначають напрямний вектор, що обчислюється через координати шляхових точок.

Розглянемо функцію $F_i(x, y) = -c/2 \cdot x^2 + y$, при $c = 1$ (рис. 2.12) і при $c = 10$ (рис. 2.13). Направний вектор $w = (1; 0)$ спрямований вертикально вгору, бажана траєкторія лежить на вертикальній осі, а поле векторів прагне заданої вертикальної траєкторії. Збільшення коефіцієнта c приводить до дуже різкого підходу векторів до заданої прямолінійної вертикальної траєкторії.

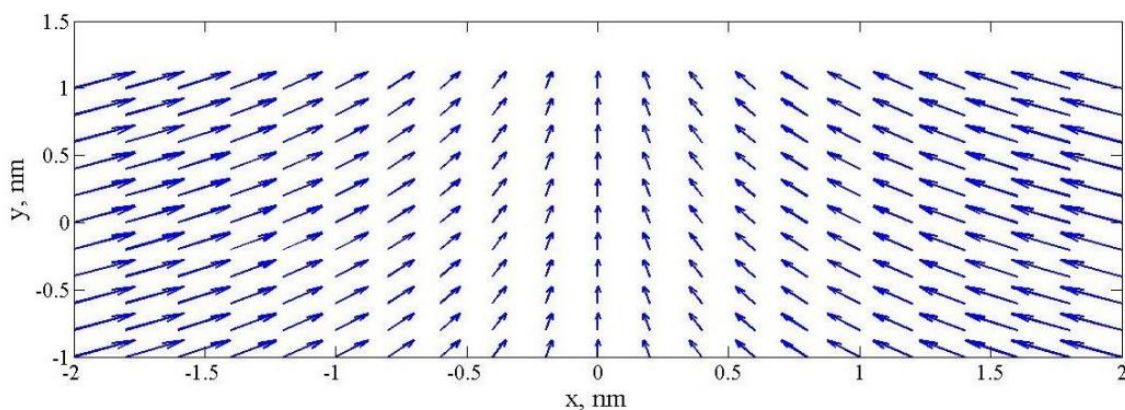


Рисунок 2.12 – Поле векторів градієнта функції $F_i(x, y)$, $c = 1$
(Джерело: розроблено автором)

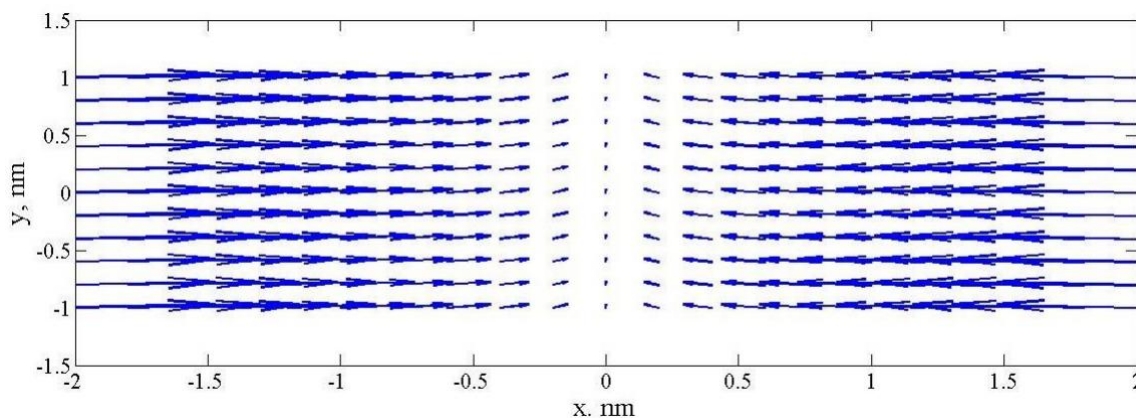


Рисунок 2.13 – Поле векторів градієнта функції $F_i(x, y)$, $c = 10$
(Джерело: розроблено автором)

Розглянемо інший випадок функції $F_i(x, y) = cy^2 + x$, де вигляд поля градієнта функції $F_i(x, y)$ при $c = -5$ та $c = -0,5$ наведені на рис. 2.14, 2.15, відповідно. Задана траєкторія розташована горизонтально, напрямний вектор $w = (0; 1)$. Поля векторів прагнуть до заданої горизонтальної траєкторії. При збільшенні коефіцієнта c з -5 до $-0,5$ також спостерігається більш різкий підхід векторів до заданої прямолінійної траєкторії.

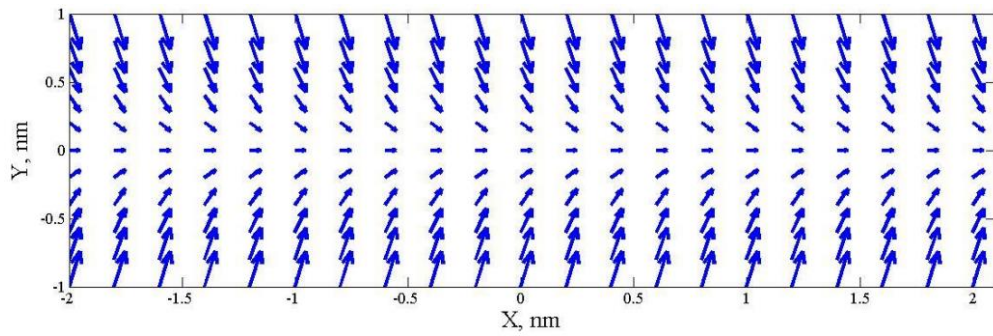


Рисунок 2.14 – Поле векторів градієнта функції $F_i(x, y)$, $c = -0,5$
(Джерело: розроблено автором)

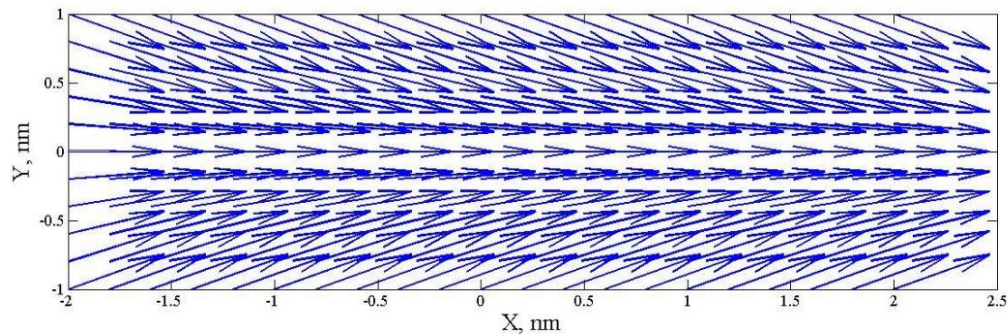


Рисунок 2.15 – Поле векторів градієнта функції $F_i(x, y)$, $c = -5$
(Джерело: розроблено автором)

Функція $F_i(x, y)$ має максимум на i -му фрагменті шляху. Тоді вектор градієнта цієї функції дорівнює:

$$\text{grad } F_i^0(x, y) = \left(\frac{dF_0}{dx}, \frac{dF_0}{dy} \right), \quad (2.16)$$

або з урахуванням рівняння (2.12) i -го фрагмента ділянки траєкторії:

$$\text{grad } F_i^0(x, y) = (ck_i(y - k_ix - b_i)). \quad (2.17)$$

Вектори градієнта функції $F_i^0(x, y)$ спрямовані до i -их фрагментів траєкторії руху та перпендикулярні ним. Здійснимо нормування напрямних векторів $w_i = (w_{xi}, w_{yi})$. Для цього запишемо вирази, за якими складові цього

вектора обчислюються через координати ХТ траєкторії руху судна:

$$\begin{aligned} w_{xi} &= \frac{x_{i+1} - x_i}{\sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}}, \\ w_{yi} &= \frac{y_{i+1} - y_i}{\sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}}. \end{aligned} \quad (2.18)$$

Сформуємо такі вектори:

$$F_i(x, y) = \text{grad } F_i^0(x, y) + aw_i = \left(\frac{d F_i^0}{dx_i} + aw_{xi}, \frac{d F_i^0}{dy_i} + aw_{yi} \right), \quad (2.19)$$

де a – ваговий коефіцієнт більший за 0.

На рис. 2.16 наведено поле векторів градієнта для функції $F_i(x, y)$ (2.17).

Розглянуті особливості допоміжних функцій та векторів складають основу алгоритму управління рухом судна за заданою траєкторією.

Бажане програмне значення курсу судна φ_{di} для виходу на i -ий фрагмент траєкторії руху дорівнює:

$$\varphi_{di}(t) = \arctg \left(\frac{\frac{dF_0(x, y)}{dy} + aw_{yi}}{\frac{dF_0(x, y)}{dx} + aw_{xi}} \right) \quad (2.20)$$

або

$$\varphi_{di}(t) = \arctg \left(\frac{\frac{dF_i(x, y)}{dy}}{\frac{dF_i(x, y)}{dx}} \right), \quad (2.21)$$

де $x = x(t)$ та $y = y(t)$ – координати судна.

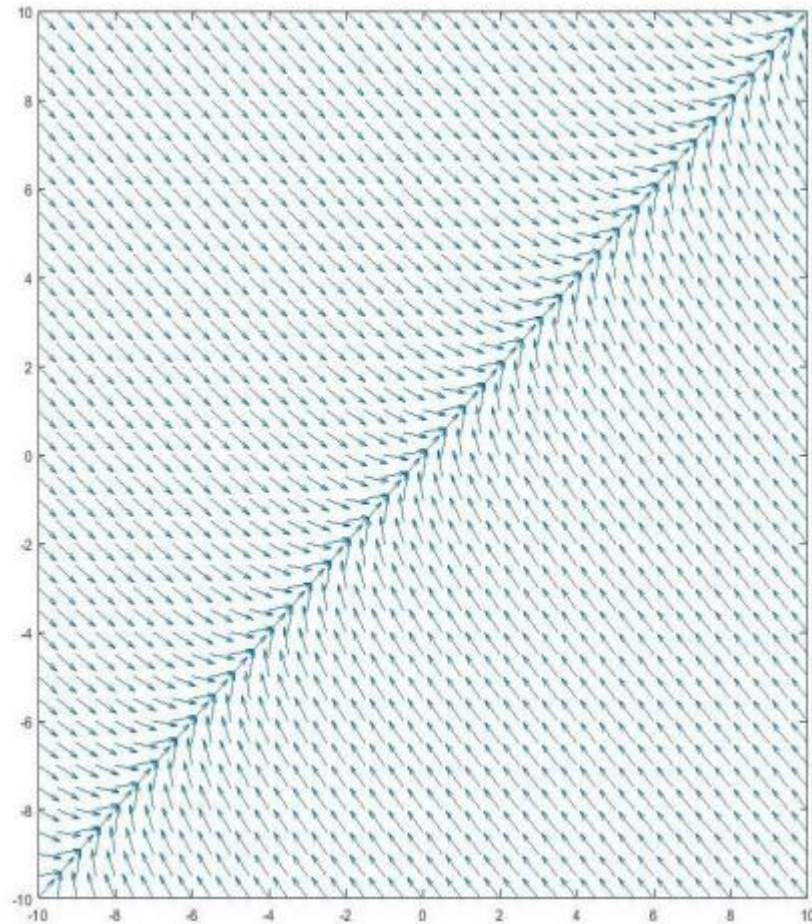


Рисунок 2.16 – Поле векторів градієнта для функції F_i
(Джерело: розроблено автором)

Модель (2.21) для обчислення бажаного програмного значення курсу судна є основою алгоритму та побудованої на його основі системи управління рухом судна за програмною траєкторією (маршрутом).

Порядок обчислення програмного значення курсу судна наведений на рис. 2.17, де i -му фрагменту програмної траєкторії судна відповідає ідеальне значення курсу φ_i , який обчислюється через координати шляхових точок $(x_i, y_i), (x_{i+1}, y_{i+1})$. Крім того, зображені вектор градієнта функції $F_i^0(x, y)$ при знаходженні судна в точці з координатами (x, y) та одиничний напрямний вектор w_i . Тоді напрямок руху судна до програмної траєкторії визначається кутом $\Delta\varphi_i(t)$.

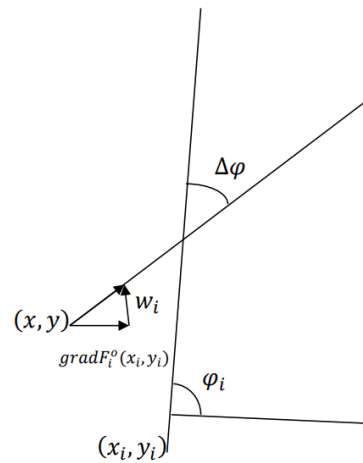


Рисунок 2.17 – Обчислення програмного значення курсу судна
(Джерело: розроблено автором)

За наведеними результатами дослідження можна синтезувати систему управління рухом судна за траєкторією (рис. 2.18).

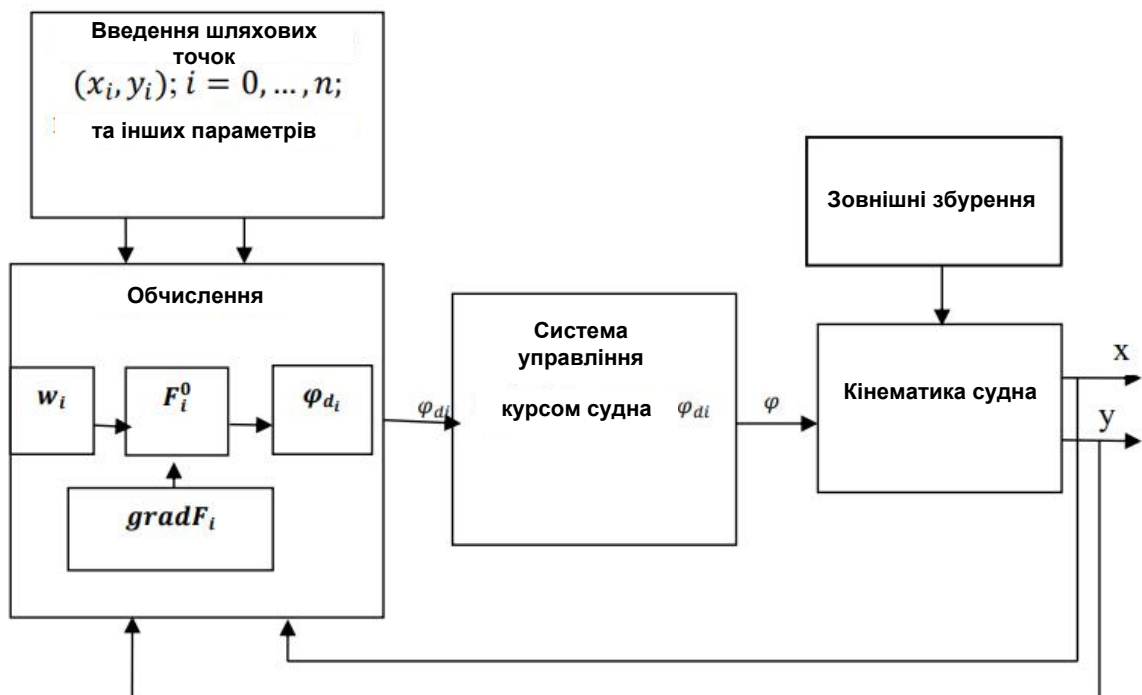


Рисунок 2.18 – Укрупнена схема системи управління рухом судна за заданою траєкторією (Джерело: розроблено автором)

До складу системи входять блоки введення початкових даних – шляхових точок за планованим маршрутом та параметрами, що визначають

алгоритм управління рухом судна. За введеними даними обчислюються напрямні вектори w_i для кожного прямолінійного фрагмента траєкторії судна, формується допоміжна функція F_i та обчислюється її градієнт як сума градієнта введеної функції $F_i^0(x, y)$ і вектору aw_i .

Далі обчислене за виразом (2.21) програмне значення курсу судна $\varphi_{di}(t)$ надходить на вхід системи керування курсом судна.

Фактичне значення курсу судна $\varphi(t)$ разом із поздовжньою швидкістю руху судна V визначає зміну просторових координат судна $x(t), y(t)$, які через зворотний зв'язок надходять на обчислювальний блок для розрахунку програмних значень курсу судна.

2.3 Математичні моделі прогнозування зміну курсу судна при маневруванні у стиснутих водах

За результатами проведених експериментів і практики управління суднами для побудови функціональних залежностей кутової швидкості повороту від кута перекладки керма в часі (рис. 2.19) рух судна на повороті необхідно розбити на окремі періоди (рис. 2.20) [29]:

- 1) період розгону (неусталеного руху) (T_1) – від t_1 до t_2 ;
- 2) період усталеного руху (руху, що встановився) (T_2) – від t_2 до t_3 ;
- 3) період гальмування (T_3) – від t_3 до t_4 .

В експерименті прийнято (див. рис. 2.19, 2.20), що для розглянутих значень перекладок керма і кривих кутових швидкостей період розгону дорівнює 15 с, а період гальмування – часовому проміжку від ТОП до нульового значення кутової швидкості руху судна.

Звідси зміна курсу судна при повороті ψ описується безперервним інтегруванням кутової швидкості на повороті ω за часом або сумою змін курсу на зазначених періодах (розгін ΔK_1 , усталений ΔK_2 , гальмування ΔK_3):

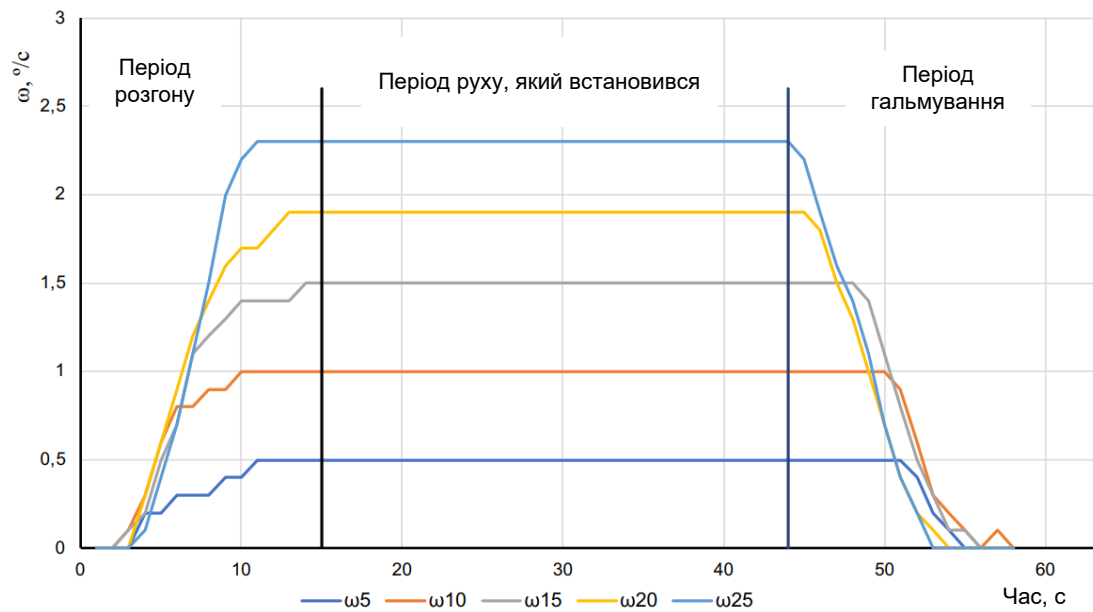


Рисунок 2.19 – Характер зміни кутової швидкості судна за різних кладок керма
(Джерело: розроблено автором)

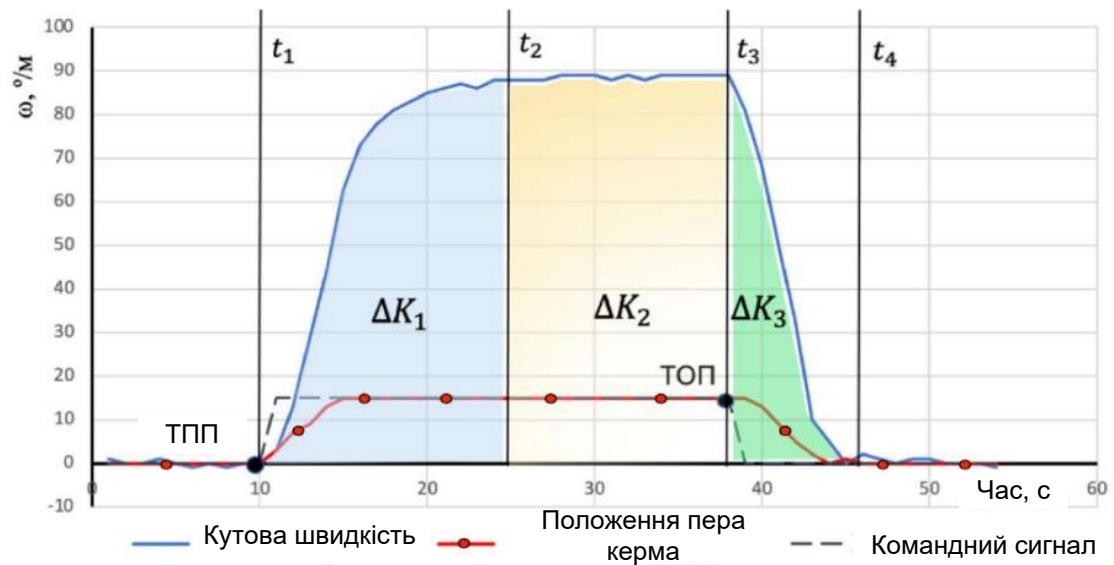


Рисунок 2.20 – Поділ елементів повороту судна на окремі періоди
(Джерело: розроблено автором)

$$\psi = \int_{t_1}^{t_4} \omega dt = \Delta K_1 + \Delta K_2 + \Delta K_3. \quad (2.22)$$

Згладжуванням виміряних експериментальних даних знижувався вплив

різного роду завад і шумів вимірів параметрів руху судна. Оскільки похибки навігаційних параметрів через дію сукупності факторів підпорядковуються нормальному закону розподілу, то для первинної обробки отриманих даних застосовано метод згладжування часових рядів на основі функції Гауса [29]. Якість результатів згладжування вимірювань параметрів руху судна на основі функції Гауса наведена на рис. 2.21.

Після згладжування значення змін курсу на окремих періодах повороту судна дорівнює:

$$\Delta K_1 = \int_{t_1}^{t_2} f_1(t)dt; \quad \Delta K_2 = \omega_{\text{зад}}(t_3 - t_2), \quad \Delta K_3 = \int_{t_3}^{t_4} f_3(t)dt, \quad (2.23)$$

де $\omega_{\text{зад}}$ – кутова швидкість повороту, що обирається судноводієм;

$f_1(t)$, $f_3(t)$ – функції, які відповідають змінам значень кутової швидкості судна в періоди розгону та гальмування судна.

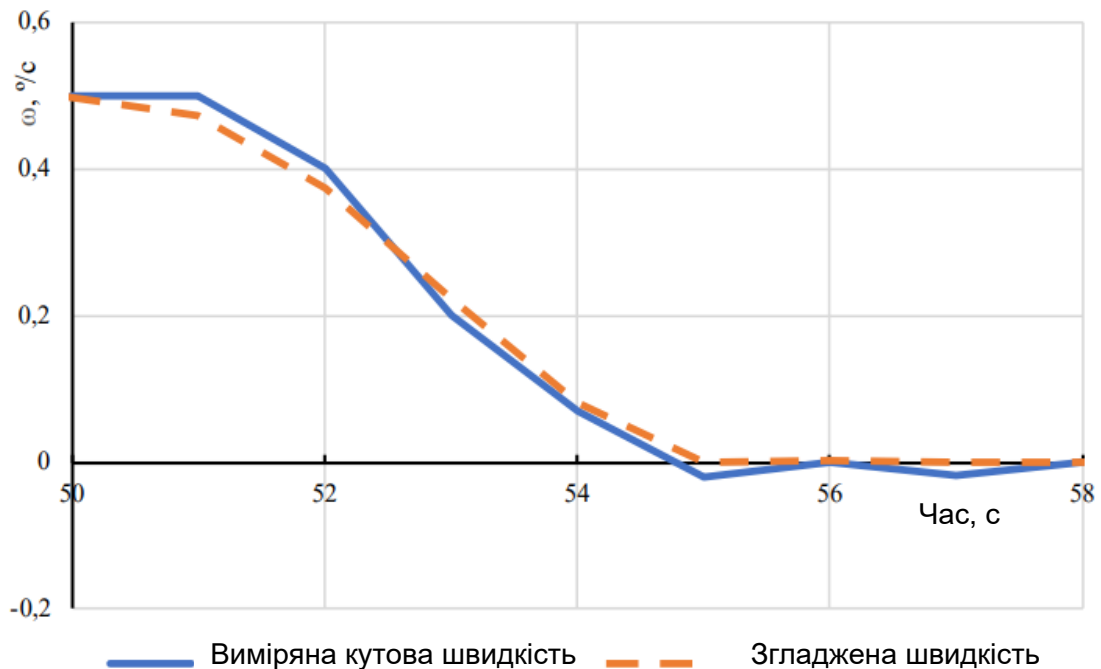


Рисунок 2.21 – Фрагмент згладжених та виміряних значень кутової швидкості судна (Джерело: розроблено автором за матеріалами [29])

Подання даних руху судна в табличному або графічному вигляді не є

зручним і не дозволяє визначити закон зміни кутової швидкості, необхідний для обчислення інтегралів (2.23). Отже, необхідно апроксимувати експериментальні дані, тобто замінити їх аналітичним виразом, що з достатнім ступенем точності відображає всі суттєві характеристики досліджуваного процесу для розглянутих періодів повороту судна.

Апроксимації вирішується у три етапи: спочатку вибираються можливі типи апроксимуючих функцій, далі визначаються їх коефіцієнти, а потім оцінюється якість апроксимації. Якість апроксимації не в останню чергу визначається вибором апроксимуючої функції періодів повороту судна.

Попередні дослідження показали, що достатній ступінь наближення до вихідних даних мають ряд тригонометричних функцій (сума синусів):

$$f_j(t) = \sum_{i=1}^3 a_i \sin(b_i t + c_i) \quad (2.34)$$

або поліноміальна функція шостого ступеня:

$$f_j(t) = k_0 + k_1 t + k_2 t^2 + k_3 t^3 + k_4 t^4 + k_5 t^5 + k_6 t^6; \quad (2.35)$$

де $f_j(t)$ – відповідні апроксимуючі функції періодів (2.22);

a_i, b_i, c_i – шукані коефіцієнти апроксимації.

Значення коефіцієнтів у (2.34), (2.35) для періодів повороту розгону і гальмування судна визначалися за методом найменших квадратів [46]. Для цього використано критерій квадратичного наближення з кейсу програмних інструментів MATCAD. Розглянуто різні режими маневрування судна, тобто різні кути перекладки керма та відповідні кутові швидкості повороту. Результати обчислень значень коефіцієнтів апроксимації тригонометричної та поліноміальної функцій для різних режимів наведено у таблицях 2.1 – 2.4.

Таблиця 2.1 – Значення коефіцієнтів апроксимації тригонометричної функції (період розгону – ΔK_1) (Джерело: розроблено автором)

Коефіцієнт	Значення коефіцієнтів апроксимації при зміні курсу з різними кладками руля				
	5^0	10^0	15^0	20^0	25^0
ΔK_1	15 с	15 с	15 с	15 с	15 с
a_1	0,5796	1,874	1,757	4,319	7,639
b_1	0,1615	0,1449	0,2009	0,1608	0,1545
c_1	-0,3318	1,42	-0,4792	1,021	1,39
a_2	0,1342	2,062	0,7983	4,14	7,801
b_2	0,2665	0,1564	0,3901	0,1856	0,1798
c_2	2,36	4,962	1,641	4,325	4,542
a_3	0,02524	0,06126	0,4043	0,1236	0,1334
b_3	1,175	0,678	0,5812	0,7551	0,8149
c_3	0,8261	3,232	3,197	2,091	0,4309
ε	0,017	0,027	0,02	0,021	0,016

Таблиця 2.2 – Значення коефіцієнтів апроксимації тригонометричної функції (період гальмування – ΔK_3) (Джерело: розроблено автором)

Коефіцієнт	Значення коефіцієнтів апроксимації при зміні курсу з різними кладками руля				
	5^0	10^0	15^0	20^0	25^0
ΔK_3	8 с	10 с	12 с	16 с	18 с
a_1	0,375	1,474	1,144	1,401	21,12,
b_1	0,3376	0,3585	0,2264	0,1164	0,007039
c_1	2,935	1,665	2,891	2,762	9,028
a_2	0,1976	1,092	0,5544	0,5365	0,4443
b_2	0,7199	0,4695	0,4651	0,3271	0,408
c_2	3,345	11,1	5,111	6,274	-4,149
a_3	0,006915	0,027	0,008174	0,07779	0,03444
b_3	1,936	1,701	0,7877	0,6145	1,04
c_3	-22,72	-15,93	15,21	10,71	-11,79
ε	0,009	0,014	0,021	0,017	0,022

Таблиця 2.3 – Значення коефіцієнтів апроксимації поліноміальної функції шостого ступеня (період розгону – ΔK_1) (Джерело: розроблено автором)

Коефіцієнт	Значення коефіцієнтів апроксимації при зміні курсу з різними кладками руля				
	5^0	10^0	15^0	20^0	25^0
ΔK_1	15 с	15 с	15 с	15 с	15 с
k_6	0,252	0,40	0,1126	0,102	-0,247
k_5	-0,436	-0,652	0,237	-0,1057	0,456
k_4	0,231	0,318	-0,1734	-0,1057	-0,2793

k_3	-0,049	-0,055	0,0583	0,0282	0,072
k_2	$5,07 \times 10^{-3}$	$4,73 \times 10^{-3}$	$-4,589 \times 10^{-3}$	$-4,71 \times 10^{-3}$	$-7,371 \times 10^{-3}$
k_1	$-2,581 \times 10^{-4}$	$-2,008 \times 10^{-4}$	$4,3 \times 10^{-4}$	$2,969 \times 10^{-4}$	$3,274 \times 10^{-4}$
k_0	$5,095 \times 10^{-6}$	$3,386 \times 10^{-6}$	$-8,964 \times 10^{-6}$	$-6,611 \times 10^{-6}$	$-5,251 \times 10^{-6}$
ε	0,0058	0,015	0,02	0,0087	0,017

Таблиця 2.4 – Значення коефіцієнтів апроксимації поліноміальної функції шостого ступеня (період гальмування – ΔK_3) (Джерело: розроблено автором)

Коефіцієнт	Значення коефіцієнтів апроксимації при зміні курсу з різними кладками руля				
	5^0	10^0	15^0	20^0	25^0
ΔK_3	8 с	10 с	12 с	16 с	18 с
k_6	$9,617 \times 10^5$	$8,475 \times 10^5$	$3,523 \times 10^5$	$5,051 \times 10^4$	$1,223 \times 10^4$
k_5	$-1,073 \times 10^5$	$-9,559 \times 10^4$	$-4,065 \times 10^4$	$-5,993 \times 10^3$	$-1,39 \times 10^3$
k_4	$4,98 \times 10^3$	$4,485 \times 10^3$	$1,95 \times 10^3$	294,828	64,721
k_3	-123,166	-112,101	-49,787	-7,696	-1,575
k_2	1,711	1,574	0,713	0,112	0,021
k_1	-0,012	-0,01	-0,0054	0,00087	-0,00014
k_0	$3,904 \times 10^{-5}$	$3,659 \times 10^{-5}$	$1,727 \times 10^{-5}$	$2,804 \times 10^{-6}$	$4,034 \times 10^{-7}$
ε	0,0015	0,009	0,004	0,007	0,018

Отримані результати обчислень для апроксимацій типу (2.34) і (2.35) для більшої наочності та подальшого детального аналізу змін значень коефіцієнтів апроксимації для різних режимів руху судна у вигляді графіків наведені на рис. 2.22 – 2.29. Аналіз результатів показав, що при перекладці керма та, відповідно, збільшенні кутової швидкості повороту, значення коефіцієнтів апроксимації збільшуються, і, навпаки, при зменшенні кутової швидкості повороту значення коефіцієнтів апроксимації зменшуються.

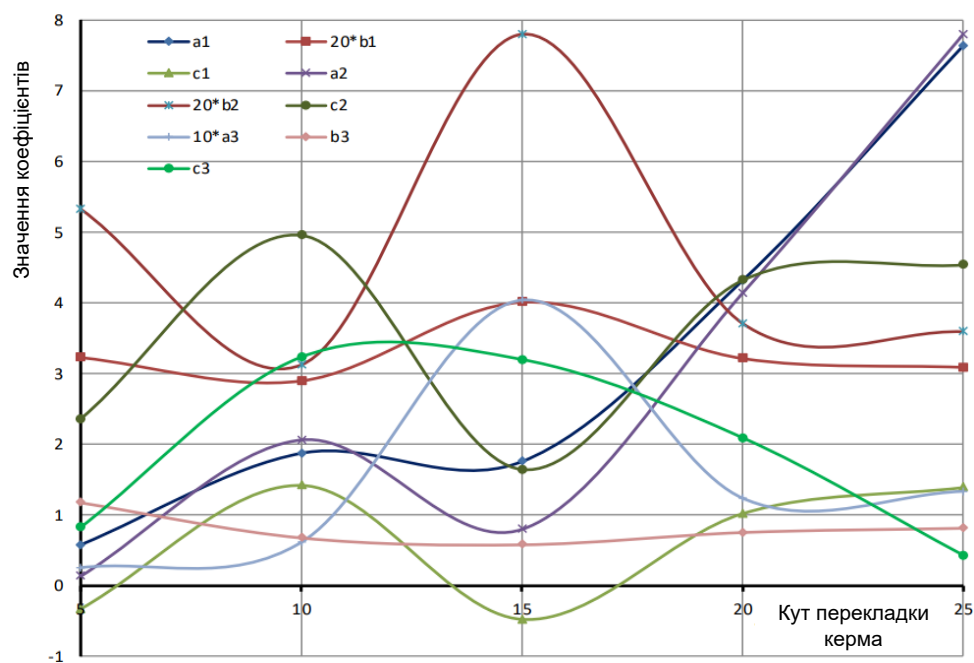


Рисунок 2.22 – Значення коефіцієнтів тригонометричної апроксимації при різних режимах руху судна в період розгону (Джерело: розроблено автором)

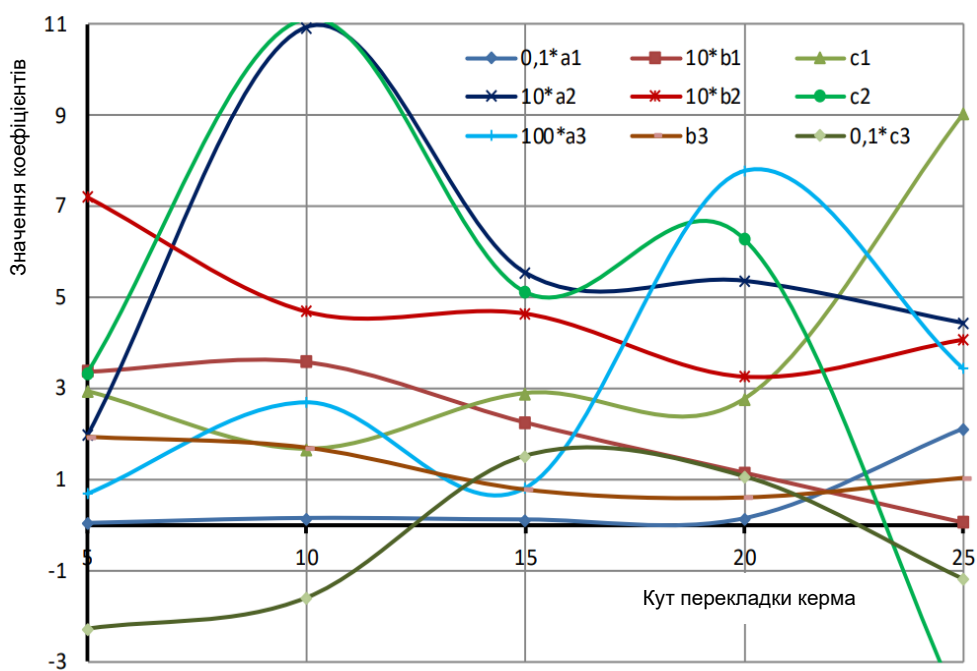


Рисунок 2.23 – Значення коефіцієнтів тригонометричної апроксимації при різних режимах руху судна в період гальмування (Джерело: розроблено автором)

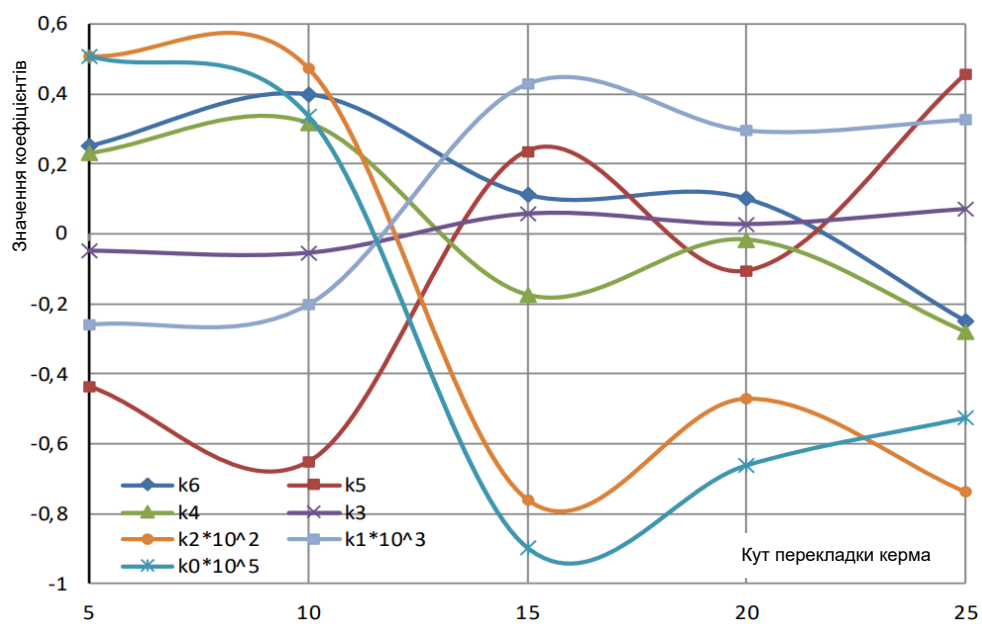


Рисунок 2.24 – Значення коефіцієнтів поліноміальної апроксимації при різних режимах руху судна в період розгону
(Джерело: розроблено автором)

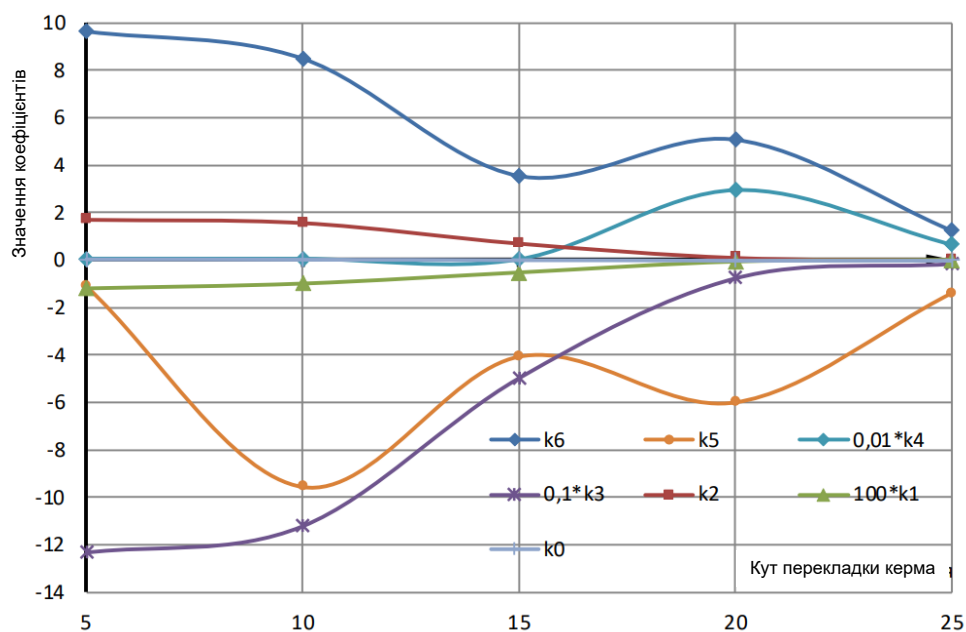


Рисунок 2.25 – Значення коефіцієнтів поліноміальної апроксимації при різних режимах руху судна в період гальмування
(Джерело: розроблено автором)

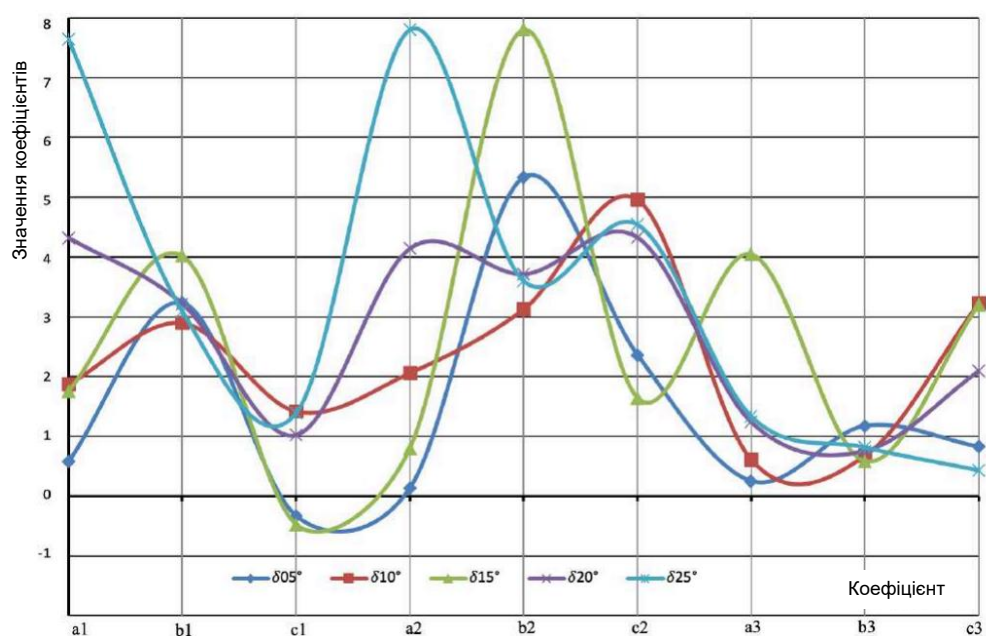


Рисунок 2.26 – Значення коефіцієнтів тригонометричної апроксимації залежно від кута переладки керма в період розгону
(Джерело: розроблено автором)

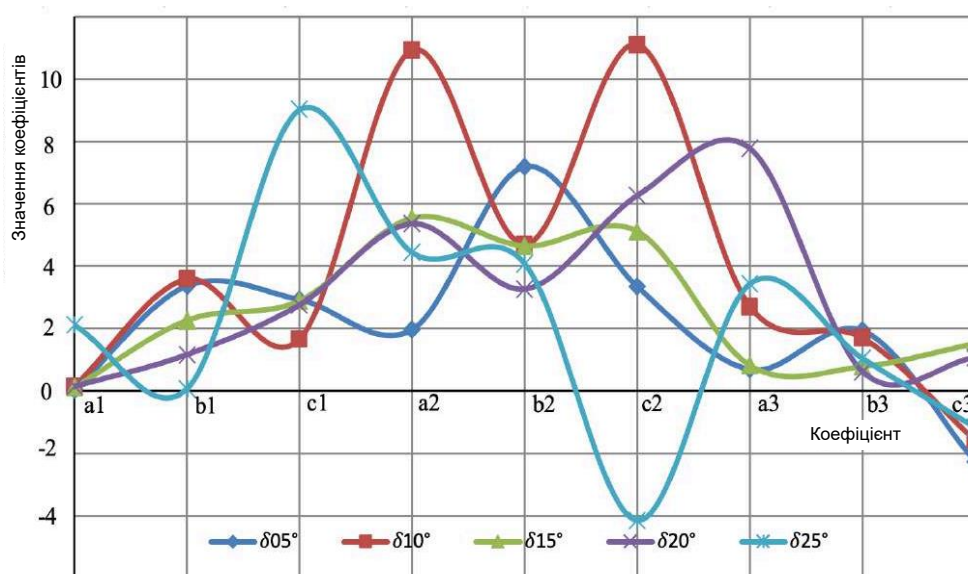


Рисунок 2.27 – Значення коефіцієнтів тригонометричної апроксимації залежно від кута перекладки керма в період гальмування
(Джерело: розроблено автором)

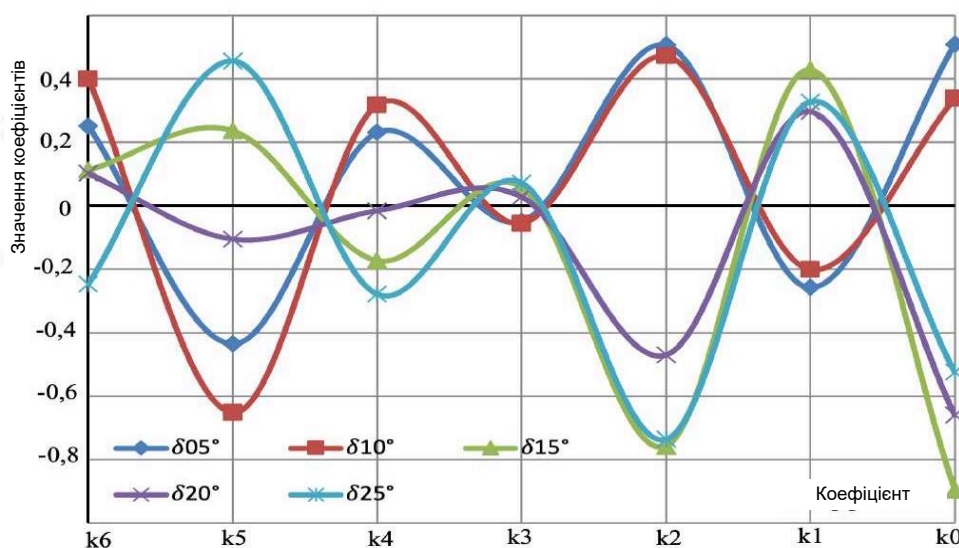


Рисунок 2.28 – Значення коефіцієнтів поліноміальної апроксимації залежно від кута перекладки керма в період розгону
(Джерело: розроблено автором)

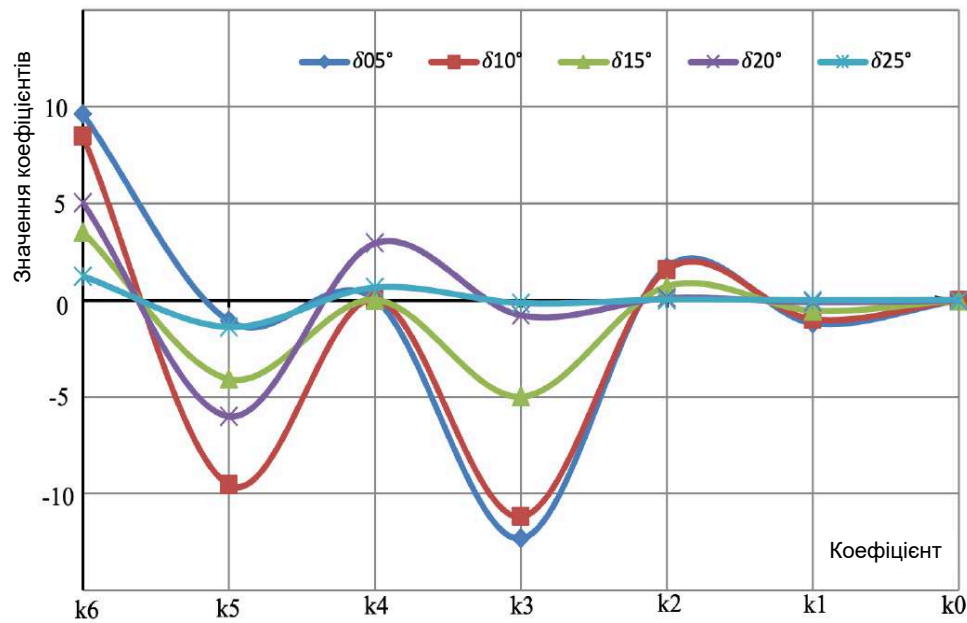


Рисунок 2.29 – Значення коефіцієнтів поліноміальної апроксимації залежно від кута перекладки керма в період гальмування
(Джерело: розроблено автором)

Ретельний аналіз дозволив виявити, що для поліноміальної апроксимації (2.35) коефіцієнти k_0 і k_1 при доданках з нульовим та першим ступенями у період гальмування для даного типу судна малі порівняно з іншими складовими високого ступеня та ними можна знехтувати. Це дозволяє при апроксимації періоду гальмування знизити поліноміальну функцію до четвертого ступеня і, тим самим, зменшити обчислювальні витрати.

Тригонометрична апроксимація (2.34), на відміну від поліноміальної (2.35), характеризується рівномірним розподілом коефіцієнтів на всіх режимах руху судна. Графічний аналіз не завжди підходить для оцінки якості апроксимації. Тому при кількісній оцінці якості апроксимації часто оцінюють середню абсолютну похибку:

$$\varepsilon = \frac{1}{n} \cdot \sum |y - f(t)|, \quad (2.36)$$

де n – довжина часового інтервалу;

y – згладжені значення кутової швидкості;

ε – середня абсолютна похибка;

$f(t)$ – апроксимуючі функції (2.34), (2.35).

Чим ближче похибка апроксимації до нуля, тим краще функція $f(t)$ апроксимує емпіричні дані, та більша кількість спостережень відповідає лінії графіка функції. Результати оцінки якості виконаної апроксимації середньою абсолютною похибкою (2.36) наведено у табл. 2.1-2.4.

Висновки, отримані у ході графічного аналізу змін значень коефіцієнтів апроксимації при різних режимах руху судна, дозволяють апроксимувати емпіричні дані поліноміальною функцією 4-го та 5-го ступенів. Значення середньої абсолютної похибки (2.36) якості апроксимації змін курсу для періодів розгону та гальмування залежно від кута перекладки керма наведені на рис. 2.30, 2.31, де через е П4 – е П6 позначені поліноміальні функції 4-6-го ступенів відповідно; е sin – тригонометрична функція. З наведених графіків очевидно, що похибки апроксимації змінюються незначно.

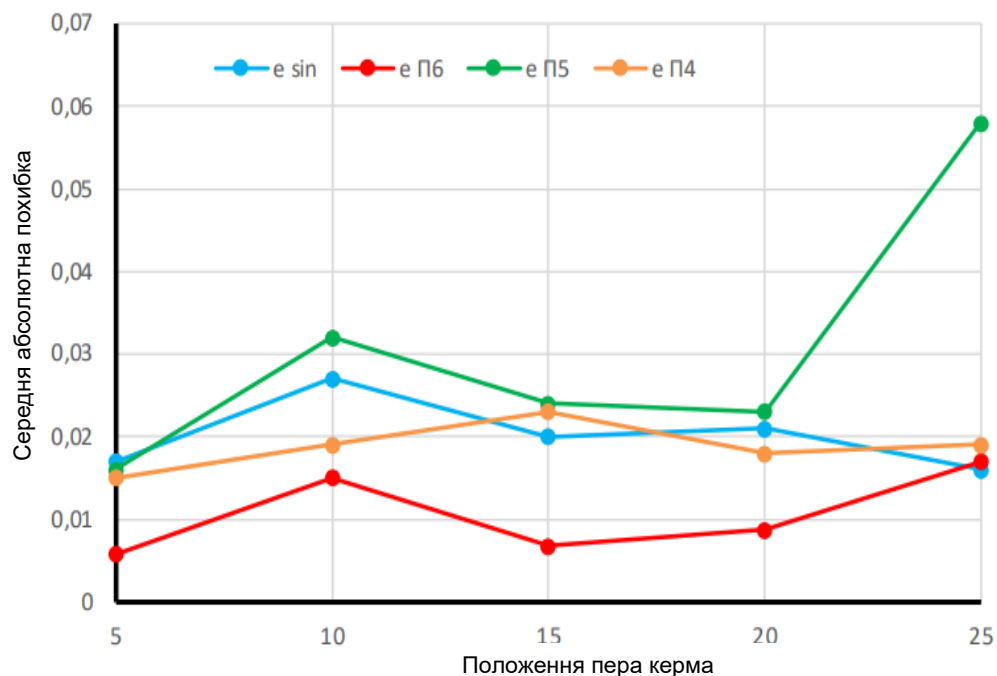


Рисунок 2.30 – Середні абсолютні похибки апроксимації змін курсу на періоді розгону в залежності від кута перекладки керма
(Джерело: розроблено автором)

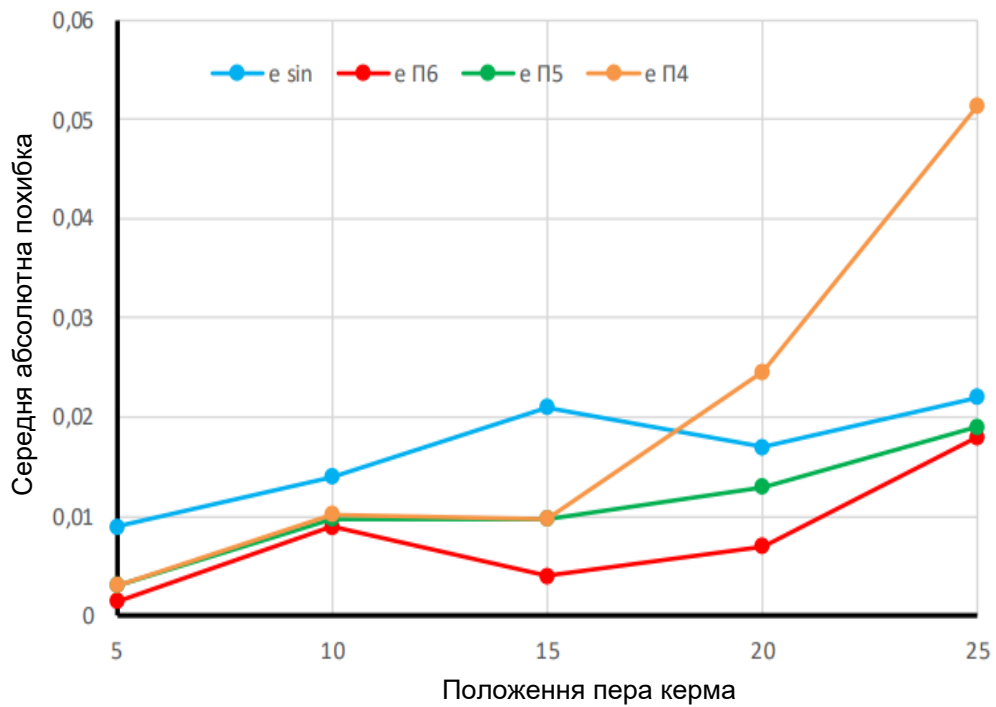


Рисунок 2.31 – Середні абсолютні похибки апроксимації змін курсу на періоді гальмування залежно від кута перекладки керма
(Джерело: розроблено автором)

Поліноміальні апроксимації 5-го ступеня та тригонометричними функціями мають практично однакову точність. Похибки поліноміальної апроксимації 4-го ступеня є більшими, а при перекладках керма більше 20° різко зростають.

У подальших дослідженнях для порівняння даних щодо змін курсу на періодах розгону та гальмування при повороті судна використовуватимемо апроксимації поліноміальною функцією шостого ступеня і тригонометричною функцією.

2.4 Математичні моделі прогнозування зміну курсової швидкості при маневруванні у стиснутих водах

Графіки згладжених й апроксимованих функціями (2.34), (2.35) на періоді розгону ΔK_1 значень кутової швидкості при повороті з перекладкою

керма 15° наведені на рис. 2.32. Згладжування вимірювань кутової швидкості повороту судна на основі функції Гауса є більш якісним порівняно з методами, використовуваними у дослідженнях [42, 43].

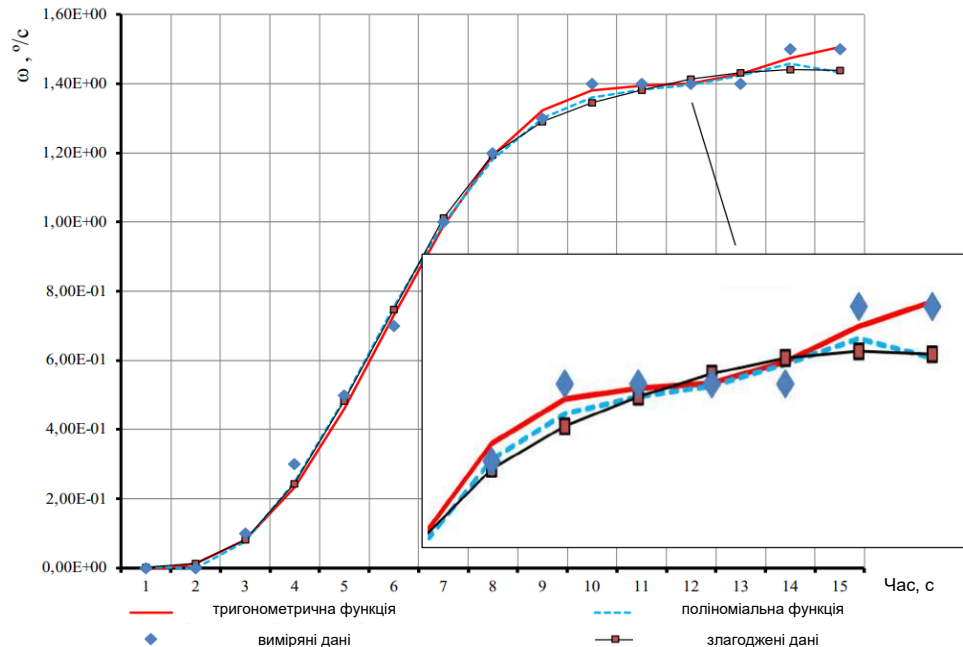


Рисунок 2.32 – Графіки згладжених та апроксимованих значень кутової швидкості повороту судна
(Джерело: розроблено автором)

Значення зміни курсу судна на періодах розгону ΔK_1 і гальмування ΔK_3 визначаються за формулами (2.34) і (2.35) і занесені до таблиць 2.5, 2.6.

Таблиця 2.5 – Значення зміни курсу на періодах розгону та періоді гальмування, апроксимованих тригонометричною функцією для різних кутів перекладки керма (Джерело: розроблено автором)

Коефіцієнт	Кут				
	5°	10°	15°	20°	25°
ΔK_1	4,311	9,838	12,827	16,023	18,223
ΔK_3	1,456	3,508	6,432	11,733	17,607

Таблиця 2.6 – Значення зміни курсу на періоді розгону та періоді гальмування, апроксимованих поліноміальною функцією шостого ступеня для різних кутів перекладки керма (Джерело: розроблено автором)

Коефіцієнт	Кут				
	5°	10°	15°	20°	25°
ΔK_1	4,19	9,634	12,791	15,74	18,555
ΔK_3	1,407	3,506	6,49	11,664	17,503

Значення зміни курсу на періоді усталеного руху ΔK_2 визначається з (2.34), (2.35) за знайденими періодами розгону ΔK_1 та гальмування ΔK_3 :

$$\Delta K_2 = \psi - (\Delta K_1 + \Delta K_3). \quad (2.37)$$

Отже, перед початком повороту судноводій самостійно вибирає необхідну кутову швидкість повороту, виходячи з навігаційної обстановки, на основі якої можна отримати елементи проміжного періоду повороту судна:

$$\Delta K_2 = \omega_{\text{зад}}(t_3 - t_2) = \psi - (\Delta K_1 + \Delta K_3). \quad (2.38)$$

Відповідно точка повороту визначається з формули (2.38) за значеннями змін курсу або за часом:

$$\text{ТОП}_{t_3} = \frac{\psi - (\Delta K_1 + \Delta K_3)}{\omega_{\text{зад}}}; \quad (2.39)$$

$$\text{ТОП}_K = \Delta K_1 + \Delta K_2 = \Delta K_1 + \omega_{\text{зад}}(t_3 - t_2) = \psi - \Delta K_3. \quad (2.40)$$

На підставі розрахункових значень змін курсу судна на періодах ΔK_1 та ΔK_3 (див. табл. 2.5, 2.6) при повороті з різними кутами перекладки керма для знаходження точки повороту використовуються значення з рис. 2.33.

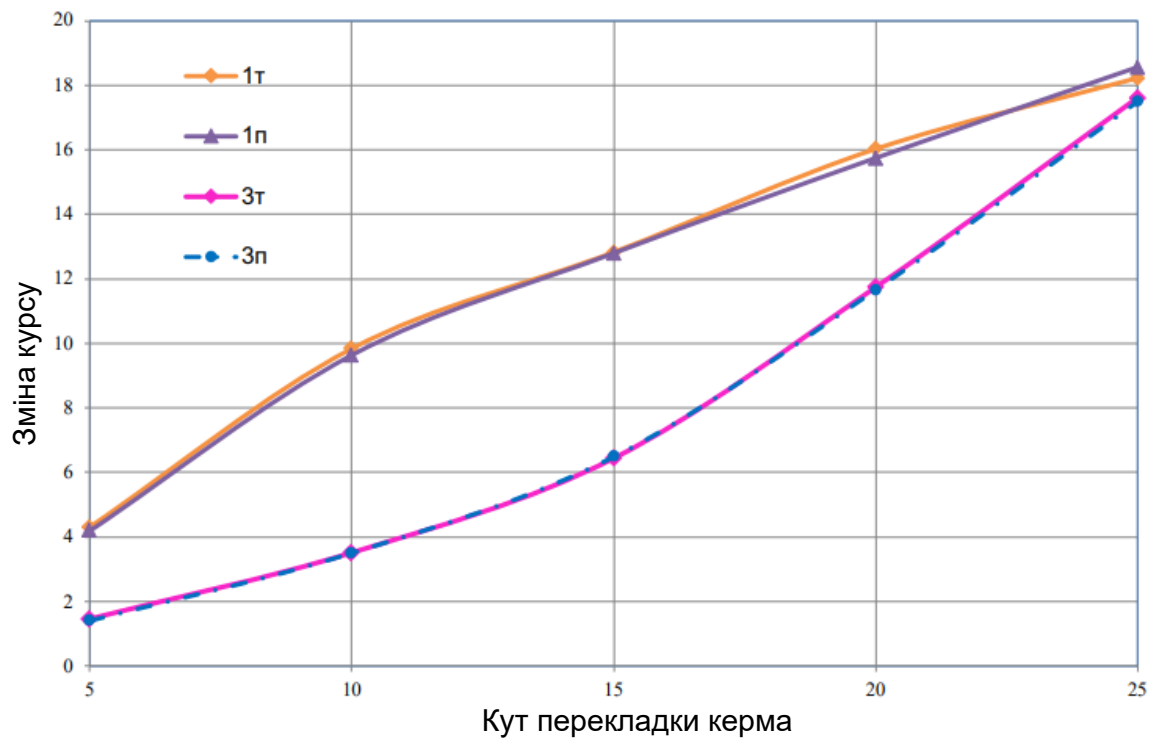


Рисунок 2.33 – Результати змін курсу судна на періодах розгону та гальмування при повороті для визначення ТОП:

1, 3 – періоди розгону та гальмування; т – тригонометрична апроксимація;
 п – поліноміальна апроксимація
 (Джерело: розроблено автором)

Датчик кутової швидкості на судні дозволяє розрахувати залежності для основних режимів ходу, доповнивши масив маневрених характеристик судна даними, використовуваними судноводієм під час виконання поворотів. Дані моделі застосовуються як регульовані параметри чи алгоритми налаштування СППР або систем автоматичного управління (САУ) судном на поворот.

2.5 Модель автоматичного управління рухом судна при маневруванні у стиснутих водах

Авторульовий (АР) як основний управляючий орган у системі автоматичного управління курсом судна (САУКС), реалізований, як правило, на електронній апаратурній базі, в тому числі приладах з програмованою

логікою та мікропроцесорах [47], що мають широкі можливості з управління та настройки. Сучасні АР бувають неадаптивними (без самонастроювання параметрів управління) та адаптивними (з частковим або повним самонастроюванням параметрів управління) [47-70]. Адаптивні АР, реалізуючи принципи адаптивного та оптимального управління, здатні автоматично підстроювати параметри управління у відповідь на зміну умов плавання судна.

Основу роботи авторульового складає пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) закон управління [30]:

$$u(t) = K_C \left[K_P \varepsilon(t) + K_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} + K_i \int \varepsilon(t) dt \right], \quad (2.41)$$

де $u(t)$ – сигнал управління;

$\varepsilon(t)$ – сигнал помилки;

K_P – коефіцієнт пропорційного каналу;

K_d – коефіцієнт диференційного каналу;

K_i – коефіцієнт інтегрального каналу;

K_C – загальний коефіцієнт підсилення системи.

Структурна схема САУКС з неадаптованим АР, який працює за ПІД-законом, наведена на рис. 2.34 [30].

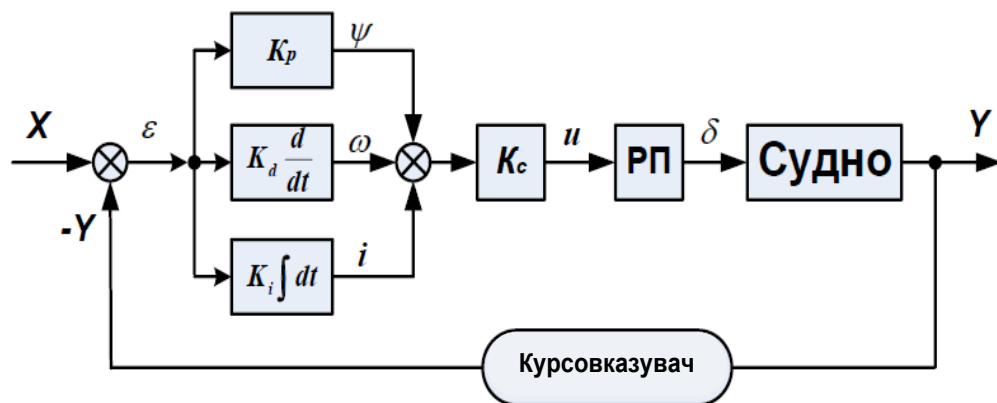


Рисунок 2.34 – Структурна схема системи управління курсом судна з АР на основі ПІД-закона управління (Джерело: розроблено автором)

На схемі 2.34 позначено: X – заданий курс; Y – дійсний курс; ψ – пропорційна складова сигналу управління; ω – диференційна складова сигналу управління; i – інтегральна складова сигналу управління; δ – кут перекладки керма; $РП$ – рульовий привід.

Наведена на рис. 2.34 САУКС з ПІД-регулятором є традиційною схемою управління курсом судна, яка використовується в АР. Але ще багато суден використовують неадаптивні АР, в яких налаштування параметрів управління проводиться вручну.

2.6 Математичні моделі морського хвилювання

Для коректної роботи СППР розроблені три математичні моделі зовнішніх збурень, що діють на морське судно. Дві з них засновані на застосуванні генератора білого шуму та формуючого фільтра, а третя модель – на підсумовуванні окремих гармонійних складових, що визначають основний діапазон морського хвилювання.

2.6.1 Модель морського хвилювання на основі формуючого фільтра

На динаміку морського судна значно впливає довкілля (вітер, хвилі і течії), особливо у стиснутих водах. Це вимагає врахування впливу вітрохвильового збурення при розробці методів управління рухом судна.

Морське хвилювання – це складний багатовимірний випадковий процес. Через неможливість побудови його повної адекватної математичної моделі застосовують досить прості моделі вітрохвильового збурення.

Морське хвилювання характеризується спектральною щільністю $S(w)$, яка визначає розподіл потужності за гармонійними складовими. Графік $S(w)$ є кривою резонансного типу, екстремуму якого відповідає переважна частота морського хвилювання. Тобто, для моделювання морського хвилювання

необхідно отримати випадковий процес із заданим спектром. У найпростішому випадку для цього застосовують генератор білого шуму з постійною спектральною щільністю та формуючим фільтром (рис. 2.35):

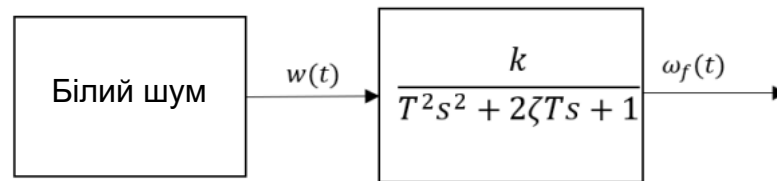


Рисунок 2.35 – Простіша модель стаціонарного морського хвилювання
(Джерело: розроблено автором)

$$T^2 \ddot{\omega}_f + 2T\zeta \dot{\omega}_f + \omega_f = k w(t); \quad (2.42)$$

або

$$\ddot{\omega}_f + \frac{2\zeta}{T} \dot{\omega}_f + \frac{1}{T^2} \omega_f = \frac{k}{T^2} w(t). \quad (2.43)$$

Як формуючий фільтр вибрано коливальну ланку з амплітудно-частотною характеристикою у вигляді резонансної кривої з відповідними періодом T , швидкістю ζ та інтенсивністю k згасання коливання, які підбираються так, щоб спектр його вихідного сигналу максимально збігався із заданим, що відповідає інтенсивності морського хвилювання. Так, випадковий процес стаціонарного збурення при $T = 2$, $\zeta = 0,005$, $k = 0,5$ наведено на рис. 2.36.

Наведена модель відповідає стаціонарному морському хвилюванню, ймовірнісні характеристики якого змінюються у часі.

2.6.2 Модель морського хвилювання, що розвивається

Важливою частиною досліджень системи управління рухом судна є вплив морського хвилювання, що посилюється або розвивається, що приводить до суттєвих змін характеристик відповідного випадкового процесу.

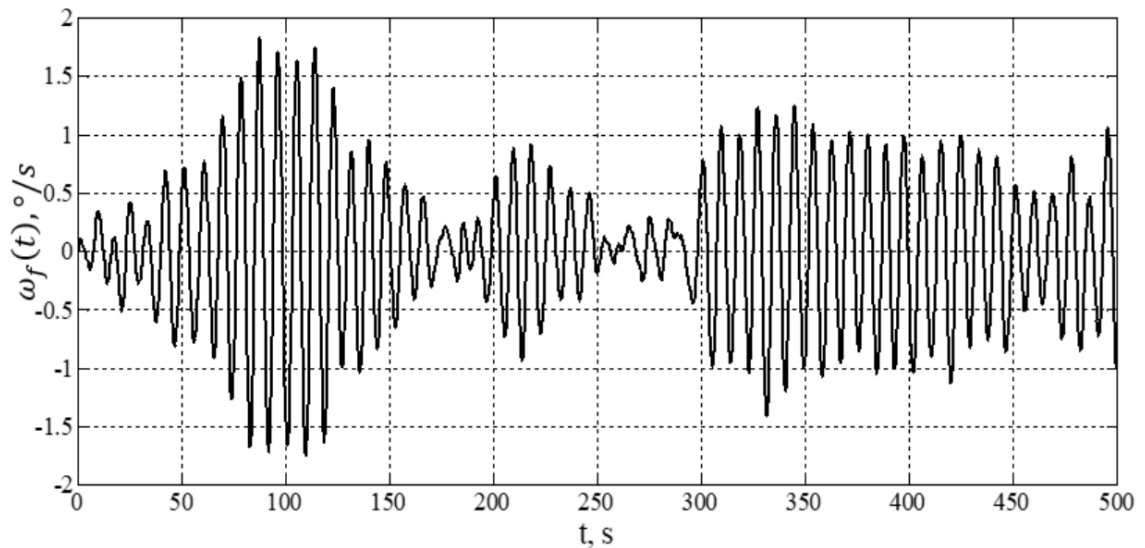


Рисунок 2.36 – Випадковий процес стаціонарного морського хвилювання
(Джерело: розроблено автором)

На рис. 2.37 наведена структурна схема моделі морського хвилювання, що розвивається, створена у системі Simulink, яка реалізує формуючий фільтр, що відповідає коливальній ланці зі змінними параметрами T , ζ , k .

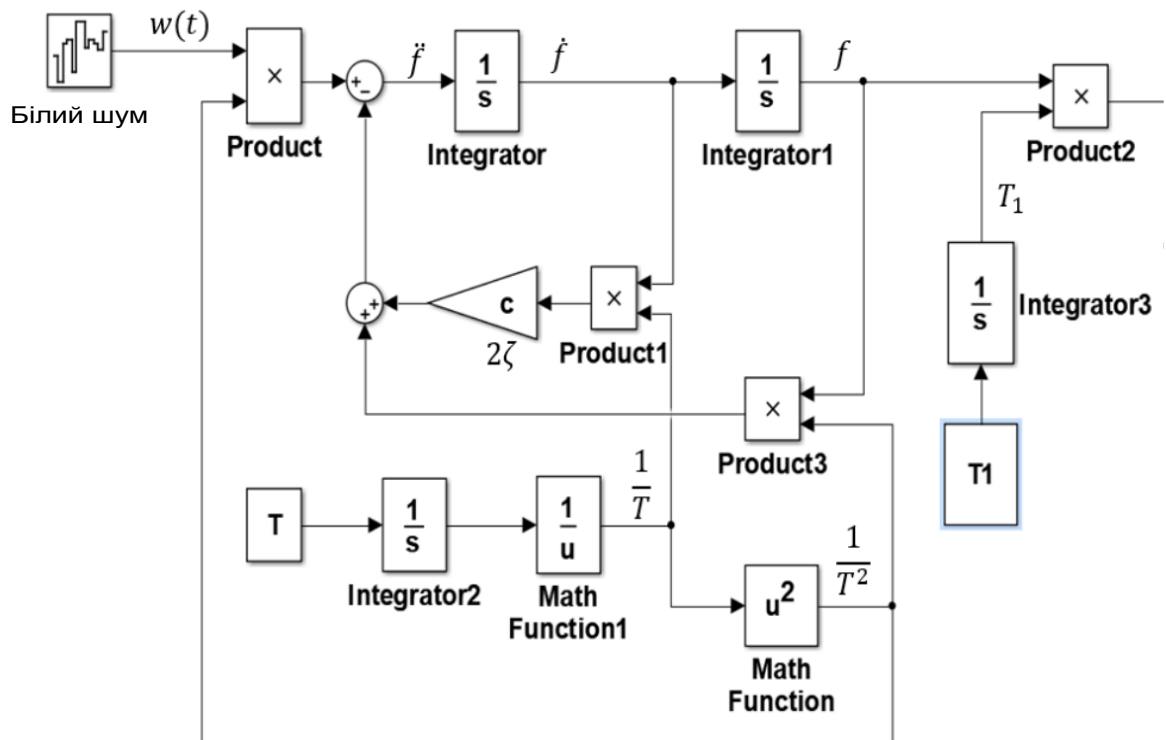


Рисунок 2.37 – Модель морського хвилювання
(Джерело: розроблено автором)

Наведена модель дозволяє згенерувати випадковий процес морського хвилювання, що розвивається, приклад якого наведений на рис. 2.38.

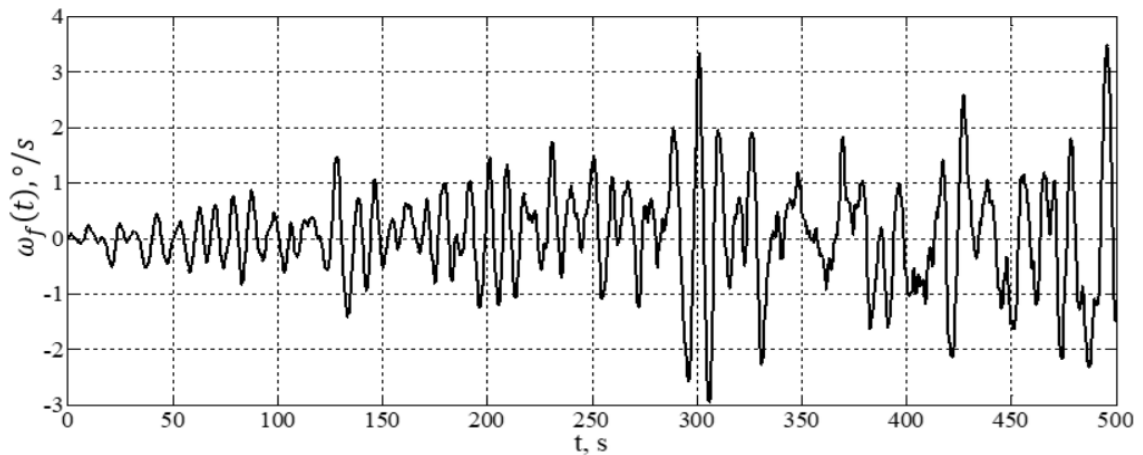


Рисунок 2.38 – Випадковий процес морського хвилювання, що розвивається
(Джерело: розроблено автором)

2.6.3 Модель морського хвилювання з дискретним спектром

Крім відмічених раніше характерних типів зовнішніх збурень, на судно також постійно впливає регулярне морське хвилювання, яке, зазвичай, характерне для відкритих акваторій. Воно характеризується висотою і довжиною (частотою) хвилі та її фазовою швидкістю. Розрізняють мілководні та глибоководні хвилі.

Регулярне морське хвилювання впливає на судно не за своєю власною, а з так званою уявною частотою, яка залежить від швидкості і напрямку руху судна.

Вплив регулярного морського хвилювання на рух судна за курсом є періодичним процесом, який за допомогою математичного апарату рядів Фур'є можна подати у вигляді суми n гармонійних складових. На рис. 2.39 наведено MATLAB/Simulink модель генератора однієї i -ої гармоніки у складі зовнішньої збурюючої дії. Задані на інтегратор початкові умови визначають амплітуду та фазу гармонійного сигналу.

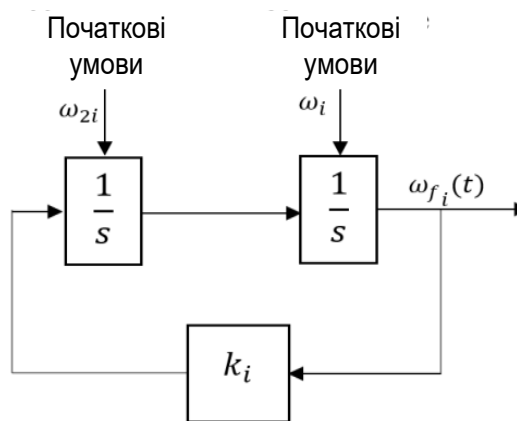


Рисунок 2.39 – Модель генератора i -ої гармоніки зовнішнього хвильового обурення (Джерело: розроблено автором)

Модель зовнішнього хвильового збурення, що містить n гармонійних складових, наведено на рис. 2.40.

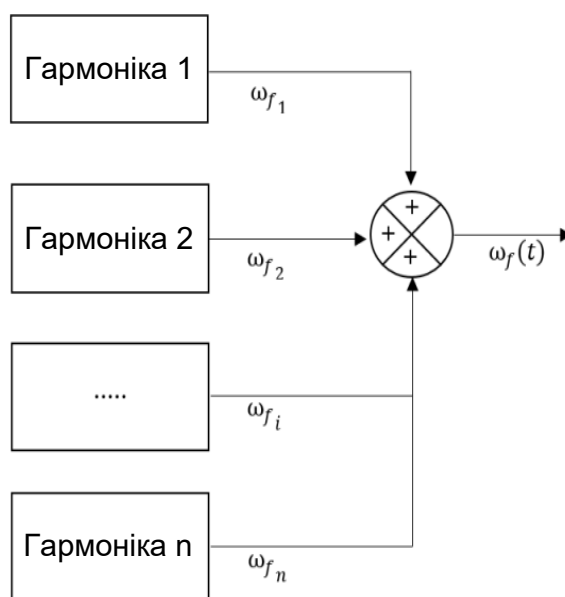


Рисунок 2.40 – Модель регулярного морського хвилювання (Джерело: розроблено автором)

Наведена схема дозволяє формувати сигнал $\omega_f(t)$, який відповідає періодичному зовнішньому збуренню, що діє на судно:

$$\omega_f(t) = \sum_{i=1}^r a_i \sin(\omega_i t + \varphi_i), \quad (2.44)$$

де a_i – коефіцієнт ряду Фур'є.

Приклади періодичних зовнішніх збурень при $n = 3$ і $n = 5$ наведені на рис. 2.41 і 2.42 відповідно.

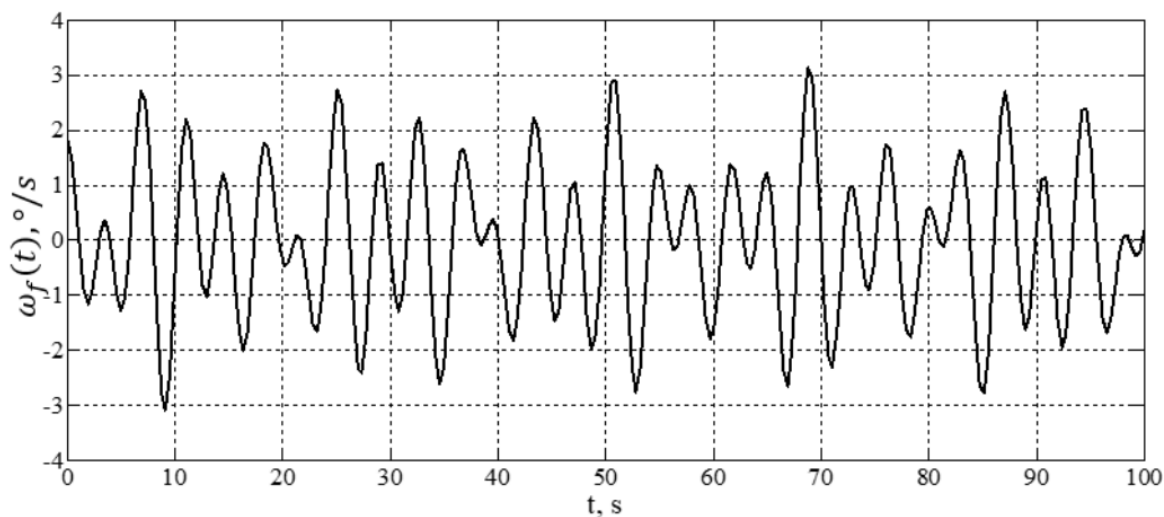


Рисунок 2.41 – Збурюючі впливи при $n = 3$

(Джерело: розроблено автором)

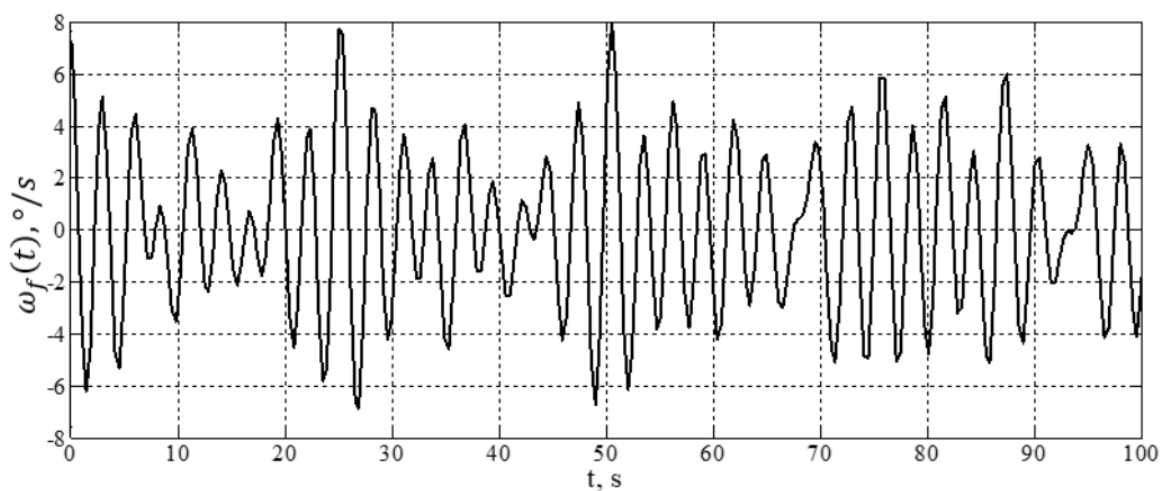


Рисунок 2.42 – Збурюючі впливи при $n = 5$

(Джерело: розроблено автором)

Таким чином, запропоновані моделі Simulink дозволяють імітувати

стаціонарне та морське хвилювання, що розвивається, які можуть бути використані для оцінки впливу вітрохвильового збурення на процес управління рухом судна в стиснутих водах та розробки відповідних методів.

Висновки до розділу 2

1. У загальному випадку математичні моделі, що описують рух судна, представляють собою систему складних нелінійних диференціальних рівнянь високого порядку з параметрами, що залежать від множини факторів. Істотна нелінійність динаміки й невизначеність параметрів керованості судна значно ускладнюють рішення завдання побудови системи управління його рухом.

2. Удосконалено модель автоматичного управління рухом судна при маневруванні у стиснутих водах, яка, на відміну від існуючих, відрізняється застосуванням адаптивного авторульового, який реалізує пропорційно-інтегрально-диференційний закон управління і дозволяє автоматично підстроювати параметри управління у відповідь на зміну умов плавання судна.

3. На практиці широко застосовуються спрощені нелінійні й лінеаризовані моделі, які є коректними для деяких часткових режимів руху судна.

4. Подальше вдосконалення систем управління рухом судна пов'язане з побудовою нових і вдосконаленням відомих моделей і методів визначення априорно невизначених параметрів і функціональних залежностей.

5. Розроблено модель руху судна за траєкторією з використанням градієнта допоміжної функції, адекватність якої доведено дослідженням у середовищі MATLAB/Simulink.

6. Запропоновано варіанти моделювання морського хвилювання, яке впливає на системи управління курсом судна, що використовують генератор білого шуму, який формує фільтр з постійними та змінними параметрами, і на сумуванні кількох гармонійних складових спектру морського хвилювання.

Основні результати розділу опубліковані в роботах [26], [29], [30] .

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА МЕТОДУ УПРАВЛІННЯ РУХОМ СУДНА В ПОРТОВІЙ АКВАТОРІЇ

3.1 Особливості автоматичного управління судном за траєкторією в стиснутих водах

Стиснуті води через посадки на міліну, зіткнення, навали на причальні спорудження та пришвартовані судна вважаються найнебезпечнішим для судноводіння районом плавання [27, 29]. Це обумовлено підвищеним потоком й інтенсивним маневруванням суден, швидкою зміною навігаційної обстановки, впливом приливних течій, наявністю банок і мілководдя.

Для забезпечення безпеки судноплавства у стиснутих водах Резолюція ІМО А.893(21) вимагає ретельного планування маршруту й маневрів згідно з такими вихідними даними [31]:

- а) точки початку і кінця повороту з урахуванням маневрених елементів, гідрометеорологічних та інших факторів навколишнього середовища;
- б) фактори забезпечення безпечної провідки й постановки до причалу (режими роботи ГД, рульового обладнання, швидкість та орієнтацію судна в момент контакту із причалом);
- в) встановлена безпечна швидкість поблизу навігаційних небезпек і причальних споруджень.

3.1.1 Формування програмної траєкторії

Траєкторія в стиснутих водах є комбінацією прямих і дуг окружностей. Вибір максимального кута між прямими (або дотичними за дугами окружностей у точці сполучення) й дотичними до дуг окружностей наступної ділянки траєкторії здійснюється за критерієм мінімізації відхилення судна від

заданої траєкторії з врахуванням маневрених характеристик судна.

Дуги окружності задаються рівняннями утворюючих їх окружностей: $(x_p - X_c)^2 + (y_p - Y_c)^2 = R_o^2$, де X_c, Y_c – координати центру окружності; R_o – радіус окружності.

Відхилення від траєкторії, заданою дугою окружності, є різницею між дистанцією від поточного положення до центру окружності та її радіусом:

$$\chi = \sqrt{(X - x_p)^2 + (Y - y_p)^2} - R_o. \quad (3.1)$$

Точки початку й кінця дуги визначаються автоматично за навігаційною обстановкою на карті, тому їх непотрібно визначати аналітично.

3.1.2 Завдання принципу управління

Проведене у розділі 2 моделювання показало, що найбільшу ефективність при управлінні судном за криволінійною траєкторією має регулятор, представлений такою системою рівнянь:

$$\begin{cases} \delta_p = a_{pr}(K_p + \Delta K_\chi - K) + a_d(\omega_p - \omega) + a_{dd}\hat{\omega} + a_m \int (K_p + \Delta K_\chi - K) dt; \\ \Delta K_\chi = b_{pr}\chi + b_d\dot{\chi} + b_m \int \chi dt. \end{cases} \quad (3.2)$$

Регулятор відрізняється наявністю в диференціальному каналі заданої кутової швидкості для підвищення точності управління, враховуючи кривизну траєкторії. Задана кутова швидкість визначається через заданий радіус кривизни поточної ділянки траєкторії й поточну поздовжню швидкість.

$$\omega_p = \frac{v}{R_o}. \quad (3.3)$$

При перевищенні заданою кутовою швидкістю максимальної кутової, яку судно здатне розвинути при максимальній перекладці керма, необхідно завчасно знизити поздовжню швидкість. При недостатності цих заходів для збільшення упору потоку води на пері керма необхідно давати поштовхи машиною, тобто маневрування швидкістю є складним заходом.

Для автоматичної навігації при здійсненні проводки за траєкторією попередньо планується поздовжня швидкість або дискрети ходу ГД для різних ділянок траєкторії з її подальшим автоматичним корегуванням.

Морська практика і результати модельних експериментів доводять основні переваги завдання траєкторії дугами окружностей:

- 1) простота контролю положення судна щодо траєкторії;
- 2) простота опису траєкторії, коли задаються координати центру, радіус і полярні координати початку й кінця дуги;
- 3) простота управління, що забезпечує мінімум керуючих впливів.

3.2 Метод автоматичного управління судном за траєкторією в портовій акваторії

Прийняте рішення про постановку до причалу порту у сукупності з різноманітним навігаційним, гідрометеорологічним та іншим факторів свідчать про практичну неповторюваність виконання судноводієм даного завдання. Це підтверджує практика маневрування в стиснутих акваторіях і при швартових операціях, коли постфактум судноводії не можуть чітко визначити причинно-наслідковий зв'язок обставин проводки та прийняття рішень щодо виконання того або іншого виду маневру [29, 30]. Також при рівнозначних умовах дії лоцмана при постановці до одного причалу різних суден суттєво відрізняються. Отже, на порядок денний виходить завдання формалізації та уніфікації траєкторій й способів проводки за нею суден в умовах обмеженої

акваторії портів та підходів до причальних споруджень.

Математична модель формування програмних рухів судна гладкими кривими у портовій акваторії описується апроксимуючою сигмоїдальною траєкторною функцією (СТФ) $\Pi^c(S)$, яка описує режими зміни кінематичних параметрів (курс, швидкість, кут дрейфу) руху судна за певною траєкторією при заданих початкових умовах:

$$\Pi^c(S) = - \frac{\Pi_{max}^c - \Pi_0^c}{1 + \exp\left(4(S_{\Pi}^c + \Delta S_{\Pi}^c - S_i) \frac{g_{\Pi_{mn}^c}}{\Pi_{max}^c - \Pi_0^c} R_{\Pi}^c\right)}, \quad (3.4)$$

де mn – індекс значення параметра у середній точці перехідного періоду маневру;

ΔS_{Π}^c – поправка, що враховує зсув СТФ за початкових умов маневру;

S_i, S_{Π}^c – відстань за траєкторією від початкової позиції до поточної до точки перегину СТФ;

R_{Π}^c – коефіцієнт зміни нахилу СТФ від управляючого впливу;

$\Pi^c, \Pi_{max}^c, \Pi_0^c$ – кінематичний параметр, його максимальне та початкове значення відповідно.

У СППР судноводія задані кінематичні параметри судна (курс, кутова й поздовжня швидкості) визначатимуться як градієнти за траєкторією (рис. 3.1).

Перевизначимо задану поздовжню швидкість за траєкторією $v(S)$ в залежність від часу, використовуючи відомі фізичні співвідношення:

$$\begin{aligned} v(S) &= \frac{dS}{dt}; \\ t &= \int dt = \int \frac{dS}{v(S)}; \\ t &= \frac{S_i}{v_{max}^c - v_0^c} - \frac{\exp\left(4(S_v^c + \Delta S_v^c - S_i) \frac{g_{v_{mn}^c}}{v_{max}^c - v_0^c} R_v^c\right)}{g_{v_{mn}^c} R_v^c}, \end{aligned} \quad (3.5)$$

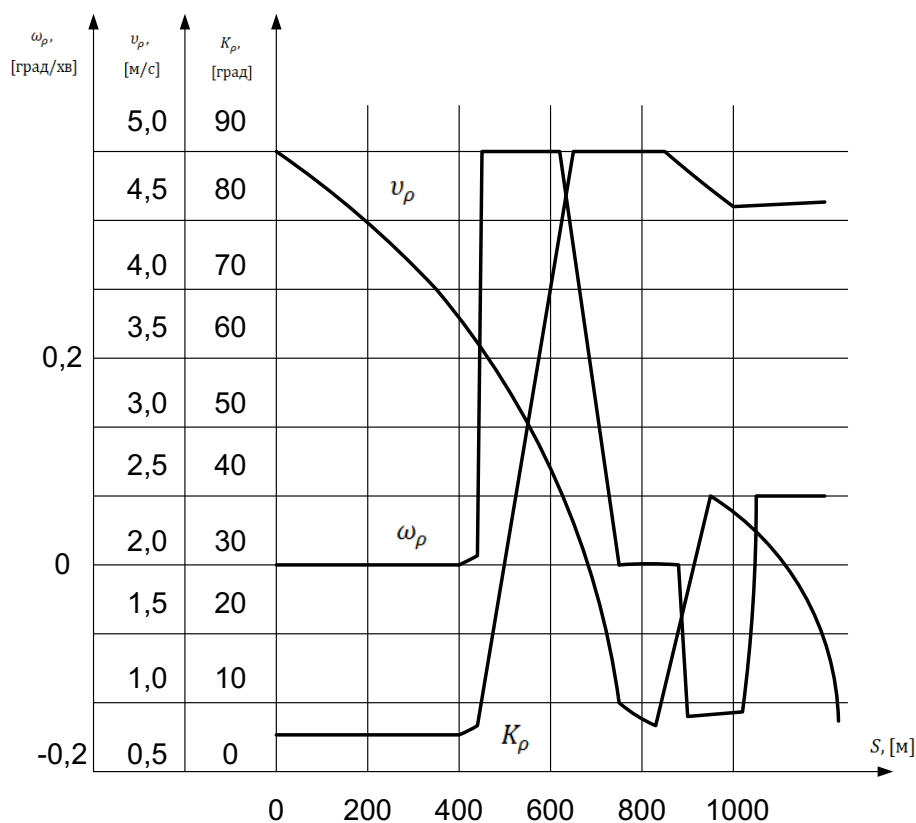


Рисунок 3.1 – Градієнти кінематичних параметрів руху судна за траєкторією
(Джерело: розроблено автором)

де v_{max}^c , v_0^c – максимальне й початкове значення поздовжньої швидкості.

Побудуємо залежність пройденої відстані за траєкторією від часу (рис. 3.2).

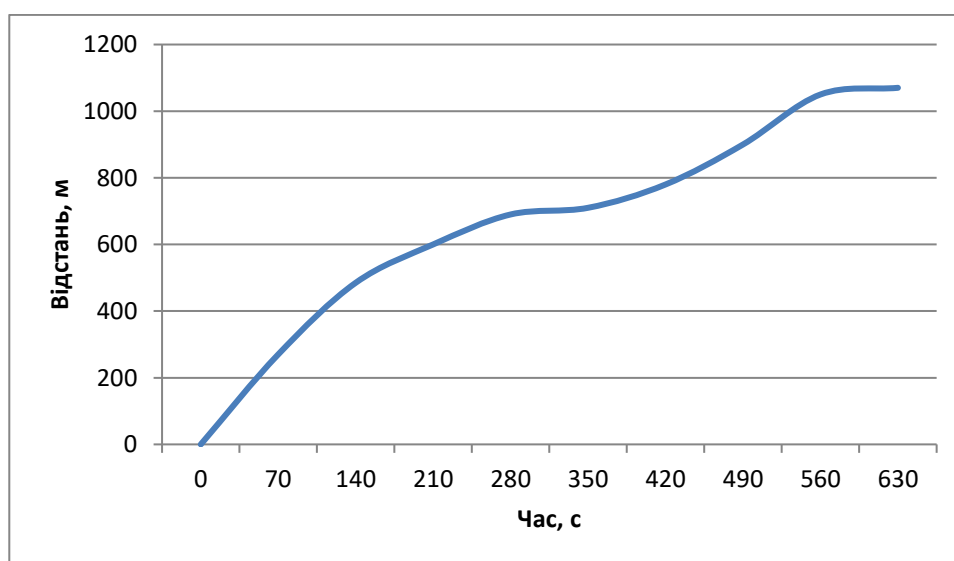


Рисунок 3.2 – Зміна пройденої за траєкторією відстані з часом
(Джерело: розроблено автором)

Отримана залежність $S(t)$ підставляється у формулу (3.5) та знаходяться залежності $v(t)$, $K(t)$, $\omega(t)$.

Множина координат точок заданої СТФ траєкторії визначається системою рівнянь

$$\begin{cases} x_p = X_0 + \int v_p(t) \sin(K_p(t) + a_p(t)) dt; \\ y_p = Y_0 + \int v_p(t) \cos(K_p(t) + a_p(t)) dt, \end{cases} \quad (3.6)$$

де v_p , K_p – задані у формі сигмоїдальних функцій швидкість і курс;

a_p – заданий кут дрейфу;

X_0 , Y_0 – початкові координати траєкторії.

Підстановка кінематичних параметрів вигляду (3.5) до системи рівнянь (3.6) робить останню складною і не дозволяє визначити відхилення судна від заданої СТФ траєкторії аналітично. Тому відстань від точки з координатами (X, Y) до найближчої точки траєкторії з координатами (x_p, y_p) , що належать множині координат точок заданої траєкторії, знаходиться повним перебором:

$$\chi = \min \left\{ \sqrt{(X - x_p)^2 + (Y - y_p)^2} \right\}. \quad (3.7)$$

Проведене моделювання управління судном за траєкторією показало переваги завдання траєкторії СТФ:

- 1) об'єкт управління може фізично реалізувати задану траєкторію;
- 2) траєкторія задається безперервною гладкою кривою;
- 3) не має потреби додаткового завдання точок початку маневру;

Недоліками завдання траєкторії СТФ є такі:

- 1) необхідність завдання всіх точок траєкторії з певною дискретністю;
- 2) складність визначення відхилення від траєкторії;
- 3) необхідність врахування взаємного впливу кінематичних параметрів.

3.3 Автоматичне управління рухом судна за криволінійною ламаною траєкторією у стиснутих водах

3.3.1 Автоматичне управління рухом судна у річковій акваторії

Нехай за контрольний район плавання обрана ділянка акваторії ріки Міссісіпі з параметрами траєкторії, наведеними на рис. 3.3.

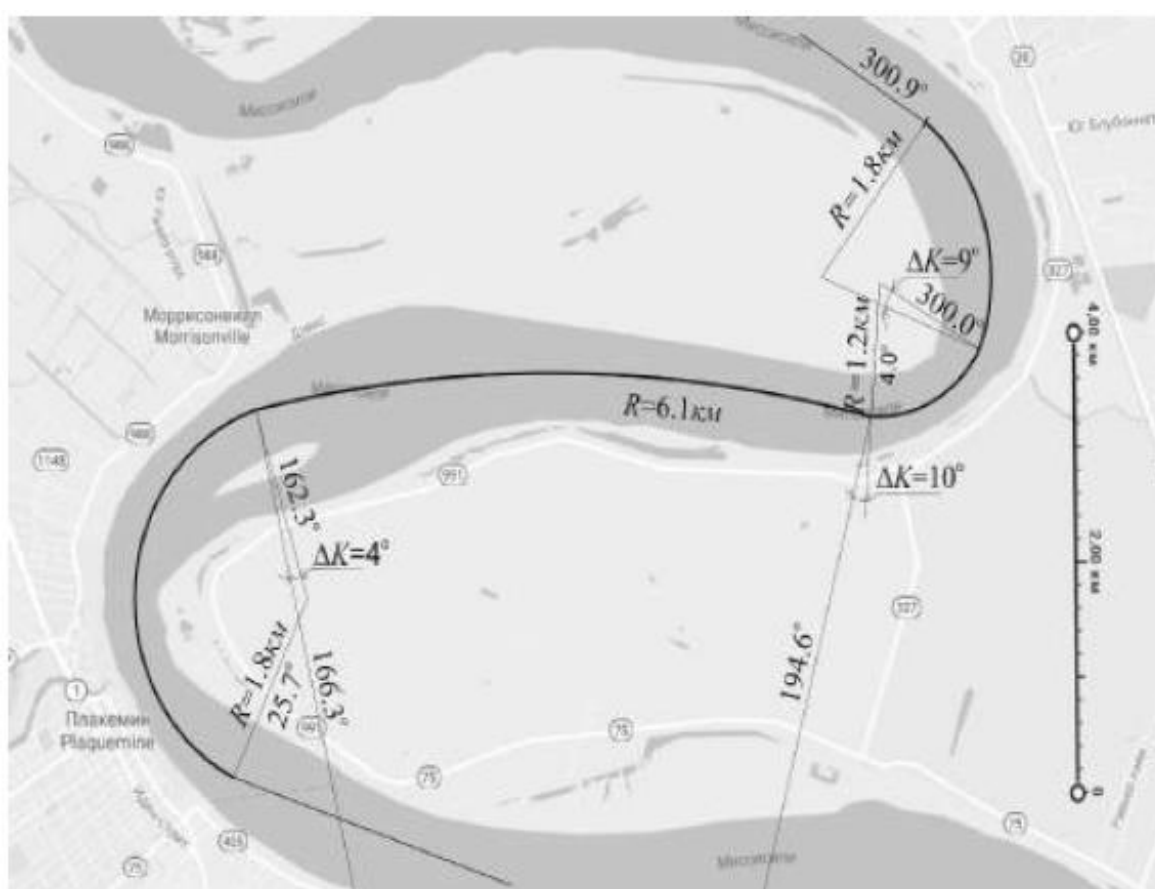


Рисунок 3.3 – Траєкторія, задана дугами окружностей
(Джерело: розроблено автором)

Необхідно виконати S-подібний маневр й за визначеною траєкторією у вигляді трьох сполучених дуг окружності із заданими координатами центрів та радіусами. Координати точок сполучення дуг визначаються автоматично з електронної карти СППР безпеки судноводіння. Плануються точки початку й

кінця маневру щодо переходу з однієї дуги на наступну.

Параметри регулятора виду (3.2), за якими метод є ефективним, наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Параметри регулятора (4.8) (Джерело: розроблено автором)

Параметр	a_p	a_i	a_d	a_{dd}	b_p	b_i	b_d
Значення	4	0,002	-200	-2000	0,05	0,0005	0

Перемикання між режимами малий передній хід (МПХ), середній передній хід (СПХ), повний передній хід (ППХ) у маневреному режимі двигуна забезпечує управління швидкістю при проходженні каналів та річок.

Повна зупинка двигуна і режим самий малий передній хід (СМПХ) забезпечують безпечну розбіжність суден і прохід портових споруджень й ошвартованих суден, тобто до втримання судна на траєкторії не ставляться.

Механізм управління поздовжньою швидкістю на борту судна полягає в звичайному релейному перемиканні режимів роботи ГД, що змінює частоту обертання гвинта. Але метод на основі простого релейного перемикання буде неефективним, коли задана швидкість перебуває на границі діапазонів попередньо встановлених режимів роботи ГД. У цьому разі для дотримання заданої швидкості режими роботи машини будуть безупинно перемикатися. Цей недолік усувається використанням нечіткого регулятора, який працює у діапазоні заданих швидкостей, функції приналежності (ФП) яких вибираються лінійними трикутними з перетинанням діапазонів у межах 30% (рис. 3.4). Для режимів роботи машини функції задаються синглтонами (рис. 3.5) [30].

За структуру нечіткої системи обрано Сугено, яка, на відміну від Мамдані, підтримує синглтонні ФП. На вхід нечіткого регулятора заданої швидкості подаються лінійні функції приналежності (крім ППХ). Нелінійні ФП перевантажують обчислювальні системи, скорочуючи їх швидкодію. Терм ППХ має сигмоїдальну ФП з областю значень $(-\infty ; +\infty)$. Тому відсутня необхідність визначати максимальне значення заданої швидкості.

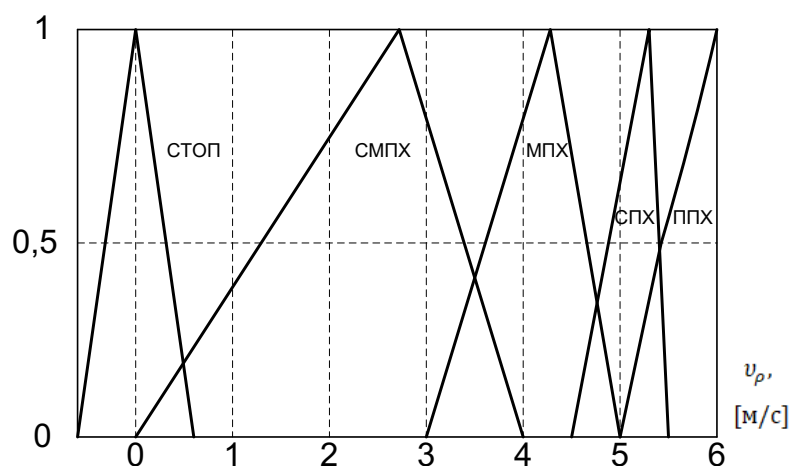


Рисунок 3.4 – Функції приналежності заданих поздовжніх швидкостей
(Джерело: розроблено автором)

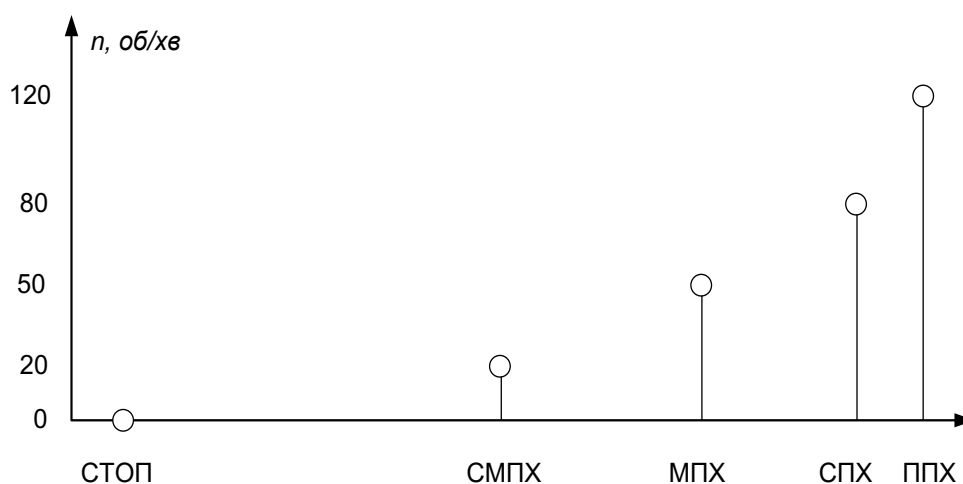


Рисунок 3.5 – Відповідні режими роботи головних двигунів
(Джерело: розроблено автором)

За результатами моделювання (рис. 3.6) для ділянки акваторії ріки, зображеної на рис. 3.3, встановлено таке.

- 1) Утримання судна на траєкторії з постійним радіусом кривизни за допомогою регулятора (3.2) є адекватним з позиції судноводіння.
- 2) Відхилення на ділянках траєкторії з постійним радіусом кривизни не перевищує 10 м.
- 3) При переходах між дугами траєкторії виникають відхилення, які не перевищують 30 м.

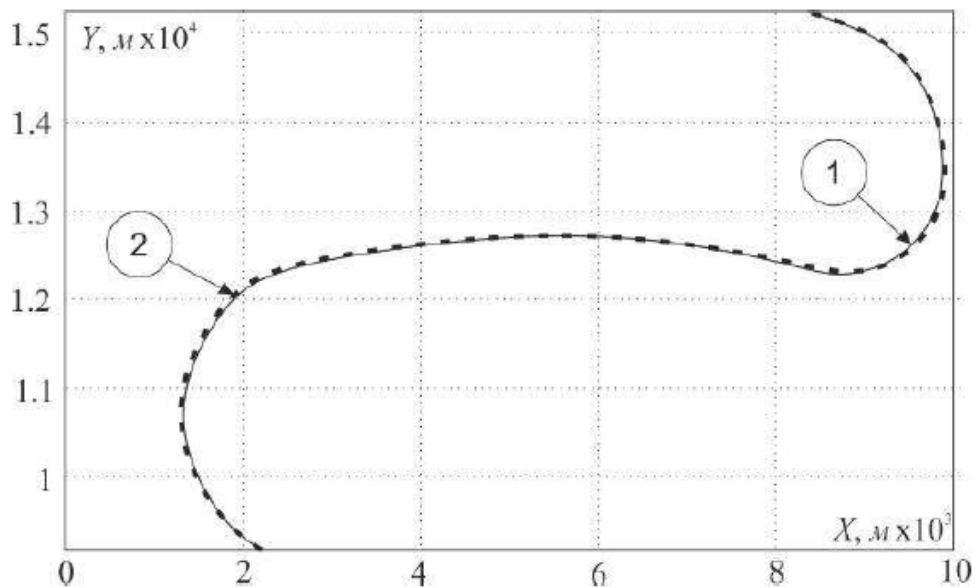


Рисунок 3.6 – Управління судном на криволінійній траєкторії:

1 – виконана траєкторія; 2 – програмна траєкторія

(Джерело: розроблено автором)

4) Одержані відхилення є допустимою помилкою управління, що обумовлена фізичною неможливістю судна повторити траєкторію, задану дугами окружностей в околиці її вершин.

3.3.2 Автоматичне управління рухом судном за гладкою криволінійною траєкторією в припортовій акваторії

За контрольну акваторію для моделювання процесів проводки судна до причалу розглянемо конфігурацію умовного порту, зображену на рис. 3.7, де крива 1 показує типовий трек судна при лоцманській проводці вхідних суден до причалу 3, а крива 2 – траєкторію, задану системою рівнянь (3.6) [30, 31].

Параметри для даного моделювання вибрані з таблиці 3.1, а структура й параметри регулятора курсу задані виразом (3.2). Отже, даний регулятор автоматично враховує радіус кривизни траєкторії, незалежно від того, чи він є постійним як у випадку дуг окружності, або змінним як у випадку сигмоїдальних функцій [71-75].

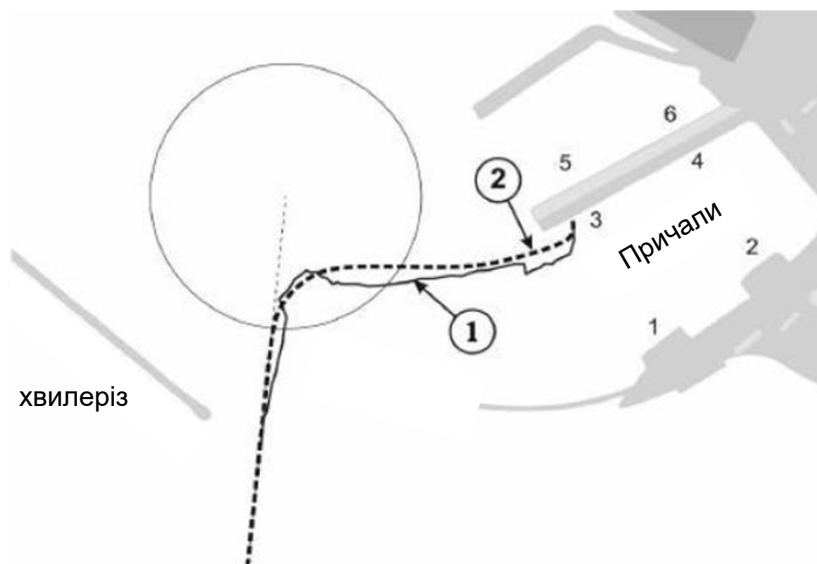


Рисунок 3.7 – Підхід до умовного порту
(Джерело: розроблено автором)

Регулятор поставив судно до причалу, але при цьому припустив два відхилення від заданої траєкторії (рис. 3.8). Це пояснюється недостатнім врахуванням зниження керованості судна при зниженні поздовжньої швидкості при завданні траєкторії траєкторними функціями, зміною поздовжньої швидкості залежно від кутової і нестачою ресурсів керованості судна.

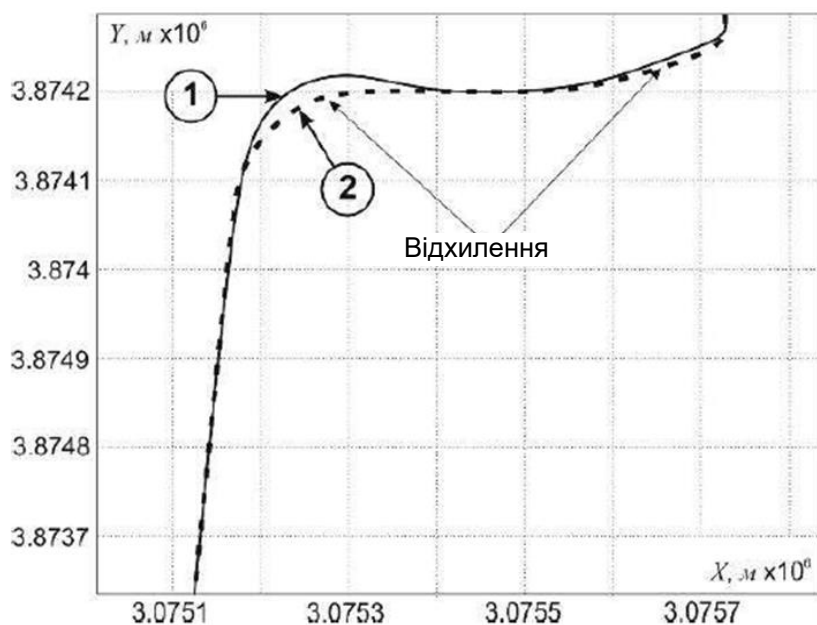


Рисунок 3.8 – Шлях судна та виниклі відхилення при русі за траєкторією
(Джерело: розроблено автором)

Дана проблема вирішується шляхом урахування у методі управління умов, коли регулятор надає машині необхідні впливи при недостатній ефективності керма. Крім того, для більш пологої й завчасної зміни курсу і кутової швидкості корегуються траєкторні функції. Нарешті, на ділянках з відхиленнями для подолання нестачі ресурсів можливе використання буксирів.

Висновки до розділу 3

1. Запропоновані способи завдання траєкторії руху судна для різних районів плавання із властивими ним умовами навігації, що базуються на методах аналітичної геометрії та фізичних принципах маневрування судном. Використаний математичний апарат для завдання ліній траєкторій довів його ефективність, що полегшує роботу автоматичних регуляторів.

2. Для кожного з типів траєкторій розроблений відповідний за функціоналом принцип формування управляючих впливів та псевдоуправлінь, що базується на теорії автоматичного управління. Регулятори базуються на принципах ПІД-управління. Введення додаткового каналу кутового прискорення при управлінні нестійким на курсі судном дозволяє перетворити коливальні перехідні процеси в аперіодичні. Даний підхід розширює область стійкості системи управління й суттєво підвищує якість управління за критеріями економічності й безпеки за рахунок можливості підвищення коефіцієнта підсилення системи управління.

3. Вперше розроблено метод управління рухом судна в портовій акваторії, який базується на застосуванні апроксимуючої сигмоїдальної траєкторної функції, що описує режими зміни кінематичних параметрів (курс, швидкість, кут дрейфу) руху судна за певною траєкторією при заданих початкових умовах і дозволяє описувати програмні рухи судна гладкими

кривими у портовій акваторії.

4. За результатами моделювання руху судна на кожному з типів траєкторій з обраним для них регулятором відхилення від заданих траєкторій не перевищують допустимого за критеріями безпеки значення для кожного з районів плавання. Це підтверджує застосовність запропонованих регуляторів при рішенні завдань утримання судна на відповідних типах траєкторій.

Основні результати розділу опубліковані в роботах: [27], [29], [30], [31].

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА МЕТОДІВ ОБХОДУ СТАТИЧНИХ ПЕРЕШКОД ТА
РОЗХОДЖЕННЯ СУДЕН В СТИСНУТИХ ВОДАХ НА ОСНОВІ
ГРАДІЄНТА ДОПОМІЖНОЇ ШТРАФНОЇ ФУНКЦІЇ

4.1 Формування допоміжних штрафних функцій

Введемо функцію $p_j(x_{pj}, y_{pj}, x, y)$, де (x_{pj}, y_{pj}) – координати перешкоди, $j = \overline{1 \dots m}$, m – кількість перешкод, (x, y) – координати судна, яку надалі будемо називати “допоміжною штрафною функцією”. Для компактності запису аргументи функції p_j далі можуть бути опущені.

Модуль вектор градієнта допоміжної штрафної функції, зв’язаної з конкретною перешкодою з координатами (x_{pj}, y_{pj}) , збільшується зі зменшенням відстані до перешкоди і спрямовується до нуля зі зростанням відстані від судна до перешкоди. Допоміжна штрафна функція, призначена для коригування програмного (бажаного) значення курсу, визначається конкретною ділянкою первинно побудованої траєкторії руху судна. При побудові методу корекції програмної траєкторії руху судна можуть використовуватися різні допоміжні штрафні функції p_j , які відповідають j -ій перешкоді [31, 76-82]:

$$p_j = \gamma_1 e^{-\gamma_2((x_{pj}-x)^2 + (y_{pj}-y)^2)}; \quad (4.1)$$

$$p_j = \frac{\gamma_1}{1 + \gamma_2((x_{pj}-x)^2 + (y_{pj}-y)^2)}; \quad (4.2)$$

$$p_j = \arctg \gamma((x_{pj}-x)^2 + (y_{pj}-y)^2); \quad (4.3)$$

$$p_j = \arctg \left(\gamma \sqrt{((x_{pj}-x)^2 + (y_{pj}-y)^2)} \right), \quad (4.4)$$

де p_j – допоміжна штрафна функція, яка відповідає j -ій перешкоді;

j – номер перешкоди, $j = \overline{1 \dots m}$;

γ_1, γ_2 – коефіцієнти.

На рисунках 4.1 (координати перешкоди $x_{pj} = 0, y_{pj} = 0$; $\gamma = 0,2$) та 4.3 (координати перешкоди $x_{pj} = 0, y_{pj} = 0$; $\gamma_1 = 1, \gamma_2 = 1$) наведені приклади поверхонь, побудованих в обчислювальному середовищі MATLAB на основі допоміжних штрафних функцій p_j , а на рисунках 4.2 і 4.4 – приклади полів вектора градієнта для цих допоміжних штрафних функцій відповідно.

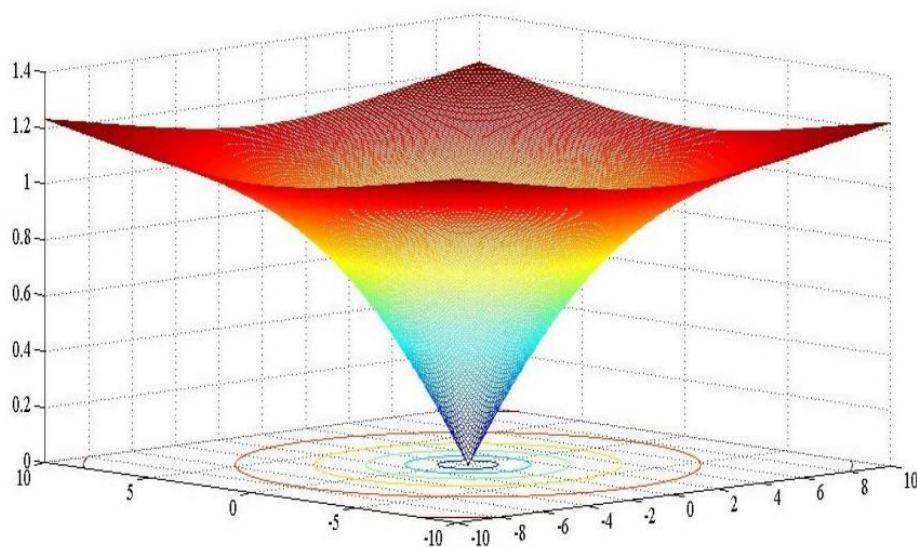


Рисунок 4.1 – Поверхня, побудована для допоміжної штрафної функції виду (4.4)

(Джерело: розроблено автором)

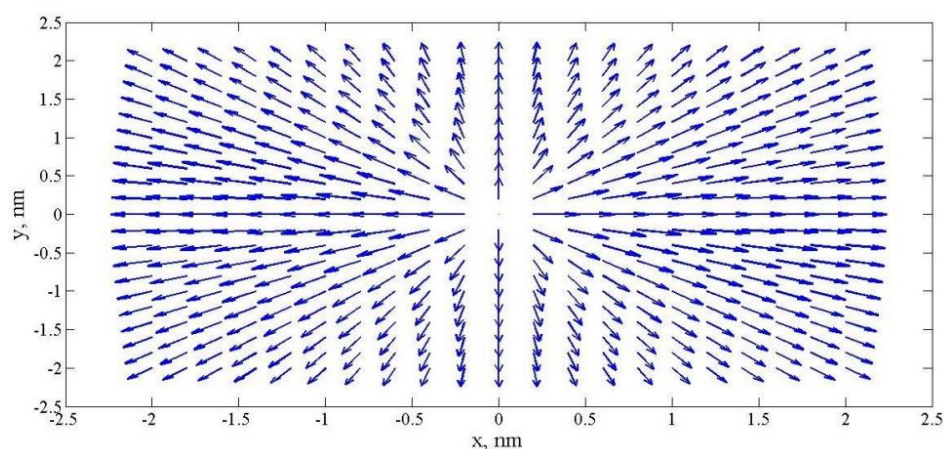


Рисунок 4.2 – Поле вектора градієнта для допоміжної штрафної функції виду (4.4)

(Джерело: розроблено автором)

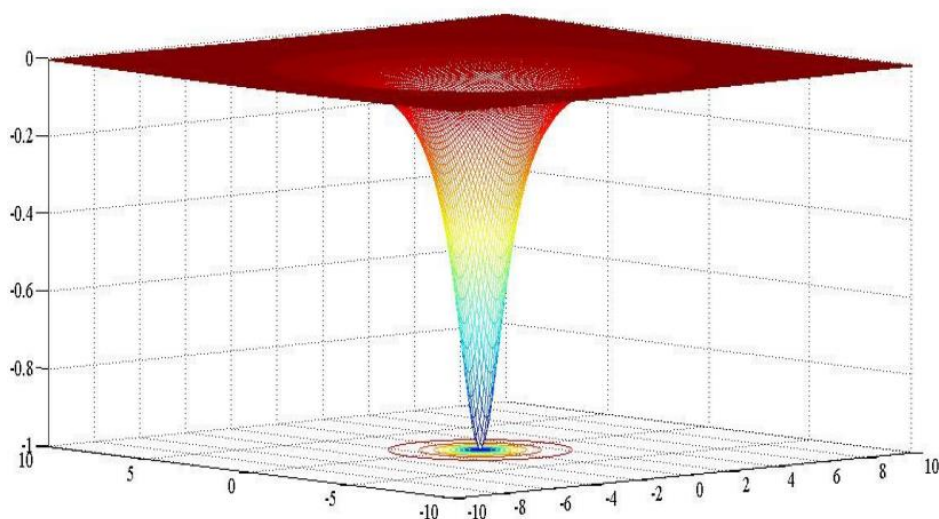


Рисунок 4.3 – Поверхня, побудована для допоміжної штрафної функції виду (4.2)
(Джерело: розроблено автором)

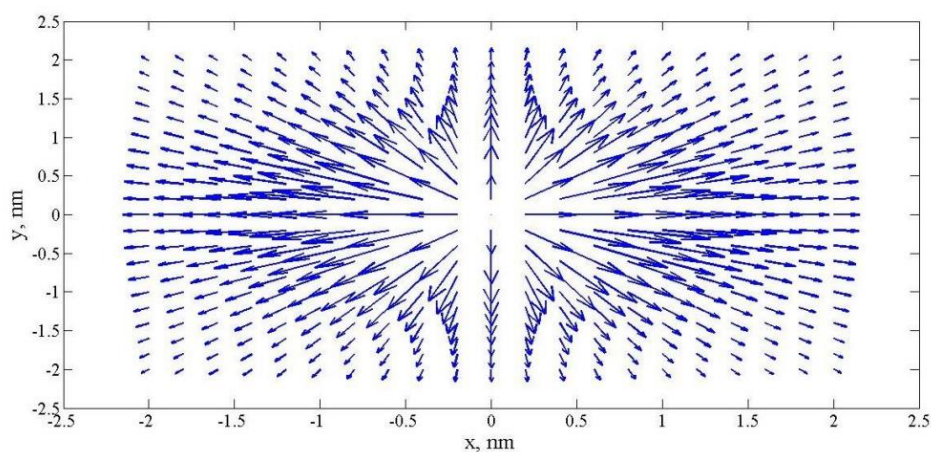


Рисунок 4.4 – Поле вектора градієнта для допоміжної штрафної функції виду (4.2)
(Джерело: розроблено автором)

Що стосується протяжної (неточкової) перешкоди, допоміжна штрафна функція може бути обрана таким чином, що її вектори градієнта спрямовані від перешкоди за всією її довжиною. Прикладом такої функції є (4.4), поля векторів градієнта якої при $c = 0,1$ та $c = 0,05$ наведені, відповідно, на рисунках 4.5 та 4.6.

Графіки показують, що поблизу перешкоди модуль вектора градієнта має найбільше значення. По мірі віддалення від перешкоди модуль вектора градієнта суттєво зменшується і прагне до нуля.

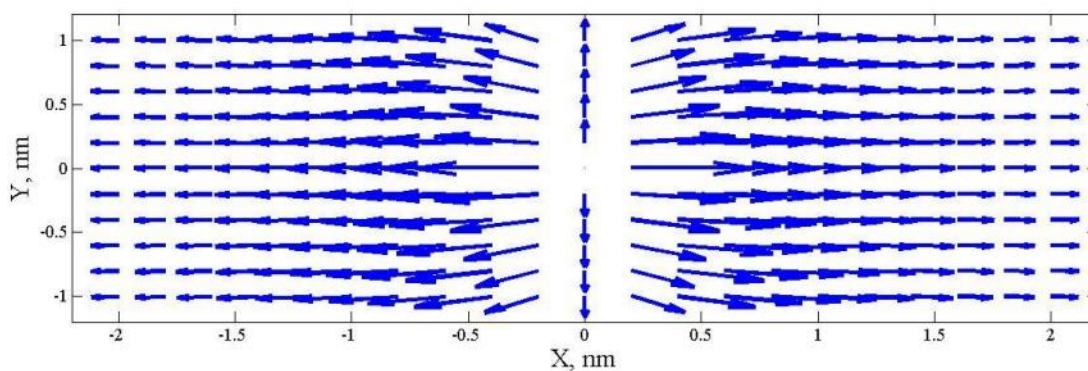


Рисунок 4.5 – Поле векторів градієнта функції $F_i(x, y)$ при $c = 0,1$
(Джерело: розроблено автором)

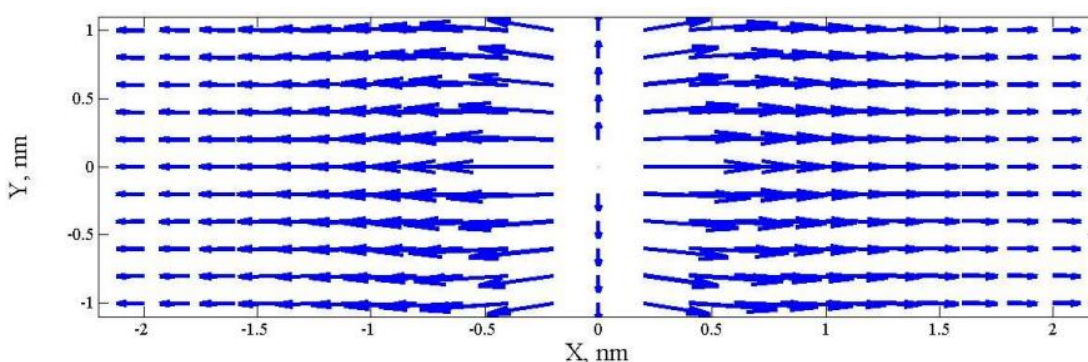


Рисунок 4.6 – Поле векторів градієнта функції $F_i(x, y)$ при $c = 0,05$
(Джерело: розроблено автором)

4.2 Метод обчислення програмного значення курсу судна за наявності перешкод

У розділі 2 для побудови поля векторів градієнта, що визначає бажаний (програмний) напрям руху судна, вводилася допоміжна функція $F_i(x, y)$, вектор градієнта якої визначає напрямок руху судна до програмної траєкторії та вздовж неї.

При перешкоді поблизу траєкторії додавання вектора градієнта функції p_j до градієнта функції F_i змінюватиме (коригувати) раніше запланований курс судна, відводячи його від перешкоди. У процесі обходу перешкоди та віддаленні від неї модуль вектора градієнта функції p_j прагне до нуля (з

пред'явлених до функції p_j вимог), і судно повертається на вихідну заплановану траєкторію. Для реалізації методу введемо функцію $Q_i(x, y)$:

$$Q_j(x, y) = F_i^0(x, y) + w_{xi}x + w_{yi}y + \sum_{j=1}^m p_j(x_{pj}, y_{pj}, x, y); \quad (4.5)$$

де i – номер ділянки траєкторії судна; w_{xi} , w_{yi} – координати напрямного вектора для i -ої ділянки траєкторії руху судна.

Для ілюстрації основної ідеї методу побудуємо поле градієнтів для функції Q_i . Для визначеності задамо конкретний вигляд та параметри допоміжної штрафної функції p_j :

$$p_j = \arctg \gamma \left((x_{pj} - x)^2 + (y_{pj} - y)^2 \right); \quad (4.6)$$

Розглянемо випадки різної кількості та розташування перешкод [83-86]. Для побудови використовувалося середовище програмування MATLAB.

Характер зміни поля векторів градієнта функції $Q_i(x, y)$ зі зміною параметрів γ_1 та γ_2 ілюструють рисунки 4.5 – 4.8.

Випадок 1. Кількість перешкод $m = 1$, координати перешкод $x_{p1} = 0$, $y_{p1} = 5$ (рис. 4.7), $x_{p1} = 0$, $y_{p1} = 1$ (рис. 4.8), $x_{p1} = 0$, $y_{p1} = 1$ (рис. 4.9), коефіцієнти γ_1 , γ_2 дорівнюють, відповідно, $\gamma_1 = 100$, $\gamma_2 = 0,1$ (рис. 4.7), $\gamma_1 = -1$, $\gamma_2 = 1$ (рис. 4.8), $\gamma_1 = 4$, $\gamma_2 = 1$ (рис. 4.9). Координати початкової та кінцевої точки спочатку запланованої i -ої ділянки маршруту руху судна дорівнюють, відповідно $(0,0)$ та $(20,0)$. На рис. 4.7 – 4.9 наведені випадки побудови поля градієнтів із однією перешкодою. Як видно з рис. 4.7, вектори градієнта введеної функції Q_i спрямовані до початково заданої програмної траєкторії (горизонтальна лінія). По мірі наближення до перешкоди за рахунок додавання вектора градієнта функції p_j потік поля векторів обходить перешкоду і далі після обходу перешкоди знову притягується до заданої горизонтальної траєкторії.

Таким чином, напрям вектора градієнта може бути використаний для завдання програмного значення курсу судна під час обходу перешкоди.

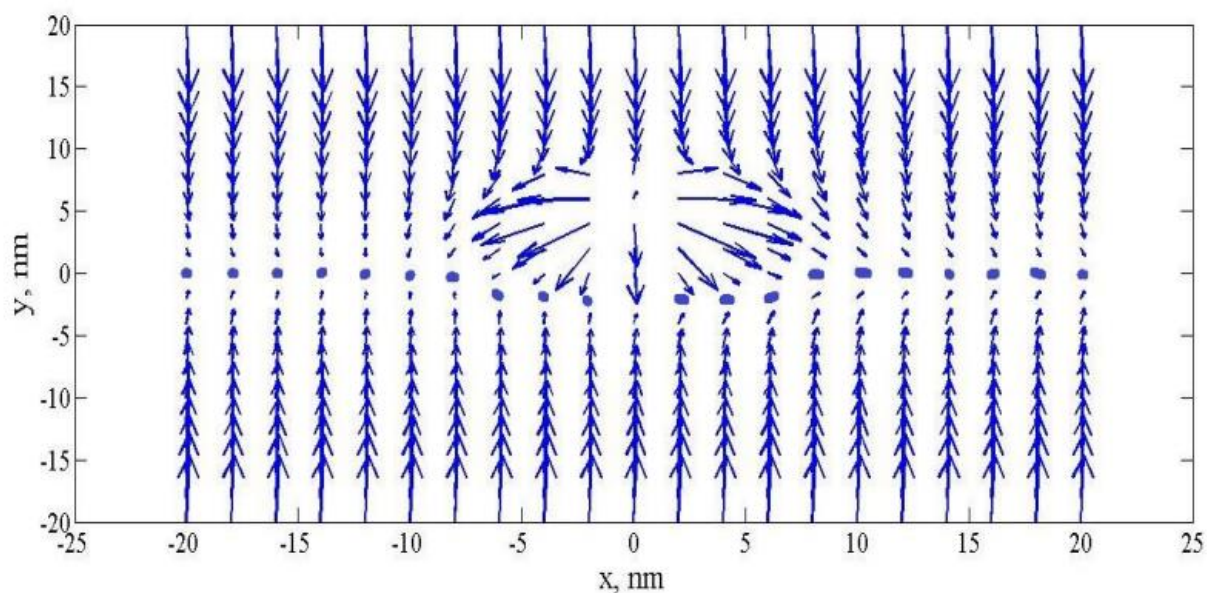


Рисунок 4.7 – Поле векторів градієнта для функції $Q_i(x, y)$ для однієї перешкоди ($m=1$)

(Джерело: розроблено автором)

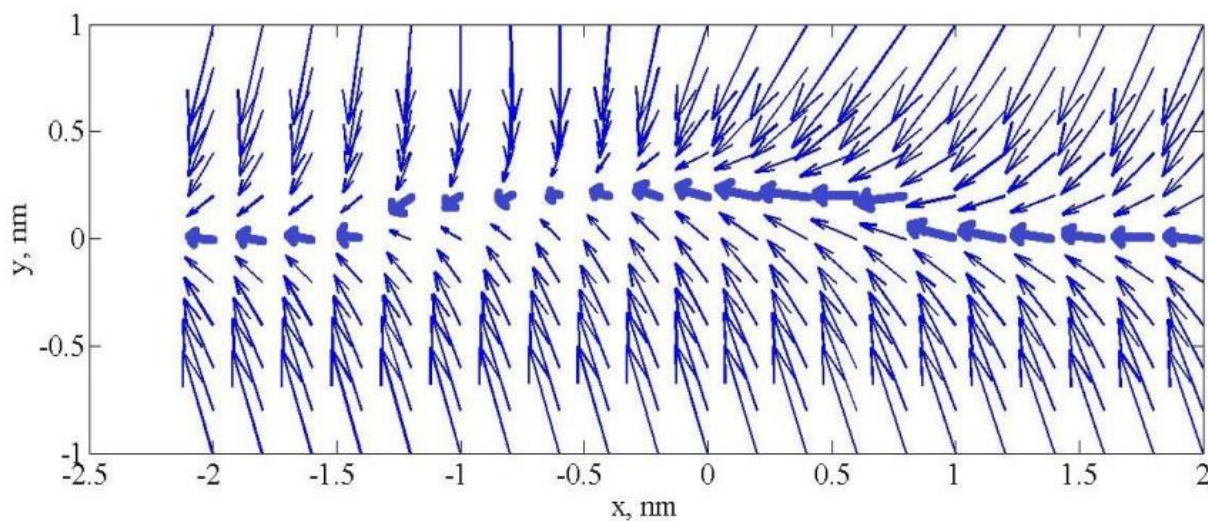


Рисунок 4.8 – Поле векторів градієнта для функції $Q_i(x, y)$ для однієї перешкоди ($m=1$)

(Джерело: розроблено автором)

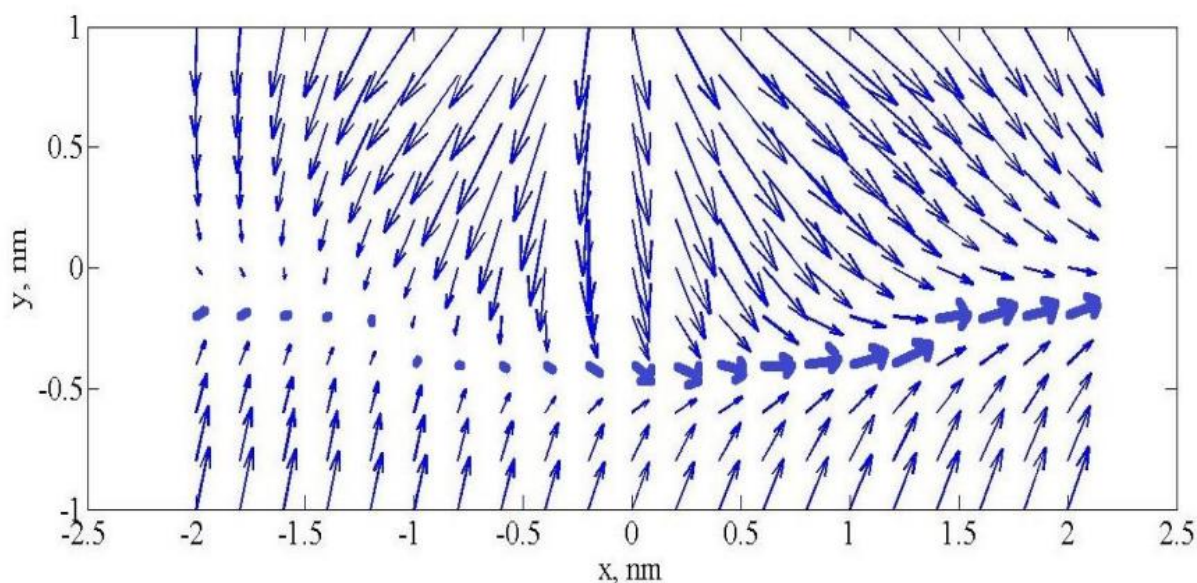


Рисунок 4.9 – Поле векторів градієнта для функції $Q_i(x, y)$
для однієї перешкоди ($m=1$)
(Джерело: розроблено автором)

Випадок 2. Кількість перешкод $m = 2$, координати перешкод $x_{p1} = -10$, $y_{p1}=5$, $x_{p2}=20$, $y_{p2}=-5$, коефіцієнти γ_1 , γ_2 дорівнюють, відповідно, $\gamma_1=100$, $\gamma_2=0,05$. Координати початкової та кінцевої точки запланованої i -ої ділянки маршруту руху судна дорівнюють, відповідно, $(0,0)$ та $(40,0)$. На рис. 4.10 наведені випадки побудови градієнтів поля з двома перешкодами, поле векторів введеної функції Q_i стягується до траєкторії, що обходить обидві перешкоди та підтверджує можливість використання градієнта функції Q_i для завдання програмного значення курсу судна, що забезпечує обхід перешкод.

Таким чином, аналіз поля векторів градієнта функції Q_i , що включає допоміжні штрафні функції p_j свідчить, що за рахунок введення останніх запланована прямолінійна траєкторія руху деформується таким чином, що судно відходить від перешкоди. Параметри функції p_j , зокрема, γ_1 та γ_2 , впливають на кривизну траєкторії при обході перешкод.

Таким чином, враховуючи вищезазанчене, для руху за траєкторією при наявності статичних перешкод може бути запропонований наступний закон або алгоритм формування програмного значення курсу судна [87-97]:

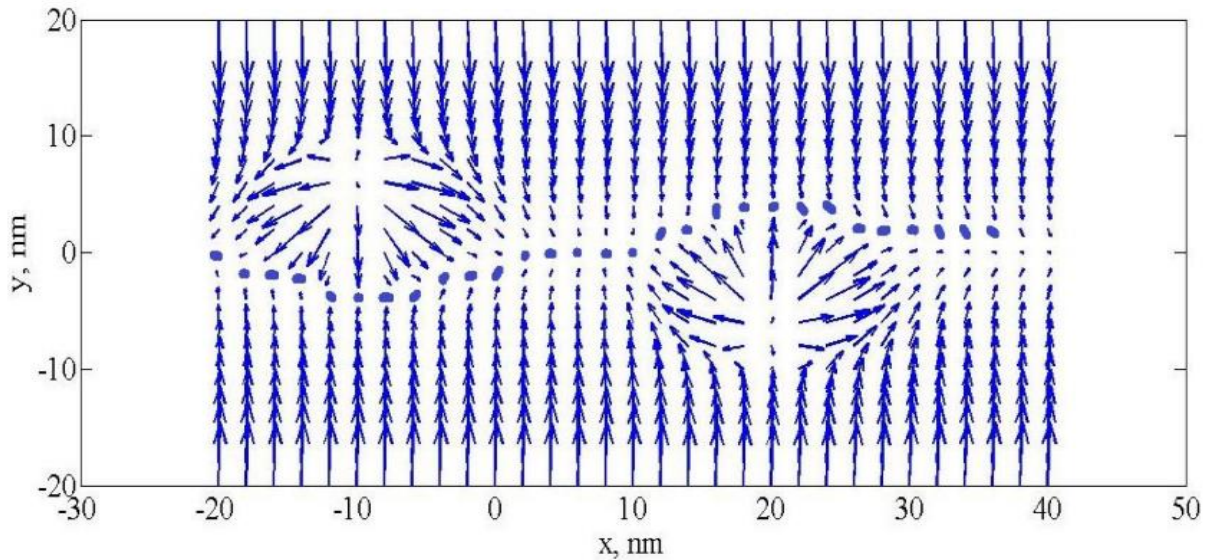


Рисунок 4.10 – Поле векторів градієнта для функції $Q_i(x, y)$ для двох перешкод ($m=2$) (Джерело: розроблено автором)

$$\varphi_{di}(t) = \arctg \left(\frac{\frac{dQ_i}{dy}}{\frac{dQ_i}{dx}} \right); \quad (4.7)$$

або

$$\varphi_{di}(t) = \arctg \left(\frac{\frac{dF_i^0(x, y)}{dy} + aw_{yi} + \frac{dp_j}{dy}}{\frac{dF_i^0(x, y)}{dx} + aw_{xi} + \frac{dp_j}{dx}} \right). \quad (4.8)$$

Для перевірки системи управління рухом судна за траєкторією за наявності перешкод, що ґрунтується на математичній моделі (4.7), була розроблена модель системи в середовищі MATLAB та проведено чисельні експерименти. Програмна траєкторія руху судна: $y = k_i x + b_i$, при $k = 0$, $b = 0,1$; напрямний вектор має вигляд: $w = (w_x; w_y) = (1; 0)$.

Відповідно до розглянутого вище підходу сформуємо функцію:

$$F_i^0(x, y) = -\frac{1}{2}(y - 0,1)^2.$$

Спочатку розглянемо випадок однієї перешкоди з координатами: $x_{p1} = 0$, $y_{p1} = 0$. Виберемо допоміжну штрафну функцію (4.6). Задамо $\gamma_1 = 4$, $\gamma_2 = 2$.

Результати моделювання системи управління рухом судна за курсом, що реалізує алгоритм (4.7) за обраних умов, наведено на рисунках 4.11-4.12. Як видно з результатів моделювання, розроблений алгоритм забезпечує обхід перешкоди та повернення судна на вихідну заплановану програмну траєкторію.

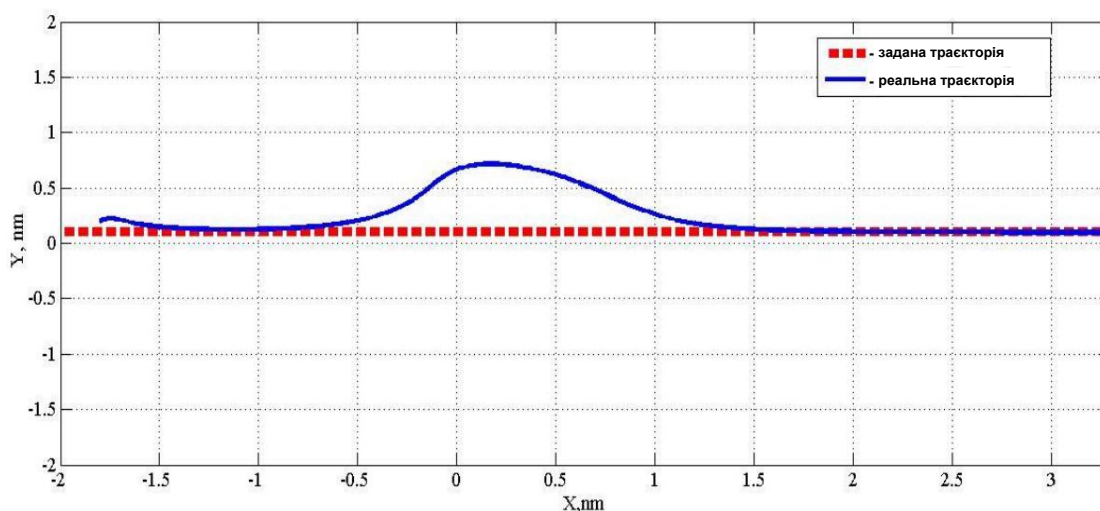


Рисунок 4.11 – Траєкторія руху судна за однієї перешкоди
(Джерело: розроблено автором)

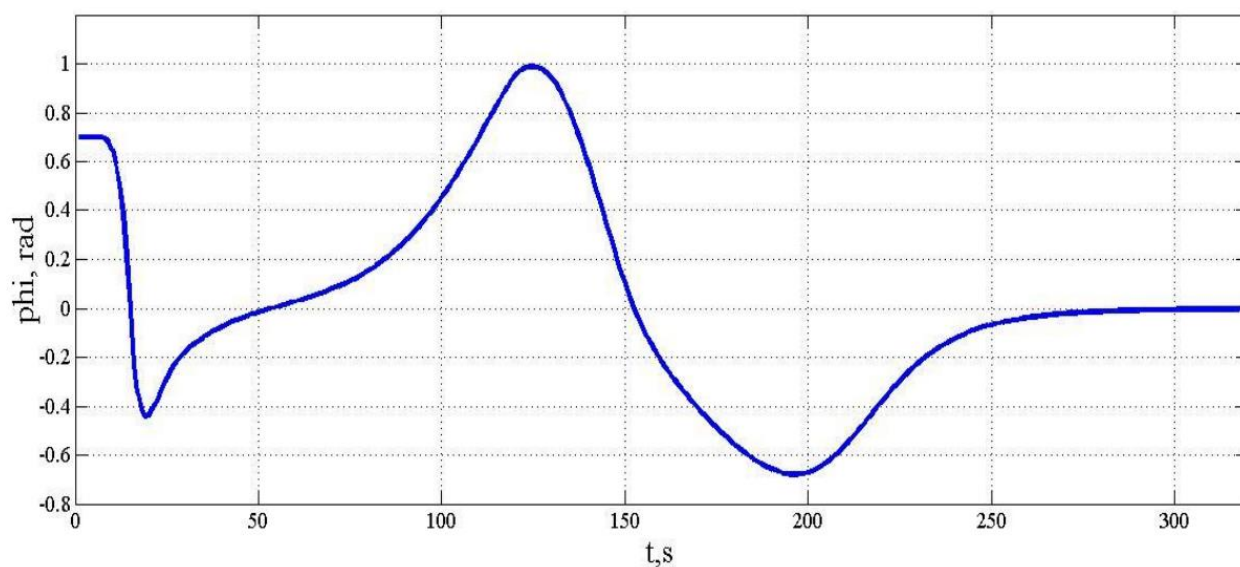


Рисунок 4.12 – Курс судна за однієї перешкоди
(Джерело: розроблено автором)

Аналогічний чисельний експеримент проводився за наявності двох перешкод. Координати перешкод: $x_{p1} = -0,3$; $y_{p1} = -0,3$; $x_{p2} = 2$; $y_{p2} = 0,2$.

Штрафні допоміжні функції вибиралися як (4.6). Задамо $\gamma_1 = 6$, $\gamma_2 = 8$. Результати моделювання системи управління рухом судна за курсом, що реалізує модель (4.7) за обраних умов, наведено на рисунках 4.13 – 4.14.

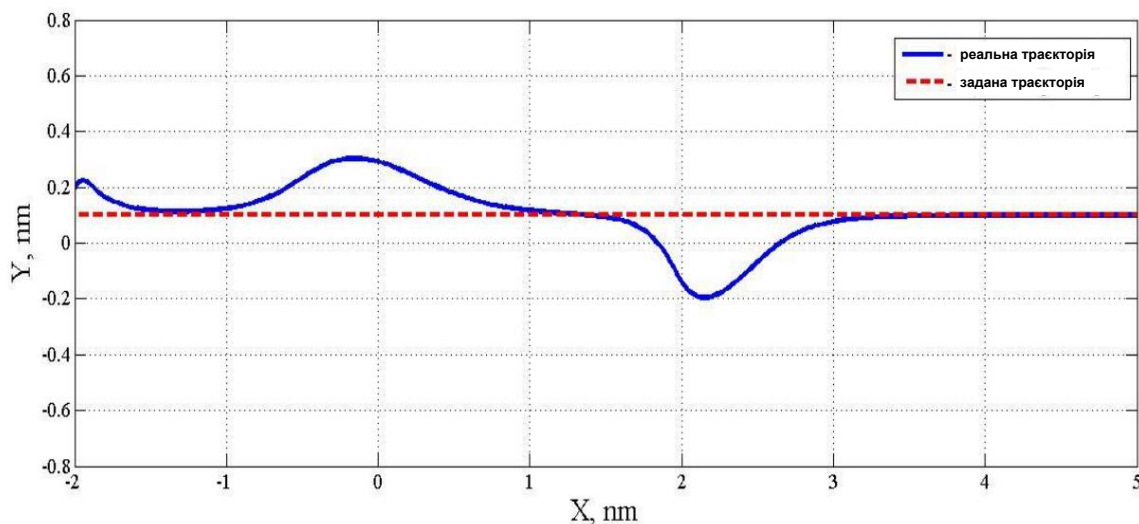


Рисунок 4.13 – Траєкторія руху судна за наявності двох перешкод
(Джерело: розроблено автором)

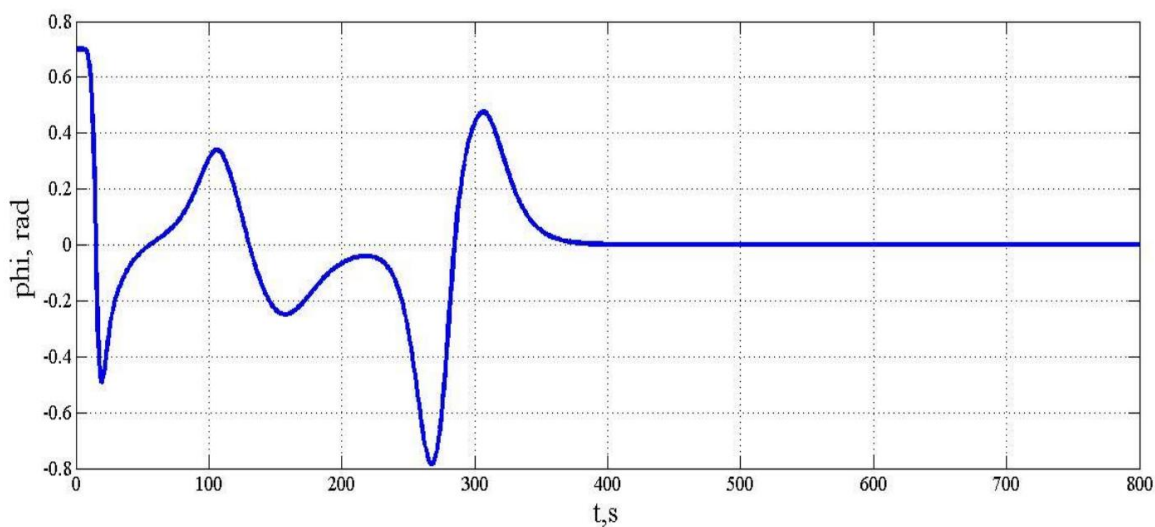


Рисунок 4.14 – Курс судна за наявності двох перешкод
(Джерело: розроблено автором)

Моделювання підтвердило, що запропонований алгоритм забезпечує обхід перешкод та повернення судна на первинно задану програмну траєкторію.

Таким чином, чисельні експерименти підтверджують працездатність та

ефективність запропонованого алгоритму та побудованих на його основі систем управління рухом судна за траєкторією при наявності перешкод.

4.3 Метод розходження та обгону суден в стиснутих водах з застосуванням векторів градієнта допоміжної штрафної функції

4.3.1 Пряма побудова допоміжної штрафної функції

Для вирішення завдання управління рухом судна за траєкторією при наявності перешкод вище запропоновано підхід, що ґрунтується на використанні допоміжних штрафних функцій (наприклад (4.1)-(4.4)), які мають певні властивості. Водночас можливий альтернативний підхід до побудови алгоритму управління рухом судна за наявності перешкод. Його сутність полягає у прямій побудові поля векторів градієнта деякої допоміжної штрафної функції без її явного визначення. При цьому область завдання поля векторів градієнта обмежена, а її розташування визначається координатами перешкоди.

Для ілюстрації розробленого підходу розглянемо приклад. Для визначеності поставимо прямокутні області, в центрі яких перебуває перешкода [30]:

$$\begin{cases} |x - x_{pj}| \leq \Delta x; \\ |y - y_{pj}| \leq \Delta y, \end{cases} \quad (4.9)$$

де (x, y) – координати судна; (x_{pj}, y_{pj}) – координати перешкоди; $(\Delta x, \Delta y)$ – координати прямокутної області, в центрі якої знаходяться перешкоди.

Допустимо, що програмна траєкторія руху судна представляє собою горизонтальну лінію з рівнянням $y = 1$, напрямний вектор $w = (w_x, w_y) = (1; 0)$ (рух зліва направо). Розглянемо випадок однієї перешкоди. Без втрати загальності приклада вважатимемо, що координати $x_{p1} = 0, y_{p1} = 0$.

Задамо параметри прямокутної області: $\Delta x = 1$, $\Delta y = 2$. У середині прямокутної області задамо поле векторів градієнта допоміжної штрафної функції в такий спосіб. Вище перешкоди вектори спрямовані вертикально вгору та мають одиничну довжину, нижче за неї вони також мають одиничну довжину й спрямовані вертикально вниз (такому вигляду поля векторів градієнта відповідає функція $p_1 = |y|$). При русі судна поза певної області алгоритм управління, заснований на допоміжних функціях та судно з початкового положення $x(t_0) = -5$, $y(t_0) = 2$ асимптотично наближається до програмної траєкторії (горизонтальної лінії). В результаті поза вказаною областю алгоритм обчислення програмного значення курсу судна набуває вигляду: $\varphi_d(t) = -\arctgy$.

При знаходженні судна всередині заданої області, пов'язаної з перешкодою, алгоритм обчислення програмного значення курсу судна виконується згідно формули: $\varphi_d(t) = \arctgy + k \text{sign}y$, де $k = \text{const}$ (при моделюванні обрано $k = 1$).

На рис. 4.15, 4.16 наведено результати моделювання. Рух судна вздовж заданої траєкторії та обхід перешкоди наведені на рис. 4.15. На рис. 4.16 наведено графік, що демонструє зміну курсу судна $\varphi(t)$ у процесі його руху.

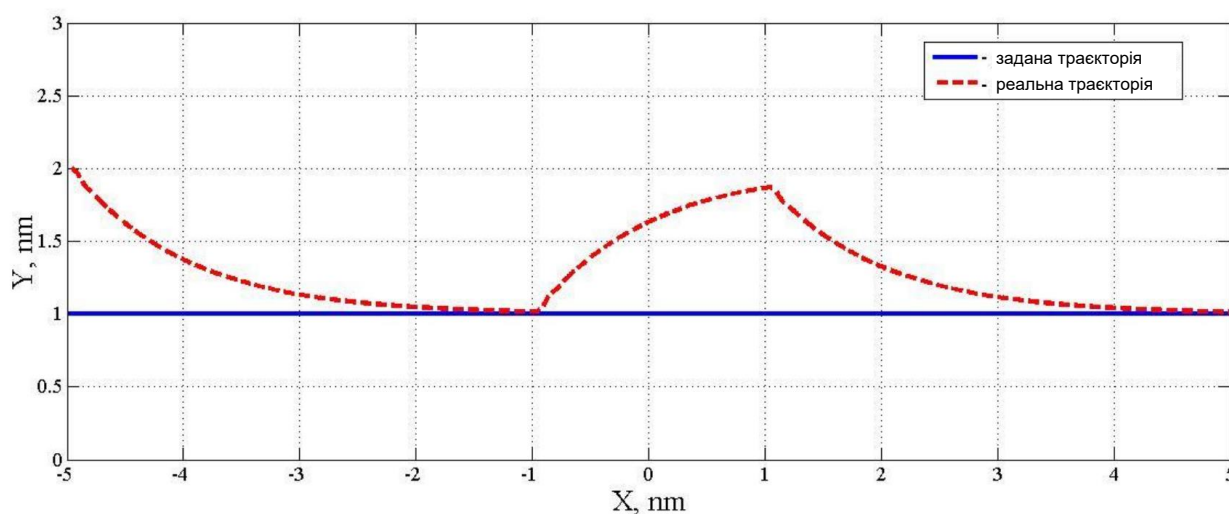


Рисунок 4.15 – Траєкторія руху судна з обходом однієї перешкоди

(Джерело: розроблено автором)

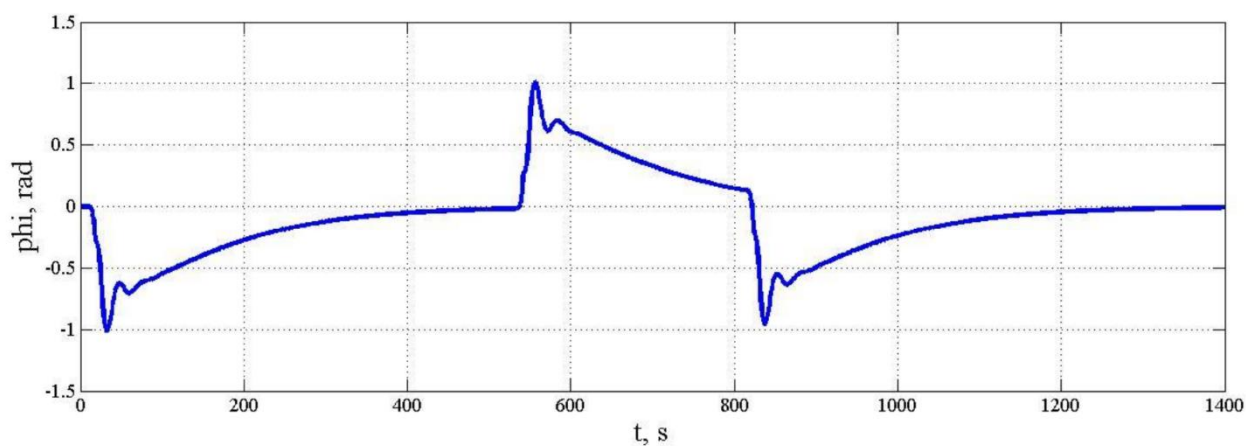


Рисунок 4.16 – Зміна курсу судна з обходом однієї перешкоди
(Джерело: розроблено автором)

Аналогічний чисельний експеримент проводився для випадку двох перешкод. Їхні координати були обрані наступні: $x_{p1} = 0$, $y_{p1} = 0,5$; $x_{p2} = 4$, $y_{p2} = 1,2$. Розміри областей визначалися тими ж параметрами: $\Delta x_1 = 1$, $\Delta y_1 = 1$, $\Delta x_2 = 1,5$; $\Delta y_2 = 3$. Аналогічно визначалися поля векторів градієнта допоміжних функцій усередині областей. Метод також підтвердив свою працездатність. Результати моделювання наведені на рис. 4.17 – 4.18.

Рух судна вздовж заданої траєкторії та обхід перешкод наведені на рис. 4.17. На рис. 4.18 наведено графік, що демонструє зміну курсу судна $\varphi(t)$ у процесі його руху.

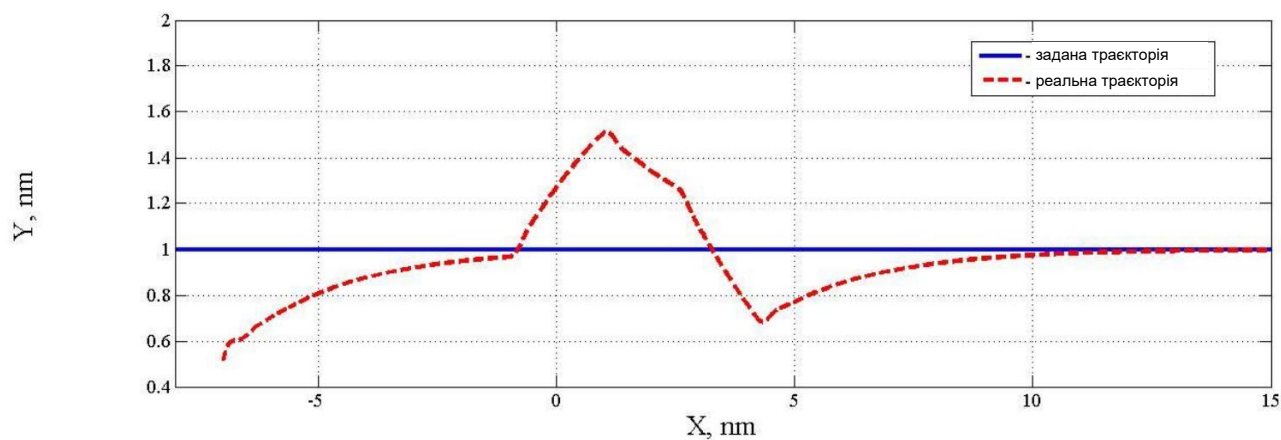


Рисунок 4.17 – Траєкторія руху судна з обходом двох перешкод
(Джерело: розроблено автором)

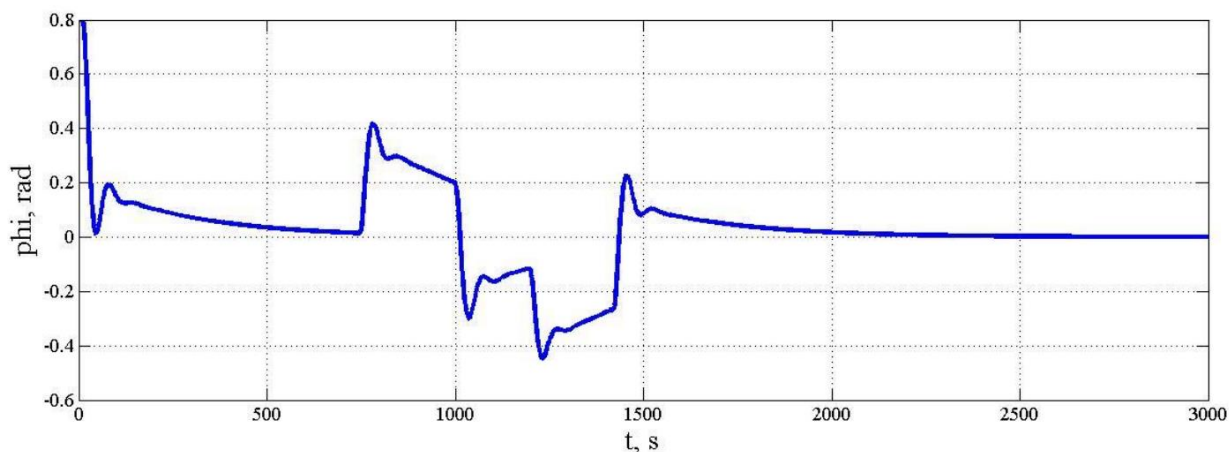


Рисунок 4.18 – Зміна курсу судна з обходом двох перешкод
(Джерело: розроблено автором)

Таким чином, запропонований підхід до прямої побудови поля векторів градієнта допоміжної штрафної функції підтвердив свою ефективність і може бути використаний при синтезі методів та систем управління рухом судна траєкторією за наявності перешкод. Крім того, область, що відповідає перешкоді, може бути обрана не тільки у вигляді прямокутника, а в іншому вигляді, наприклад, кола.

4.3.2 Застосування розробленого методу при розходженні та обгоні суден

У п.п. 4.3.3 досліджувалась робота алгоритмів та систем для випадку статичних перешкод, координати яких залишалися незмінними. В даному підрозділі дослідимо можливість застосування розробленого методу управління рухом судном за траєкторією, заснованого на градієнті допоміжних функцій для вирішення завдання розходження та обгону суден.

Судно у стиснутих водах можна розглядати як динамічну перешкоду для інших суден, а два судна – як взаємні рухомі перешкоди. Тому координати судна x_{si} , y_{si} можна вважати координатами перешкоди x_{pj} , y_{pj} , які входять до відповідних формул для штрафних допоміжних функцій, використаних при

формуванні курсу другого судна і навпаки, координати другого судна є координатами перешкоди, що входить до штрафної функції, яка використовується при управлінні першим судном. Пояснимо вказану можливість застосування розроблених методів управління на двох конкретних прикладах.

Приклад 1. Розглянемо ситуацію, коли два судна рухаються зустрічно за поряд розташованим паралельним траєкторіям. На рис. 4.19 початкова відстань між суднами дорівнює 20 миль. Швидкість руху суден – 20 вузлів.

Параметри методів управління рухом суден було обрано такими, за яких забезпечувалася безпечне їх розходження. За правилом 14 МПЗЗС-72 – ситуація зближення суден, що йдуть прямо один на одного, коли два судна з механічними двигунами зближуються на протилежних чи майже протилежних курсах так, що виникає небезпека зіткнення, кожне з них має змінити свій курс вправо, щоб кожне судно пройшло в іншого судна по лівому борту. Така ситуація має вважатися існуючою, коли судно бачить інше прямо або майже прямо за курсом, і при цьому вночі воно може бачити в створі або майже в створі топові вогні та (або) обидва бортові вогні іншого судна, а вдень воно спостерігає його відповідний ракурс. Якщо мається сумнів щодо того, чи існує така ситуація, слід вважати, що вона існує, і діяти відповідно [МПЗЗС].

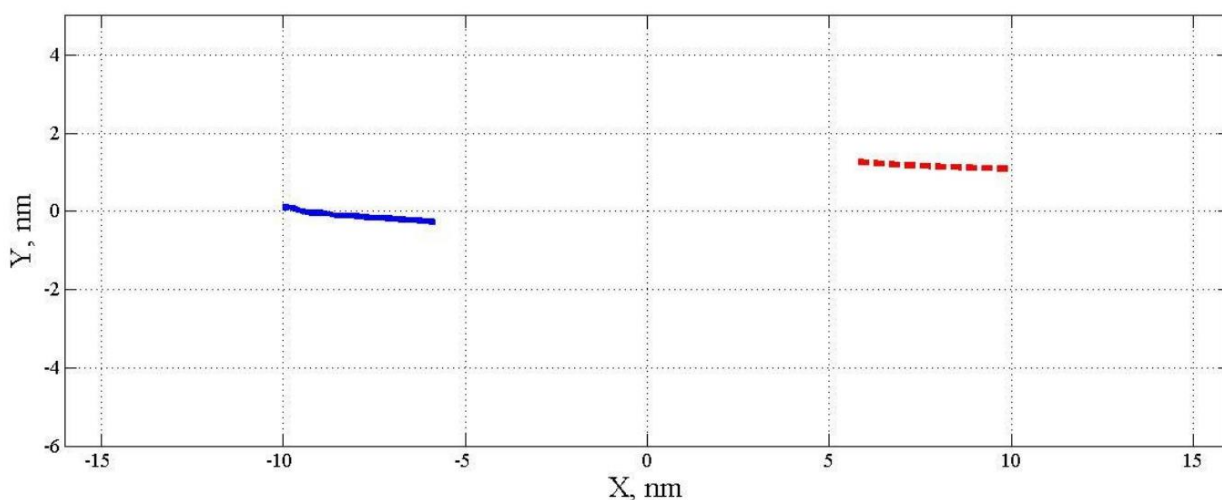


Рисунок 4.19 – Траєкторії суден при розходженні ($t = 700$ с)

(Джерело: розроблено автором)

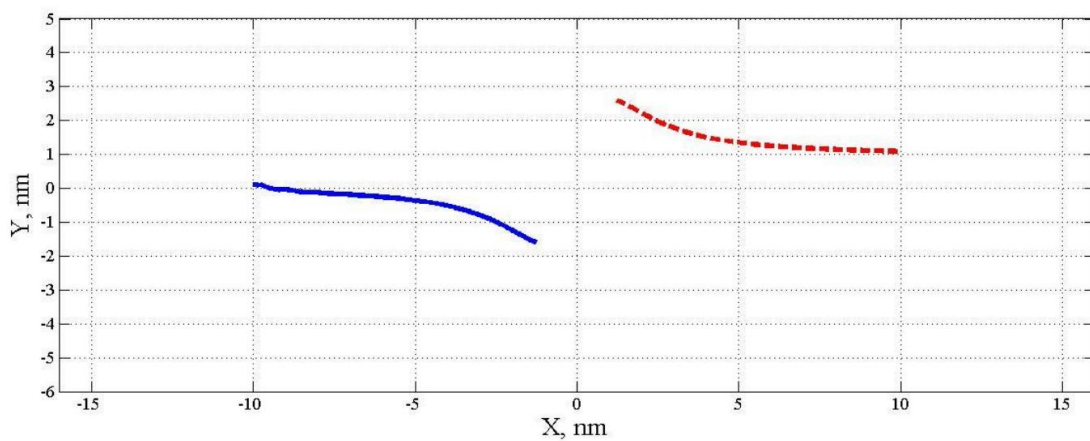


Рисунок 4.20 – Траєкторія руху суден при розходженні за час $t = 1500$ с
(Джерело: розроблено автором)

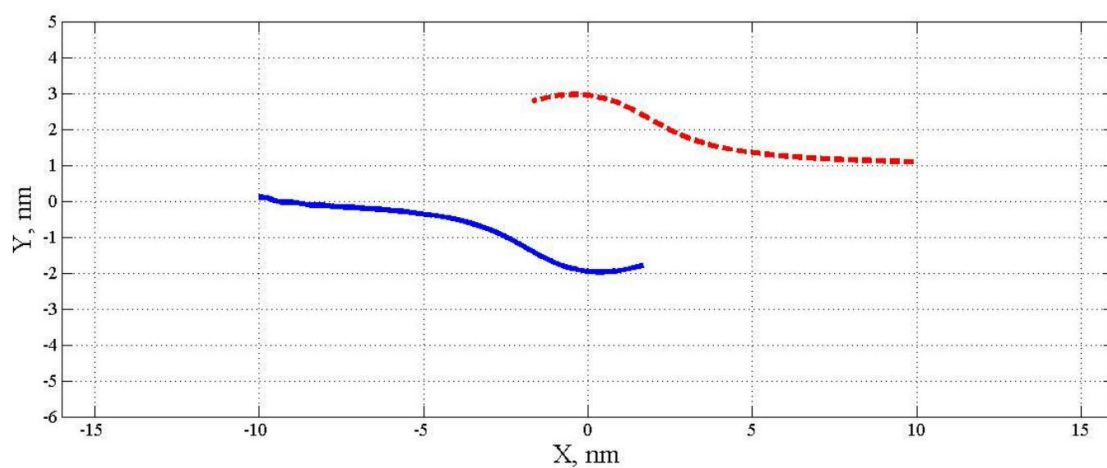


Рисунок 4.21 – Траєкторія руху суден при розходженні за час $t = 2000$ с
(Джерело: розроблено автором)

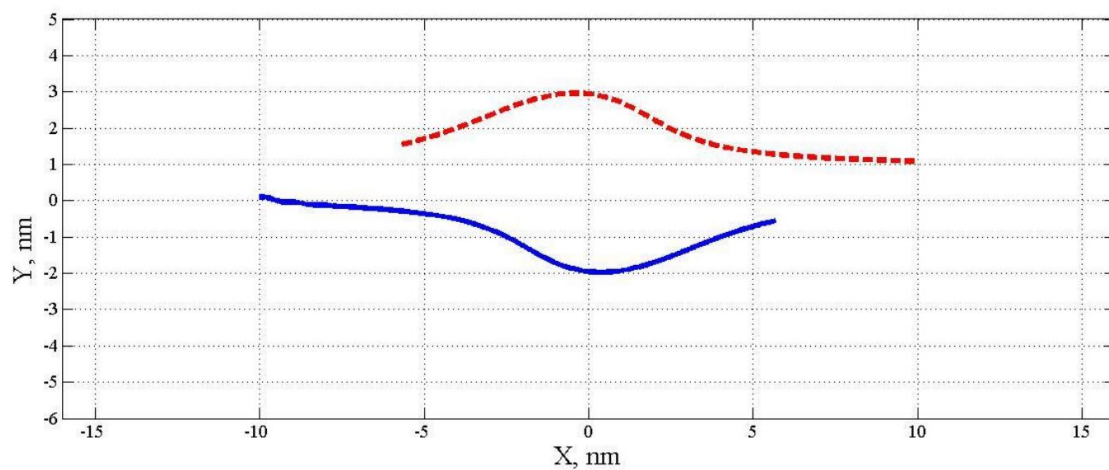


Рисунок 4.22 – Траєкторія руху суден при розходженні за час $t = 2700$ с

(Джерело: розроблено автором)

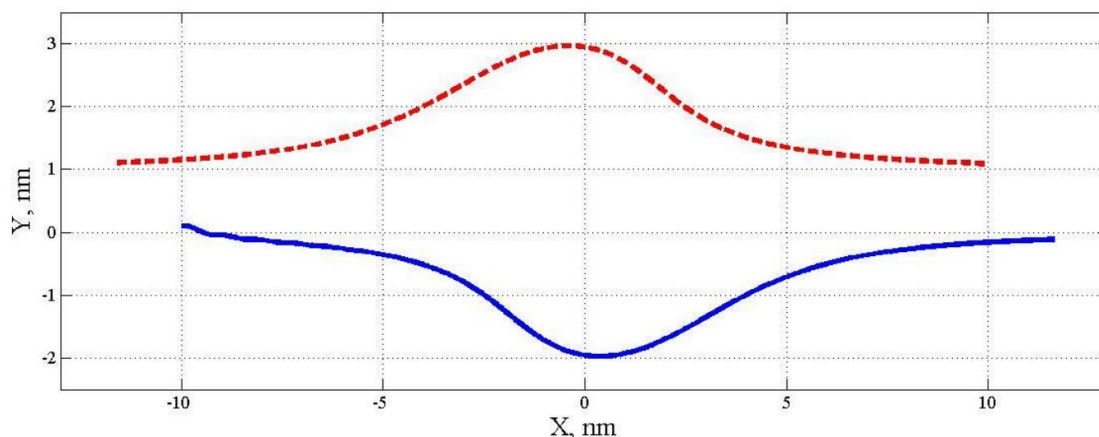


Рисунок 4.23 – Траєкторія руху суден під час розходження за час $t = 3700$ с

(Джерело: розроблено автором)

Рисунки 4.19 – 4.23 ілюструють процес розходження. На рис. 4.24 наведений графік зміни відстані між суднами у процесі їх руху. Як видно на графіку, при використанні розроблених алгоритмів управління, мінімальна відстань між суднами дорівнює 5 миль, тобто задовольняє вимогам. Після взаємного маневрування судна повертаються на спочатку заплановані траєкторії.

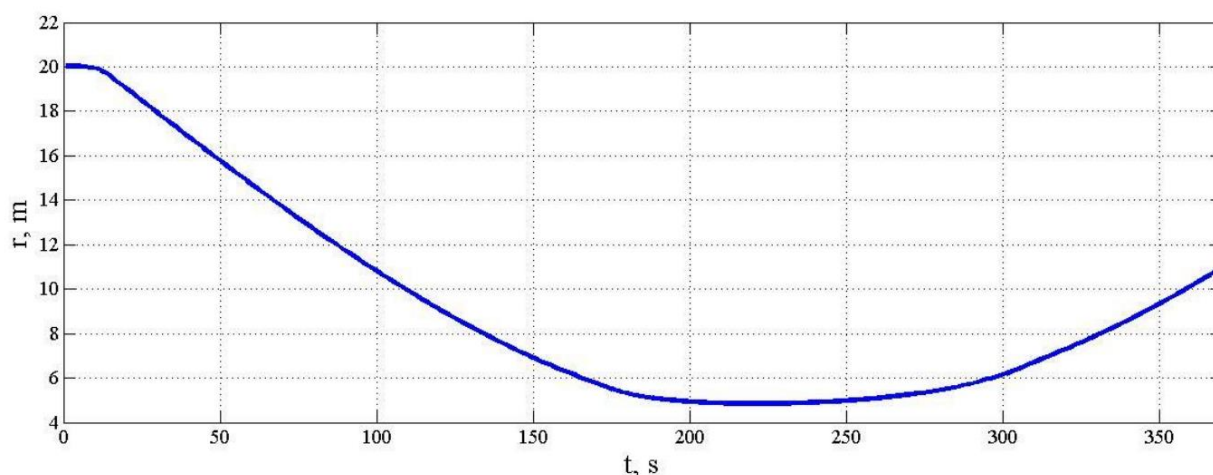


Рисунок 4.24 – Зміна відстані між суднами під час розходження

(Джерело: розроблено автором)

Приклад 2. Розглянемо ситуацію, коли два судна рухаються за паралельними близько розташованим траєкторіям в одному напрямку

(рис. 4.25). Швидкість першого судна дорівнює 10 вузлам, другого судна – 20 вузлам. Друге судно у процесі руху обганяє перше. У початковий момент часу відстань між суднами дорівнює 11 миль. За правилом 13 МППРС-72 – обгін, незалежно від розпоряджень, що містяться в Правилах Розділів 1 та 2 Частини В кожне судно, яке обганяє інше, має триматися осторонь шляху судна, яке обганяється. Судно вважається таким, що обганяє інше судно, коли воно підходить до нього з напрямку понад 22,5 градусів за траверзою останнього, тобто, коли судно, що обганяє, знаходиться в такому положенні по відношенню до того, хто обганяє, що вночі судно, що обганяє, може бачити тільки кормовий вогонь судна, що обганяється, і не може бачити жоден з його бортових вогнів [34].

Результати моделювання траєкторій руху суден під час використання розробленого методу управління, наведено на рис. 4.25, а графік зміни відстані між суднами – на рис. 4.26. Як видно з графіка, мінімальна відстань між суднами при обгоні становить 5 миль, що відповідає вимогам, що висуваються.

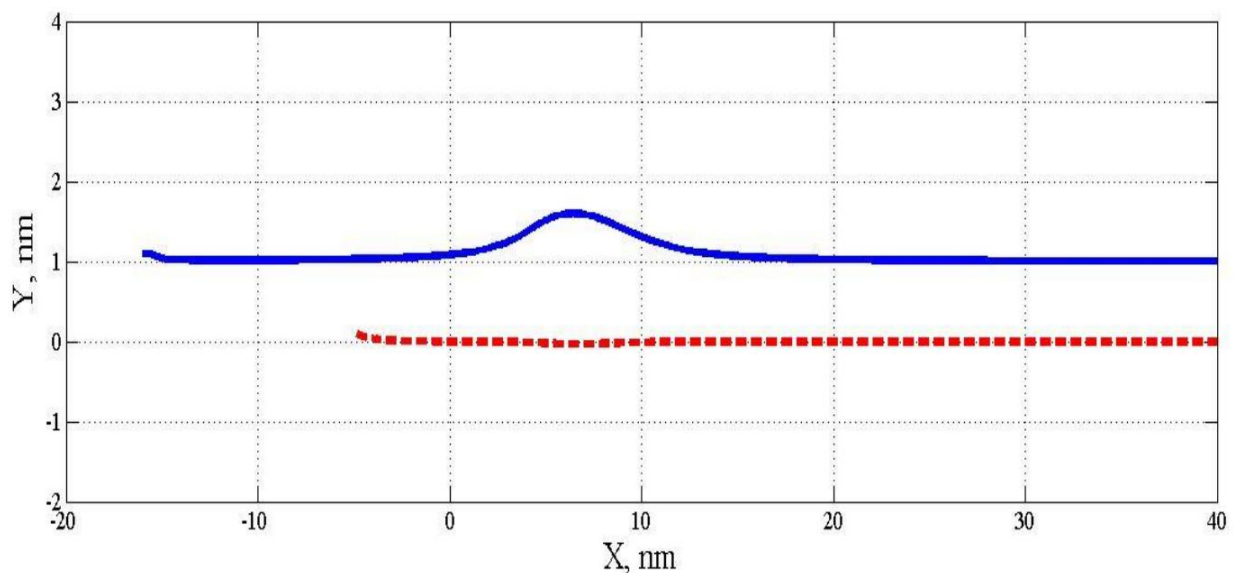


Рисунок 4.25 – Траєкторія руху суден під час обгону
(розроблено автором)

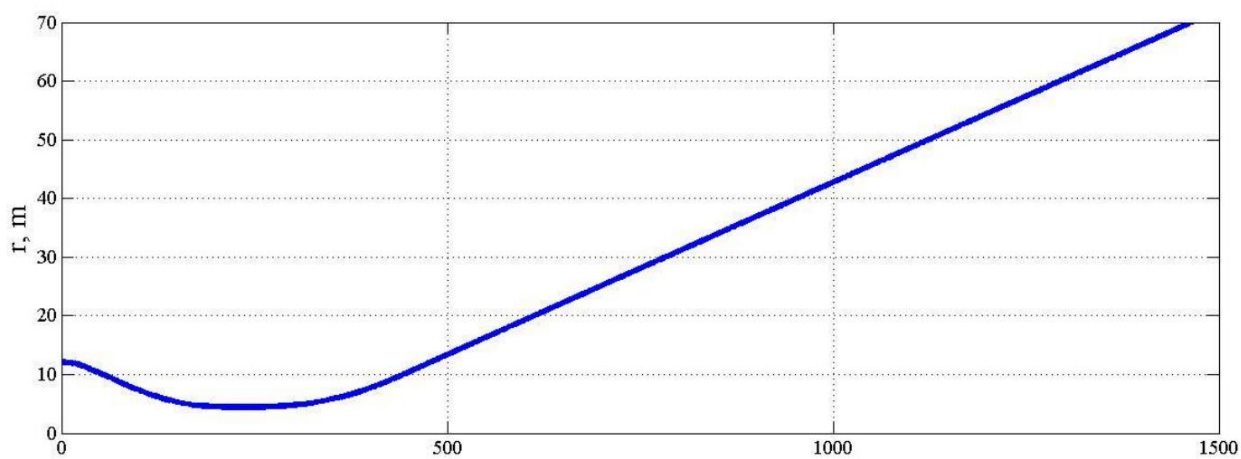


Рисунок 4.26 – Зміна відстані між суднами під час обгону
(розроблено автором)

Таким чином, розроблені алгоритми та системи засновані на використанні градієнта допоміжних функцій та демонструють можливість їх ефективного застосування для вирішення задачі розбіжності та обгону суден.

Висновки до розділу 4

1. Введено поняття допоміжної штрафної функції, асоційованої з перешкодою, що дозволило формалізувати рішення задачі управління рухом судна за траєкторією при наявності перешкод. Наведено приклади введених функцій, поля градієнтів яких мають необхідні властивості.

2. Одержав подальший розвиток метод обчислення програмного значення курсу судна за наявності перешкод, який на відміну від відомих, базується на використанні допоміжної штрафної функції, асоційованої з перешкодою, і дозволяє змінюватиме раніше запланований курс судна, відводячи його від перешкоди, що знаходиться поблизу запланованої траєкторії, і повертаючи судно на вихідну заплановану траєкторію у процесі обходу перешкоди та віддаленні від неї.

3. Розроблено алгоритм і систему управління рухом судна за траєкторією, що забезпечують корекцію програмної траєкторії під час обходу перешкод.

4. Розроблено підхід до прямої побудови поля векторів градієнта допоміжних штрафних функцій, що дозволяє спростити побудову системи управління рухом судна за траєкторією при наявності перешкод.

5. Використання допоміжної штрафної функції дозволило сформулювати програмне значення курсу судна, при якому забезпечується обхід перешкод з подальшим виходом на раніше заплановану програмну траєкторію. Продемонстрована принципова можливість застосування розроблених алгоритмів та систем для вирішення завдань управління при розходженні та обгоні суден.

6. Чисельні експерименти для різних видів допоміжних штрафних функцій підтвердили працездатність та ефективність запропонованих рішень.

Основні результати розділу опубліковані в роботах: [30], [31].

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано *актуальне наукове завдання*, яке полягало у розробці моделей та методів системи підтримки прийняття рішення безпеки судноводіння в стиснутих водах (портовій акваторії) для підвищення ефективності системи безпеки судноводіння. При цьому отримано такі наукові та практичні результати.

1. Результати *проведеного аналізу* забезпечення безпеки судноводіння в портовій акваторії свідчать про особливу відповідальність судноводіїв за планування руху та управління рухом суден у таких складних умовах. Застосування систем підтримки прийняття рішень для автоматизованого управління рухом судна у портовій акваторії потребує формалізації району та умов плавання, які впливають на вибір траєкторії та встановлення режимів руху, з одного боку, і формування адекватної математичної моделі побудови оптимального маршруту руху судна, з іншого.

2. *Сформульовано комплексне завдання* щодо формулювання принципів функціонування системи підтримки прийняття рішення безпеки судноводіння в обмежених умовах портовій акваторії, яке складається з:

- удосконалення моделі автоматичного управління рухом судна при маневруванні у стиснутих водах;
- розробка методу управління рухом судна в портовій акваторії;
- подальшого розвитку методу обчислення програмного значення курсу судна за наявності перешкод.

3. *Удосконалено модель* автоматичного управління рухом судна при маневруванні у стиснутих водах, яка, на відміну від відомих, відрізняється застосуванням адаптивного авторульового, який реалізує пропорційно-інтегрально-диференціальний закон управління і дозволяє автоматично підстроювати параметри управління у відповідь на зміну умов плавання судна.

При моделюванні удосконаленої моделі системи управління рухом судна за траєкторією з використанням градієнта допоміжної функції в умовах

хвилювання генератор білого шуму формує підсумкову гармоніку спектру морського хвилювання, що підвищує адекватність отриманих результатів.

4. *Вперше розроблено* метод управління рухом судна в портовій акваторії, який базується на застосуванні апроксимуючої сигмоїдальної траєкторної функції, що описує режими зміни кінематичних параметрів (курс, швидкість, кут дрейфу) руху судна за певною траєкторією при заданих початкових умовах і дозволяє описувати програмні рухи судна гладкими кривими у портовій акваторії.

У ході апробації показано перевагу запропонованого способу завдання траєкторії руху судна для складних умов навігації, який використовує методи аналітичної геометрії та фізичні принципи маневрування судном, що полегшують роботу системи підтримки прийняття рішень. Розширення області стійкості системи управління судна при перетворенні коливальних перехідних процесів в аперіодичні за рахунок введення додаткового каналу кутового прискорення підвищує якість управління та безпеку судноплавства.

5. *Одержав подальший розвиток метод* обчислення програмного значення курсу судна за наявності перешкод, який на відміну від відомих, базується на використанні допоміжної штрафної функції, асоційованої з перешкодою, і дозволяє змінюватиме раніше запланований курс судна, відводячи його від перешкоди, що знаходиться поблизу запланованої траєкторії, і повертаючи судно на вихідну заплановану траєкторію у процесі обходу перешкоди та віддаленні від неї.

Апробація розвиненого методу обчислення програмного значення курсу судна за наявності перешкод шляхом використання допоміжних штрафних функцій різних видів принципово підтвердила можливість застосування розроблених алгоритмів для вирішення завдань управління при розходженні суден, дозволила забезпечити обхід перешкод з подальшим виходом на раніше заплановану програмну траєкторію та підтвердили ефективність запропонованих рішень.

6. *Реалізація запропонованого в дисертаційній роботі підходу щодо*

забезпечення безпеки судноводіння в портовій акваторії шляхом розробки методів системи підтримки прийняття рішення дозволяє:

- автоматично підстроювати параметри управління у відповідь на зміну умов плавання судна;
- описувати програмні рухи судна гладкими кривими у портовій акваторії;
- змінюватиме раніше запланований курс судна, відводячи його від перешкоди, що знаходиться поблизу запланованої траєкторії, і повертаючи судно на вихідну заплановану траєкторію у процесі обходу перешкоди та віддаленні від неї.

Запропоновані теоретичні моделі і методи знаходяться у високому ступені готовності до застосування та доведені до їх практичної реалізації.

7. Значення вирішеного у дисертації завдання для науки полягає в подальшому розвитку теоретичних та прикладних основ побудови методів забезпечення безпеки судноводіння в портовій акваторії.

8. Практичне значення отриманих результатів полягає у подальшому вдосконаленні системи підтримки прийняття рішення безпеки судноводіння в портовій акваторії на базі розроблених моделей і методів, що дозволяють підвищити ефективність маневрування і безпеку судноводіння в портовій акваторії.

9. Дослідження базується на методах системного аналізу, проєктування інформаційного забезпечення та побудови моделей штучного інтелекту, теорії побудови систем підтримки прийняття рішення, методах математичного моделювання, теорії ймовірності, теорії множин, графів, оцінювання безпеки судноводіння та маневрування.

10. Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій підтверджується коректною постановкою наукового завдання; комплексним використанням відомих, перевірених практикою теоретичних та емпіричних методів дослідження, а саме методів системного аналізу, проєктування інформаційного забезпечення та побудови моделей штучного

інтелекту, побудови систем підтримки прийняття рішення, математичного моделювання, теорії ймовірності, теорії множин, графів, оцінювання безпеки судноводіння та маневрування суден на етапах розробки моделей і методів, моделювання й аналізу результатів досліджень; задовільним збігом одержаних результатів з відомими даними у розглянутій області наукових знань, вільним обговоренням результатів на наукових конференціях і їх публікацією у визнаних наукових виданнях; впровадженню результатів дисертаційного дослідження у виробничу діяльність круїзної компанії «Червона рута» та у навчальний процес Державного університету інфраструктури і технологій.

11. *Наукові та прикладні результати досліджень*, отримані в дисертації, доцільно використовувати при розробці систем підтримки прийняття рішень для вирішення завдань управління при розходженні та обгоні суден; у науково-дослідних організаціях – для забезпечення безпеки судноводіння в портовій акваторії; у вищих навчальних закладах – для вдосконалення системи підготовки фахівців зі спеціальності морський та внутрішній водний транспорт.

Результати дисертаційного дослідження будуть корисними при вдосконаленні існуючого та розробці перспективного програмного забезпечення систем підтримки прийняття рішень засобів водного транспорту.

12. Теоретичні результати дисертаційних досліджень впроваджені у Державному університеті інфраструктури та технологій, використовуються в навчальному процесі факультету судноводіння на кафедрі навігації і управління суднами при викладанні дисциплін «Забезпечення навігаційної безпеки плавання» та «Управління морехідними якостями судна» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю 271 Морський та внутрішній водний транспорт.

13. *Напрямами подальших досліджень* слід вважати вдосконалення використовуваного апарату формалізації, формалізації правил руху суден в

портовій акваторії, розробку та вдосконалення методів маніпулювання знаннями у системах штучного інтелекту.

Таким чином, послідовне рішення визначених наукових завдань дослідження, отримані нові наукові результати, їх перевірка та доведення ефективності дозволяють стверджувати, що дисертаційна робота є завершеною, а мета дослідження, яка полягала у підвищенні оперативності й обґрунтованості прийняття рішень щодо забезпечення безпеки судноводіння в районі порту, досягнутою.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. IMO // Accuracy Standards for Navigation [Internet portal]. URL: <https://www.imo.org/en/OurWork/AccuracyStandardsforNavigation/Pages/Default.aspx>. Res. A.529 (13) Nov. 1983.
2. IMO // Accuracy Standards for Navigation [Internet portal]. URL: <https://www.imo.org/en/OurWork/AccuracyStandardsforNavigation/Pages/Default.aspx>. Res. A.815 (19) Nov. 1983.
3. IMO // Human Element [Internet portal]. URL: <https://www.imo.org/en/OurWork/HumanElement/Pages/Default.aspx>.
4. IMO / Human Element // Vision, Principles and Goals [Internet portal]. URL: <https://www.imo.org/en/OurWork/HumanElement/Pages/Default.aspx>.
5. IMO / E-Navigation [Internet portal]. URL: <https://www.imo.org/en/OurWork/Safety/Pages/eNavigation.aspx>.
6. Згуровський М.З. Основи системного аналізу / М.З. Згуровський, Н.Д. Панкратова. – К. Вид. група BHV, 2007. – 546 с.
7. Russell, Stuart J.; Norvig, Peter. (2021). Artificial Intelligence: A Modern Approach (4th ed.). Hoboken: Pearson. ISBN 978-0134610993. LCCN 20190474.
8. Fayyad U., Piatetsky-Shapiro G., Smyth P. From data mining to knowledge discovery in databases. AI Mag. 1996;17:37–54.
9. H. Chniter, Y. Li, M. Khalgui, A. Koubaa, Z. Li and F. Jarray, "Multi-Agent Adaptive Architecture for Flexible Distributed Real-Time Systems," in *IEEE Access*, vol. 6, pp. 23152-23171, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2825023.
10. Дакі О.А., Дорошева А.О., Іваненко В.М., Чебан В.І. Агентоорієнтована модель реалізації системи підтримки прийняття рішення безпеки судноводіння. *Системи озброєння і військова техніка*. 2020. № 3(63). С. 122-30. <https://doi.org/10.30748/soivt.2020.63.18>.
11. Вильский Г. Б. Информационная безопасность судовождения : монография. – Миколаїв : Видавництво ФОП Швець В.Д., 2014. – 336 с.
12. Мельник О.В., Шапран Ю.Є., Матюхов А.Т., Бойко О.А.

Дослідження системи підтримки прийняття рішення безпеки судноводіння / Водний транспорт: Збірник наукових праць. Випуск 1(32). 2021.

13. Ларін О. О. Комп'ютерне та математичне моделювання в задачах прогнозування надійності при поступових відмовах : монографія / О. О. Ларін, О. О. Водка, К. Є. Потопальська ; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". – Харків : Юрайт, 2020. – 232 с.

14. Моделювання складних систем : Монографія / За заг. ред. Соловійова В.М. – Черкаси: Брама, видавець Третяков О. М., 2015. – 354 с.

15. Walrand, Jean. Probability in Electrical Engineering and Computer Science. – Springer Nature, University of California, Berkeley Foundation. 2021. 380 с. DOI: 10.1007/978-3-030-49995-2.

16. Russell, Stuart; Norvig, Peter (2003) [1995]. Artificial Intelligence: A Modern Approach (2nd Ed.). Prentice Hall. ISBN 978-0137903955.

17. Zak, B. Modelling of Ship's Motion Using Artificial Neural Networks / Bogdan Zak, Zygmunt Kitowski, Jozef Malecki //Advances in Neural Networks and Applications – Danvers: World Scientific and Engineering Society Press, 2001. – P. 298–303.

18. Вагущенко Л.Л. Поддержка решений по расхождению с судами / Л.Л. Вагущенко. – Одесса: Феникс, 2010. –229 с.

19. Обертюр К.Л. Повышение безопасности эксплуатации судов методами управления событиями: дис. ... канд.техн. наук 05.22.20 / Обертюр Константин Леонидович. – Одесса, 2015. – 223 с.

20. Бужбецкий Р.Ю. Совершенствование методов предупреждения столкновения судов с учетом особенностей их взаимодействия: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.13 / Бужбецкий Ростислав Юрьевич. – Одесса, 2016. – 223 с.

21. Мальцев А.С. Маневрирование судов при расхождении / А.С. Мальцев. – Одесса: Морской тренажерный центр, 2005. – 208 с.

22. Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року. Розпорядження Кабінет міністрів України від 30 травня 2018 р. № 430-р.

23. Про затвердження Морської доктрини України на період до 2035 року : Постанова Кабінету Міністрів України від 07.10.2009 № 1307.

24. Звіт з науково-дослідної роботи «Моделі та методи прогнозування довговічності обладнання засобів річкового та морського транспорту в умовах експлуатації за технічним станом». № ДР (РК) 0120U104335. – К.: ДУІТ, 2022. – 124 с.

25. Звіт з науково-дослідної роботи «Розробка методів запобігання зіткнення суден для підвищення безпеки судноплавства на основі формалізації навігаційних ситуацій». № ДР (РК) 0119U103754. – К.: ДУІТ, 2021. – 98 с.

26. Гусак І.Л., Замана А. Методика визначення критеріїв безпечної швидкості суден при експлуатації суден внутрішнім водним транспортом. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*. 2023. Т. 4, № 74. С. 34–39. URL: <https://doi.org/10.26906/sunz.2023.4.034>

27. Гусак І. Л., Нікітін П. В. Метод управління ризиками надзвичайних ситуацій при виконанні морських перевезень. *Збірник наукових праць «Водний транспорт»*. 2023. № 2(38). С. 108–114. <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.12> .

28. Гусак І.Л., Аросланкін О.О., Шапіро Г.В., Саф'ян О.С., Постніков Є.Є. Нейромережева модель прогнозування параметрів руху судна в системі формування надводної обстановки ближньої морської зони. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. 2021. № 3(69). С. 116-25. <https://doi.org/10.30748/zhups.2021.69.15> .

29. Гусак І.Л. Дослідження факторів ризику плавання судна в акваторії морського порту. *Вісник Приазовського Державного технічного університету*. 2023. № 47. С. 280–286. https://journals.urau.ua/vestnikpgtu_tech/article/view/300114/292591

30. Гусак І.Л., Ярмач В. Пропозиції щодо розробки методів управління рухом судна в портовій акваторії. *Збірник наукових праць «Водний транспорт»*. 2023. № 1 (39). С. 5968. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.06 <https://vt.duit.in.ua/index.php/home/article/view/319/276>

31. Гусак І.Л., Боріна М.В. Метод управління ризиками надзвичайних ситуацій при виконанні морських перевезень. Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції м. Київ, 7 грудня 2023 р. – Київ: вид-во Київського інституту водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Державного університету інфраструктури та технологій. – С. 17-19.

32. Гусак І.Л., Ярмач В. Дослідження методів управління рухом судна в портовій акваторії. Матеріали II Всеукраїнської науково-практичної конференції «Виклики та перспективи розвитку транспортної інфраструктури». 29.03.2024-05.04.2024 р. м. Київ.

33. International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS). International Maritime Organization (IMO). Archived from the original on 7 June 2015. Retrieved 6 April 2013.

34. Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea, 1972 (COLREGs) Archived 14 October 2009 at the Portuguese Web Archive, from the IMO (The International Maritime Organisation). Retrieved 13 February 2006.

35. International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973, as modified by the Protocol of 1978 relating thereto (MARPOL 73/78) Archived 25 June 2012 at the Wayback Machine.

36. Jesús A. García Maza, Reyes Poo Argüelles, COLREGs and their application in collision avoidance algorithms: A critical analysis, Ocean Engineering, Volume 261, 2022, 112029, ISSN 0029-8018, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112029>.

37. М. О. Медведєва. Міжнародна охорона людського життя на морі // Українська дипломатична енциклопедія: У 2-х т./Редкол. :Л. В. Губерський (голова) та ін. – К. : Знання України, 2004 – Т.2 – 812с. ISBN 966-316-045-4.

38. Information about accidents with ships at sea and GDP [Electronic resource]. Access mode: <https://sea.rostransnadzor.gov.ru/funktsii/rassledovanie-transportny-h-proisshes/analiz-i-sostoyanieavarijnost>

39. Маринов М.Л., Клименко В.Д. Врахування людського фактору в аварійних ситуаціях на морі // Експлуатація морського транспорту. 2008. № 2. С. 25-29

40. Shipping safety – Human error comes in many forms. Allianz Global Corporate & Specialty: веб-сайт. URL: <https://www.agcs.allianz.com/news-and-insights/expertrisk-articles/human-error-shipping-safety.html> (Last accessed 13.09.2023).

41. Shapiro, H., Aroslinkin, O. i Postnikov, Y. 2021. Формування інформаційної моделі надводної обстановки для автоматизації процесів судноводіння. Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. 3, 65 (Вер 2021), 37-41. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.26906/SUNZ.2021.3.037>.

42. Шапіро Г.В., Горалік Є.Т. Моделі та метод формалізації навігаційної обстановки для автоматизації процесів судноводіння. Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. – К.: ДУІТ, 2021. – Випуск 3(34). – 182 с. <https://doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34>

43. Angrisano, A.; Cappello, G.; Gaglione, S.; Gioia, C. Velocity Estimation Using Time-Differenced Carrier Phase and Doppler Shift with Different Grades of Devices: From Smartphones to Professional Receivers. *Algorithms* 2024, 17, 2. <https://doi.org/10.3390/a17010002>

44. Volodymyr Shymkovych, Volodymyr Samoty, Sergii Telenyk, Petro Kravets, Taras Posvistak. A real time control system for balancing a ball on a platform with FPGA parallel implementation // Technical Transactions. Poland. 2018. Vol. 5. 109-117.

45. Volodymyr Shymkovych, Veronika Niechkina. The criterion for determining the buffering time of the measuring channel for smoothing the variable changes of the sensor signal // 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), Kyiv, Ukraine. 2020. pp. 343-346.

46. Омельченко Т. Ю. Удосконалення алгоритмів управління процесом

розходження суден. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.22.13 – навігація та управління рухом (271-Річковий та морський транспорт). – Національний Університет "Одеська морська академія", Одеса, 2018.

47. Гильгурт С.Я. Анализ применения реконфигурируемых вычислителей на базе ПЛИС для реализации нейронных сетей // Моделювання та інформаційні технології. Зб. наук. пр. ПІМЕ НАН України. 2006. Вип. 37. с. 168- 174.

48. Кравець П. І., Федорчук В. В., Гой А. А. Нейромережевий контролер системи стабілізації рухомого об'єкта з апаратно-програмною реалізацією на ПЛИС // Вісник НТУУ «КПІ». Інформатика, керування та обчислювальна техніка: Зб. наук. пр. 2014. №63. С. 4-11

49. Руденко О. Г., Бодянський Є. В. Штучні нейронні мережі: вид. компанія СМІТ, Харків. 2006.

50. Дубровін В.І., Субботін С.О. Методи оптимізації та їх застосування в задачах навчання нейронних мереж: Навчальний посібник. Запоріжжя: ЗНТУ, 2003. 136 с.

51. Volodymyr Symkovych, Peter Kravets. Hardware Implementation Neural Network Controller on FPGA for Stability Ball on the Platform // Hu Z., Petoukhov S., Dychka I., He M. (eds) Advances in Computer Science for Engineering and Education II. ICCSEEA 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 938. Springer, Cham, Switzerland. pp. 247-256

52. Hunt K. J., Sbarbaro D., Zbikowski R., Gawthrop P. J. Neural networks for control systems: A survey // Automatica. 1992. Vol. 28. № 6. pp. 1083-1112

53. Kawato M., Uno Y., Isobe M., Suzuki R. Hierarchical neural network model for voluntary movement with application to robotics // IEEE Control Systems Magazine. 1988. Vol. 8. pp. 8-16.

54. Passalis N., Tefas A. Continuous drone control using deep reinforcement learning for frontal view person shooting // Neural Computing and Applications.

2020. Vol. 32. pp. 4227-4238

55. Наконечний М. В., Наконечний Ю. М. Особливості ідентифікації динамічних об'єктів за допомогою рекурентних нейронних мереж // Вісник Національного університету "Львівська політехніка": Автоматика, вимірювання та керування. 2009. № 639. с. 107-116.

56. Субботін С.О., Олійник А.О., Олійник О.О. Неітеративні, еволюційні та мультиагентні методи синтезу нечіткологічних і нейромережних моделей / Під заг. ред. С. О. Субботіна : Монографія. Запоріжжя: ЗНТУ, 2009. 375 с.

57. Шимкович В. М., Кравець П. І., Жеребко В. А., Шимкович В. М., Дьомін Р. Ю., Мостович А.В. Нейромережеві технології оперативного діагностування технічного стану рухомого складу // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. 2011. №123. С. 119–123

58. Gouletas S. Development of a Ship Autopilot using Neural Network / S. Gouletas // National Technical University of Athens. – 2020. – 86 P.

59. W Thomas Miller, Paul J Werbos, and Richard S Sutton. Neural networks for control. MIT press, 1995.

60. R Burns and R Richter. A neural-network approach to the control of surface ships. Control Engineering Practice, 4(3):411–416, 1996.

61. Jyun-Yu Jhang, Kuang-Hui Tang, Chuan-Kuei Huang, Cheng-Jian Lin, Kuu-Young Young. FPGA Implementation of a Functional Neuro-Fuzzy Network for Nonlinear System Control // Electronics. 2018. Vol.7, №145. pp. 1- 22.

62. Arbab Nighat Khizer and MA Dai Yaping. Unar,” design of heading controller for cargo ship using feed forward artificial neural network. International Journal of Advancements in Computing Technology (IJACT), 5(9):556–566, 2013.

63. Tristan Perez, Andrew Ross, and Thor I Fossen. A 4-dof simulink model of a coastal patrol vessel for manoeuvring in waves. 2006.

64. Шимкович В. М. Методи та засоби проектування апаратних компонентів нейромережевих систем керування. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 –

комп'ютерні системи та компоненти. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Київ, 2021.

65. Doronin V. Application of evaluation criteria of functional sustainability instrumental method of navigation on Ukraine's Inland waterways // The XIII International Scientific Conference. – Zheleznii Port, Ukraine, 2017. – P. 178–181.

66. Panin V. Application of the System Analysis of Implementation of the Instrumental Method of Navigation on Inland Waterways of Ukraine / V. Panin, V. Doronin, V. Aleynikov // Radio Electronics, Computer Science, Control. – 2018. – No. 2 (45). – P. 125–134. DOI 10.15588/1607-3274-2018-2-14.

67. Lainiotis D. Neural network application to ship position estimation // Proceedings of Conference «OCEANS'93. Engineering in Harmony with Ocean». – 1993. – P. 1384–1389.

68. Thor I Fossen et al. Guidance and control of ocean vehicles, volume 199. Wiley New York, 1994.

69. Application of Intelligent Processing of Data Flows Under Conditions of River Navigation / [V. Panin, V. Doronin, I. Tykhonov, M. Aleinikov] // Eastern European Journal of Enterprise Technologies. – 2018. – Vol. 3/9 (93). – P. 6–18. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.131599.

70. Nam-Kyun Im, Van-Suong Nguyen, Artificial neural network controller for automatic ship berthing using head-up coordinate system, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Volume 10, Issue 3, 2018, Pages 235–249, ISSN 2092-6782, <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2017.08.003>.

71. Y. Zhang, et al. Neural network approaches to a class of ship control problems (part I, II) P.A. Wilson (Ed.), Eleventh Ship Control Systems Symposium, vol. 1 (1997), pp. 115–150.

72. Mingyang Zhang, Pentti Kujala, Mashrura Musharraf, Jinfen Zhang, Spyros Hirdaris, A machine learning method for the prediction of ship motion trajectories in real operational conditions, Ocean Engineering, Volume 283, 2023, 114905, ISSN 0029-8018, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114905>.

73. Nocedal, Jorge; Wright, Stephen J. (2006). Numerical Optimization (2nd

ed). Springer. ISBN 978-0-387-30303-1.

74. Fujimoto Shoji. Maneuvering ship using wheel-over position / Fujimoto Shoji, Hakozaki Tetsuya. // *Nihon kokai gakkaishi-Navigation*. – 1997. – №132. – P. 42-50.

75. K. Kijima, et al. On the maneuvering performance of a ship with the parameter of loading condition *J. Soc. Nav. Archit. Jpn.*, 168 (2) (1990), pp. 141-148.

76. Тришин Н. В. Интегрирование предиктивной модели движения судна в ЭКНИС / Тришин Н. В., Сикирин В. Е. // *Судовождение: Сб. научн. трудов./ ОНМА, Вып. 24*. – Одесса: «ИздатИнформ», 2014 – С. 164-171.

77. Сикирин В.Е. Зависимость точности судовождения от закона управления движением судна по курсу. // *Річковий та морський транспорт: інфраструктура, судноплавство, перевезення, безпека: Матеріали наук.-техн. конф.*, 16-17 листоп. 2017 – Одеса : ОНМА, 2017. – С. 137-140 .

78. Marquardt, D. W. An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters / Donald W. Marquardt // *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*. – 1963. – Vol. 11(2). – P. 431–441.

79. Foresee, F. D. Gauss-Newton approximation to Bayesian learning / F. Dan Foresee and Martin T. Hagan // *The 1997 IEEE International Conference on Neural Networks*. June 9–12, 1997, Houston, USA Vol.3 – NJ.: IEEE, 1997. – P. 1930–1935.

80. Artyszuk, J. Data Smoothing Application to the Ship Motion Mathematical Model Identification [Text]/ *Annual of Navigation*. – 2000. – No. 2. – P. 5-15.

81. Barrass, C.B. Ship design and performance for masters and mate [Text]. – Burlington: Elsevier Butterworth-Heinemann Linacre House, 2004. – 264 p.

82. Morawski, L. Problem of Stopping Vessel at the Waypoint for Full-Mission Control Autopilot [Text]/ L.Morawski, V.Nguyen Cong// *Int. J. on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. – 2010. – V.4. – No.2. – P.151-156.

83. Тимошук О.М. Метод формалізації знань про оцінку обстановки судноводієм при виникненні небезпечної ситуації зближення (зіткнення). *Системи обробки інформації*. – 2019. – №2(157). – С. 154-160.

<https://doi.org/10.30748/soi.2019.157.22>.

84. Aarsther, K.G. Combined Maneuvering Analysis, AIS and Full-Mission Simulation [Text] / K.G.Aarsther, T.Moan// Int. J. on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. – 2007. – V.1. – No.1. – pp. 31-36.

85. Artyszuk, J. Data Smoothing Application to the Ship Motion Mathematical Model Identification [Text]/ Annual of Navigation. – 2000. – No. 2. – P. 5-15.

86. Barrass, C.B. Ship design and performance for masters and mate [Text]. – Burlington: Elsevier Butterworth-Heinemann Linacre House, 2004. – 264 p.

87. Dupond, S. A thorough review on the current advance of neural network structures // Annual Reviews in Control. 14 – 2019 – P. 200–230.

88. Sugeno, M. An introductory survey of fuzzy control // Information sciences. – Vol. 36, №1-2. – 1985. – pp. 59-83.

89. Dushkoff M., Ptucha, R. Adaptive Activation Functions for Deep Networks, Electronic Imaging // Computational Imaging XIV – 2016. - pp. 1-5.

90. Yasunobu, S., Miyamoto, S. Automatic train operation system by predictive fuzzy control // Industrial Applications of Fuzzy Control, Elsevier, Amsterdam. Netherlands, – 1985. – pp. 1-18.

91. Marr, D. Theory of edge detection / D. Marr, E. Hildreth // Proceedings of the royal society of London. Vol. 207, No. 1167, 1980. - P. 187 -217

92. Дакі О.А., Дорошева А.О., Іваненко В.М., Чебан В.І. Агентоорієнтована модель реалізації системи підтримки прийняття рішення безпеки судноводіння. *Системи озброєння і військова техніка*. 2020. № 3(63). С. 122-30. <https://doi.org/10.30748/soivt.2020.63.18>.

93. Dimitrios Dagdilelis, Mogens Blanke, Rasmus H. Andersen, Roberto Galeazzi, Cyber-resilience for marine navigation by information fusion and change detection, Ocean Engineering, Volume 266, Part 3, 2022, 112605, ISSN 0029-8018, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112605>.

94. Мельник О.В., Шапран Ю.Є., Матюхов А.Т., Бойко О.А. Дослідження системи підтримки прийняття рішення безпеки судноводіння /

Водний транспорт: Збірник наукових праць. Випуск 1(32). 2021.

95. Hagen J.E. Implementing e-Navigation, 2017. – 203 p.

96. Astrein V. Determination of ships passing strategy by the use of a conflict function / V. Astrein // Eurasian Union of Scientists. – 2015. – № 12(21). – С. 1-3.

97. Ali, R.; Hussain, A.; Nazir, S.; Khan, S.; Khan, H.U. Intelligent Decision Support Systems – An Analysis of Machine Learning and Multicriteria Decision-Making Methods. *Appl. Sci.* 2023, *13*, 12426. <https://doi.org/10.3390/app132212426>

Додаток А

Список публікацій за темою дисертації у фахових виданнях:

1. Гусак І.Л., Замана А. Методика визначення критеріїв безпечної швидкості суден при експлуатації суден внутрішнім водним транспортом. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*. 2023. Т. 4, № 74. С. 34–39. URL: <https://doi.org/10.26906/sunz.2023.4.034>
2. Гусак І. Л., Нікітін П. В. Метод управління ризиками надзвичайних ситуацій при виконанні морських перевезень. *Збірник наукових праць «Водний транспорт»*. 2023. № 2(38). С. 108–114. <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.12> .
3. Гусак І.Л., Аросланкін О.О., Шапіро Г.В., Саф'ян О.С., Постніков Є.Є. Нейромережева модель прогнозування параметрів руху судна в системі формування надводної обстановки ближньої морської зони. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. 2021. № 3(69). С. 116-25. <https://doi.org/10.30748/zhups.2021.69.15> .
4. Гусак І.Л. Дослідження факторів ризику плавання судна в акваторії морського порту. *Вісник Приазовського Державного технічного університету*. 2023. № 47. С. 280–286. https://journals.urau.ua/vestnikpgtu_tech/article/view/300114/292591
doi: 10.31498/2225-6733.47.2023.300114
5. Гусак І.Л., Ярмач В. Пропозиції щодо розробки методів управління рухом судна в портовій акваторії. *Збірник наукових праць «Водний транспорт»*. 2023. № 1 (39). С. 5968. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.06
<https://vt.duit.in.ua/index.php/home/article/view/319/276> doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.06

Публікації за доповідями та матеріалами міжнародних та всеукраїнських науково-практичних конференцій:

1. Гусак І.Л., Боріна М.В. Метод управління ризиками надзвичайних ситуацій при виконанні морських перевезень. Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції м. Київ, 7 грудня 2023 р. – Київ: вид-во Київського інституту водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Державного університету інфраструктури та технологій. – С. 17-19.
2. Гусак І.Л., Ярмач В. Дослідження методів управління рухом судна в портовій акваторії. Матеріали II Всеукраїнської науково-практичної конференції «Виклики та перспективи розвитку транспортної інфраструктури». 29.03.2024-05.04.2024 р. м. Київ.

Додаток Б



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФРАСТРУКТУРИ ТА ТЕХНОЛОГІЙ
(ДУІТ)

Вул. Кирилівська, 9 м. Київ, 04071 тел./факс: (044) 463-74-70, 482-51-26

E-mail: duit@duit.edu.ua Код ЄДРПОУ 41330257

«28» 02 2024 № 183/У-11

УЗГОДЖЕНО

Проректор з науково-педагогічної роботи

 **Юрій ДУДНИК**

ЗАТВЕРДЖУЮ

Ректор

 **Надія БРАЙКОВСЬКА**

АКТ

про впровадження в навчальний процес результатів дисертаційної роботи
**ГУСАК Ірини на тему «Методи системи підтримки прийняття рішення
 безпеки судноводіння в портовій акваторії»**

Цей акт складено про те, що наукові дослідження за темою дисертаційної роботи ГУСАК Ірини на тему «Методи системи підтримки прийняття рішення безпеки судноводіння в портовій акваторії» використовуються в навчальному процесу факультету судноводіння на кафедрі навігації і управління суднами при викладанні дисциплін «Забезпечення навігаційної безпеки плавання» та «Управління морехідними якостями судна» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю 271 Морський та внутрішній водний транспорт.

**Директор Київського інституту водного
 транспорту імені гетьмана
 Петра Конашевича-Сагайдачного,
 доктор технічних наук, професор**

**Декан факультету судноводіння,
 кандидат юридичних наук, доцент**



Олена ТИМОЩУК



Олександр ЄЛАЗАРОВ



ЧЕРВОНА РУТА
Круїзна компанія

CHERVONA RUTA
Cruise Company

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи

Гусак Ірини Леонідівни

«Методи системи підтримки прийняття рішення безпеки судноводіння в портовій акваторії», представленої на здобуття наукового ступеня

доктора філософії зі спеціальності

271 – Морський та внутрішній водний транспорт

Цей акт складено про те, що результати дослідження здобувачки ступеня доктора філософії Гусак Ірини Леонідівни на тему «Методи системи підтримки прийняття рішення безпеки судноводіння в портовій акваторії» мають практичне значення та дійсно використовуються в діяльності підприємства круїзна компанія «Червона Рута».

На підприємстві застосовується метод ідентифікації надводної обстановки, який базується на використанні нечітких нейронних мереж, що дозволяє підвищити оперативність та обґрунтованість ситуаційної обізнаності та виробленню відповідних рішень при керуванні судном у складних умовах навігації.

Завдяки впровадженню результатів дисертаційної роботи, а саме розробці алгоритмів ідентифікації та розпізнавання надводної обстановки, відбору та управління параметрами відображення інформаційними ознаками при інтерпретації інформаційної моделі, що забезпечує інформаційну підтримку процесу вироблення рішень судноводієм існує можливість скоротити час аналізу обстановки на 12-25% і підвищити повноту врахування значимих чинників в оцінці обстановки на 20-35% зі збільшенням вартості модифікації інформаційного середовища на 10-15% за допомогою модернізації спеціального програмного забезпечення.

Генеральний директор



С.Н. Дроздова