

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ»

Кваліфікаційна наукова праця на
правах рукопису

КАЗАК ЮРІЙ ВЛАДИСЛАВОВИЧ

УДК 656.61.052.484

ДИСЕРТАЦІЯ

**РОЗРОБКА СПОСОБУ УРАХУВАННЯ ТРАЄКТОРНОЇ ПОХИБКИ
ПОВОРОТУ СУДНА ПРИ ОЦІНЦІ БЕЗПЕКИ СУДНОВОДІННЯ**

Спеціальність 05.22.13 - навігація та управління рухом

Подається на здобуття наукового ступеню кандидата технічних наук
Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



(Ю.В. Казак)

Науковий керівник:
Ворохобін Ігор Ігорович,
к.т.н., доцент

Одеса – 2019

Казак Ю.В. Розробка способу урахування траєкторної похибки повороту судна при оцінці безпеки судноводіння. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеню кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.13 – навігація та управління рухом. – Національний університет «Одеська морська академія» Міністерства освіти і науки України, Одеса, 2019.

Дисертаційне дослідження спрямоване на розв’язання науково-прикладної задачі – забезпечення безпеки судноводіння шляхом створення способу вибору безпечної траєкторії руху судна під час плавання в стислих водах морського порту з урахуванням траєкторної похибки його повороту, який реалізовано у вигляді комп’ютерної програми за мінімумом середньоквадратичної похибки зчислення та обсервації в умовах експлуатації судна.

Головною мотивацією досліджень є сьогоденна наявність **запиту практики: безпечне судноплавство; моделювання руху судна; управління судном; зони руху судна.**

Метою дисертаційного дослідження є одержання найбільшого ефекту від технології маневрування судном в стислих умовах акваторії морського порту.

Науковою гіпотезою цього дослідження прийняте допущення про можливість подальшого підвищення безпеки судноводіння шляхом мехатронного об’єднання методів і способів технології маневрування з елементами *e* - навігації.

Головною задачею дослідження стала розробка програмного забезпечення електронних карт спроможністю оперативної оцінки зчисленого місцезнаходження та вибору оптимально обсервованого безпечного місцеперебування судна в стислих умовах акваторії порту.

Рішення головного завдання полягає у виборі безпечної траєкторії руху судна з урахуванням похибок поворотів та верифікація процесу безпечного управління судном в реальних експлуатаційних умовах.

У результаті вирішення головних та допоміжних завдань отримані наступні **наукові положення**:

Наукові положення обґрунтовані **науковими результатами**.

- удосконалена процедура оцінювання величини траєкторної похибки повороту судна залежно від динамічної моделі його прогнозу;
- отримав подальший розвиток спосіб визначення залежності вірогідності безпечної проводки судна від випадкових траєкторних похибок повороту;
- отримав подальший розвиток графоаналітичний спосіб комп'ютерного відображення навігаційної ситуації на електронній карті та мінімаксний вибір безпечної траєкторії руху судна з урахуванням похибок повороту.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що отримані наукові результати впроваджуються на морських судах у процесі експлуатації для вибору безпечного маршруту плавання без модернізації обладнання, а також використані розробниками судових навігаційних інформаційних систем.

Практичні результати дисертаційного дослідження впроваджені приватним вищим навчальним закладом «Інститут післядипломної освіти» «Одеський морський тренажерний центр» для підготовки судноводіїв (акт впровадження від 05.09.2018 р.), компанією «СМА SHIPS» для перепідготовки судноводіїв компанії (акт впровадження від 09.09.2018р.). Матеріали дисертаційного дослідження використовуються в навчальному процесі на кафедрі управління судном під час викладання дисципліни «Маневрування і управління судном» (акт від 17.09.2018 р.).

У **вступі** роботи наведені актуальність теми дисертації, її зв'язок із програмами наукових досліджень, сформульовано мету та гіпотезу дослідження, визначено його головну та допоміжні завдання, методи

дослідження, наукова новизна та показано практичне значення дисертаційної роботи.

У першому розділі методом дедукції здійснений інформаційний огляд літературних джерел та проведено аналіз базових напрямків вирішення проблеми забезпечення безпеки судноводіння.

Обґрунтовані основні напрямки невирішених проблем та питань безпеки судноплавства.

Другий розділ містить обґрунтування вибору теми дисертаційного дослідження та технологію його методологічного забезпечення.

За допомогою системного підходу сформовано технологічну карту дисертаційного дослідження, яка містить запит практики, тему, мету, головну задачу дисертаційного дослідження, його об'єкт та предмет. Методами системного аналізу, відповідно принципам ідентифікації та активного експерименту, поставлені три допоміжні задачі дослідження.

У третьому розділі приведені результати рішення першої допоміжної задачі – дослідження залежності похибки управління від істотних чинників руху судна.

Науковим результатом рішення першої допоміжної задачі стало встановлення графоаналітичних залежностей траєкторних векторних похибок управління судном на повороті $S^{(s)}$ та двомірної щільності нормального розподілу випадкової векторної похибки управління судном f^S_C , необхідних для програмного діалогу з програмним забезпеченням електронних карт.

В четвертому розділі представлені результати рішення другої допоміжної задачі – аналізу впливу випадкової складової траєкторної похибки повороту на вирогідність безпечної проводки судна в стислих умовах.

Науковим результатом рішення другої допоміжної задачі став інноваційний спосіб кількісного визначення критерію оцінки безпечного плавання судна в стислих умовах отриманого ймовірнісним методом адаптованим за принципами ідентифікації до елементів e - навігації.

У **п'ятому розділі** представлені результати рішення третьої допоміжної задачі – розробки графічного способу комп'ютерного відображення навігаційної ситуації на електронній карті.

Науковим результатом рішення третьої допоміжної задачі стала процедура відображення на електронній карті безпечної траєкторії руху з визначенням величини траєкторної похибки повороту судна шляхом зіставлення збільшення координат судна за час повороту, розрахованих з використанням повної динамічної моделі обертального руху судна зміни курсу судна для вибраного маневру зміни курсу.

Рішення головної задачі дослідження здійснене методом верифікації динамічної моделі руху т/х «Celandine» типу Ro-Ro водотоннажністю 18031 тонна. Параметри динамічної моделі визначені для повороту судна з кутами кладки пера керма від 5 до 30 градусів включно.

У дисертації отримано теоретичне узагальнення і нове вирішення задачі забезпечення безпеки судноводіння шляхом створення способу вибору безпечної траєкторії руху судна під час плавання в стислих водах морського порту з урахуванням траєкторної похибки його повороту, який реалізовано у вигляді комп'ютерної програми за мінімумом середньоквадратичної похибки зчислення та обсервації в умовах експлуатації судна.

У дисертаційній роботі:

- удосконалена процедура оцінювання величини траєкторної похибки повороту судна залежно від динамічної моделі його прогнозу;
- отримав подальший розвиток спосіб визначення залежності вірогідності безпечної провідки судна від випадкових траєкторних похибок повороту;
- отримав подальший розвиток графоаналітичний спосіб комп'ютерного відображення навігаційної ситуації на електронній карті та мінімаксний вибір безпечної траєкторії руху судна з урахуванням похибок повороту.

Практичні результати дисертаційного дослідження впроваджені приватним вищим навчальним закладом «Інститут післядипломної освіти» «Одеський морський тренажерний центр» для підготовки судноводіїв (акт впровадження

від 05.09.2018 р.), компанією «СМА SHIPS» для перепідготовки судноводіїв компанії (акт впровадження від 09.09. 2018 р.). Матеріали дисертаційного дослідження використовуються в навчальному процесі на кафедрі управління судном під час викладання дисципліни «Маневрування і управління судном» (акт від 17.09.2018 р.).

Ключові слова: безпека судноводіння, траєкторна похибка повороту судна, щільність розподілу похибки бокового відхилення, динамічні моделі прогнозу повороту судна, імітаційне моделювання, верифікація.

**Наукові праці в спеціалізованих виданнях з переліком
наукометричних баз, де вони проіндексовані:**

1. Ворохобин И.И. Оценка навигационной безопасности при плавании судов в стесненных водах / И. И. Ворохобин, **Ю. В. Казак**, В. В. Северин – LAP LAMBERT Academic Publishing, – 2018. - 239 с.

2. Ворохобин И.И. Эквивалентность оценки вероятности безаварийного плавания судна в стесненном районе / И. И. Ворохобин, В. В. Северин, **Ю. В. Казак** // Судовождение: Сб. научн. трудов. ОНМА, Вып. 25. – Одесса: «ИздатИнформ», 2015. - С. 40-47.

3. Ворохобин И.И. Количественная оценка безопасности судовождения / И.И. Ворохобин, В. В. Северин, **Ю. В. Казак** // Автоматизация судовых технических средств: научн. - техн. сб. – 2015. – Вып. 21. Одесса: ОНМА. – С. 34 – 39.

4. Северин В. В. Стохастическая характеристика бокового отклонения судна при проводке по заданному маршруту / В. В. Северин, **Ю. В. Казак** // Автоматизация судовых технических средств: научн. -техн. сб. – 2016. – Вып. 22. Одесса: НУ"ОМА". – С. 92 – 96.

5. Казак Ю. В. Оценка векториальной погрешности поворота судна и минимизация ее величины / **Ю. В. Казак**, В. В. Северин // Автоматизация судовых технических средств: научн.- техн. сб. – 2017. – Вып. 23. Одесса: НУ"ОМА". – С. 37 – 43.

6. Ворохобин И.И. Векториальные погрешности, возникающие при повороте судна / И. И. Ворохобин, **Ю. В. Казак** // Судовождение: Сб. научн. трудов: НУ"ОМА", Вып. 26. – Одесса: «ИздатИнформ», 2016. - С. 60-64.

7. Казак Ю.В. Влияние погрешности перекладки пера руля на точность поворота судна/ Ю. В. Казак // Судовождение: Сб. научн. трудов.: НУ"ОМА", Вып. 27. – Одесса: «ИздатИнформ», 2017. - С. 96 - 101.

8. Казак Ю.В. Учет динамических моделей вращательного движения судна при обеспечении безопасности судовождения / Ю.В. Казак, Г. Е. Калиниченко // Судовождение: Сб. научн. трудов. НУ «ОМА», Вып. 28. – Одесса: «ИздатИнформ», 2018. - С. 63-69.

9. Ворохобин И.И. Плотность распределения векториальной погрешности поворота судна / И. И. Ворохобин, В. В Северин., **Ю. В. Казак** // Эксплуатация, безопасность и экономика водного транспорта. Вестник Государственного морского университета им. адмирала Ф. Ф. Ушакова. Новороссийск. – 2017. – выпуск 3 (84). – С. 65 - 69.

10. Ворохобин И. И. Траекторная погрешность поворота судна и способы снижения ее величины / И. И. Ворохобин, **Ю. В. Казак**, Северин В. В. // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, V (14), Issue: 132, 2017. - С.101 – 105.

11. Астайкин Д.В. Сравнение способов оценки безопасности плавания в стесненных районах / Д. В. Астайкин, В. В. Северин, **Ю. В. Казак** // East European Scientific Journal, №11 (27), 2017, part 1. - С. 31-39. (SCOPUS)

Опубліковані праці апробаційного характеру:

12. Казак Ю.В. Определение величины векториальной погрешности

поворота судна / **Ю. В. Казак**, В. В. Северин. // Развитие науки в XXI веке: Материалы XXVII международной научно-практической конференции, 15 сентября 2017 - Харьков: научно-информационный центр «Знание», 2017. – С. 34-38.

13. Казак Ю.В. Зависимость погрешности бокового отклонения судна от траекторной погрешности поворота судна / Ю.В. Казак // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, V (16), Issue: 148, 2017.- С. 75-77.

14. Ворохобин И. И. Определение вероятности обеспечения безаварийного плавания судов в стесненных районах / И. И. Ворохобин, В. В. Северин, **Ю. В. Казак** // Материалы научно-методологической конференции «Морські перевезення та інформаційні технології в судноплаванні», - 18-19 листопада 2014, Одеса. – С. 160-163.

15. Ворохобин И. И. Определение закона распределения бокового отклонения судна / И. И. Ворохобин, В. В. Северин, **Ю. В. Казак** // Материалы научно-методологической конференции „Морські перевезення та інформаційні технології в судноплаванні”, - 19-20 листопада 2015, Одеса. – С. 117-119.

16. Казак Ю. В. Зависимость точности поворота судна от погрешности перекладки пера руля. / Ю. В. Казак // Річковий та морський транспорт: інфраструктура, судноплавання, перевезення, безпека: Матеріали наук.-техн. конф., 16-17 листопада 2016 – Одеса : ОНМА, 2016. – С. 10–15.

17. Казак Ю. В. Учет динамических моделей вращательного движения судна при обеспечении безопасности судовождения / **Ю. В. Казак**, Г. Е. Калиниченко // Транспортні технології (Морський та річковий флот): інфраструктура, судноплавання, перевезення, автоматизація: Матеріали наук.-техн. конф., 16-17 листоп. 2017 – Одеса: НУ «ОМА», 2017. – С. 99 - 102.

18. Ворохобин И. И. Формирование процедуры оценки вероятности безаварийного плавания судна в стесненных районах/ И. И. Ворохобин, В. В. Северин, **Ю. В. Казак** // Материалы VII Международной научно-

методологической конференции «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2015)», - 26-28 мая 2015, Херсон. – С. 99-102.

19. Северин В. В. Определение закона распределения бокового отклонения судна / В. В. Северин, **Ю. В. Казак** // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2016): Матеріали VIII Міжнародної наук.-практ. конф., 24-26 травня. 2016 – Херсон: ХДМА, 2016. – С. 139–145.

20. Казак Ю. В. Влияние погрешности перекладки руля на точности поворота судна / Ю. В. Казак // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2017): Матеріали IX Міжнародної наук. - практ. конф., 23-25 травня. 2017 – Херсон: ХДМА, 2017. – С. 112–114.

21. Ворохобин И. И. Векториальная погрешность и ее плотность распределения / И. И. Ворохобин, В. В. Северин, **Ю. В. Казак** // Материалы Всеукраинской научно-технической конференции с международным участием. 17-18 мая 2017 г., Николаев, НУК, 2017.- С. 25 – 27.

ANNOTATION

Kazak Yu. V. Development method of account of trajectory error of turn of ship at estimation of safety of navigation. It is Qualifying scientific labor on rights for a manuscript.

Dissertation on the receipt of scientific degree of candidate of engineering sciences in specialty 05.22.13 – navigation and traffic control. – National University "Odessa marine academy", Odessa, 2020.

The dissertation research is directed on the solution of a scientific and applied problem - maintenance of safety of navigation by creation of a way of a choice of a safe trajectory of movement of the vessel when sailing in congested waters of seaport taking into account a trajectory error of its turn which is realized in the form of computer program calculation and observation in the conditions of operation of the vessel.

The main motivation for research is the current demand for practice: safe shipping; ship motion modeling; ship management; areas of movement of the vessel.

The purpose of the dissertation research is to obtain the greatest effect from the technology of ship maneuvering in the concise conditions of the seaport.

The scientific hypothesis of this study is the assumption of the possibility of further improving the safety of navigation by mechatronic integration of methods and techniques of maneuvering technology with elements of e - navigation.

The main task of the study was to develop electronic chart software with the ability to asses quickly the calculated location and select the optimally observed safe location of the vessel in the cramped conditions of the port.

The solution of the main task is to choose a safe trajectory of the vessel taking into account the errors of turns and verification of the process of safe control of the vessel in real operating conditions.

As a result of solving the main and auxiliary tasks, the following scientific positions were obtained:

Scientific positions are substantiated by scientific results.

- improved procedure for estimating the magnitude of the trajectory error of the vessel depending on the dynamic model of its forecast;
- the method of determining the dependence of the probability of safe passage of the vessel on accidental trajectory errors of the turn was further developed;
- the graph analytical method of computer display of the navigation situation on the electronic chart and the minimum choice of a safe trajectory of the vessel taking into account turn errors was further developed.

The practical significance of the obtained results is that the obtained scientific results are implemented on seagoing vessels during operation to select a safe navigation route without upgrading the equipment, as well as used by the developers of ship navigation information systems.

The practical results of the dissertation research were implemented by the private higher educational institution "Institute of Postgraduate Education" "Odesa Marine Training Center" for the training of navigators (act of implementation from 05.09.2018), the company "CMA SHIPS" for retraining of company navigators from the act of implementation from 09.09.2018 .). The materials of the dissertation research are used in the educational process at the Ship handling department during the teaching of the discipline "Maneuvering and Ship Handling" (act of 17.09.2018).

The introduction of the work presents the relevance of the dissertation topic, its connection with research programs, formulates the purpose and hypothesis of the study, defines its main and auxiliary objectives, research methods, scientific novelty and shows the practical significance of the dissertation.

In the first section by the method of deduction the information review of the literature sources is carried out and the analysis of the basic directions of the decision of a problem of maintenance of safety of navigation is carried out.

The main directions of unresolved problems and issues of navigation safety are substantiated.

The second section contains the rationale for choosing the topic of the dissertation research and the technology of its methodological support.

With the help of a systematic approach, a technological map of the dissertation research is formed, which contains the request of practice, topic, purpose, the main task of the dissertation research, its object and subject. Methods of system analysis, in accordance with the principles of identification and active experiment, are set by the three auxiliary research tasks.

The third section represents the results of the solution of the first auxiliary problem - the study of the dependence of control error on the essential factors of vessel movement.

The scientific result of solving the first auxiliary problem was the establishment of graph-analytical dependences of trajectory vector errors of ship control on turn and two-dimensional density of normal distribution of random vector error of vessel control fSC required for software dialogue with electronic chart software.

The fourth section represents the results of solving the second auxiliary problem - the analysis of the influence of the random component of the trajectory error of the turn on the probability of safe passage of the vessel in compressed conditions.

The scientific result of the solution of the second auxiliary problem was an innovative way to quantify the criterion for assessing the safe navigation of the vessel in concise conditions obtained by the probabilistic method adapted to the principles of identification to the elements of e - navigation.

The fifth section presents the results of solving the third auxiliary problem - the development of a graphical method of computer display of the navigation situation on an electronic chart.

The scientific result of the third auxiliary problem was the procedure of displaying a safe trajectory on the electronic chart with determining the magnitude of the trajectory error of the vessel by comparing the increase in coordinates of the

vessel during the rotation, calculated using a full dynamic model of rotational motion of the vessel for the selected course.

The solution of the main problem of research is carried out by a method of verification of dynamic model of movement of m/v "Celandine" of the Ro-Ro type with a tonnage of 18031 tons. The parameters of the dynamic model are defined for turning the vessel with the angles of laying the rudder from 5 to 30 degrees inclusive.

In the dissertation the theoretical generalization and the new decision of a problem of maintenance of safety of navigation by creation of a way of a choice of a safe trajectory of movement of the vessel when sailing in compressed waters of seaport taking into account a trajectory error of its turn which is realized in the form of the computer program on a minimum error. in the conditions of operation of the vessel.

In the dissertation:

- improved procedure for estimating the magnitude of the trajectory error of the vessel depending on the dynamic model of its forecast;
- the method of determining the dependence of the probability of safe passage of the vessel on accidental trajectory errors of the turn was further developed;
- the graph analytical method of computer display of the navigation situation on the electronic chart and the minimum choice of a safe trajectory of the vessel taking into account turn errors was further developed.

The practical results of the dissertation research were implemented by the private higher educational institution "Institute of Postgraduate Education" "Odesa Marine Training Center" for the training of pilots (act of implementation from 05.09.2018), the company "CMA SHIPS" for retraining of pilots of the company (act of implementation from 09.09. 2018). p.). The materials of the dissertation research are used in the educational process at the Ship Handling Department during the teaching of the discipline "Maneuvering and Ship Handling" (act of 17.09.2018).

Keywords: safety of navigation, trajectory error of turn of ship, closeness of distributing of error of lateral declination, dynamic models of prognosis of turn of ship, imitation design, verification.

Basic scientific results of dissertation

1. Ворохобин И.И. Оценка навигационной безопасности при плавании судов в стесненных водах / И. И. Ворохобин, **Ю. В. Казак**, В. В. Северин – LAP LAMBERT Academic Publishing, – 2018. - 239 с.

2. Ворохобин И.И. Эквивалентность оценки вероятности безаварийного плавания судна в стесненном районе / И. И. Ворохобин, В. В. Северин, **Ю. В. Казак** // Судовождение: Сб. научн. трудов. ОНМА, Вып. 25. – Одесса: «ИздатИнформ», 2015. - С. 40-47.

3. Ворохобин И.И. Количественная оценка безопасности судовождения / И.И. Ворохобин, В. В. Северин, **Ю. В. Казак** // Автоматизация судовых технических средств: научн. - техн. сб. – 2015. – Вып. 21. Одесса: ОНМА. – С. 34 – 39.

4. Северин В. В. Стохастическая характеристика бокового отклонения судна при проводке по заданному маршруту / В. В. Северин, **Ю. В. Казак** // Автоматизация судовых технических средств: научн. -техн. сб. – 2016. – Вып. 22. Одесса: НУ"ОМА". – С. 92 – 96.

5. Казак Ю. В. Оценка векториальной погрешности поворота судна и минимизация ее величины / **Ю. В. Казак**, В. В. Северин // Автоматизация судовых технических средств: научн.- техн. сб. – 2017. – Вып. 23. Одесса: НУ"ОМА". – С. 37 – 43.

6. Ворохобин И.И. Векториальные погрешности, возникающие при повороте судна / И. И. Ворохобин, **Ю. В. Казак** // Судовождение: Сб. научн. трудов: НУ"ОМА", Вып. 26. – Одесса: «ИздатИнформ», 2016. - С. 60-64.

7. Казак Ю.В. Влияние погрешности перекладки пера руля на точность поворота судна / Ю. В. Казак // Судовождение: Сб. научн. трудов.: НУ"ОМА", Вып. 27. – Одесса: «ИздатИнформ», 2017. - С. 96 - 101.

8. Казак Ю.В. Учет динамических моделей вращательного движения судна при обеспечении безопасности судовождения / Ю.В. Казак, Г. Е. Калиниченко // Судовождение: Сб. научн. трудов. НУ «ОМА», Вып. 28. – Одесса: «ИздатИнформ», 2018. - С. 63-69.

9. Ворохобин И.И. Плотность распределения векториальной погрешности поворота судна / И. И. Ворохобин, В. В Северин., **Ю. В. Казак** // Эксплуатация, безопасность и экономика водного транспорта. Вестник Государственного морского университета им. адмирала Ф. Ф. Ушакова. Новороссийск. – 2017. – выпуск 3 (84). – С. 65 - 69.

10. Ворохобин И. И. Траекторная погрешность поворота судна и способы снижения ее величины / И. И. Ворохобин, **Ю. В. Казак**, Северин В. В. // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, V (14), Issue: 132, 2017. - С.101 – 105.

11. Астайкин Д.В. Сравнение способов оценки безопасности плавания в стесненных районах / Д. В. Астайкин, В. В. Северин, **Ю. В. Казак** // East European Scientific Journal, №11 (27), 2017, part 1. - С. 31-39.

Publications which certify approbation of materials of dissertation

12. Казак Ю.В. Определение величины векториальной погрешности поворота судна / **Ю. В. Казак**, В. В. Северин. // Развитие науки в XXI веке: Материалы XXVII международной научно-практической конференции, 15 сентября 2017 - Харьков: научно-информационный центр «Знание», 2017. – С. 34-38.

13. Казак Ю.В. Зависимость погрешности бокового отклонения судна от траекторной погрешности поворота судна / Ю.В. Казак // Science and Education

a New Dimension. Natural and Technical Sciences, V (16), Issue: 148, 2017.- С. 75-77.

14. Ворохобин И. И. Определение вероятности обеспечения безаварийного плавания судов в стесненных районах / И. И. Ворохобин, В. В. Северин, **Ю. В. Казак** // Материалы научно-методологической конференции «Морські перевезення та інформаційні технології в суднопластві», - 18-19 листопада 2014, Одеса. – С. 160-163.

15. Ворохобин И. И. Определение закона распределения бокового отклонения судна / И. И. Ворохобин, В. В. Северин, **Ю. В. Казак** // Материалы научно-методологической конференции „Морські перевезення та інформаційні технології в суднопластві”, - 19-20 листопада 2015, Одеса. – С. 117-119.

16. Казак Ю. В. Зависимость точности поворота судна от погрешности перекладки пера руля. / Ю. В. Казак // Річковий та морський транспорт: інфраструктура, суднопластво, перевезення, безпека: Матеріали наук.-техн. конф., 16-17 листопада 2016 – Одеса : ОНМА, 2016. – С. 10–15.

17. Казак Ю. В. Учет динамических моделей вращательного движения судна при обеспечении безопасности судовождения / **Ю. В. Казак**, Г. Е. Калиниченко // Транспортні технології (Морський та річковий флот): інфраструктура, суднопластво, перевезення, автоматизація: Матеріали наук.-техн. конф., 16-17 листоп. 2017 – Одеса: НУ «ОМА», 2017. – С. 99 - 102.

18. Ворохобин И. И. Формирование процедуры оценки вероятности безаварийного плавания судна в стесненных районах/ И. И. Ворохобин, В. В. Северин, **Ю. В. Казак** // Материалы VII Международной научно-методологической конференции «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2015)», - 26-28 мая 2015, Херсон. – С. 99-102.

19. Северин В. В. Определение закона распределения бокового отклонения судна / В. В. Северин, **Ю. В. Казак** // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2016): Матеріали VIII Міжнародної наук.-практ. конф., 24-26 травня. 2016 – Херсон: ХДМА, 2016. – С. 139–145.

20. Казак Ю. В. Влияние погрешности перекладки руля на точности поворота судна / Ю. В. Казак // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2017): Матеріали ІХ Міжнародної наук. - практ. конф., 23-25 травня. 2017 – Херсон: ХДМА, 2017. – С. 112–114.

21. Ворохобин И. И. Векториальная погрешность и ее плотность распределения / И. И. Ворохобин, В. В. Северин, **Ю. В. Казак** // Материалы Всеукраинской научно-технической конференции с международным участием. 17-18 мая 2017 г., Николаев, НУК, 2017.- С. 25 – 27.

ЗМІСТ

Стр.

ВСТУП.....	20
РОЗДІЛ 1 ІНФОРМАЦІЙНИЙ ПОШУК ЩОДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗАВАРІЙНОГО СУДНОВОДІННЯ.....	26
1.1. Огляд і аналіз літературних джерел щодо вирішення проблеми безпечного плавання суден.....	26
1.2. Неочевидні проблемні питання проблемних завдань безпечного плавання суден у стислих умовах.....	39
1.3. Висновки за першим розділом.....	40
РОЗДІЛ 2 МЕТОДОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАУКОВОГО ДОСЛІДЖЕННЯ.....	42
2.1. Вибір теми дослідження методом експертного оцінювання.....	43
2.2. Мета та задачі дослідження.....	46
2.3. Технологія наукового дослідження.....	47
2.4. Характеристика загального підходу до ідентифікації моделей єб'єктів і систем.....	51
2.5. Висновки за другим розділом.....	56
РОЗДІЛ 3 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ МЕХАНІЗМУ ФОРМУВАННЯ ТА КІЛЬКІСНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ТРАЄКТОРНОЇ ПОМИЛКИ ПОВОРOTУ СУДНА.....	57
3.1. Вплив вибору динамічної моделі поворотності судна на величину систематичної похибки управління.....	65
3.2. Урахування динаміки судна під час визначення похибки від перекладок керма $S^{(\beta)}$	85
3.3. Щільність розподілу векторної похибки управління.....	86
3.4. Висновки за третім розділом.....	93

РОЗДІЛ 4 АНАЛІЗ ВПЛИВУ ВИПАЛКОВОЇ ТРАЄКТОРІЇ ПОХИБКИ ПОВОРОТУ НА ВИРОГІДНІСТЬ БЕЗПЕЧНОЇ ПРОВОДКИ СУДНА В СТИСЛИХ УМОВАХ.....	95
4.1. Зв'язок одновимірної щільності похибки бічного відхилення з двовимірною щільністю векторної траєкторної похибки.....	107
4.2. Висновки за четвертим розділом.....	117
РОЗДІЛ 5 ОПЕРАТИВНА ОЦІНКА БЕЗПЕКИ ПЛАВАННЯ МЕТОДОМ ЗЧИСЛЕННЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ІНТЕГРАЛЬНОЇ ТРАЄКТОРНОЇ ПОХИБКИ ПОВОРОТУ СУДНА МЕТОДОМ ОБСЕРВАЦІЇ В УКСПЛУАТАЦІЙНИХ УМОВАХ.....	119
5.1. Відображення навігаційної ситуації з інформацією про небезпечне судноводіння.....	119
5.2. Верифікація динамічної моделі руху судна типу Ro-Ro дотоннажністю 18021 тонн.....	134
5.3. Висновки за п'ятим розділом.....	150
ВИСНОВКИ.....	152
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	153
ДОДАТОКИ	163

ВСТУП

Актуальність теми. Від успішного рішення проблеми забезпечення безаварійного судноводіння залежить зменшення кількості аварійних випадків, що веде до зниження загрози людському життю та навколишньому середовищу.

Плавання морських суден в стислих умовах ускладнено навігаційними перешкодами та інтенсивним судноплавством, які створюють передумови для виникнення аварійних ситуацій.

Безпечне судноплавство визначається ефективною керованою технологією судноводіння обмеженою інструментальними системами та засобами оперативної оцінки якості зчислення місця судна, внутрішнього і зовнішнього управління при наявності навігаційних перешкод та природних завад.

Тому розробка способу, що мінімізує аварійні ризики при плаванні судна в стислих водах є актуальним науковим напрямом.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. При виконанні роботи керувалися положеннями Транспортної стратегії України на період до 2020 р. (розпорядження Кабінету Міністрів України від 20.10.2010 р., №2174-р), рішенням Ради національної безпеки і оборони України від 16.05.2008 р. «Про заходи щодо забезпечення розвитку України як морської держави» (указ Президента України від 20.05.2008 р. №463 / 2008). Дисертаційне дослідження виконувалось в рамках планів наукових досліджень Національного університету «Одеська морська академія» за держбюджетною темою «Забезпечення безпеки судноводіння в стислих районах плавання», ДР № 0115U003580 (2017), в якій здобувач виконав окремий підрозділ.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційного дослідження є одержання найбільшого ефекту від технології маневрування судном в стислих умовах акваторії морського порту.

Науковою гіпотезою цього дослідження прийняте допущення про можливість подальшого підвищення безпеки судноводіння шляхом мехатронного об'єднання методів і способів технології маневрування з елементами е - навігації.

Головною задачею дослідження стала розробка програмного забезпечення електронних карт спроможністю оперативної оцінки зчисленного місцезнаходження та вибору оптимально обсервованого безпечного місцеперебування судна в стислих умовах акваторії порту.

Дослідження наступних допоміжних задач забезпечило рішення головної задачі дисертації:

- дослідження залежності траєкторної похибки повороту судна від істотних параметрів руху;
- аналіз впливу випадкової складової траєкторної похибки повороту на вірогідність безпечної проводки судна в стислих умовах;
- розробка способу комп'ютерного відображення з оцифровкою і без неї навігаційної обстановки на електронній карті.

Рішення головного завдання полягає у виборі безпечної траєкторії руху судна з урахуванням похибок поворотів та верифікація процесу безпечного управління судном в реальних експлуатаційних умовах.

Об'єктом дослідження дисертації є процес судноводіння.

Предметом дослідження є параметри руху судна та навігаційної обстановки в стислих умовах.

Методи дослідження. У дисертаційному дослідженні для рішення поставлених задач були застосовані наступні методи:

- дедукції для аналізу основних аспектів вирішення проблеми забезпечення безпеки судноводіння;
- експертного оцінювання для вибору теми дисертаційного дослідження;
- системного аналізу при формуванні технології наукового дослідження;
- ідентифікації, аналізу, синтезу, мінімаксу та верифікації при рішенні поставлених задач;

- теоретичної механіки для складання диференціальних рівнянь обертального руху судна;
- математичного аналізу для рішення рівнянь руху судна під час його повороту й пошуку залежності його поточного курсу від положення керма;
- теорії вірогідностей та математичної статистики для опису стохастичних характеристик випадкових векторних похибок.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у створенні способу вибору безпечної траєкторії руху судна під час плавання в стислих водах морського порту з урахуванням траєкторної похибки його повороту, який реалізовано у вигляді комп'ютерної програми за мінімумом середньоквадратичної похибки зчислення та обсервації в умовах експлуатації судна.

У дисертаційній роботі:

- удосконалена процедура оцінювання величини траєкторної похибки повороту судна залежно від динамічної моделі його прогнозу;
- отримав подальший розвиток спосіб визначення залежності вірогідності безпечної проводки судна від випадкових траєкторних похибок повороту;
- отримав подальший розвиток графоаналітичний спосіб комп'ютерного відображення навігаційної ситуації на електронній карті та мінімаксний вибір безпечної траєкторії руху судна з урахуванням похибок повороту.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що отримані наукові результати впроваджуються на морських судах у процесі експлуатації для вибору безпечного маршруту плавання без модернізації обладнання, а також використані розробниками суднових навігаційних інформаційних систем.

Практичні результати дисертаційного дослідження впроваджені приватним вищим навчальним закладом «Інститут післядипломної освіти» «Одеський морський тренажерний центр» для підготовки судноводіїв (акт впровадження від 05.09.2018 р.), компанією «СМА SHIPS» для перепідготовки судноводіїв компанії (акт впровадження від 09.09.2018р.). Матеріали дисертаційного

дослідження використовуються в навчальному процесі на кафедрі управління судном під час викладання дисципліни «Маневрування і управління судном» (акт від 17.09.2018 р.).

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота виконана дисертантом самостійно: проведено інформаційний пошук, в результаті якого проаналізовані основні аспекти проблеми забезпечення безаварійності судноводіння; забезпечене методологічне обґрунтування дослідження; розроблена процедура визначення залежності величини траєкторної похибки повороту від динамічної моделі його прогнозу, а також алгоритми для формування комп'ютерної системи відображення навігаційної ситуації на електронній карті та вибору безпечної траєкторії руху з урахуванням похибки повороту; впроваджені результати дисертаційної роботи у виробничий процес. У дисертації використані лише ті положення наукових праць, опублікованих у співавторстві, які належать автору особисто: формування кількісної характеристики безпеки судноводіння [2, 3], процедура визначення бокового відхилення судна під час плавання заданим маршрутом [4, 12], формалізація механізму утворення траєкторної похибки повороту [6], характеристика динамічних моделей обертального руху судна та їх застосування під час оцінювання траєкторної похибки повороту [8, 17], процедура визначення щільності розподілу похибки повороту для нормального закону [9, 15], процедура зниження траєкторної похибки повороту [10], порівняльний аналіз оцінок безпеки судноводіння в стислих водах [11], алгоритм оцінки вірогідності безпечного плавання обмеженим рухом маршрутом [14], визначення параметрів для оцінки вірогідності безаварійного плавання судна в районах з обмеженим рухом [18], процедура визначення закону розподілу похибки бокового відхилення судна [19, 21], характеристика траєкторної похибки повороту та спосіб її урахування під час оцінювання вірогідності безаварійного плавання судна в районах з обмеженим рухом [1].

Апробація результатів дисертації. Основні результати і положення роботи доповідалися, обговорювалися і були схвалені на науково-практичних, науково-технічних і науково-методичних конференціях:

науково-методологічна конференція «Морські перевезення та інформаційні технології в судноплавстві» (Одеса, 18-19 листопада 2014 р.), науково-методологічна конференція «Морські перевезення та інформаційні технології в судноплавстві» (Одеса, 19-20 листопада 2015 р.), науково-технічна конференція «Річковий та морський транспорт: інфраструктура, судноплавство, перевезення, безпека» (Одеса, 16-17 листопада 2016 р.), науково-технічна конференція «Річковий та морський транспорт: інфраструктура, судноплавство, перевезення, безпека» (Одеса, 16-17 листопада 2017 р.), VI Міжнародна науково - практична конференція «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2015)» (Херсон, 26-28 травня 2015 р.), VIII Міжнародна науково - практична конференція «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2016)» (Херсон, 24-26 травня 2016 р.), IX Міжнародна науково - практична конференція «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2017)» (Херсон, 23-25 травня 2017 р.), Всеукраїнська науково-технічна конференція «Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів та інженерних споруд» (Миколаїв, 17-18 травня 2017 р.), XXVII Международная конференция «Развитие науки в XXI веке» (Харків, 15 вересня 2017 р.).

Публікації. За результатами виконаних досліджень автором опубліковано 21 наукову працю (з них 3 одноосібно), в тому числі: у наукових профільних виданнях, що входять до переліку МОН України - 7 наукових статей [2 - 8]; у зарубіжних наукових фахових виданнях - 4 наукові статті [9 - 11, 13] та монографія [1]; в збірниках матеріалів наукових конференцій - 9 доповідей [12, 14 - 21].

Структура роботи. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних літературних джерел (86 найменувань) і

додатків. Загальний обсяг роботи становить 222 сторінки і містить 48 рисунків та 7 таблиць, зокрема: 153 сторінки основного тексту, 10 сторінок списку використаних джерел, 59 сторінок додатків.

РОЗДІЛ 1

ІНФОРМАЦІЙНИЙ ПОШУК ЩОДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗАВАРІЙНОГО СУДНОВОДІННЯ

Інформаційний пошук раніше не виявлених проблемних напрямків, завдань та питань відомих результатів наукових досліджень у області безпеки експлуатації морських та річкових транспортних засобів здійснюється із застосуванням філософського підходу “від загального до особистого через часткове”, де методом дедукції аналізується апріорна інформація, яка знаходиться у мережі Internet, літературних джерелах та інших джерелах апіорних знань.

Гарантована безпека судноводіння, яка покладена за основу в задачах транспортної стратегії України, полягає у збереженні фізичних, логістичних та евристичних (інтелектуальних) умов руху транспортних засобів на окремих акваторіях та ділянках руху за певний час.

В першу чергу це стосується безаварійного судноводіння в стислих умовах, яке притаманне географічним умовам прибережної акваторії України.

З огляду на те, що основні апіорні результати досліджень викладені у спеціальних виданнях, то для інформаційного пошуку доцільно залучити спосіб огляду і аналізу літературних джерел.

1.1. Огляд і аналіз літературних джерел щодо вирішення проблеми безпечного плавання суден.

Огляд та аналіз літературних джерел передбачає аналіз неочевидних фактів загальної характеристики сучасного стану проблеми попередження зіткнення суден, проблемних завдань: моделювання руху суден; удосконалення методів управління судном та формування безпечної суднової зони руху.

Базові питання навігаційної безпеки судноводіння викладено в роботі [1], де вперше розглянуто питання навігаційної надійності судноводіння і запропоновано спосіб її формалізації.

Попередження зіткнень суден під час плавання в прибережних районах інтенсивного судноплавства належить до найбільш актуальних проблем забезпечення безаварійного судноводіння. У роботах [2 - 9] надана загальна характеристика сучасного стану вирішення проблеми попередження зіткнень суден.

Два основні принципи управління суднами в ситуації небезпечного зближення розглянуто в роботі [2]. Одним із них є локально-незалежний принцип, згідно якому під час небезпечного зближення пари суден кожне з них приймає рішення про власний маневр розходження в рамках регламентуючої системи бінарної координації для попередження їх зіткнення. На теперішній час такою системою бінарної координації є МППЗС-72.

У разі локально - незалежного принципу взаємодіючим суднам приписуються координуючі дії, виходячи з ситуації зближення з кожною із цілей і не враховуючи ситуації зближення між цілями.

Інший принцип ієрархічного підходу передбачає повне управління системою суден, що зближуються, зовнішнім оператором, яким враховуються всі парні ситуації зближення суден і визначається загальна стратегія розходження, що передбачає взаємоузгоджені зовнішнім оператором маневри суден для їх безпечного розходження.

Для обох принципів управління процесом розходження суден розроблені процедури вибору оптимальних маневрів розходження з урахуванням навігаційних перешкод та динаміки судна, що маневрує. Приведені результати імітаційного комп'ютерного моделювання запропонованих принципів управління процесом розходження суден, яке показало їх коректність та дієздатність.

У роботі [3] розглянуто питання систематизації теорії і практики управління суднами в різних ситуаціях, в тому числі і ситуацій небезпечного

зближення, для яких запропоновано заходи вирішення проблеми попередження зіткнення суден.

Основні аспекти принципу незалежного управління процесом розходження суден досліджені в роботі [4], якими є теоретичне обґрунтування взаємодії суден з застосуванням теорії динамічних *n*-керованих систем, запропонована теорія взаємодії декількох суден в умовах небезпечного зближення, а також використання теорії ієрархічних багаторівневих систем прийняття рішень для розробки математичної моделі системи взаємодіючих суден. Процедура визначення векторного і матричного ситуативних збурень розроблена для формалізації можливих типів взаємодії суден.

При застосуванні мінімаксного підходу роботі запропонований метод синтезу гнучких стратегій розходження, які не суперечать вимогам МППЗС-72 в частині маневрування, а при формалізації взаємодії судна з навколишніми цілями запропонований спосіб формування координатного й дійсного “каркасів”.

Стратегію зміщення судна на паралельну лінію шляху для розходження суден в морі розглянуто у монографії [5], де відзначається, що запобігання зіткнення може досягатися створенням нових алгоритмів та інтелектуальних систем. Для розходження суден в роботі розглядається лише одна стратегія - зміщення на паралельну лінію шляху зміною напрямку руху до лінії програмного курсу. Вибір оптимальної стратегії розходження проводиться з множини можливих варіантів по комплексному критерію, що враховує вимоги до безпеки, помітності та завчасності маневру для попередження зіткнення.

У роботі [6] розглянута координованість бінарних взаємодій як характеристика взаємодій суден при їх небезпечному зближенні. Запроваджена процедура чисельної оцінки їх ефективності та математична модель взаємодії групи суден, що небезпечно зближуються для різних типів управління процесом розходження.

У роботі [7] досліджено екстрене маневрування суден у ситуації надмірного зближення для попередження їх зіткнення. Під час небезпечного

зближення суден враховані особливості їх взаємодії, які визначають взаємні обов'язки в процесі розходження, а формалізація бінарної координації суден здійснена згідно з МППЗС-72. В момент надмірного зближення суден, коли виникає ситуація невизначеності їх подальшої поведінки та відсутності координації, запропонована стратегія екстреного розходження.

Узагальнений спосіб формування областей неприпустимих значень параметрів руху суден для оцінки небезпеки ситуації зближення наведений у роботі [8]. Для принципів локально-незалежного і зовнішнього управління процесом розходження суден формалізовані межі областей неприпустимих значень параметрів руху суден, тобто, значень їх курсів і швидкостей. В умовах локально-незалежного управління переважно маневрує одне з суден. Тому розглядаються області неприпустимих значень курсів і швидкостей судна, що маневрує, для вибору безпечного маневру його розходження зміною курсу або швидкості.

У разі зовнішнього управління суден у ситуації небезпечного зближення змінюються параметри руху обох суден. Визначені три типи областей: неприпустимих значень курсів одного і другого судна; неприпустимих значень швидкостей одного і другого судна; неприпустимих значень курсів одного судна і швидкостей другого судна.

Кожна із трьох приведених областей забезпечує можливість оцінки небезпеки ситуації їх зближення та вибір безпечного маневру розходження, параметри якого залежать від типу області небезпечного зближення.

У роботі [9] приведена характеристика принципу зовнішнього управління процесом розходження суден з аналізом його основних переваг. У ній показано, що основними методами визначення параметрів маневру розходження при зовнішньому управлінні процесом розходження суден є застосування області небезпечних курсів суден, що зближуються, форма якої залежить від співвідношення швидкостей суден та області їх небезпечних швидкостей. Згадані області небезпечного зближення забезпечують оцінку небезпеки ситуації зближення і вибір параметрів маневру розходження. У разі визначення

безпечних курсів розходження суден за допомогою області небезпечних курсів запропонований спосіб врахування точкової навігаційної перешкоди.

Проблема навігаційної надійності судноводіння у прибережному й внутрішньому плаванні водами України пов'язана з розробкою методології поліергатичного забезпечення навігації та управління рухом суден в нестационарному середовищі, яка має ключове значення для завчасного дистанційного виявлення та розпізнавання небезпечних об'єктів на траєкторії руху за критеріями ефективного та небезпечного використання водного простору з виводом суден у локально обмежений простір з визначенням простору - часовими координатами.

Питання моделювання руху судна в стислих умовах плавання досліджуються в публікаціях [10-29], в яких розглянуті маневри суден, що забезпечують його більш ефективне і безпечне плавання.

Забезпечення безаварійного судноводіння застосуванням сучасних систем автоматичного управління рухом судна розглянуто в роботі [10], а основні відомості щодо бортових автоматизованих систем для вирішення завдань оцінки, прогнозу та оптимізації мореплавства відображені в роботі [11], в якій детально розглянуті методи прогнозу мореплавства та викладено принципи вибору рішень для забезпечення безпеки судна у штормових умовах. У роботі наведена інформація про особливості відображення інформації та характеристики функціональних можливостей таких засобів.

Розробці високоточного управління судна на криволінійних ділянках руху в стислих умовах плавання присвячені роботи [12, 13], в яких запропоновано прогнозні моделі визначення траєкторії руху судна, що враховують час перекладки його керма.

Вимоги до систем управління морськими об'єктами, що рухаються з постійною швидкістю, в роботі [14] сформульовані у вигляді задач оптимального управління. Для їх формалізації пропонується динамічна модель руху об'єкту, що описується нелінійним матричним диференціальним рівнянням.

Сучасні системи управління складними динамічними об'єктами розглянуто в роботі [15]. У цих системах використовується модель керованого об'єкта, сформована на базі нейронної мережі, за допомогою якої визначаються керуючі впливи спрямовані на об'єкт, морські судна.

Нелінійна модель судна з урахуванням збурень формалізована в роботі [16]. За її допомогою синтезується управління рухом судна за критерієм точності при його стабілізації на траєкторії. Вирішення задачі здійснюється лінійно-квадратичним методом, причому для ідентифікації математичної моделі судна застосовується процедура багато альтернативної фільтрації.

У роботі [17] приведена програма статистичного моделювання процесу руху суден лінійним фазватером та представлені результати моделювання. Виявлена залежність числа ситуацій небезпечного зближення від параметрів навігаційних умов плавання.

Дворівнева системи управління рухом швидкісних суден, яка складається зі стратегічного і виконавчого рівнів, пропонується в роботі [18]. У роботі також розглянуто питання проектування локальних підсистем управління. На прикладі двох типів швидкісних суден наводиться структура та склад дворівневої системи.

Теорія управління динамічними об'єктами зі змінними параметрами, яка побудована з позицій методів синергетики, викладена в роботі [19], у якій детально описані нейромережа, її архітектура та викладено принципи формування традиційної системи управління і сучасні методи управління на основі нечіткої логіки, для яких наведено приклади синтезу систем управління, побудованих на нейромережах та штучного нейронного інтелекту.

Теоретичне дослідження руху судна проведене в роботі [20], де проведена оцінка адекватності математичної моделі з врахуванням впливу додаткових нелінійних членів моделі на режими руху судна. У роботі приведені результати дослідження впливу зміни параметрів вітру на біфуркаційну картину, що формується моделлю. Ефективність авторульового була значно підвищена та

знижено рівень некерованості судна завдяки введенню інтелектуальної складової до алгоритму роботи авторульового.

Інформаційна система імітаційного моделювання руху суден представлена в роботі [21], розробка якої здійснена на базі складних динамічних моделей, що забезпечує нові процедури планування маневрів судна. Задані маневри під час їх реалізації пропонується відображати в режимі реального часу з поточною індикацією прогнозованої траєкторії за даними від датчиків судна. Така система спроможна вирішувати пряму задачу відображення прогнозованої траєкторії за заданими параметрами маневру. Однак більш актуальною є задача визначення параметрів наступного маневру по заданій програмній траєкторії руху.

Інформація про навігаційно-інформаційні системи (НІС) судна, які є одним із найбільш ефективних засобів забезпечення безаварійного судноводіння, докладно представлена в роботі [22]. У роботі розглянуто характеристики складових частин НІС, їх функціональних можливостей та особливості відображення інформації.

Робота [23] присвячена управлінню судном у екстремальних умовах, що потребує розрахунку впливу зовнішніх сил, які є суттєвими під час управління судном у складних погодних умовах. У роботі представлено основні принципи оцінки впливу зовнішніх сил на управління судном та можливість їх використання в екстремальних умовах з урахуванням ефективності від роботи буксирів.

Стаття [24] присвячена питанням розробки системи управління курсом судна на принципах нечіткої логіки та адаптації системи з урахуванням складної динаміки та нелінійності математичної моделі руху судна, як об'єкта управління, через випадково змінювані умови роботи системи.

У роботі [25] визначена залежність маневрених характеристик судна від параметрів математичної моделі його руху. Визначені відповідні коефіцієнти для початкової поворотності судна, радіусу його сталої циркуляції та характеристик одержування.

Необхідність застосування вдосконалених комп'ютерних систем для

безпечного плавання сучасних суден зазначена в роботі [26]. Як правило, у таких системах використовуються спрощені прогнозні моделі руху суден, що обмежує їх використання щодо негайної перекладки положення керма та зміни обертів двигуна. Визначається, що лише більш вдосконалені прогнозні моделі руху судна забезпечують необхідну точність реалізації криволінійної траєкторії його руху.

Питання ідентифікації математичних моделей маневрування судна вирішуються у роботі [27], де на основі аналізу гідродинаміки судна сформована відповідна нелінійна модель. У роботі запропонований алгоритм визначення параметрів моделі руху судна, який засновано на розширеній теорії фільтра Калман, що призводить до зменшення похибок внесених під час процесу вимірювання.

У статті [28] запропонована концепція «віртуального вікна», для навчання контролера штучної нейронної мережі при автоматичному причалуванні суден, що забезпечує мінімальний за часом маневр швартування. Оцінка ефективності навчання контролера здійснена за допомогою моделювання методом Монте-Карло по завершенню навчання. Для планування експерименту з моделлю судна навчені мережі реалізуються після отримання прийнятного відсотка успіху. Результати дослідження поведінки мережі під час таких експериментів під можливим впливом початкових умов та наявності вітру показали, що за допомогою контролера судно виводиться в кінцеву точку, яка знаходиться на деякій відстані від межі пірсу, що обумовлює необхідність визначення доцільності застосування буксирів для остаточного виведення судна до фактичної межі пірсу.

Інтелектуальна система прогнозування руху судна розглядається також в роботі [29], яка здійснює процес навчання автономного блоку управління, побудованого на штучній нейронній мережі. Блок управління аналізує вхідні сигнали, за значенням яких обчислює безпечні параметри маневрування судна в обмежених водах. Функцією системи є безперервний моніторинг навігаційних параметрів судна та прогноз їх значень після певного інтервалу часу

спостереження. Прогнозування може бути використане в якості попередження судноводія про можливу загрозу безпечному плаванню.

Результати синтезу моделей поліергатичних систем з властивостями адаптованого управління, яке направлено на навчання контролера штучної нейронної системи, базуються на абстракціях кінематики та кінетики поступового та обертового рухів судна, контролю індивідуального стану судноводія з покроковою логічною процедурою виконання програми навчання.

Питанням удосконалення методів управління судном при плаванні в стислих водах присвячені роботи [30 - 45].

У роботі [30] повідомляється, що за статистичними даними у вузькостях, протоках, на рейдах і портових акваторіях відбувається не менше 90% загального числа навігаційних аварій, причому, в першу чергу, великотоннажних суден. Основним джерелом помилок, що призводять до аварій, є суб'єктивна оцінка ситуації до початку маневра, і після його реалізації. Результати роботи можуть бути використані під час виготовлення комп'ютерних тренажерів швартувань в складних умовах або маневруванні на гнучких зв'язках, а також під час розробки математичних моделей суден.

У статті [31] розглянуто використання теорії самоналагоджувального управління призначенням полюсів автоматизованих систем управління для розробки адаптивного авторульового, що налаштовується на поточні умови плавання і маневрені характеристики судна, на якому він встановлений.

Сучасні способи управління судном з використанням новітніх технічних пристроїв, що забезпечують виконання заданих маневрів в найкоротший час, розглянуті в роботі [32], в якій також приведені результати дослідження, проведеного співробітниками Технічного науково-дослідного інституту фірми "Ісикавадзіма-Харіма дзюкоге" (Японія).

Для аналітичного опису задачі виконання заданого маневру в найкоротший час використаний класичний метод варіаційного обчислення. У роботі наведені загальні дані про математичну модель руху судна, що маневрує. Наведені розв'язання задач реалізації різних типів маневрів - для зупинки судна, яке йде

своїм ходом, в заданій позиції за найкоротший час, шляхом управління кермом і гвинтом регульованого кроку (ГРК), а також лише кермом, ГРК і носовим підрулюючим пристроєм (ПП). Також описується спосіб виконання такого маневру за допомогою керма, ГРК, носового і кормового ПП. Випробування, що проводилися на навчальному судні "Сиоміті мару", оснащеним ГРК, носовим і кормовим ПП підтвердили ефективність способів виконання маневрування за найкоротший час.

Патент на пристрій управління подовжнім рухом судна описаний у роботі [33]. Винахід належить до систем автоматичного управління подовжнім рухом судна і дозволяє підвищити точність роботи контуру управління судном. У складі пристрою управління рухом судна є датчики кута перекидання керма і кутової швидкості повороту судна, пристрій установки путьового кута, рульовий пристрій судна, приймач супутникових навігаційних систем з антеною і автоматичний регулятор шляхового кута.

Автоматичний регулятор шляхового кута містить обчислювач бічного відхилення судна від заданої траєкторії, блок оцінки стану судна і суматор. У свою чергу, блок оцінки стану судна складається з чотирьох суматорів, чотирьох помножувачів і чотирьох інтеграторів, виходи яких є входами блоку оцінки стану судна. Закон, за яким здійснюється стабілізація й управління рухом судна, містить оцінку кута дрейфу.

У публікації [34] розглядаються закони автоматичного управління рухом судна за заданим кутом курсу з фіксованим кутом дрейфу, а також із заданою швидкістю бічного руху судна під час швартування з одночасною стабілізацією заданого курсу. Приводяться закони логічного управління рухом судна, які одержані завдяки тому, що система стабілізації судна повністю спостережувана і керована та використовується для підвищення ефективності роботи існуючих авторульових. Вказані властивості досягнуті використанням носових підрулюючих пристроїв і приймача супутникової навігаційної системи.

У публікації [35] наголошується, що важливою чинником використання тренажерів з управління судном є оцінка безпеки плавання фарватерами в різних

умовах. У роботі приведена методика оцінки особливостей управління судном під час плавання по фарватеру, яка враховує маневрені характеристики керованості судна, скупчення суден на фарватері, його конфігурацію, персональні якості судноводія, впливи вітру і течії, а також наявність вільної акваторії. Для проведення дослідження були вибрані трейлерне судно, спеціальне судно для перевезення автомобілів, контейнеровоз і великотоннажний танкер для перевезення сирої нафти. Для дослідження використовувався тренажер по управлінню судном, наведені методика і результати дослідження, проведена оцінка особливостей управління під час плавання по фарватеру. Також здійснений аналіз здатності судноводія оцінювати величину максимального бічного зносу і ступінь впливу індивідуальної помилки на таку оцінку.

Спосіб вибору моменту віддачі команди рульовому на зміну курсу судна під час його проходження у вузькостях описаний у роботі [36]. В основу способу покладене використання даних про відстань від точки перетину поточної і нової траєкторій до початку циркуляції судна, які наперед визначаються для різних кутів перекладання керма і швидкостей ходу судна.

Підвищення якості автоматичного управління річковим судном у режимі переводу на заданий курс шляхом створення алгоритмів управління і настройки авторульового представлено у дисертаційному дослідженні [37]. Методи синтезу принципів та законів управління, на підставі яких побудований адаптивний до швидкості руху астатичний регулятор стану, розглядаються в роботі [38].

У публікації [39] описана електронна система інформації про стан фарватеру ARGO. Ця система є проектом телеметричних служб федерального Міністерства водного транспорту Німеччини, що використовують електронну карту річки, на яку накладаються поточні радіолокаційні зображення і яка поєднується з наявною інформацією про глибини на різних ділянках водного шляху. Ця інформація виводиться на монітор, оперативно інформуючи судноводіїв про стан фарватеру і про глибини ділянки водного шляху, де в даний момент знаходиться судно.

Питання комплектування сучасних інформаційних технологій в регіональних структурах управління рухом суден на внутрішніх водних шляхах і їх зв'язок із супутниковими системами високоточного визначення місця рухомих об'єктів розглянуто в публікації [40].

У роботі [41] розглядаються питання інтегрування сенсорів автоматичної ідентифікаційної системи (AIC) до системи управління рухом суден (СУДС). Обговорюються переваги, які виникають під час інтегрування даних судових AIC транспондерів в СУДС.

Як наголошується в статті [42], формування моделі керованого руху судна пов'язане із значними труднощами під час моделювання складних умов плавання: нерегулярного хвилеутворення, змінного мілководдя, поривчастого вітру і тощо. Особливо важливо це для маневреного тренажера та під час застосування математичної моделі судна для проектування водних шляхів.

Досвід проектування системи інформації і управління судноплавством VTMIS в турецьких протоках наведено у статті [43], у якій стверджується, що імітація і моделювання руху суден сприяють зростанню безпеки і ефективності судноплавства в стислих водних шляхах з інтенсивним судноплавством.

У статті наведені моделі імітації потоку суден та управління судном, а також розглянуті моделі прогнозу гідрографії. Математична модель руху судна враховує умови стану зовнішнього середовища та інтенсивність транспортного потоку. У турецьких протоках Босфор та Дарданелли, за умов безпеки, допускається проходження не більш 5 тис. суден в місяць. По завершенню статті обговорюється використання таких імітаційних програм для запобігання морських аварій на водних шляхах, які можуть призвести до втрати людського життя і забруднення навколишнього середовища.

У роботі [44] обґрунтовується структура математичної моделі руху судна в процесі його заходу в камеру шлюзу. Відмінність запропонованої моделі керованості судна від традиційних моделей полягає у тому, що гідродинамічні характеристики судна додатково залежать від позиції судна

відносно шлюзу, а в роботі [45] пропонується уточнений вираз для рівняння руху судна.

Удосконалення методів управління судном під час плавання у стислих умовах направлено на точність реалізації судном безпечної програмної траєкторії руху шляхом адаптації оптимізації та інваріантного управління відносно зовнішніх збурень та завад, синхронізації процесів управління рухом на кожному з ієрархічних рівнях та вибору при прийнятті рішень характерних для командного стилю управління.

Питанням формування безпечної суднової зони руху присвячені роботи [46 - 55], де запропонована математична модель, що містить системний облік істотних чинників, яка орієнтована на практичне використання в процесі плавання судна в різних умовах.

У роботі [53] наведена статистична оцінка поздовжніх і поперечних розмірів зони безпеки суден за натурними спостереженнями, причому в ній одержані орієнтовні параметри зони безпеки: по носу судна - близько 10 його довжин, по кормі - близько 3 – 4 довжини, по траверзах – близько п'яти довжин.

Роботи [54, 55] присвячені методам розрахунку геометричної форми зон зіткнення суден. У публікації [54] автор, посилаючись на зарубіжні дослідження, описує домени Гудвіна і Девіса, а в роботі [55] пропонується метод розрахунку зони в ситуаціях обгону для випадків як хорошої, так і обмеженої видимості. У роботі також розглянуто облаштування зони безпеки за прогнозованими значеннями часу й дистанції найкоротшого зближення.

Безпечна суднова зона формується графоаналітичним методом для визначення обмежень руху суден у області біфуркації (не стійкості руху) пов'язаних з загрозою зіткнення. Проблема оптимізації руху судна вирішується експертними методами прийняття рішень, де під час вибору не треба ототожнювати цілі та критерії, які при використанні оптимізаційного підходу співвідносяться як оригінал і модель. Критерій характеризує ціль лише побічно, іноді краще, іноді гірше, но завжди приблизно. Недоврахування форми зони

безпеки (обмеження) суттєво відіб'ється на результаті рішення. Тому цей напрямок наукових досліджень остається до кінця не вирішеним.

1.2. Неочевидні проблемні питання проблемних завдань безпечного плавання суден у стислих умовах

Під час плавання у стислих умовах найбільш гострою залишається проблема попередження зіткнення суден.

Проблемність безаварійного судноводіння полягає у неспроможності її вирішення навіть методами штучного інтелекту з застосуванням е-навігації без компетентних спостерігачів та операторів різних рівнів управління, які адекватно діють у неадекватних умовах плавання.

Неочевидні питання проблемних завдань полягають у наступному.

У напрямку моделювання руху суден проблемні питання пов'язані з необхідністю посилення точності руху програмною траєкторією, математична простота якої залежить від ступеня абстрагування процесів руху, характеру взаємодії між збурюючими й завадними впливами та компенсуючою реакцією судна на них на рівні астатичного регулювання окремих параметрів руху та управління з застосуванням штучного інтелекту в залежності від навігаційної обстановки та оперативної ситуації, а також спроможності операторів систем управління рухом разом з екіпажами забезпечити синхронність процесів та синергізм в покроковому управлінні суднами за реальним часом на протязі гарантованого періоду.

У напрямку удосконалення методів управління судном невирішені проблемні питання пов'язані з точністю та швидкодією відповідних алгоритмів та способів відтворення окремих маневрів методами ідентифікації, верифікації та формалізації процесів руху судна для визначення як програмної траєкторії руху, так і програмної моделі управління з урахуванням особливості динаміки просування судна. Задекларована точність реалізації програмної траєкторії

залежить від якості контролю траєкторних та стохастичних векторних похибок управління судном і вимагає їх детермінації. Узагальненим показником безпеки судноводіння може стати апіорна вірогідність безаварійної проводки судна стислим маршрутом, яка в значній мірі залежить від навігаційних обставин на маршруті включаючи, окрім природних завад, гнучкі й жорсткі шляхові перешкоди та скопичення суден.

У напрямку формування небезпечних областей руху суден неочевидні проблемні питання викликані інтегрованим впливом на зону безпеки зіткнення суден у динамічних ситуаціях, які вимагають застосування не тільки графоаналітичних методів, але й формування стратегій, генерації альтернатив, методів прийняття рішень притаманних системному аналізу. В результаті такого аналізу визначаються оптимальні рішення (часткові та глобальний критерії у вигляді функціоналів) з урахуванням обмежень та синтезується послідовність безпечного руху суден на небезпечних ділянках маршруту у реальному часі.

1.3. Висновки за першим розділом

Інформаційний пошук неочевидних факторів дійсності проведено дедуктивним методом огляду та аналізу спеціалізованих джерел, які містять апіорну інформацію про специфічні проблеми транспортної безпеки, зокрема безпеки судноводіння. Вона передбачає досягнення інваріантності руху судна від зовнішніх та внутрішніх загроз та завад. Однак основною проблемою судноводіння у районах скупчення суден залишається попередження їх зіткнення у стислих районах плавання.

Частковими напрямками (аспектами) вирішення цієї практичної проблеми визначено: моделювання програмних траєкторій руху суден, удосконалення методів та способів управління судном, формування безпечних судових зон руху суден.

В результаті аналізу проблемних напрямків також встановлені окремі проблемні питання, які вимагають наукового вирішення.

Здійснений методом дедукції інформативний пошук (“від загального до особистого через часткове”) дозволив здійснити наступний етап системного аналізу – вибір теми дослідження.

Основний зміст першого розділу міститься у роботах [56-76] автора.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАУКОВОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

Відомо, що методологія – вчення про сукупність методів, які використовуються в окремій науці, а метод (прийом, спосіб, або образ дії) – спосіб пізнання, дослідження явищ природи або суспільного життя.

Для вирішення задач навігації та управління рухом суден використовуються експериментально-теоретичні методи: експеримент, аналіз і синтез, індукція і дедукція, гіпотетичний, історичний і логічний.

Задача виявлення істини вимагає не тільки збір фактів, але і правильну їх теоретичну обробку.

Наукові дослідження є першим етапом на шляху розв'язання будь-якої практичної задачі. Вибір такої задачі здійснюється на основі спостереження попиту практики у вигляді проблемних завдань та критеріїв (факторів), які визначають їхню соціальну значимість, призначаються вагові коефіцієнти, за допомогою яких регулюють внесок кожного фактора в загальну інтегральну оцінку. Процедура вибору критеріїв і призначення вагових коефіцієнтів відноситься до ідентифікації, успішне вирішення якої можливе на основі тільки експертного оцінювання.

Результати спостереження, починаючи з інформаційного пошуку, дозволяють одноосібно вибрати назву теми, об'єкт, предмет та науковий рівень дослідження, визначати мету, робочу гіпотезу та задачі, методи та способи дослідження, реєстрації очікуваних результатів, обробки та інтерпретації нової отриманої інформації.

Технологія наукового дослідження на теоретичному рівні формується діалектичними методами, зокрема методами системного аналізу, за допомогою якого досліджуються самі теорії, розробляються шляхи їх побудови, вивчається система положень та понять даної теорії, обґрунтовуються шляхи синтезу декількох теорій.

Центральною задачею цього рівня досліджень є пізнання умов формалізації наукових теорій і вироблення формалізованих мов (е-навігації та інші), іменованих метамовами. Використання положень системного аналізу у теорії судноводіння найбільш доцільне тому, що в його основі лежить поняття «система». Система містить об'єкти (елементи), що мають заздалегідь визначені властивості з фіксованими відносинами між ними. На базі цього поняття за допомогою методів ідентифікації, верифікації та обробки результатів експерименту отримати не тільки гомоморфну модель маневрування, яка з деякою ймовірністю характеризує тільки деякі риси об'єкта, але й за допомогою оціночного ймовірностного критерію шляхом дослідження різноманітних математичних моделей руху судна дозволить встановити найбільш ефективні при забезпеченні безпеки судноводіння у стислих умовах.

2.1. Вибір теми дослідження методом експертного оцінювання

За результатами інформаційного пошуку для запобігання зіткнень судна у стислих умовах спостерігались три проблемних напрямки, які піддаються дослідником особистій експертизі за п'ятьма факторами: актуальність, передбачена наукова новизна, економічна доцільність, відповідність тематики дослідження паспорту наукової спеціальності 05.22.13 (271.2) та терміном реалізації дослідження (табл. 2.1)

Експертна оцінка здійснена за двобальним принципом: «1» бал при позитивному оцінюванні фактора «+» і «0» балів при негативному оцінюванні «-» фактора.

В результаті такого оцінювання дослідження перевага була надана проблемному напрямку пов'язаному з практичним удосконаленням методів управління судном, який найближчий до спеціальності 05.22.13 – навігація та управління рухом, з прогнозованим терміном реалізації. В той час як перший і третій напрямки мають складні багаторівневі моделі з великою кількістю

факторів впливу, абстрагування яких вимагає багатокритеріальної оцінки, яка пов'язана з верифікацією.

Таблиця 2.1 – Результати експертного оцінювання проблемних напрямків

№ п/п	Проблемні напрямки	Фактори					
		Актуальність	Новизна	Економічність	Паспорт спеціальності	Термін реалізації	
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Моделювання руху суден	+	-	+	+	-	3
2	Удосконалення методів управління судном	+	+	+	+	+	5
3	Формування безпечної суднової зони руху	+	-	+	+	-	3

Що стосується удосконалення методів управління судном, то підвищення точності та надійності, яка пов'язана з маневруванням судном, виникає вже на стадії прогнозування та планування маневрів, зокрема поворотів, а тому це пов'язане з гомоморфністю об'єкта управління.

Удосконалення методів управління судном взагалі носить складний ситуаційний характер, але окремі маневри можливо представляти гомогенними (спрощеними) моделями, які однозначно характеризують тільки деякі риси об'єкта. Такі спрощені моделі застосовують у вигляді деяких математичних виразів, що описують характер поведінки об'єкта.

Гомогенні моделі відповідають обмірюваним або абчисленим змінним, що дозволяє одержати прогнозне значення об'єкта з заданою точністю. Ці математичні моделі, як правило, відрізняє простота опису в порівнянні з імітаційними математичними моделями, які максимально докладно описують внутрішні й зовнішні процеси, що протікають в об'єкті, за допомогою яких якби імітують об'єкт.

Практичне застосування гомогенних моделей при оцінюванні безпеки судноводіння, як вимог вищого ієрархічного рівня управління судном, у разі доказу правомірності їх існування методами ідентифікації та верифікації, вимагає адаптації отриманих алгоритмів або процедур управління безпекою до засобів візуалізації, зокрема EKDIS, шляхом методу формалізації за допомогою процедури програмування на алгоритмічному мові EDIS.

Подальші дослідження вимагають синтезувати інформаційну систему безпеки судноводіння, який полягає у застосуванні експериментальних досліджень при використанні електронної картографії шляхом моделювання та виробничого експерименту за екстремумом цільової функції.

Беручи до уваги наведені спостереження, темою дисертаційного дослідження стала **«Розробка способу урахування траєкторної похибки повороту судна під час оцінювання безпеки судноводіння»**.

Об'єктом дослідження став процес судноводіння.

Предмет дослідження – параметри руху судна та навігаційної обстановки в стислих умовах.

Наукову новизну дослідження може скласти спосіб розробки алгоритму визначення інтегральної залежності траєкторної похибки повороту судна від моделі прогнозу криволінійної траєкторії руху та засіб відображення поточної навігаційної ситуації на електронній карті для вибору безпечної траєкторії руху по мінімуму похибки повороту.

Економічна ефективність дисертаційного дослідження очевидна так як, окрім стипендіальних витрат та використання кафедральної техніки, воно не потребує значних фінансових витрат, тому що процедури ідентифікації та верифікації заплановані до виконання здобувачем особисто.

Значення та цінність результатів наукового дослідження по темі дисертації ґрунтується на коректності отриманих теоретичних та експериментальних результатів за допомогою засобів як імітаційного моделювання так і виробничого експерименту.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. При виконанні роботи керувалися положеннями Транспортної стратегії України на період до 2020 р. (розпорядження Кабінету Міністрів України від 20.10.2010 р., №2174-р), рішенням Ради національної безпеки і оборони України від 16.05.2008 р. «Про заходи щодо забезпечення розвитку України як морської держави» (указ Президента України від 20.05.2008 р. №463 / 2008). Дисертаційне дослідження виконувалось в рамках планів наукових досліджень Національного університету «Одеська морська академія» за держбюджетною темою «Забезпечення безпеки судноводіння в стислих районах плавання», ДР № 0115U003580 (2017), в якій здобувач виконав окремий підрозділ.

2.2. Мета та задачі дослідження

Постановка задач системного аналізу окрім визначення об'єкта та предмета дослідження передбачає визначення цілей, задання критеріїв для вивчення цього об'єкту і управління ним.

Метою дисертаційного дослідження є одержання найбільшого ефекту від технології маневрування судном в стислих умовах акваторії морського порту.

Науковою гіпотезою цього дослідження прийняте допущення про можливість подальшого підвищення безпеки судноводіння шляхом мехатронного об'єднання методів і способів технології маневрування з елементами е - навігації.

Головною задачею дослідження стала розробка програмного забезпечення електронних карт спроможністю оперативної оцінки зчисленого місцезнаходження та вибору оптимально обсервованого безпечного місцеперебування судна в стислих умовах акваторії порту.

Дослідження наступних **допоміжних задач** забезпечило рішення головної задачі дисертації:

- дослідження залежності траєкторної похибки повороту судна від істотних параметрів руху;
- аналіз впливу випадкової складової траєкторної похибки повороту на вірогідність безпечної проводки судна в стислих умовах;
- розробка способу комп'ютерного відображення з оцифровкою і без неї навігаційної обстановки на електронній карті.

Рішення головного завдання полягає у виборі безпечної траєкторії руху судна з урахуванням похибок поворотів та верифікація процесу безпечного управління судном в реальних експлуатаційних умовах.

2.3 Технологія наукового дослідження

Технологія наукового дослідження представляє наукове коло пізнання: від практики до ідеї (гіпотези) з метою поліпшення використання природного середовища для виробничих цілей. Структурно ця технологія наведена у вигляді технологічної карти (рис. 2.1), де представлені основні етапи системного аналізу за принципом: для досягнення поставленої мети необхідна наявність наукового положення у вигляді алгоритму або програми адекватних практичних дій.

Технологія дослідження наступна: по результатам огляду та аналізу апріорної інформації з літературних джерел, методом експертного оцінювання проблемних аспектів за факторами: актуальність, наукова новизна, економічна доцільність, відповідність науковій спеціальності та терміну реалізації дослідження, вибрана тема дослідження. Для досягнення мети дослідження покладена гіпотеза про можливість застосування принципу оптимальності, що забезпечує необхідність одержання найбільшого ефекту при обмежених витратах на технологію керування нею при наявності жорстких обмежень по безпеці та безаварійності.

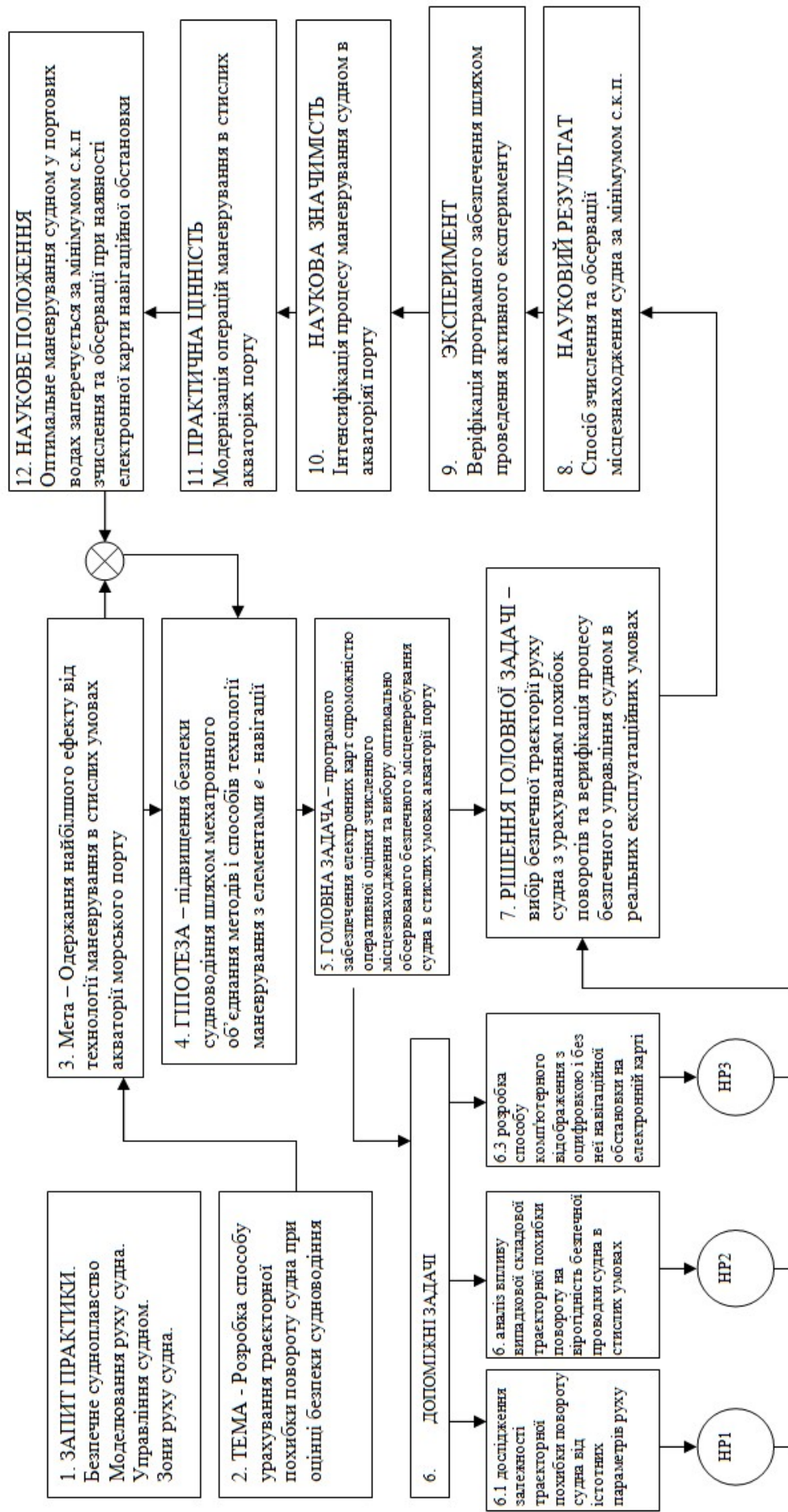


Рисунок 2.1 – Технологічна карта наукового дослідження

Головна задача дослідження вирішується шляхом синтезу трьох допоміжних задач, які дозволяють сформулювати цільову функцію управління по точності прогнозу та плануванні руху на прямих та кривих ділянках поетапно в статиці та динаміці вірогідним методом за мінімумом середньоквадратичної похибки зчислення та обсервації.

Для вирішення першої допоміжної задачі при встановленні залежності між величиною траєкторної похибки повороту і параметрами різних динамічних моделей прогнозу траєкторії повороту для одного і того ж кута зміни курсу планується застосування методів елементарної та аналітичної геометрії. Після цього проаналізувати отриману залежність для трьох динамічних моделей і результати аналізу порівняти з експериментальними даними, одержаними із натуральних спостережень.

Вирішення другої допоміжної задачі по врахуванню впливу випадкової складової траєкторної похибки повороту на вірогідність безпечної проводки судна пов'язане з необхідністю подальшого прийняття рішень у ситуаціях, для яких не вдається повністю врахувати зумовлені аспекти та фактори. Для її вирішення потрібно, виходячи із законів розподілу похибки в куті перекладки керма та похибки визначення моменту часу початку повороту судна, знайти аналітичні вирази для двомірної щільності розподілу вірогідностей траєкторної похибки повороту, а також її впливу на вірогідність безпечної проводки судна, ураховуючи двомірний закон розподілу векторної позиційної похибки.

Третьою допоміжною задачею дослідження є розробка графічного способу комп'ютерного відображення навігаційної ситуації на електронній карті.

Для цього слід використати електронну карту району плавання, на яку наноситься точнісне поле, що може оцифровуватися або бути без оцифрування. Після прогнозу повороту на електронну карту доцільно програмно нанести смугу руху судна, ширина якої визначається можливою траєкторною похибкою повороту. Інтегрована таким чином інформація дозволяє вибирати безпечний маршрут плавання.

Оцінка можливих значень траєкторних похибок повороту потребує проведення натурного експерименту, результати якого забезпечать формування залежності величини траєкторної похибки від кута кладки пера керма і збільшення курсу за час повороту.

Для відображення навігаційної ситуації на електронній карті, що потребує розробки комп'ютерної програми, яка має реалізувати цю частину допоміжної задачі необхідно:

- вивести на екран монітору задану електронну карту;
- відобразити дійсну навколишню навігаційну ситуацію на електронній карті;
- розрахувати двомірний масив значень показника небезпеки щодо всього району безпечної області стисненого маршруту для формування поля точності;
- розрахувати безпечну смугу руху судна, ширина якої визначається можливою траєкторною похибкою повороту.

У результаті рішення кожної із допоміжних незалежних задач планується отримання відповідних наукових результатів НР1, НР2 і НР3:

- науковим результатом першої допоміжної задачі (НР1) стане процедура оцінки величини траєкторної похибки повороту залежно від динамічної моделі його прогнозу;
- спосіб визначення залежності вірогідності безпечної провідки судна від випадкової складової траєкторної похибки повороту стане науковим результатом (НР2) другої допоміжної задачі;
- графічний спосіб комп'ютерного відображення навігаційної ситуації на електронній карті й вибору безпечної траєкторії руху з урахуванням похибки повороту стане науковим результатом НР3 третьої допоміжної задачі.

Головна задача дослідження по визначенню глобальної оцінки якості та безпеки здійснення повороту судна з застосуванням електронних карт вирішується теоретично у вигляді цільової функції методами імітаційного

моделювання та подальшою верифікацією та активного експерименту в умовах експлуатації судна.

Наукова значимість результатів дослідження полягає у інтенсифікації маневрів та операцій маневрування для безпечного руху у стислих акваторіях порту та складних навігаційних ситуаціях.

Практична цінність результатів дисертаційної роботи полягає у модернізації процесів та операцій маневрування шляхом застосування сучасних ІТ – технологій в системах навігаційного забезпечення судна.

Отримані в дисертаційному дослідженні наукові результати і проведені натурні спостереження дозволять сформулювати наукове положення роботи щодо необхідних та достатніх умов оптимальності цільової функції управління, які відображаються на електронній карті за результатами графоаналітичної оцінки точності зчислення та обсервації місця судна.

2.4. Характеристика загального підходу до ідентифікації моделей об'єктів і систем

На вирішення завдань ідентифікації істотний вплив здійснює априорна інформація трьох видів: про фізико-технічні властивості об'єкта; про впливи зовнішнього середовища на об'єкт; про обмірювані змінні.

При рішенні завдань практичної ідентифікації опираються на накопичений досвід, знання й інтуїцію розроблювачів.

Ідентифікацію підрозділяють на ідентифікацію у реальному часі й після-експериментальну.

У першому випадку на ідентифікацію накладаються жорсткі часові обмеження, у другому - таких обмежень немає, але потрібна більш висока якість моделі. Експериментальна ідентифікація поділяється на два типи: ідентифікація у режимі нормальної експлуатації (пасивний експеримент) і з подачею на об'єкт пробних входних впливів (активний експеримент).

Те, що пізнається в результаті обробки вимірів і не залежить від методів і засобів самих вимірів, називається об'єктом ідентифікації. Під об'єктом розуміється все, що пізнається в процесі обробки результатів вимірів або обчислень. Побудова математичної моделі технічного об'єкта або процесу, системи керування технологічним процесом тощо із заданою точністю є завдання ідентифікації. Точність рішення завдання ідентифікації визначається ступенем адекватності математичної моделі процесам у технологічному об'єкті.

Процес побудови (конструювання) моделей технічних об'єктів за даними спостережень включає три основних компоненти: дані; моделі-кандидати; правила оцінки ступеня відповідності моделі, що випробовується, даним спостережень.

Дані спостережень. Вхідні-вихідні дані іноді реєструються в процесі проведення цілеспрямованих ідентифікаційних експериментів, коли користувач може визначити перелік і моменти виміру сигналів, причому деякі із вхідних сигналів можуть бути керованими. Завдання планування експериментів, таким чином, полягає в тому, щоб, з урахуванням можливих обмежень, вибрати максимально інформативні дані про сигнали системи. У деяких випадках користувач не має змоги впливати на хід експерименту й повинен спиратися на дані нормальної експлуатації.

Множина моделей. Моделі -кандидати устанавлюються за допомогою фіксації тієї групи моделей, у межах якої ми збираємося шукати модель, яка найбільш підходить. Безсумнівно, це найбільш важлива й у той же час найбільш важка частина процедури ідентифікації. Саме на цьому етапі знання формальних властивостей моделей необхідно з'єднати з апріорним знанням, інженерним мистецтвом, інтуїцією й, безумовно, фізикою процесів, що протікають. Безліч моделей іноді стає результатом ретельного моделювання, після чого на основі законів фізики й інших достовірних знань формується модель, що включає фізичні параметри із ще не певними значеннями. Інша можливість полягає в тому, щоб без усякого фізичного обґрунтування використати стандартні, найчастіше - лінійні, моделі. Таких моделей, у яких

параметри розглядаються насамперед як варіативні з підстроюванням моделей до наявних даних і не відбивають фізики процесу, називається *чорним ящиком*. Безліч моделей з налаштовуваними параметрами, які допускають фізичну інтерпретацію, називають *сірими ящиками*.

Метод ідентифікації - визначення на основі даних спостережень «найкращої» моделі. Ця частина -. Оцінка якості моделі зв'язана, як правило, з вивченням поведінки моделей у процесі їхнього використання для відтворення даних вимірів.

Підтвердження моделі. У результаті здійснення всіх трьох етапів процедури ідентифікації одержуємо, хоча б у неявній формі, конкретну модель: одну з безлічі, причому таку, котра відповідно до обраного критерію якості щонайкраще відтворює дані спостережень.

Залишається перевірити, "чи досить гарна" модель, тобто чи виконує модель своє призначення. Такі перевірки відомі за назвою **верифікації - процедур підтвердження моделі**. До них ставляться різні процедури оцінювання відповідності моделей даним спостережень, апіорній інформації й поставленій прикладній меті. Незадовільне поведінка моделі кожному із цих компонентів змушує відмовлятися від моделі, тоді як гарне її функціонування створює певний ступінь довіри до моделі. Модель ніколи не можна вважати остаточним і повним описом системи. Її скоріше можна розглядати як спосіб досить гарного опису тих аспектів поведінки системи, які представляють для дослідника найбільший інтерес.

Контур ідентифікації системи/об'єкта. Процедура ідентифікації системи або об'єкта породжує наступну природну логіку дії: (1) зібрати дані спостережень (експериментів); (2) вибрати безліч моделей; (3) вибрати найкращу із цієї безлічі модель-кандидат. Однак цілком імовірно, що перша з так знайдених моделей не витримає перевірки на етапі її верифікації (підтвердження). Тоді потрібно повернутися й переглянути різні кроки процедури.

Існує кілька причин, з яких модель не відповідає завданню:

- чисельний метод не дозволяє знайти найкращу за обраним критерієм модель;
- критерій обраний невдало;
- безліч моделей виявилось неповноціною у тому розумінні, що в цій безлічі взагалі ні “досить гарного” опису системи (об'єкта);
- безліч даних спостережень не була досить інформативна для того, щоб забезпечити вибір гарних моделей.

Власне кажучи, головним у додатках ідентифікації є ітеративне рішення всіх цих питань, особливо третього, на основі апріорної інформації й результатів попередніх спроб (див. рис. 2.2). Очевидно, що важливим інструментальним засобом рішення цього ітеративного завдання є діалогове програмне забезпечення.

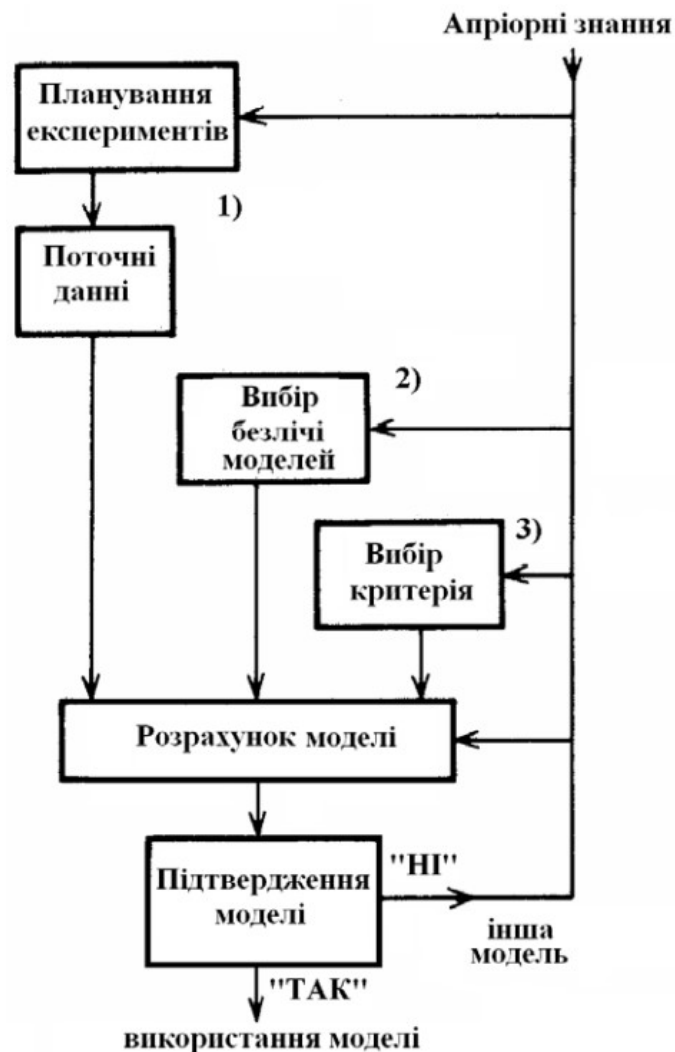


Рисунок 2.2 – Узагальнений алгоритм процесу ідентифікації

Слід зазначити, що незалежно від типу ідентифікації (активна, пасивна) на вхідні сигнали накладається обмеження по інформативності. Так, часові характеристики сигналів інформативні, якщо сам сигнал спільно зі своїми похідними становить лінійно незалежну систему функцій, а число різних частот вхідного сигналу не менше, ніж половина оцінюваних параметрів. При цьому якщо існує хоча б одна частота в частотній характеристиці сигналу помилки виходів об'єкта й моделі така, що на цій частоті перешкода дорівнює нулю, то завдання ідентифікації може бути вирішена як завгодно точно.

Наука, що вивчає об'єднання сучасних методів технології з електронікою й механікою зветься “механотроніка”, основою якої є принцип оптимальності, що забезпечує необхідність одержання найбільшого ефекту при обмежених витратах на технологію, керування нею при наявності різних обмежень, таких як екологічна чистота, безпека, безаварійність. Таким чином, для цілеспрямованого керування технічним об'єктом дуже важливі знання про характеристики й властивості об'єкта. Це обов'язкова умова для того, щоб правильно сформований сигнал керування зміг перевести об'єкт із деякого початкового стану в необхідне. Процес переходу технічного об'єкта (виробничої системи, механізму) у новий стан у більшості випадків здійснюється електромеханічними або механотронними системами.

Отже, ідентифікація систем, будучи цілеспрямованою, повинна складатися з погоджених окремих операцій. Кожна технологічна операція характеризується станом інструмента, блоків, вузлів і механізмів, надалі називаних «об'єктами». Інформація про стан об'єкта необхідна для ухвалення рішення про зміну керуючих впливів на окремі об'єкти або технології в цілому. Звідси - важливість вірогідності й швидкості надходження інформації. Інформація одержується у вигляді формул, графіків, таблиць шляхом обробки вимірів. Математичні вираження містять інформацію в найбільш концентрованому виді. Для стиску інформації будують математичні моделі, за допомогою яких судять про стан об'єкта і які застосовують для формування оптимальних, у заданому змісті, керуючих впливів. Як відзначене вище, істотне

значення для побудови математичної моделі має апіорна інформація, що містить відомості про аналогічні об'єкти, про загальні принципи функціонування об'єктів, закони розподілу й числові.

2.5. Висновки за другим розділом

Другий розділ дисертаційної роботи присвячений питанням вибору теми дослідження і його методологічного забезпечення. Розроблена технологічна карта дисертаційного дослідження, в якій відображено методологічну структуру дисертаційної роботи, та наведене її методологічне забезпечення.

Технологічна карта відображає взаємозв'язок мети дисертаційного дослідження, його головної задачі з трьома допоміжними задачами дослідження, які направлені на підтвердження запропонованої гіпотези наукового дослідження. Зроблені припущення стосовно отримання наукових результатів та наукового положення мають відповідне методичне та методологічне підґрунття.

Методи побудови геометричних фігур та аналітичної геометрії для застосування координатного методу на площині давно відомі та апробовані, як метод мінімаксу при виборі безпечної ситуації. Тому спрогнозовані значущість і практична цінність роботи об'єктивні.

Спрогнозоване наукове положення роботи відповідає вимогам викладеної методики розв'язування задач дисертаційного дослідження з урахуванням теоретичних розробок, натурних експериментів та комп'ютерного моделювання.

РОЗДІЛ 3

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ МЕХАНІЗМУ ФОРМУВАННЯ ТА
КІЛЬКІСНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ТРАЄКТОРНОЇ ПОМИЛКИ ПОВОРOTУ СУДНА

Розв'язання першої допоміжної задачі пов'язане з дослідженням залежності похибки управління від істотних чинників руху.

Під час виконання повороту судна виникає векторна похибка, щодо прогнозованої точки виходу судна на новий курс. Вона настає з наступних причин.

По-перше, вибір моменту часу t_n початку повороту визначається тим, щоб після повороту судно знаходилося в прогнозованій точці зчислення за допомогою відповідності динамічної моделі поворотності судна. Припустимо, що прогнозована траєкторія, яка визначається характеристиками динамічної моделі поворотності судна, відрізняється від його реальної обсервованої траєкторії. Це веде до виникнення похибки Δt_n у визначенні моменту часу початку повороту судна t_n і до появи систематичної складової векторної похибки управління $S^{(d)}$.

Крім даної систематичної похибки, виникають і випадкові векторні похибки через похибки перекладки пера керма $\Delta \beta_k$ і / або похибки моментів часу початку повороту Δt щодо розрахованого моменту часу t_n .

Механізм появи систематичної векторної похибки $S^{(d)}$ у графічному виді представлений рис. 3.1.

Виходячи з обраної динамічної моделі поворотності судна, розраховується момент часу початку повороту t_n , якому відповідає точка С на прямолінійній ділянці з курсом K_1 програмної траєкторії руху, а прогнозована (зчислена) перехідна траєкторія руху показана пунктирною лінією CL. Для реальної обсервованої траєкторії руху поворот необхідно починати в момент часу $\tilde{t}_n$, якому відповідає точка В на прямій ділянці з курсом K_1 .

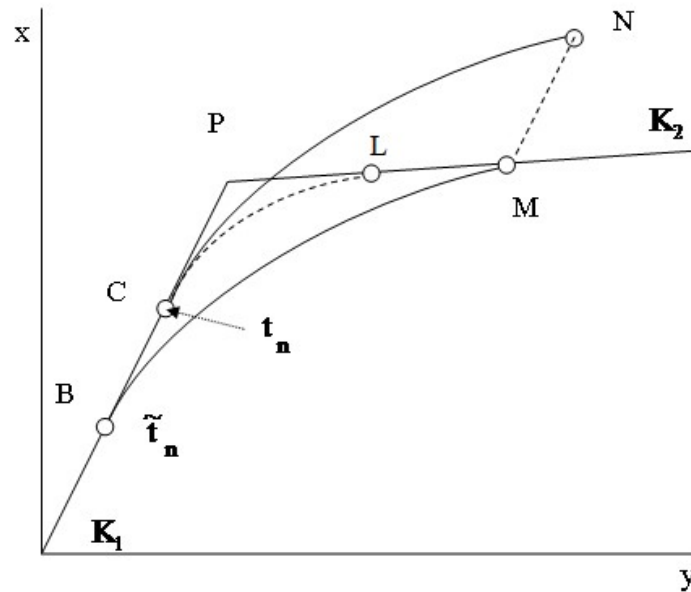


Рисунок 3.1 – Причина виникнення систематичної векторної похибки $S^{(d)}$

Якщо починати поворот у розрахований момент часу t_n , то судно потрапляє в точку N замість точки M. Очевидно, що систематична векторна похибка «невязка» $S^{(d)}$ дорівнює за величиною відстані між точками M і N, тобто довжині відрізка MN. Відрізки MN, BC та LM рівні між собою так і систематична векторна похибка чисельно $S^{(d)}$ дорівнює відрізку BC, тому $S^{(d)} = BC$.

Величина відрізка BC також залежить від швидкості судна V_o та інтервалу часу $t_n - \tilde{t}_n$. Тому аналітичний вигляд систематичної векторної похибки $S^{(d)}$ буде наступним:

$$S^{(d)} = V_o \text{Abs}(t_n - \tilde{t}_n),$$

з проекціями $S_x^{(d)}$ та $S_y^{(d)}$ на вісі площини YOХ:

$$S_x^{(d)} = V_o \text{Abs}(t_n - \tilde{t}_n) \sin K_1,$$

$$S_y^{(d)} = V_o \text{Abs}(t_n - \tilde{t}_n) \cos K_1.$$

Момент часу t_n визначається обратною математичною моделлю поворотності судна із заданою постійною кутовою швидкістю судна, а момент часу $\tilde{t}_n$, забезпечує його вихід на задану лінію курсу. Під час здійснення руху судна, $\tilde{t}_n$ може бути визначений за більш складною динамічною математичною моделлю, яка обирається для ідентифікації з множини динамічних моделей криволінійного руху судна.

Гіпотезою передбачено, що поворот судна з курсу на курс здійснюється, як мінімум, з двох фаз. На першій фазі, у початковий момент часу t_n , коли судно прямує постійним курсом K_1 , проводиться перекладка пера керма на кут β_k і кермо утримується в такому положенні протягом інтервалу часу Δt_k . На другій фазі повороту проводиться «отримання повороту судна», тобто проводиться перекладка керма на протилежний борт відносно його діаметральної площини (ДП) на ту ж величину, що призводить до зниження інерції повороту судна протягом інтервалу часу Δt . Після цього інтервалу часу судно виходить на новий заданий курс. Кутова швидкість повороту судна падає до нуля, перо керма приводиться в ДП судна, а судно виходить на новий постійний курс K_2 (рис. 3.2.).

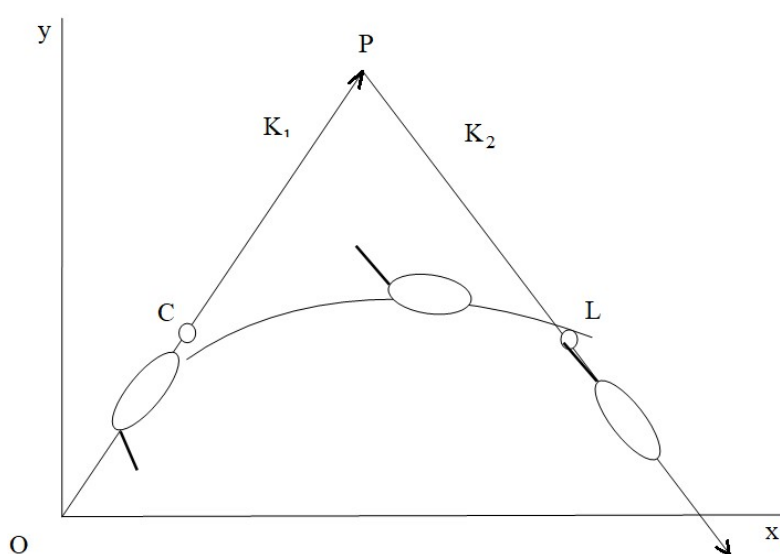


Рисунок 3.2. – Графічне відображення гіпотетичного процесу повороту судна з курсу на курс з мінімумом фаз

Гіпотетична модель повороту з мінімумом управляючих впливів (фаз) починається з розрахунку моментів часу початку t_n повороту судна з курсу K_1 на курс K_2 програмної траєкторії руху після поєднання початку системи координат ОХУ з початковим положенням судна (рис. 3.3).

Згідно концепції, поворот судна починається в початковий момент часу $t_n = 0$ і завершується в точці L виходом на курс K_2 . Переміщення криволінійної траєкторії повороту судна ОМ за напрямком курсу K_1 до суміщення точки М з другою програмною ділянкою з курсом K_2 , яка проходить через точку Р, визначаємо точку початку повороту з моментом часу t_n .

Аналітичний вигляд прямолінійної ділянки траєкторії з курсом K_1 має наступний вигляд:

$$y = x \operatorname{ctg} K_1.$$

Рівняння прямої лінії, що проходить через точку М курсом K_2 :

$$y = y_m + (x - x_m) \operatorname{ctg} K_2.$$

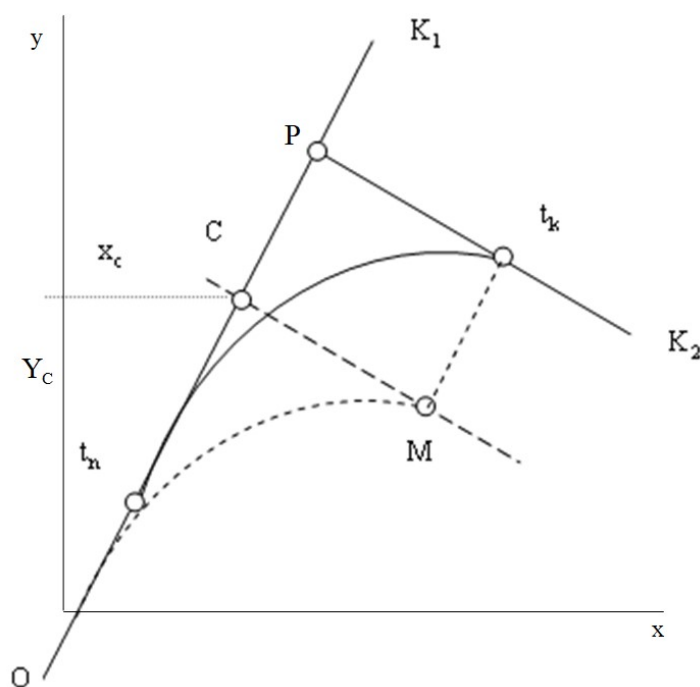


Рисунок 3.3 – Графічне відображення типової криволінійної траєкторії руху судна під час повороту

Координати точки С (x_c, y_c) знаходяться, враховуючи, що вона є точкою перетину згаданих двох прямих ліній у вигляді системи рівнянь:

$$\begin{cases} y_c = x_c \operatorname{ctg} K_1; \\ y_c = y_m + (x_c - x_m) \operatorname{ctg} K_2 \end{cases} \quad (3.1.)$$

Звідки:

$$x_c \operatorname{ctg} K_1 = y_m + (x_c - x_m) \operatorname{ctg} K_2.$$

З останнього рівняння знаходиться x_c :

$$x_c = \frac{y_m - x_m \operatorname{ctg} K_2}{\operatorname{ctg} K_1 - \operatorname{ctg} K_2}.$$

З урахуванням першого рівняння системи рівнянь (3.1) отримується значення для ОС:

$$OC = \sqrt{x_c^2 + x_c^2 \operatorname{ctg}^2 K_1} = \frac{x_c}{\sin K_1}.$$

Час початку повороту судна визначається як:

$$t_n = \frac{OA - OC}{V_1} = \frac{D - \frac{x_c}{\sin K_1}}{V_1} = \frac{D \sin K_1 - x_c}{V_1 \sin K_1}.$$

За час маневру τ значення координат x_c і y_c змінюються на x_m та y_m :

$$x_m = \int_0^{\tau} V_1 \sin[K_1 + K(t)] dt, \quad y_m = \int_0^{\tau} V_1 \cos[K_1 + K(t)] dt. \quad (3.2)$$

З урахуванням етапів повороту (рис. 3.3), вираз (3.2) приймає вигляд:

$$\begin{aligned}
x_m &= \int_0^{\Delta t_1} V_1 \sin[K_1 + K] dt + \int_0^{\Delta t_2} V_1 \sin[K_1 + K(\Delta t_1) + \tilde{K}] dt, \\
y_m &= \int_0^{\Delta t_1} V_1 \cos[K_1 + K] dt + \int_0^{\Delta t_2} V_1 \cos[K_1 + K(\Delta t_1) + \tilde{K}] dt, \quad (3.3)
\end{aligned}$$

де K и $\tilde{K}$ - поточне значення курсу судна відповідно на першій і другій фазах повороту.

Для обчислення інтервалів часу Δt_1 и Δt_2 , протягом яких курс судна змінюється на величину $\Delta K = K_2 - K_1$, в загальному вигляді запропонована наступна система рівнянь [77]:

$$\begin{cases} \Delta K = K(\Delta t_1) + \tilde{K}(\Delta t_2) \\ \omega(\Delta t_1, \Delta t_2) = 0 \end{cases}, \quad (3.4)$$

в якій перше рівняння є очевидним співвідношенням, а друге - є умовою зменшення до нуля в кінці повороту кутової швидкості ω судна.

Підставляючи у вираз (2.4) вирази $K(\Delta t_1)$, $\tilde{K}(\Delta t_2)$ і $\omega(\Delta t_1, \Delta t_2)$, отримуються залежності, з яких можна розрахувати значення Δt_1 і Δt_2 методом простих ітерацій. Після цього, використовуючи отримані значення Δt_1 і Δt_2 , шукані збільшення координат судна x_m та y_m розраховуються наступним чином:

$$x_m = V_1 \left[\int_0^{\Delta t_1} y_1(t) dt + \int_0^{\Delta t_2} y_2(t) dt \right]; \quad y_m = V_1 \left[\int_0^{\Delta t_1} y_3(t) dt + \int_0^{\Delta t_2} y_4(t) dt \right], \quad (3.5)$$

де $y_1(t) = \sin[K_1 + K(t)]; \quad y_2(t) = \sin[K_1 + K(\Delta t_1) + \tilde{K}(t)];$

$y_3(t) = \cos[K_1 + K(t)]; \quad y_4(t) = \cos[K_1 + K(\Delta t_1) + \tilde{K}(t)].$

Кожен з чотирьох інтегралів виразу (3.5) обчислюється методом Сімпсона. Загальний вираз шуканого інтеграла $\mathfrak{I}_i$ можна записати в такий спосіб:

$$\mathfrak{I}_i = \int_0^{\Delta t_i} y_i(t) dt.$$

Інтервал часу Δt_i , на якому проводиться інтегрування, необхідно розбити на парне число n елементарних інтервалів h_j , тривалість кожного з яких доцільно дорівняти $h = 1$ с. При цьому $n = 2\text{Trunc}(\Delta t_i/2)$. У способі Сімпсона підінтегральна функція $y_i(t)$ на кожному відрізку $2h_j$, що дорівнює двом елементарним відрізкам, апроксимується інтерполяційним багаточленом Лагранжа другого ступеня і в цьому випадку справедливо співвідношення:

$$\int_{t_{j-1}}^{t_{j+1}} y_i(t) dt \approx \frac{h}{3} [y_i(t_{j-1}) + 4y_i(t_j) + y_i(t_{j+1})].$$

Якщо позначити $y_{ij} = y_i(t_j)$, то визначений інтеграл розраховується як сума інтервалів:

$$\mathfrak{I}_i = \int_0^{\Delta t_i} y_i(t) dt = \frac{h}{3} [y_{i0} + 4(y_{i1} + y_{i3} + \dots + y_{i(n-1)}) + 2(y_{i2} + y_{i4} + \dots + y_{i(n-2)}) + y_{in}].$$

Момент часу закінчення повороту судна t_k розраховується за допомоги наступного виразу:

$$t_k = t_n + \Delta t_1 + \Delta t_2.$$

Векторна похибка $S^{(\beta)}$ виникає через похибки перекладки пера керма $\Delta\beta_k$ (рис. 3.2 та рис. 3.3). Якщо кут кладки керма β_k не містить інструментальної

похибки, то до кінця повороту судно потрапляє на нову ділянку лінійної програмної траєкторії в точку М, і векторної похибки $S^{(\beta)}$ не виникає. За наявності інструментальної похибки $\Delta\beta_k$ кут кладки керма дорівнює $\beta_k + \Delta\beta_k$, і до кінця маневру, коли судно досягає курсу K_y , воно виявляється в точці N.

У цьому разі векторна похибка $S^{(\beta)}$ визначається величиною відрізка MN і її компонентами $S_x^{(\beta)}$ та $S_y^{(\beta)}$:

$$S_x^{(\beta)} = x_N - x_M$$

$$S_y^{(\beta)} = y_N - y_M,$$

де x_M и y_M - координати точки М;

x_N и y_N - координати точки N.

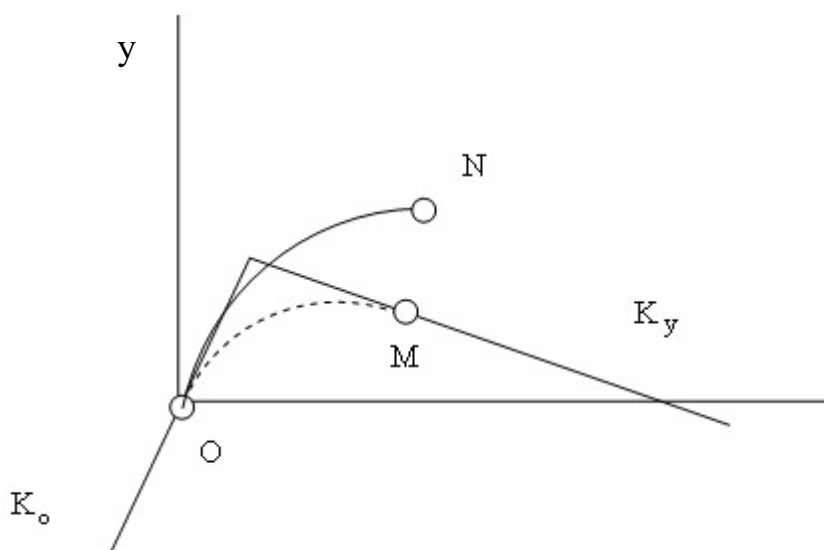


Рисунок 3.4 – Пояснення причини виникнення векторної похибки перекладки керма $S^{(\beta)}$

Векторна похибка $S^{(t)}$, що виникає через похибку моменту часу початку повороту Δt (рис. 3.5), дорівнює відрізку MN, який у свою чергу збігається за величиною з відрізком OS. Тому:

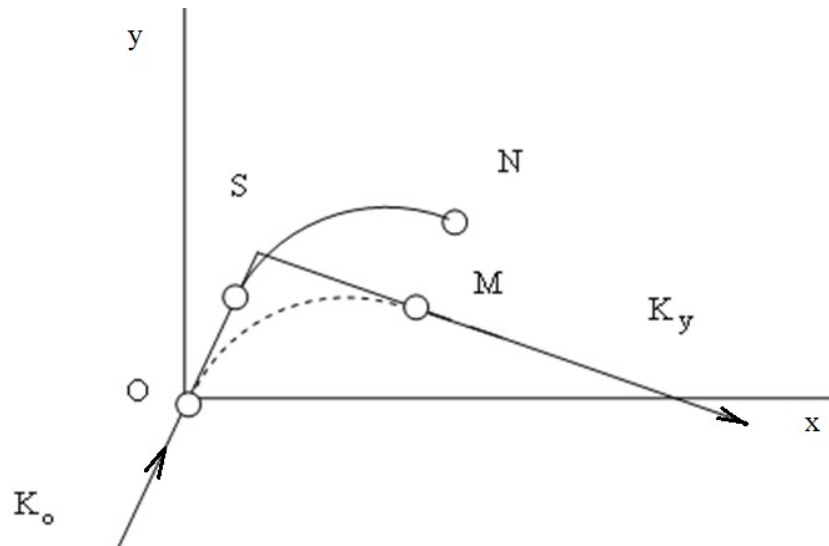


Рисунок 3.5 – Пояснення щодо формування векторної похибки $S^{(t)}$ за часом

$$S^{(t)} = OS = V_o \Delta t.$$

$$S_x^{(t)} = V_o \Delta t \sin K_o,$$

$$S_y^{(t)} = V_o \Delta t \cos K_o.$$

Компоненти $S_x^{(t)}$ и $S_y^{(t)}$ даної векторної похибки мають вигляд:

Враховуючи сучасну концепцію здійснення процесу повороту судна за базову модель, математичну можливість подальшого спрощення абстрагування цього процесу, що складається тільки з двох операцій, виникла гіпотеза про можливість оперативної оцінки точності та безпеки повороту судна кількісними ймовірнісними показниками руху – векторними Z похибками.

3.1. Вплив вибору динамічної моделі поворотності судна на величину систематичної похибки управління

Систематична векторна похибка $S^{(d)}$ представлена проекціями $S_x^{(d)}$ і $S_y^{(d)}$:

$$S_x^{(d)} = V_o \text{Abs}(t_n - \tilde{t}_n) \sin K_1,$$

$$S_y^{(d)} = V_o \text{Abs}(t_n - \tilde{t}_n) \cos K_1.$$

У даних виразах:

$$t_n = \frac{D \sin K_1 - x_c}{V_1 \sin K_1},$$

$$\tilde{t}_n = \frac{D \sin K_1 - \tilde{x}_c}{V_1 \sin K_1},$$

де координати x_c і $\tilde{x}_c$:

$$x_c = \frac{y_m - x_m \text{ctg} K_2}{\text{ctg} K_1 - \text{ctg} K_2} \text{ і } \tilde{x}_c = \frac{\tilde{y}_m - \tilde{x}_m \text{ctg} K_2}{\text{ctg} K_1 - \text{ctg} K_2},$$

а вирази для розрахунку x_m , y_m , $\tilde{x}_m$ і $\tilde{y}_m$ визначаються формулами (3.3) і залежать від вигляду динамічної моделі поворотності судна.

У роботах Е.П. Чапчая [13], І.О Бурмаки [77] та Л.Л. Вагущенко [78] для опису траєкторії повороту судна запропоновані п'ять кинетичних моделей його обертального руху. Перша модель спрощена. Вона описує траєкторію повороту судна з незмінною кутовою швидкістю; друга і третя моделі містять постійні часу, що характеризують інерційність динаміки руху судна; дві останні моделі, крім динаміки руху судна, враховують час перекладки пера керма.

Відзначимо, що перша модель служить початковим наближенням при ітераційному рішенні виразів, отриманих за більш складним моделям поворотності судна.

Перша динамічна модель руху судна, що характеризує зміну курсу судна K під дією пера керма, передбачає поворот судна з постійною кутовою швидкістю і описується диференціальним рівнянням, яке має наступний вигляд [78]:

$$\dot{K} = k_{\omega} \beta_k,$$

де k_{ω} - коефіцієнт ефективності керма;

β_k - кут кладки пера керма.

Оскільки $\omega = \dot{K}$, вихідне рівняння можна записати у вигляді:

$$\omega = k_{\omega} \beta_k = a_{\omega},$$

інтегруючи яке, отримаємо вираз для поточного курсу судна K , як функцію часу, тобто:

$$K = K_o + \int_0^t \omega d\tau = K_o + \int_0^t a_{\omega} d\tau.$$

Таким чином, у загальному вигляді отримуємо вираз для курсу судна в функції часу t :

$$K = K_o + a_{\omega} t.$$

У даній моделі поворот судна проводиться без одержування, тобто поворот має тільки одну фазу і тому $\Delta t_k = \tau$. Отже,

$$\Delta K = a_{\omega} \tau \quad \text{або} \quad \tau = \Delta K / a_{\omega}. \quad (3.6)$$

Приріст координат судна за час маневрування τ визначається наступними виразами:

$$\Delta x_o = \int_0^{\tau} V_o \sin[K_o + K(t)] dt, \quad \Delta y_o = \int_0^{\tau} V_o \cos[K_o + K(t)] dt.$$

Підставляючи вираз для $K(t)$, можна записати:

$$\Delta x_o = \int_0^{\tau} V_o \sin(K_o + a_{\omega} t) dt, \quad \Delta y_o = \int_0^{\tau} V_o \cos(K_o + a_{\omega} t) dt.$$

Розглянемо вираз для Δx_o :

$$\Delta x_o = \int_0^{\tau} V_o \sin(K_o + a_{\omega} t) dt = V_o \sin K_o \int_0^{\tau} \cos(a_{\omega} t) dt + \\ + V_o \cos K_o \int_0^{\tau} \sin(a_{\omega} t) dt .$$

Позначимо $\mathfrak{Z}_s = \int_0^{\tau} \sin(a_{\omega} t) dt$ і $\mathfrak{Z}_c = \int_0^{\tau} \cos(a_{\omega} t) dt$. Тоді останній

вираз для Δx_o приймає наступний вигляд:

$$\Delta x_o = V_o (\sin K_o \mathfrak{Z}_c + \cos K_o \mathfrak{Z}_s).$$

Після інтегрування приріст координати Δx_o запишемо в наступному вигляді:

$$\Delta x_o = \frac{V_o}{a_{\omega}} \{ \sin K_o \sin(a_{\omega} \tau) - \cos K_o [\cos(a_{\omega} \tau) - 1] \} .$$

Враховуємо, що $\Delta K = a_{\omega} \tau$, і вираз для Δx_o набирає вигляду:

$$\Delta x_o = \frac{V_o}{a_{\omega}} [\sin K_o \sin \Delta K - \cos K_o [\cos \Delta K - 1]] = \frac{V_o}{a_{\omega}} [\cos K_o - \cos(K_o + \Delta K)] .$$

Оскільки $K_o + \Delta K = K_y$, де K_y - курс другої ділянки програмної траєкторії судна, тому остаточний вираз для Δx_o :

$$\Delta x_o = \frac{V_o}{a_{\omega}} (\cos K_o - \cos K_y) .$$

Аналогічно знаходимо вираз для збільшення другої координати Δy_o :

$$\Delta y_o = \int_0^{\tau} V_o \cos[K_o + K(t)] dt = V_o \cos K_o \int_0^{\tau} \cos(a_{\omega} t) dt -$$

$$- V_o \sin K_o \int_0^{\tau} \sin(a_{\omega} t) dt, \quad \text{або}$$

$$\Delta y_o = \frac{V_o}{a_{\omega}} [\cos K_o \sin \Delta K + \sin K_o (\cos \Delta K - 1)].$$

Кінцевий вираз:

$$\Delta y_o = \frac{V_o}{a_{\omega}} (\sin K_y - \sin K_o).$$

Таким чином, можна відзначити, що розрахунок збільшення координат Δx_o и Δy_o проводиться за наступними формулами:

$$\Delta x_o = \frac{V_o}{a_{\omega}} (\cos K_o - \cos K_y),$$

$$\Delta y_o = \frac{V_o}{a_{\omega}} (\sin K_y - \sin K_o). \quad (3.7)$$

Отримані вирази (3.7) визначені для початкової оцінки величини поправки на інерційність судна, а також як початкового наближення розв'язання способом простих ітерацій.

Друга динамічна модель руху судна, що характеризує зміну курсу судна K під дією пера керма, описується неоднорідним лінійним диференціальним рівнянням з постійними коефіцієнтами, яке має наступний вигляд [78]:

$$T_1 \ddot{K} + \dot{K} = k_{\omega} \beta_k,$$

де T_1 - постійна часу, що характеризує інерційні властивості судна.

Наведемо рішення даного диференціального рівняння, для чого запишемо його щодо кутової швидкості ω , враховуючи, що $\omega = \dot{K}$:

$$T_1 \dot{\omega} + \omega = k_{\omega} \beta_k.$$

Аналізоване рівняння є неоднорідним, тому його спільне розв'язання є сумою розв'язків відповідного однорідного рівняння і часткового розв'язування [79], тобто:

$$\omega = \omega_{od} + \omega_r, \quad (3.8)$$

де ω_{od} и ω_r - відповідно розв'язання аналогічного однорідного рівняння і часткове розв'язання.

Знайдемо розв'язання для ω_{od} , записуючи відповідне однорідне диференціальне рівняння:

$$T_1 \dot{\omega}_{od} + \omega_{od} = 0,$$

якому відповідає характеристичне рівняння:

$$T_1 k + 1 = 0,$$

з корнем $k = -1/T_1$. Отже [79], розв'язання однорідного диференціального рівняння є:

$$\omega_{od} = C_1 \exp(-t/T_1).$$

Тому вираз (3.8) приймає наступний вигляд:

$$\omega = C_1 \exp(-t/T_1) + \omega_r. \quad (3.9)$$

Постійну інтегрування C_1 знаходимо з початкових умов при $t=0$. Початкове значення кутової швидкості позначимо через ω_0 і, підставляючи в (3.9) $t=0$, отримаємо вираз для постійної інтегрування C_1 :

$$C_1 = \omega_o - \omega_r . \quad (3.10)$$

Тоді, підставляючи (3.10) в (3.9), для ω остаточно отримується наступний вираз:

$$\omega = (\omega_o - \omega_r) \exp(-t/T_1) + \omega_r . \quad (3.11)$$

Інтегруючи останнє рівняння, отримаємо вираз для поточного курсу судна К:

$$K = K_o + \int_0^t [(\omega_o - \omega_r) \exp(-\tau/T_1) + \omega_r] d\tau .$$

Позначимо:

$$J_o = \int_0^t [(\omega_o - \omega_r) \exp(-\tau/T_1) + \omega_r] d\tau ,$$

і знайдемо вираз для даного інтеграла. Очевидно, що:

$$J_o = \int_0^t [(\omega_o - \omega_r) \exp(-\tau/T_1) + \omega_r] d\tau = \int_0^t [(\omega_o - \omega_r) \exp(-\tau/T_1)] d\tau + \int_0^t \omega_r d\tau ,$$

$$\text{або } J_o = (\omega_o - \omega_r) \int_0^t \exp(-\tau/T_1) d\tau + \omega_r t .$$

Остаточно інтеграла J_o записується наступним чином:

$$J_o = \omega_r t - T_1 (\omega_r - \omega_o) [1 - \exp(-t/T_1)] .$$

Отже, вираз для курсу судна має такий вигляд:

$$K = K_o + \omega_r t - T_1 (\omega_r - \omega_o) [1 - \exp(-t/T_1)]. \quad (3.12)$$

Знайдемо вираження значення курсу судна на першій і другій фазах повороту, які відрізняються положенням пера керма щодо діаметральної площини судна.

На першій фазі повороту тривалістю Δt_k початкове ω_o і усталене ω_r значення кутової швидкості виражаються наступним чином:

$$\omega_o = 0 \quad \text{та} \quad \omega_r = k_\omega \beta_k = a_\omega.$$

У цьому випадку вираз (3.12) набуває вигляду:

$$\begin{aligned} K &= K_o + a_\omega t - T_1 a_\omega [1 - \exp(-t/T_1)] \\ &\quad \text{або} \\ K &= K_o + a_\omega \{t - T_1 [1 - \exp(-t/T_1)]\}. \end{aligned} \quad (3.13)$$

У момент часу $t_n + \Delta t_k$ відбувається перекидання керма на протилежний борт на кут $-\beta_k$ (друга фаза повороту) і протягом інтервалу часу Δt відбувається одержування судна. При цьому початкове значення кутової швидкості на момент часу Δt_k визначається виразом $\omega_o = a_\omega [1 - \exp(-\Delta t_k/T_1)]$, а стале значення кутової швидкості $\omega_r = -a_\omega$. Підставляючи вирази ω_o и ω_r в (3.12):

$$\tilde{K} = K - a_\omega t - T_1 \{-a_\omega - a_\omega [1 - \exp(-\Delta t_k/T_1)]\} [1 - \exp(-t/T_1)].$$

Остаточно значення поточного курсу $\tilde{K}$ для другої фази повороту описується залежністю:

$$\tilde{K} = K + a_{\omega} \{ T_1 [2 - \exp(-\Delta t_k / T_1)] [1 - \exp(-t / T_1)] - t \}. \quad (3.14)$$

Для обчислення інтервалів часу Δt_k і Δt необхідно скласти систему рівнянь, яка в загальному випадку формалізує вимоги повороту на заданий приріст курсу ΔK , а також падіння до нуля кутової швидкості на момент часу виходу на новий курс, і має такий вигляд:

$$\begin{cases} \Delta K = K(\Delta t_k) + \tilde{K}(\Delta t) \\ \omega(\Delta t_k, \Delta t) = 0 \end{cases}. \quad (3.15)$$

Запишемо перше рівняння системи (3.15) в наявному вигляді, для чого використовуємо вирази (3.13) і (3.14):

$$\begin{aligned} \Delta K = a_{\omega} \{ \Delta t_k - T_1 [1 - \exp(-\Delta t_k / T_1)] \} + a_{\omega} \{ T_1 [2 - \exp(-\Delta t_k / T_1)] \times \\ \times [1 - \exp(-t / T_1)] - \Delta t \}. \end{aligned}$$

Розділимо обидві частини отриманого рівняння на величину a_{ω} і отримаємо:

$$\begin{aligned} \Delta K / a_{\omega} = \Delta t_k - T_1 [1 - \exp(-\Delta t_k / T_1)] + a_{\omega} \{ T_1 [2 - \exp(-\Delta t_k / T_1)] \times \\ \times [1 - \exp(-t / T_1)] - \Delta t \}, \end{aligned}$$

звідки знаходимо вираз для розрахунку Δt_k методом простих ітерацій [80]:

$$\Delta t_k = T_1 [1 - \exp(-\Delta t_k / T_1)] + \Delta t - T_1 [2 - \exp(-\Delta t_k / T_1)] [1 - \exp(-\Delta t / T_1)] + \Delta K / a_{\omega}$$

з початковим наближенням $\Delta t_k = \Delta K / a_{\omega}$.

У наведеному виразі для простих ітерацій необхідно знайти залежність між змінними Δt_k і Δt , тобто величину Δt необхідно виразити через Δt_k . Для цього скористаємося другим рівнянням системи (3.15) і початковими значеннями кутової швидкості на другій фазі повороту:

$$\omega_o = a_\omega [1 - \exp(-\Delta t_k / T_1)] , \quad \omega_r = -a_\omega .$$

Підставляючи ці значення в (3.15), отримаємо:

$$\omega(\Delta t_k, \Delta t) = \{a_\omega [1 - \exp(-\Delta t_k / T_1)] + a_\omega\} \exp(-\Delta t / T_1) - a_\omega = 0, \quad \text{т. е.}$$

$$a_\omega [1 - \exp(-\Delta t_k / T_1) + 1] \exp(-\Delta t / T_1) - a_\omega = 0 \quad \text{або}$$

$$a_\omega \{[2 - \exp(-\Delta t_k / T_1)] \exp(-\Delta t / T_1) - 1\} = 0 ,$$

з цього виразу можна записати:

$$[2 - \exp(-\Delta t_k / T_1)] \exp(-\Delta t / T_1) = 1 , \quad \text{тобто}$$

$$[2 - \exp(-\Delta t_k / T_1)]^{-1} = \exp(-\Delta t / T_1) ,$$

логарифмуючи обидві частини останнього рівняння, отримаємо:

$$-\frac{\Delta t}{T_1} = -\ln[2 - \exp(-\Delta t_k / T_1)] , \quad \text{або} \quad \Delta t = T_1 \ln [2 - \exp(-\Delta t_k / T_1)] .$$

Останнє отримане рівняння дозволяє пов'язати змінні Δt_k і Δt , чим забезпечується ітераційне обчислення тривалості кожної з фаз повороту судна, а також тривалості повороту τ з одного заданого курсу судна на інший.

Для розрахунку поправок, що враховують інерційність судна, до моментів його повороту необхідно обчислювати приріст координат Δx_o і Δy_o судна за час повороту τ . Очевидно, що:

$$\Delta x_o = \int_0^\tau V_o \sin[K_o + K(t)] dt , \quad \Delta y_o = \int_0^\tau V_o \cos[K_o + K(t)] dt .$$

Якщо врахувати, що поворот судна містить дві фази, причому вираз для поточного курсу на першій і другій фазах має різний вигляд, то попередні інтеграли для Δx_o і Δy_o набувають такого вигляду:

$$\Delta x_o = \int_0^{\tau} V_o \sin[K_o + (K + \tilde{K})] dt, \quad \Delta y_o = \int_0^{\tau} V_o \cos[K_o + (K + \tilde{K})] dt.$$

Кожен з наведених визначених інтегралів є сумою двох інших, що описують приріст координат на першій і другій фазах повороту судна, тобто:

$$\begin{aligned} \Delta x_o &= \int_0^{\Delta t_k} V_o \sin[K_o + K] dt + \int_0^{\Delta t} V_o \sin[K_o + K(\Delta t_k) + \tilde{K}] dt, \\ \Delta y_o &= \int_0^{\Delta t_k} V_o \cos[K_o + K] dt + \int_0^{\Delta t} V_o \cos[K_o + K(\Delta t_k) + \tilde{K}] dt. \end{aligned}$$

Підставляючи вирази (3.13) і (3.14) в попередні рівняння, отримаємо спочатку вираз для збільшення Δx_o :

$$\begin{aligned} \Delta x_o &= V_o \sin K_o \int_0^{\Delta t_k} \cos[a_{\omega} \{t - T_1 [1 - \exp(-t/T_1)]\}] dt + \\ &+ V_o \cos K_o \int_0^{\Delta t_k} \sin[a_{\omega} \{t - T_1 [1 - \exp(-t/T_1)]\}] dt + \\ &+ V_o \sin[K_o + K(\Delta t_k)] \int_0^{\Delta t} \cos[a_{\omega} \{T_1 [2 - \exp(-\Delta t_k/T_1)] [1 - \exp(-t/T_1)] - t\}] dt + \\ &+ V_o \cos[K_o + K(\Delta t_k)] \int_0^{\Delta t} \sin[a_{\omega} \{T_1 [2 - \exp(-\Delta t_k/T_1)] [1 - \exp(-t/T_1)] - t\}] dt, \quad (3.16) \end{aligned}$$

де $K(\Delta t_k) = a_{\omega} \{ \Delta t_k - T_1 [1 - \exp(-\Delta t_k/T_1)] \}$.

Аналогічно знаходимо вираз для збільшення координати Δy_o :

$$\begin{aligned}
\Delta y_o = & V_o \cos K_o \int_0^{\Delta t_k} \cos [a_\omega \{t - T_1 [1 - \exp(-t/T_1)]\}] dt - \\
& - V_o \sin K_o \int_0^{\Delta t_k} \sin [a_\omega \{t - T_1 [1 - \exp(-t/T_1)]\}] dt + \\
& + V_o \cos [K_o + K(\Delta t_k)] \int_0^{\Delta t} \cos [a_\omega \{T_1 [2 - \exp(-\Delta t_k / T_1)] [1 - \exp(-t/T_1)] - t\}] dt - \\
& - V_o \sin [K_o + K(\Delta t_k)] \int_0^{\Delta t} \sin [a_\omega \{T_1 [2 - \exp(-\Delta t_k / T_1)] [1 - \exp(-t/T_1)] - t\}] dt. \quad (3.17)
\end{aligned}$$

Таким чином відбуваються обчислення необхідних значень величин Δt , Δt_k , Δx_o і Δy_o в разі, коли використовується друга динамічна модель обертального руху судна.

Звертаємо увагу на ту обставину, що певні інтеграли, які входять до виразів для Δx_o і Δy_o , не беруться в елементарних функціях, і їх значення знаходяться чисельними методами, наприклад, використовується метод трапецій або, що дає більш точні результати, метод Сімпсону.

Третя динамічна модель зміни курсу судна K під час його повороту описується неоднорідним лінійним диференціальним рівнянням третього порядку з постійними коефіцієнтами, яке має наступний вигляд [78]:

$$T_1 T_2 \ddot{K} + (T_1 + T_2) \dot{K} + K = K_\omega \beta_k ,$$

де T_1 і T_2 - постійні часу, що характеризують інерційні властивості судна.

Розв'язанням цього рівняння, як показано в роботі [77], є таким. Вираз для K , на першій фазі повороту:

$$K = K_o + a_\omega \{t - \{T_1^2 [1 - \exp(-t/T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-t/T_2)]\} / (T_1 - T_2)\}. \quad (3.18)$$

Вираз для поточного курсу судна на другій фазі повороту $\tilde{K}$ має такий вигляд:

$$\begin{aligned} \tilde{K} = & K - a_{\omega} t + a_{\omega} \{2 - [T_1 \exp(-\Delta t_k / T_1) - T_2 \exp(-\Delta t_k / T_2)] / (T_1 - T_2)\} \times \\ & \times \{T_1^2 [1 - \exp(-t / T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-t / T_2)]\} / (T_1 - T_2). \end{aligned} \quad (3.19)$$

Вирази (3.18) і (3.19) дозволяють записати перше рівняння для заданої зміни курсу ΔK під час повороту оперуючого судна. Однак, необхідно спочатку записати вирази для збільшення курсу на першій фазі повороту $K(\Delta t_k)$ і на другій $\tilde{K}(\Delta t)$.

Підставляємо значення Δt_k в вираз (3.18) і отримуємо:

$$K(\Delta t_k) = a_{\omega} \{ \Delta t_k - \{T_1^2 [1 - \exp(-\Delta t_k / T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-\Delta t_k / T_2)]\} / (T_1 - T_2) \}.$$

Аналогічно, підстановка Δt в (3.19) дозволяє отримати вираз для збільшення курсу на другій фазі повороту $\tilde{K}(\Delta t)$:

$$\begin{aligned} \tilde{K}(\Delta t) = & -a_{\omega} \Delta t + a_{\omega} \{2 - [T_1 \exp(-\Delta t_k / T_1) - T_2 \exp(-\Delta t_k / T_2)] / (T_1 - T_2)\} \times \\ & \times \{T_1^2 [1 - \exp(-\Delta t / T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-\Delta t / T_2)]\} / (T_1 - T_2). \end{aligned}$$

Підставляємо отримані вирази у формулу збільшення курсу

$$\Delta K = K(\Delta t_k) + \tilde{K}(\Delta t)$$

й отримаємо наступний аналітичний вираз:

$$\Delta K = a_{\omega} \{ \Delta t_k - \{T_1^2 [1 - \exp(-\Delta t_k / T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-\Delta t_k / T_2)]\} / (T_1 - T_2) \} -$$

$$- a_{\omega} \Delta t + a_{\omega} \{2 - [T_1 \exp(-\Delta t_k / T_1) - T_2 \exp(-\Delta t_k / T_2)] / (T_1 - T_2)\} \times \\ \times \{T_1^2 [1 - \exp(-\Delta t / T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-\Delta t / T_2)]\} / (T_1 - T_2).$$

Розділимо обидві частини рівняння на величину a_{ω} :

$$\Delta t_k - \{T_1^2 [1 - \exp(-\Delta t_k / T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-\Delta t_k / T_2)]\} / (T_1 - T_2) - \\ - \Delta t + \{2 - [T_1 \exp(-\Delta t_k / T_1) - T_2 \exp(-\Delta t_k / T_2)] / (T_1 - T_2)\} \times \\ \times \{T_1^2 [1 - \exp(-\Delta t / T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-\Delta t / T_2)]\} / (T_1 - T_2) = \Delta K / a_{\omega}.$$

З останнього виразу записуємо залежність Δt_k від Δt :

$$\Delta t_k = \Delta t + \{T_1^2 [1 - \exp(-\Delta t_k / T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-\Delta t_k / T_2)]\} / (T_1 - T_2) - \\ - \{2 - [T_1 \exp(-\Delta t_k / T_1) - T_2 \exp(-\Delta t_k / T_2)] / (T_1 - T_2)\} \times \\ \times \{T_1^2 [1 - \exp(-\Delta t / T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-\Delta t / T_2)]\} / (T_1 - T_2) + \Delta K / a_{\omega}. \quad (3.20)$$

Друге рівняння складаємо, підставляючи в (3.15) значення початкової та усталеної кутової швидкості на другій фазі повороту і прирівнюємо отриманий вираз до нуля, тобто:

$$\omega(\Delta t_k, \Delta t) = a_{\omega} \{2 - [T_1 \exp(-\Delta t_k / T_1) - T_2 \exp(-\Delta t_k / T_2)] / (T_1 - T_2)\} \times \\ \times [T_1 \exp(-\Delta t / T_1) - T_2 \exp(-\Delta t / T_2)] / (T_1 - T_2) - a_{\omega} = 0.$$

Скорочуючи обидві частини на a_{ω} , отримуємо наступне рівняння:

$$\{2 - [T_1 \exp(-\Delta t_k / T_1) - T_2 \exp(-\Delta t_k / T_2)] / (T_1 - T_2)\} \times$$

$$\times [T_1 \exp(-\Delta t/T_1) - T_2 \exp(-\Delta t/T_2)] / (T_1 - T_2) - 1 = 0,$$

або

$$\{2 - [T_1 \exp(-\Delta t_k/T_1) - T_2 \exp(-\Delta t_k/T_2)] / (T_1 - T_2)\} \times \\ \times [T_1 \exp(-\Delta t/T_1) - T_2 \exp(-\Delta t/T_2)] / (T_1 - T_2) = 1.$$

Проведемо елементарні перетворення в останньому рівнянні:

$$[T_1 \exp(-\Delta t/T_1) - T_2 \exp(-\Delta t/T_2)] = (T_1 - T_2) \times \\ \times \{2 - [T_1 \exp(-\Delta t_k/T_1) - T_2 \exp(-\Delta t_k/T_2)] / (T_1 - T_2)\}^{-1},$$

що дозволяє записати отримане рівняння у формі, зручній для обчислення способом простих ітерацій. Для цього запишемо:

$$\exp(-\Delta t/T_1) = (T_2/T_1) \exp(-\Delta t/T_2) + [(T_1 - T_2)/T_1] \times \\ \times \{2 - [T_1 \exp(-\Delta t_k/T_1) - T_2 \exp(-\Delta t_k/T_2)] / (T_1 - T_2)\}^{-1}.$$

Логарифмуючи обидві частини останнього рівняння, отримаємо:

$$-\Delta t/T_1 = \ln \{ (T_2/T_1) \exp(-\Delta t/T_2) + [(T_1 - T_2)/T_1] \times \\ \times \{2 - [T_1 \exp(-\Delta t_k/T_1) - T_2 \exp(-\Delta t_k/T_2)] / (T_1 - T_2)\}^{-1} \},$$

звідки можна записати наступний вираз:

$$\Delta t = -T_1 \ln \{ (T_2/T_1) \exp(-\Delta t/T_2) + [(T_1 - T_2)/T_1] \times \\ \times \{2 - [T_1 \exp(-\Delta t_k/T_1) - T_2 \exp(-\Delta t_k/T_2)] / (T_1 - T_2)\}^{-1} \}.$$

Позначаючи $L = 2 - [T_1 \exp(-\Delta t_k / T_1) - T_2 \exp(-\Delta t_k / T_2)] / (T_1 - T_2)$,

остаточно отримаємо вираз зв'язку Δt_k з Δt :

$$\Delta t = -T_1 \ln \{ (T_2 / T_1) \exp(-\Delta t / T_2) + [(T_1 - T_2) / T_1] L^{-1} \}. \quad (3.21)$$

Таким чином, для розрахунку величин Δt_k і Δt методом простих ітерацій, задаючись попереднім значенням Δt_k , за допомоги виразу (3.20) обчислюється значення Δt , яке потім підставляється у вираз (3.15) для розрахунку подальшого значення Δt_k .

Вирази для розрахунку збільшень координат судна Δx_o і Δy_o за час повороту τ мають вигляд:

$$\begin{aligned} \Delta x_o = & V_o \sin K_o \int_0^{\Delta t_k} \cos \{ a_\omega \{ t - \{ T_1^2 [1 - \exp(-t/T_1)] - \\ & - T_2^2 [1 - \exp(-t/T_2)] \} / (T_1 - T_2) \} \} dt + V_o \cos K_o \int_0^{\Delta t_k} \sin \{ a_\omega \{ t - \\ & - \{ T_1^2 [1 - \exp(-t/T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-t/T_2)] \} / (T_1 - T_2) \} \} dt + \\ & + V_o \sin [K_o + K(\Delta t_k)] \int_0^{\Delta t} \cos \{ -a_\omega t + \\ & + a_\omega \{ 2 - [T_1 \exp(-\Delta t_k / T_1) - T_2 \exp(-\Delta t_k / T_2)] / (T_1 - T_2) \} \times \\ & \times \{ T_1^2 [1 - \exp(-t/T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-t/T_2)] \} / (T_1 - T_2) \} dt + \\ & + V_o \cos [K_o + K(\Delta t_k)] \int_0^{\Delta t} \sin \{ -a_\omega t + \\ & + a_\omega \{ 2 - [T_1 \exp(-\Delta t_k / T_1) - T_2 \exp(-\Delta t_k / T_2)] / (T_1 - T_2) \} \times \\ & \times \{ T_1^2 [1 - \exp(-t/T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-t/T_2)] \} / (T_1 - T_2) \} dt. \end{aligned} \quad (3.22)$$

$$\begin{aligned}
\Delta y_o = & V_o \cos K_o \int_0^{\Delta t_k} \cos \{ a_\omega \{ t - \{ T_1^2 [1 - \exp(-t/T_1)] - \\
& - T_2^2 [1 - \exp(-t/T_2)] \} / (T_1 - T_2) \} \} dt - V_o \sin K_o \int_0^{\Delta t_k} \sin \{ a_\omega \{ t - \\
& - \{ T_1^2 [1 - \exp(-t/T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-t/T_2)] \} / (T_1 - T_2) \} \} dt + \\
& + V_o \cos [K_o + K(\Delta t_k)] \int_0^{\Delta t} \cos \{ -a_\omega t + \\
& + a_\omega \{ 2 - [T_1 \exp(-\Delta t_k/T_1) - T_2 \exp(-\Delta t_k/T_2)] / (T_1 - T_2) \} \} \times \\
& \times \{ T_1^2 [1 - \exp(-t/T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-t/T_2)] \} / (T_1 - T_2) \} dt - \\
& - V_o \sin [K_o + K(\Delta t_k)] \int_0^{\Delta t} \sin \{ -a_\omega t + \\
& + a_\omega \{ 2 - [T_1 \exp(-\Delta t_k/T_1) - T_2 \exp(-\Delta t_k/T_2)] / (T_1 - T_2) \} \} \times \\
& \times \{ T_1^2 [1 - \exp(-t/T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-t/T_2)] \} / (T_1 - T_2) \} dt. \quad (3.23)
\end{aligned}$$

Таким чином проводиться розрахунок приросту координат судна за час його повороту з урахуванням третьої динамічної моделі руху кутом рискання.

Розглянуті три динамічні моделі обертального руху припускають миттєву перекладку пера керма. Однак у роботі [13] запропоновано ще дві моделі, в яких враховується час перекладки пера керма.

У роботі [13] припускається, що перекладка пера керма виконується за кінцевий час $\Delta t_{\beta s}$ зі швидкістю V_β й до кінця перекладки кут перекладки пера досягає сталого значення рівного, який дорівнює β_o . У першому наближенні вважається, що кут перекладки β змінюється лінійно протягом інтервалу $\Delta t_{\beta s}$, тобто:

$$\beta = V_\beta t, \quad \text{при } t \leq \Delta t_{\beta s}$$

$$\beta = \beta_o, \quad \text{при } t > \Delta t_{\beta s}.$$

На першому етапі повороту судна з урахуванням часу перекладки пера керма залежність для поточного значення курсу судна $\bar{K}$ для четвертої моделі має вигляд [13]:

$$\bar{K} = K_o + b_{\beta} \left\{ \frac{t^2}{2} - T_1 [T_1 - (t + T_1) \exp(-t/T_1)] \right\}, \quad \text{при } t \leq \Delta t_{\beta 1}$$

$$\bar{K} = \tilde{K}(\Delta t_{\beta 1}) + a_{\omega} \{ t - k T_1 \exp(-\Delta t_{\beta 1}/T_1) [1 - \exp(-t/T_1)] \}, \quad \text{при } t > \Delta t_{\beta 1},$$

$$\text{де } \tilde{K}(\Delta t_{\beta 1}) = K_o + b_{\beta} \left\{ \frac{\Delta t_{\beta 1}^2}{2} - T_1 [T_1 - (\Delta t_{\beta 1} + T_1) \exp(-\Delta t_{\beta 1}/T_1)] \right\}.$$

У п'ятій моделі повороту судна зміна курсу судна з урахуванням часу перекладки пера керма в загальному випадку на першому етапі повороту характеризується виразом [13]:

$$\begin{aligned} \bar{K} = K_o + b_{\beta} \frac{t^2}{2} - k_3 \{ & b_{\beta} T_1 [T_1^2 - T_1(t + T_1) \exp(-t/T_1)] - \\ & - b_{\beta} T_2 [T_2^2 - T_2(t + T_2) \exp(-t/T_2)] \}, \quad \text{при } t \leq \Delta t_{\beta 1}, \end{aligned}$$

$$\bar{K} = K(\Delta t_{\beta 1}) + a_{\omega} \bar{t} - s T_1^2 [1 - \exp(-\bar{t}/T_1)] + s T_2^2 [1 - \exp(-\bar{t}/T_2)], \quad \text{при } t > \Delta t_{\beta 1},$$

$$\text{де } k_3 = \frac{1}{(k_1 - k_2)};$$

$$s = \frac{a_{\omega}}{(T_1 - T_2)^2} [T_1 \exp(-\Delta t_{\beta 1}/T_1) - T_2 \exp(-\Delta t_{\beta 1}/T_2)];$$

$$K(\Delta t_{\beta 1}) = K_o + b_{\beta} \frac{\Delta t_{\beta 1}^2}{2} - k_3 \{ b_{\beta} T_1 [T_1^2 - T_1(\Delta t_{\beta 1} + T_1) \exp(-\Delta t_{\beta 1}/T_1)] -$$

$$-b_{\beta}T_2[T_2^2 - T_2(\Delta t_{\beta 1} + T_2)\exp(-\Delta t_{\beta 1}/T_2)]\}.$$

Для вибору адекватної моделі обертального руху було проведено імітаційне моделювання траєкторій повороту за допомогою результатів апріорного експериментального дослідження, який був отриманий в реальних умовах експлуатації для розрахунку чисельних значень інерційних характеристик суден.

Для балкера «Sheila Ann» в реальних умовах експлуатації були отримані матеріали щодо його поворотності [81], згідно з якими найкраще відповідність з експериментальної траєкторії повороту судна досягається для п'ятого типу моделі. Моделі перших трьох типів мають набагато нижчі щодо точності характеристики, у яких С.К.П. і траєкторна похибка в 2÷4 рази більше, ніж в моделі п'ятого типу, тобто більша на 27÷125 м.

У роботі [82] також було здійснене імітаційне моделювання повороту контейнеровоза "Oxford", характеристики поворотності якого були приведені в [12], з розрахунком величини траєкторної похибки на момент часу завершення маневру. Як приклад базової моделі, що характеризує реальний рух судна, була прийнята найбільш точна модель п'ятого типу, яка описувала поточний курс судна диференціальним рівнянням третього порядку з урахуванням часу перекладки керма. У результаті імітаційного моделювання повороту на 90° було встановлено, що при використанні для прогнозу криволінійної траєкторії повороту математичної моделі першого типу траєкторна похибка склала 150÷200 м, для другого типу моделі ця величина склала 35÷40 м, а для третього - 25÷30 м.

Таким чином, найбільш прийнятною стала математична модель поворотності судна третього типу, оскільки при достатній простоті вона має необхідну точність (максимальна розбіжність експериментальної та модельної траєкторій 25÷30 м).

Отже, момент часу $\tilde{t}_n$ дійсного початку повороту судна розраховується за математичною моделлю поворотності судна третього типу, використовуючи для розрахунку координат $\tilde{x}_m$ і $\tilde{y}_m$ виразу (3.22) і (3.23). Зокрема, розрахунковий момент часу t_n визначається за однією з розглянутих трьох типів динамічних моделей.

Так, якщо розрахунок моментів часу початку повороту проводився за математичною моделлю поворотності судна першого типу, то для обчислення координат $x_m = x_{m1}$ і $y_m = y_{m1}$ використовувалися формули (3.7) і для даного випадку $t_{n1} = t_n(x_{m1}, y_{m1})$.

У разі розрахунку моменту часу початку повороту з математичної моделі поворотності судна другого типу слід скористатися виразами (3.16) і (3.17) для визначення координат $x_m = x_{m2}$ і $y_m = y_{m2}$, при цьому $t_{n2} = t_n(x_{m2}, y_{m2})$.

Якщо розрахунок моментів часу початку повороту виконується за математичною моделлю поворотності судна третього типу, то координати $x_m = x_{m3} = \tilde{x}_m$ і $y_m = y_{m3} = \tilde{y}_m$, отже $t_{n3} = \tilde{t}_n$.

З урахуванням динамічної моделі поворотності судна проєкції $S_x^{(d)}$ і $S_y^{(d)}$ систематична векторна похибка виражається в такий спосіб:

$$S_{xi}^{(d)} = V_o \text{Abs}(t_{ni} - \tilde{t}_n) \sin K_1 + \Delta S_x,$$

$$S_{yi}^{(d)} = V_o \text{Abs}(t_{ni} - \tilde{t}_n) \cos K_1 + \Delta S_y. \quad (i=1, 2)$$

При використанні для розрахунку моменту часу t_n моделі поворотності судна третього типу:

$$S_{x3}^{(d)} = \Delta S_x \quad \text{і} \quad S_{y3}^{(d)} = \Delta S_y.$$

Додаткові складові систематичної векторної похибки ΔS_x і ΔS_y враховують різницю між реальною траєкторією повороту і траєкторією моделі поворотності судна третього типу. Як раніше вказувалося, абсолютне значення такої похибки складає близько 30 м. Тому:

$$\Delta S_x = 30 \sin K_1, \quad \Delta S_y = 30 \cos K_1.$$

3.2. Урахування динаміки судна під час визначення похибки від перекладок керма $S^{(\beta)}$.

Похибка $S^{(\beta)}$ характеризується складовими $S_x^{(\beta)}$ і $S_y^{(\beta)}$:

$$S_x^{(\beta)} = x_N - x_M \quad \text{і} \quad S_y^{(\beta)} = y_N - y_M.$$

Оскільки реальна траєкторія руху судна під час повороту в цьому дослідженні описується динамічною моделлю обертального руху судна третього порядку (3.22) і (3.23), то координати x_N і y_N , як і інтервали часу Δt_k і Δt , обчислюються за значенням $a_\omega = k_\omega \beta_k$. За розрахунком координат x_M і y_M , а також відповідних інтервалів часу, приймаємо $a_\omega = k_\omega (\beta_k + \Delta \beta_k)$.

У першому наближенні похибки $S^{(\beta)}$ можна оцінити за допомогою динамічної моделі обертального руху судна з постійною кутовою швидкістю (першого типу), згідно з якою координати точки М визначаються виразами:

$$x_M = \frac{V_o}{k_\omega \beta_k} (\cos K_o - \cos K_y),$$

$$y_M = \frac{V_o}{k_\omega \beta_k} (\sin K_y - \sin K_o).$$

Аналогічно знаходимо вирази для координат x_N і y_N точки N :

$$x_N = \frac{V_o}{k_\omega (\beta_k + \Delta\beta_k)} (\cos K_o - \cos K_y),$$

$$y_N = \frac{V_o}{k_\omega (\beta_k + \Delta\beta_k)} (\sin K_y - \sin K_o).$$

Складові $S_x^{(\beta)}$ і $S_y^{(\beta)}$ векторної похибки мають вигляд:

$$S_x^{(\beta)} = \frac{V_o}{k_\omega} (\cos K_o - \cos K_y) \left[\frac{1}{(\beta_k + \Delta\beta_k)} - \frac{1}{\beta_k} \right],$$

$$S_y^{(\beta)} = \frac{V_o}{k_\omega} (\sin K_y - \sin K_o) \left[\frac{1}{(\beta_k + \Delta\beta_k)} - \frac{1}{\beta_k} \right].$$

Оскільки $\beta_k \gg \Delta\beta_k$, то можна записати:

$$\begin{aligned} S_x^{(\beta)} &= \frac{-V_o}{k_\omega \beta_k^2} (\cos K_o - \cos K_y) \Delta\beta_k, \\ S_y^{(\beta)} &= \frac{-V_o}{k_\omega \beta_k^2} (\sin K_y - \sin K_o) \Delta\beta_k. \end{aligned} \quad (3.24)$$

3.3. Щільність розподілу векторної похибки управління

Під час виконання повороту судном, векторна похибка управління судном складається з систематичної $S^{(d)}$ і випадкової $S^{(c)}$ похибок, причому випадкова складова є сумою векторної похибки $S^{(\beta)}$, яка виникає через похибки перекладки пера керма $\Delta\beta_k$, і векторної похибки $S^{(t)}$, що виникає через похибки вибору моменту часу початку повороту Δt_n .

Для динамічної моделі обертального руху судна з постійною кутовою швидкістю векторна похибка $S^{(\beta)}$ характеризується складовими (3.24), а векторна похибка $S^{(t)}$ характеризується складовими:

$$\begin{aligned} S_x^{(t)} &= V_o \sin K_o \Delta t_n, \\ S_y^{(t)} &= V_o \cos K_o \Delta t_n, \end{aligned} \quad (3.25)$$

то для зосереджених випадкових величин $\Delta\beta_k$ і Δt_n дисперсії позначені відповідно D_β і D_t . Очевидно, що коваріаційна матриця векторної похибки $S^{(\beta)}$ при відсутності кореляції між складовими набирає вигляду:

$$K_\beta^S(x, y) = \begin{vmatrix} D_{\beta x}^S & 0 \\ 0 & D_{\beta y}^S \end{vmatrix},$$

де дисперсії складових $D_{\beta x}^S$ і $D_{\beta y}^S$ з урахуванням виразів (3.24):

$$\begin{aligned} D_{\beta x}^S &= \left[\frac{V_o}{k_\omega \beta_k^2} (\cos K_o - \cos K_y) \right]^2 D_\beta; \\ D_{\beta y}^S &= \left[\frac{V_o}{k_\omega \beta_k^2} (\sin K_y - \sin K_o) \right]^2 D_\beta. \end{aligned}$$

Коваріаційна матриця векторної похибки $S^{(t)}$, також вважаючи незалежність її складових, виражається в такий спосіб:

$$K_t^S(x, y) = \begin{vmatrix} D_{tx}^S & 0 \\ 0 & D_{ty}^S \end{vmatrix}.$$

З урахуванням співвідношень (3.25) дисперсії складових D_{tx}^S і D_{ty}^S похибки $S^{(t)}$ визначаються виразами:

$$\begin{aligned} D_{tx}^S &= (V_o \sin K_o)^2 D_t; \\ D_{ty}^S &= (V_o \cos K_o)^2 D_t. \end{aligned}$$

Оскільки векторні похибки $S^{(\beta)}$ і $S^{(t)}$ незалежні, то їх сума, тобто випадкова векторна похибка управління судном $S^{(c)}$, характеризується коваріаційною матрицею $K_c^S(x, y)$, яка, як показано в роботі [83], є сумою коваріаційних матриць доданків векторних похибок. Тому:

$$K_c^S(x, y) = K_\beta^S(x, y) + K_t^S(x, y), \text{ або}$$

$$K_c^S(x, y) = \begin{bmatrix} D_{cx}^S & 0 \\ 0 & D_{cy}^S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{\beta x}^S + D_{tx}^S & 0 \\ 0 & D_{\beta y}^S + D_{ty}^S \end{bmatrix}.$$

Маючи у своєму розпорядженні коваріаційну матрицю $K_c^S(x, y)$, можна записати вираз для двовимірної щільності нормального розподілу випадкової векторної похибки управління судном $S^{(c)}$, враховуючи наявність систематичної векторної похибки $S^{(d)}$ з проекціями $S_x^{(d)}$ і $S_y^{(d)}$:

$$f_c^S(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_{cx}^S\sigma_{cy}^S} \exp\left[-\left(\frac{(x - S_x^{(d)})^2}{D_{\beta x}^S + D_{tx}^S} + \frac{(y - S_y^{(d)})^2}{D_{\beta y}^S + D_{ty}^S}\right)\right], \quad (3.26)$$

$$\text{де } \sigma_{cx}^S = \sqrt{D_{\beta x}^S + D_{tx}^S}, \quad \sigma_{cy}^S = \sqrt{D_{\beta y}^S + D_{ty}^S}.$$

Підставляючи вирази проекцій $S_x^{(d)}$ і $S_y^{(d)}$:

$$S_x^{(d)} = V_o \text{Abs}(t_n - \tilde{t}_n) \sin K_o,$$

$$S_y^{(d)} = V_o \text{Abs}(t_n - \tilde{t}_n) \cos K_o$$

у вираз (3.25), отримаємо:

$$f_c^S(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_{cx}^S\sigma_{cy}^S} \exp\left[-\left(\frac{(x - V_o \text{Abs}(t_n - \tilde{t}_n) \sin K_o)^2}{D_{\beta x}^S + D_{tx}^S} + \frac{(y - V_o \text{Abs}(t_n - \tilde{t}_n) \cos K_o)^2}{D_{\beta y}^S + D_{ty}^S}\right)\right], \quad (3.27)$$

$$\text{причому } t_n = \frac{D \sin K_1 - x_c}{V_1 \sin K_1} \text{ та } \tilde{t}_n = \frac{D \sin K_1 - \tilde{x}_c}{V_1 \sin K_1},$$

де координати x_c і $\tilde{x}_c$:

$$x_c = \frac{y_m - x_m \operatorname{ctg} K_2}{\operatorname{ctg} K_1 - \operatorname{ctg} K_2} \text{ та } \tilde{x}_c = \frac{\tilde{y}_m - \tilde{x}_m \operatorname{ctg} K_2}{\operatorname{ctg} K_1 - \operatorname{ctg} K_2},$$

а вираз для розрахунку x_m , y_m , $\tilde{x}_m$ і $\tilde{y}_m$ визначаються формулами (3.8).

Як вище вказувалося, векторна похибка $S^{(\beta)}$ виникає через похибки перекладки пера керма $\Delta\beta_k$ і її величина залежить від динамічної моделі прогнозу повороту судна. Так наведені вирази складових векторної похибки $S^{(\beta)}$ (3.24) отримані для динамічної моделі обертального руху судна з постійною кутовою швидкістю.

У другому розділі дисертаційної роботи отримані вирази для складових векторного похибки управління $S^{(\beta)}$ в загальному вигляді:

$$S_x^{(\beta)} = x_N - x_M \text{ и } S_y^{(\beta)} = y_N - y_M,$$

де x_M і y_M - координати точки М за наявності похибки $\Delta\beta_k$;

x_N і y_N - координати точки N за відсутності похибок.

Розглянемо більш адекватну, процесу повороту, динамічну модель обертального руху судна під час повороту, яка описується таким диференціальним рівнянням другого порядку [78]:

$$T_1 \ddot{K} + \dot{K} = k_\omega \beta_k,$$

де T_1 - постійна часу, що характеризує інерційні властивості судна;

β_k - кут кладки керма;

k_ω - коефіцієнт ефективності керма.

Рішення наведеного диференціального рівняння має наступний вигляд:

$$K = K_o + \omega_r t - T_1 (\omega_r - \omega_o) [1 - \exp(-t/T_1)],$$

де ω_o и ω_r - відповідно початкове значення кутової швидкості повороту і приватне рішення вихідного диференціального рівняння.

Поворот судна містить дві фази кладки пера керма.

Для першої фази повороту судна, тривалість якої становить інтервал часу Δt_k , початкове ω_o і стале значення кутової швидкості виражаються наступним чином:

$$\omega_o = 0 \quad \text{і} \quad \omega_r = k_\omega \beta_k = a_\omega,$$

а вираз для поточного курсу набуває такого вигляду:

$$K = K_o + a_\omega \{t - T_1 [1 - \exp(-t/T_1)]\}.$$

На другій фазі повороту протягом інтервалу часу Δt відбувається одержування судна і поточний курс описується залежністю:

$$\tilde{K} = K + a_\omega \{T_1 [2 - \exp(-\Delta t_k/T_1)] [1 - \exp(-t/T_1)] - t\}.$$

Для обчислення інтервалів часу Δt_k и Δt необхідно скористатися виразом, отриманим в третьому розділі, зручним для розрахунку методом простих ітерацій з початковим наближенням $\Delta t_k = \Delta K / a_\omega$:

$$\Delta t_k = T_1 [1 - \exp(-\Delta t_k/T_1)] + \Delta t - T_1 [2 - \exp(-\Delta t_k/T_1)] [1 - \exp(-\Delta t/T_1)] + \Delta K / a_\omega, \quad (3.28)$$

де $\Delta t = T_1 \ln [2 - \exp(-\Delta t_k/T_1)]$.

Останнє отримане рівняння дозволяє зв'язати змінні Δt_k і Δt , чим забезпечується ітераційне обчислення тривалості кожної з фаз повороту судна, а також тривалості повороту τ з одного заданого курсу судна на інший.

Координати точки М визначаються виразами:

$$x_M = \int_0^{\Delta t k} V_o \sin[K_o + K] dt + \int_0^{\Delta t} V_o \sin[K_o + K(\Delta t_k) + \tilde{K}] dt, \quad (3.29)$$

$$y_M = \int_0^{\Delta t k} V_o \cos[K_o + K] dt + \int_0^{\Delta t} V_o \cos[K_o + K(\Delta t_k) + \tilde{K}] dt, \quad (3.30)$$

причому у виразах (3.28) застосовуємо $a_\omega = k_\omega \beta_k$.

Аналогічно знаходяться вирази для координат x_N і y_N точки N, тільки при їх розрахунку за формулами (3.29) і (3.30) значення $a_\omega = k_\omega (\beta_k + \Delta\beta_k)$. Під час розрахунку координат за допомогою (3.29) і (3.30) визначені інтеграли, які входять в ці формули, не беруться в елементарних функціях і їх значення знаходяться чисельними методами, наприклад, використовується метод Сімпсона.

Здійснено кількісну оцінку величини векторної похибки повороту $S^{(\beta)}$ в залежності від обраної моделі прогнозу повороту судна. Припустимо, судно прямує зі швидкістю $V_o=20$ вузлів курсом $K_o=15^\circ$ і виконує поворот на курс $K_y=105^\circ$. Кут перекладки пера керма обраний $\beta_k=15^\circ$ і судно виконує поворот з кутовою швидкістю $a_\omega = k_\omega \beta_k=2,7$ град / хв з постійною часу $T_1=10,23$ с [84]. Під час перекладання керма була допущена похибка $\Delta\beta_k=1^\circ$. Розрахуємо векторну похибку в разі прогнозу повороту за найпростішою моделлю першого порядку, для чого скористаємося виразами (3.24). Виражаючи градусну міру в радіанах і швидкість судна в м / с, розраховуємо проекції x і y векторної похибки $S^{(\beta)}$:

$$x = \frac{-0,514 \cdot 20}{0,262 \cdot 0,1745 \cdot 2,7} (1,225) 0,1745 = -17,80 \text{ м},$$

$$y = \frac{-0,514 \cdot 20}{0,262 \cdot 2,7} (0,7071) = -10,27 \text{ м}.$$

Тривалість повороту дорівнює $\tau=33,3$ с, а величина векторної похибки становить $S^{(\beta)}=20,6$ м.

За цими ж вихідними даними при прогнозуванні повороту судна по динамічній моделі другого порядку спочатку методом простих ітерацій були розраховані тривалості першої і другої фаз повороту судна $\Delta t_k=38$ с і $\Delta t=7$ с і тривалістю повороту $\tau=45$ с. Чисельним інтегруванням були визначені координати точки М: $x_M=348$ м та $y_M=235$ м, а також координати точки N: $x_N=333$ м, $y_N=222$ м. Проекції векторної похибки $x=-15$ м, $y=-13$ м, а похибка $S^{(\beta)}=19,8$ м.

Слід зазначити, що реальне значення векторної похибки значно більше, що обумовлюється відмінністю реальної кутової швидкості повороту судна від значень, розрахованих за допомогою моделей прогнозу повороту судна. Так, в роботі [82] вказується, що були виконані натурні спостереження траєкторій повороту судна, на базі яких проводилося імітаційне моделювання повороту на 90° і було встановлено, що під час використання для прогнозу криволінійної ділянки математичної моделі з постійною кутовою швидкістю траєкторна похибка, тобто максимальну розбіжність експериментальної та модельної траєкторій, склала близько 150 ... 200 м, для моделі другого порядку ця величина склала 35 ... 40 м.

Таким чином, значення векторної похибки, яка розрахована під час прогнозування повороту судна за найпростішою моделлю першого порядку і моделі другого порядку, незначно відрізняються одна від одної, проте з урахуванням реальної криволінійної траєкторії повороту сумарна векторна похибка в першому випадку прогнозу може досягати до 220 м, а в разі

прогнозування повороту за моделлю другого порядку - до 60 м, тобто приблизно в чотири рази меншою. Отже, для прогнозу повороту судна переважно необхідно користуватися моделлю другого порядку.

Науковим результатом рішення першої допоміжної задачі стало встановлення координатним методом графоаналітичних залежностей траєкторних векторних похибок управління на повороті $S^{(s)}$ та двовірної щільності нормального розподілу випадкової векторної похибки управління судном $f^s_c(x,y)$, необхідно для програмного діалогу з програмним забезпеченням електронних карт.

3.4. Висновки за третім розділом.

У третьому розділі розглянуто векторну похибку управління і досліджені її складові. Визначено залежність векторної похибки управління від істотних чинників. Встановлено, що векторна похибка управління є сумою декількох похибок.

Перш за все, це систематична векторного похибка $S^{(d)}$, яка виникає через різницю в моментах часу початку повороту судна через відмінності реального траєкторії повороту від прогнозованої по динамічній моделі поворотності судна. Виявлено механізм появи систематичної векторного похибки і показано, що час початку повороту судна залежить від обраної моделі його поворотності.

Розглянуто п'ять моделей обертального руху судна. Перша модель, - спрощена, яка описує поворот судна з незмінною кутовою швидкістю, друга і третя моделі враховують наявність постійних часу, що характеризує динаміку судна, і дві останні моделі, які враховують крім динаміки судна час перекладки керма. Показано, що при обчисленні інтегралів для визначення приросту координат доцільно використовувати метод Сімпсона.

Виявлено, що векторна похибка управління, крім систематичної складової, містить векторну похибку $S^{(\beta)}$, яка виникає через похибки перекладки пера

керма $\Delta\beta_k$, а також векторну похибку $S^{(t)}$, що виникає через похибки моментів часу початку повороту Δt . Отримано процедуру урахування динаміки судна при визначенні похибки $S^{(\beta)}$.

Основні результати розділу викладені у роботах [56-76] автора.

РОЗДІЛ 4

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ВИПАЛКОВОЇ ТРАЄКТОРІЇ ПОХИБКИ ПОВОРотУ НА
ВИРОГІДНІСТЬ БЕЗПЕЧНОЇ ПРОВОДКИ СУДНА В СТИСЛИХ УМОВАХ

Розв'язання другої допоміжної задачі з кількісною оцінкою безпеки судноводіння ймовірностним методом.

Безпека судноводіння визначається аваріями які виникають у групі суден. Причому група суден оцінюється з точки зору дослідження і може містити від одного судна до всього світового флоту. Аварії суден у процесі судноводіння виникають внаслідок посадок на мілину і навалів через позиційні похибки, зіткнень суден і посадок на мілину та навалів через похибки управління.

Аварійність характеризується потоком аварійних подій з кожної із зазначених причин. Слід зазначити, що згадані три потоки аварійних подій є незалежними і в першому наближенні їх можна розглядати, як найпростіші (стаціонарні пуасонівські) потоки. Тому і їх сумарний потік також можна вважати найпростішим.

Оскільки найпростіший потік має властивості стаціонарності, ординарності і є потоком без післядії, то число аварійних подій сумарного потоку, що виникають протягом інтервалу часу τ , розподілені за законом Пуассона з математичним очікуванням [83]:

$$a_{\Sigma} = \lambda_{\Sigma} \tau,$$

де λ_{Σ} - щільність сумарного потоку, яка дорівнює середньому числу аварійних подій, що виникають в одиницю часу.

Основною характеристикою безпеки судноводіння є ймовірність безаварійного плавання $P_b(\tau)$, яка є ймовірністю відсутності аварійної події протягом інтервалу часу τ . У загальному випадку ймовірність того, що за час τ відбудеться рівно n аварійних подій при їх розподілі за законом Пуассона, дорівнює:

$$P_n(\tau) = \frac{(\lambda_{\Sigma}\tau)^n}{n!} e^{-\lambda_{\Sigma}\tau}.$$

Вираз ймовірності безаварійного плавання $P_b(\tau)$ отримаємо, приймаючи в попередньому виразі значення $n = 0$. Отже:

$$P_b(\tau) = \frac{(\lambda_{\Sigma}\tau)^0}{0!} e^{-\lambda_{\Sigma}\tau}, \text{ або}$$

$$P_b(\tau) = e^{-\lambda_{\Sigma}\tau}.$$

Проміжок часу T між двома послідовними довільними аварійними подіями в найпростішому сумарному потоці, тобто час безаварійного плавання, розподілений за експоненціальним законом з щільністю розподілу:

$$f(t) = \lambda_{\Sigma} e^{-\lambda_{\Sigma}t}.$$

Математичне очікування часу безаварійного плавання і його дисперсія визначаються виразами:

$$M(T) = \frac{1}{\lambda_{\Sigma}}, \quad D(T) = \frac{1}{\lambda_{\Sigma}^2}.$$

Інтенсивність сумарного потоку λ_{Σ} виражаються формулою:

$$\lambda_{\Sigma} = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3,$$

де λ_1 - інтенсивність аварійних подій з причини посадок на міліну і навали через позиційні похибки;

λ_2 - інтенсивність аварійних подій з причини зіткнень суден;

λ_3 - інтенсивність аварійних подій з причини посадок на міліну і навали через похибки управління.

Інтенсивності λ_1 , λ_2 і λ_3 можуть бути визначені за статистичними даними або оцінені за допомогою математичних моделей. Для виявлення чинників, що впливають на ймовірність безаварійного плавання і розробки заходів щодо забезпечення необхідного рівня безпеки судноводіння необхідно створити математичні моделі для оцінки інтенсивностей λ_1 , λ_2 і λ_3 .

Розглянемо математичну модель для визначення суми інтенсивностей λ_1 і λ_3 , які характеризують вплив на безпеку судноводіння векторної позиційної похибки і векторної похибки управління, для чого звернемося до роботи [56]. У ній вказується, що вибір безпечного маршруту плавання судна в обмеженому районі можливий за допомогою математичної моделі оцінки ймовірності безаварійного плавання судна P_b за обраним маршрутом з його заданими характеристиками S_n і двовимірною щільністю розподілу ймовірностей сумарної траєкторної похибки $f(x,y)$, причому як ймовірність слід використовувати апіорну вірогідність безаварійної провідки судна в заданому районі за обраним маршрутом.

Безпечну область D плавання судна характеризує гранична ізобата порівняна з осадкою судна і в даному випадку безпечна область D задається в системі координат $O\Delta\varphi_t\Delta w_t$, пов'язаної з програмною траєкторією, і аналітичний вираз безпечної області будемо позначати для кожного моменту часу t через $D_{t_0}, D_{t_0+1}, \dots, D_t$. Припустимо область безпечного плавання D не є опуклою і задана щодо послідовності систем координат $O\Delta\varphi_t\Delta w_t$, початок яких належить програмній траєкторії і збігається з прогнозованими точками місця судна для моментів часу $t_0, t_0+1, \dots, t$.

Сумарна векторна траєкторна похибка судна $x(t)$ в будь-який момент часу t характеризує справжню позицію судна в системі координат $O\Delta\varphi_t\Delta w_t$, причому послідовність цих похибок в часі є осередком незалежних випадкових векторів з відомими щільностями розподілу і коваріаційними матрицями $R(t)$.

Ймовірність безпечного плавання є ймовірністю того, що справжня траєкторія руху судна належить області D , тобто ймовірність того, що кожна точка траєкторії руху судна належить безпечній області D . Оскільки рух судна в даному випадку можна описувати лінійною моделлю, то траєкторія його руху є сукупністю k послідовних лінійних ділянок, кожна з яких - переміщення судна за інтервал часу Δt між послідовними моментами корекції параметрів його руху. Ймовірність реалізації конкретної ділянки траєкторії визначається добутком ймовірностей реалізації його кінцевих точок, заданих суміжними системами координат $O\Delta\varphi_t \Delta w_t$ і $O\Delta\varphi_{t+1} \Delta w_{t+1}$, причому ймовірності дорівнюють значенням щільності розподілу $f(\Delta\varphi_t, \Delta w_t, \lambda_t)$ і $f(\Delta\varphi_{t+1}, \Delta w_{t+1}, \lambda_{t+1})$ в зазначених кінцевих точках.

Ймовірність того, що початкова ділянка траєкторії r_o належить області безпечного плавання D за умови, що її початок знаходиться в точці з координатами $\Delta\varphi_{to}, \Delta w_{to}$ (в системі координат $O\Delta\varphi_{to} \Delta w_{to}$) дорівнює добутку ймовірностей того, що кожна точка ділянки r_o належить D , причому кожна з яких визначається добутком:

$$f(\Delta\varphi_{to}, \Delta w_{to}, \lambda_{to}); \quad f(\Delta\varphi_{to+1}, \Delta w_{to+1}, \lambda_{to+1}).$$

Тому можна записати:

$$\begin{aligned} P\{r_o \in D/c_o = (\Delta\varphi_{to}, \Delta w_{to})\} = \\ = f(\Delta\varphi_{to}, \Delta w_{to}, \lambda_{to}) \int_{D_{to}} f(\Delta\varphi_{to+1}, \Delta w_{to+1}, \lambda_{to+1}) d\Delta\varphi_{to+1} dw_{to+1}, \end{aligned}$$

де c_o - координати початку траєкторії, і ймовірність реалізації початку першої ділянки не залежить від змінних $\Delta\varphi_{to+1}$ і Δw_{to+1} .

Ймовірність того, що вся траєкторія руху судна належить області D , є ймовірністю того, що всі ділянки траєкторії руху судна одночасно належать області D :

$$P\{x(t) \in D\} = \int_{D_{t_n}} f\{\Delta\varphi_{t_0}, \Delta w_{t_0}, G[R(t_0)]\} \int_{D_{t_0}} f\{\Delta\varphi_{t_0+1}, \Delta w_{t_0+1}, G[R(t_0+1)]\} \rightarrow \\ \int_{D_{t_0+1}} f\{\Delta\varphi_{t_0+2}, \Delta w_{t_0+2}, G[R(t_0+2)]\} \dots \int_{D_{t-1}} f\{\Delta\varphi_t, \Delta w_t, G[R(t)]\} d\Delta\varphi_t dw_t \dots \rightarrow \\ d\Delta\varphi_{t_0+2} dw_{t_0+2} d\Delta\varphi_{t_0+1} dw_{t_0+1} d\Delta\varphi_{t_0} dw_{t_0},$$

де D_{t_n} - частина області D , що містить безліч точок початку траєкторії;

$R(t)$ - коваріаційна матриця похибки траєкторного управління судном.

Проводячи послідовне інтегрування, отримаємо в підсумку такий вираз:

$$P\{x(t) \in D\} = \Phi_k \{D_{t_n}, D_{t_0}, \dots, D_{t-2}, D_{t-1}, R(t_0), \dots, R(t-1), R(t)\}.$$

Отримана ймовірність $P\{x(t) \in D\}$ є шуканою ймовірністю безпечного плавання P_{bn} . Тому:

$$P_{bn} = \Phi_k \{D_{t_n}, D_{t_0}, \dots, D_{t-2}, D_{t-1}, R(t_0), \dots, R(t-1), R(t)\},$$

де Φ_k - функція, що характеризується k -кратне послідовне інтегрування щільності розподілу сумарної векторної похибки.

Таким чином, ймовірність безпечного плавання P_{bn} залежить від коваріаційних матриць $R(t_0), \dots, R(t-1), R(t)$ сумарної векторної похибки $x(t)$, області безпечного плавання D і положення в ній програмної траєкторії, типу розподілу векторної похибки, а також числом ділянок траєкторії, яке визначається періодом часу Δt .

Розглянемо випадок опуклої області безпечного плавання D . Властивість, що відрізняє опуклу область, полягає в тому, що усі відрізки прямої належать області D , якщо кінці відрізка знаходяться в межах цієї області. Вказана

обставина дозволяє зробити висновок, що множина кінців кожного відрізка траєкторії не залежить від координат його початку. У разі опуклої області вираз для P_{bn} набуває наступний вигляд:

$$P_{bn} = \int_{D_{t_0}} f[x(t_0)] dx(t_0) \int_{D_{t_0+1}} f[x(t_0+1)] dx(t_0+1) \dots \int_{D_t} f[x(t)] dx(t) \Rightarrow \prod_{i=0}^k \int_{D_{t_0+i}} f[x(t_0+i)] dx(t_0+i).$$

Логарифмуємо останнє рівняння і отримаємо:

$$\ln(P_{bn}) = \sum_{i=0}^k \ln \left\{ \int_{D_{t_0+i}} f[x(t_0+i)] dx(t_0+i) \right\},$$

звідки

$$P_{bn} = \exp \left\{ \sum_{i=0}^k \ln \left\{ \int_{D_{t_0+i}} f[x(t_0+i)] dx(t_0+i) \right\} \right\}, \quad (4.1)$$

де k - ціла частина відношення $s/(V_m \Delta t)$;

s - довжина програмної траєкторії;

V_m - середня швидкість руху судна за програмною траєкторією.

Розглянутий спосіб оцінки ймовірності безаварійного плавання судна P_b вимагає розв'язування задачі на площині з використанням двовимірної щільності розподілу ймовірностей векторної похибки і багаторазовим її інтегруванням в межах безпечної області D , яка має складну форму. Тому практична реалізація даного способу оцінки ймовірності P_{bn} є складною і трудомісткою.

Тому в роботі [56] запропоновано еквівалентний спосіб розрахунку апріорної ймовірності P_{bn} , в якому розглядається задача в рамках одновимірного простору з використанням одновимірної щільності похибки бічного ухилення судна. Передбачається, що допустима область безпечного

плавання задана аналітичним описом її правої $G_{st}(X, Y)$ і лівої $G_{pt}(X, Y)$ межі. Програмна траєкторія руху судна $Tr_{pr}(X, Y)$ також задана в допустимій безпечній області D , причому для кожної точки програмної траєкторії руху судна визначена пара нормальних відстаней від програмної траєкторії руху до правої і лівої меж безпечної області, які позначені відповідно $L_{st}(X, Y)$ і $L_{pt}(X, Y)$, з врахуванням того, що $(X, Y) \in Tr_{pr}(X, Y)$.

Під час руху судна на програмній траєкторії виникають бічні відхилення, які через вплив чинників, що збурюють, носять випадковий характер, що зумовлено стохастичною природою похибок обсервації і числення судна, а також його рикання під дією зовнішніх непередбачуваних чинників.

Як раніше зазначалося, для безпечної проводки судна заданим обмеженням рухом районом необхідно, щоб його справжня траєкторія руху належала у допустимій безпечній області плавання. У цьому випадку всі бічні відхилення судна від програмної траєкторії руху $Tr_{pr}(X, Y)$ на всій її довжині не повинні перевищувати нормальних відстаней $L_{st}(X, Y)$ і $L_{pt}(X, Y)$ до меж допустимої області. Прийнято нормальні відстані $L_{st}(X, Y)$ до правої межі безпечної області плавання вважати позитивними, а до лівої межі $L_{pt}(X, Y)$ – від’ємними.

Імовірність ρ_i того, що окремо взяте i - е бічне відхилення Δ_{bi} не перевершує нормальні відстані $L_{sti}(X, Y)$ і $L_{pti}(X, Y)$ до правої і лівої меж допустимої області плавання визначається наступним аналітичним виразом:

$$\rho_i = P\{L_{pti} \leq \Delta_{bi} \leq L_{sti}\} = \int_{-L_{pti}}^{L_{sti}} f(x) dx,$$

де $f(x)$ – щільність розподілу бокового відхилення судна від програмної траєкторії руху.

Праву частину отриманої рівності можна виразити через функцію розподілу $F(x)$ бічного відхилення, тобто:

$$\int_{-L_{pti}}^{L_{sti}} f(x)dx = F(L_{sti}) - F(L_{pti}),$$

тому ймовірність ρ_i описується наступною формулою:

$$\rho_i = P\{L_{pti} \leq \Delta_{bi} \leq L_{sti}\} = F(L_{sti}) - F(L_{pti}).$$

Для безаварійної проводки судна за програмною траєкторією необхідна приналежність всіх точок істинної траєкторії руху судна безпечній області плавання D. При розгляді великої кількості передбачуваних проводок суден ймовірності ρ_i сусідніх точок програмної траєкторії можна вважати вірогідностями незалежних подій, а загальну ймовірність P безпечної проводки судна на безпечній області D отримується як добуток ймовірностей ρ_i по всіх точках програмної траєкторії:

$$P = \prod_i \rho_i, \text{ або } P = \prod_i [F(L_{sti}) - F(L_{pti})].$$

Оскільки $F(L_{sti}) - F(-L_{pti}) = F(L_{sti}) + F(L_{pti})$, то справедливим є співвідношення:

$$P = \prod_i [F(L_{sti}) + F(L_{pti})],$$

в якому L_{pti} виражаються в абсолютних значеннях.

Вираз для ймовірності P в експоненційному вигляді, враховуючи, що справедливе співвідношення $P = \exp(\ln P)$:

$$P = \exp\{\ln \prod_i [F(L_{sti}) + F(L_{pti})]\}.$$

Очевидно, що має місце рівняння:

$$\ln \prod_i [F(L_{sti}) + F(L_{pti})] = \sum_{i=1}^s \ln [F(L_{sti}) + F(L_{pti})],$$

з урахуванням якого отримаємо наступний вираз для ймовірності Р:

$$P = \exp \left\{ \sum_{i=1}^s \ln [F(L_{sti}) + F(L_{pti})] \right\}, \quad (4.2)$$

де s – довжина програмної траєкторії в допустимій області безпечного плавання.

З огляду на те, що ширина допустимої області в обмежених рухом районах плавання набагато менша, ніж довжина програмної траєкторії s , має сенс перетворити вираз для ймовірності Р, виходячи з можливих значень ширини b допустимої безпечної області плавання і частот їх повторень протягом всієї довжини програмної траєкторії.

Для цього скористаємося виразом (4.2), в якому суму логарифмів

$\sum_{i=1}^s \ln [F(L_{sti}) + F(L_{pti})]$ можна подати в наступному вигляді:

$$\sum_{i=1}^s \ln [F(L_{sti}) + F(L_{pti})] = \sum_{i=1}^{\Delta b} m_i \ln [F(L_{sti}) + F(L_{pti})], \quad (4.3)$$

де $\Delta b = b_{\max} - b_{\min}$ – різниця між максимальною $b_{\max}$ і мінімальною $b_{\min}$ шириною допустимої безпечної області;

m_i – кількість пар нормальних відстаней L_{sti} і L_{pti} , які в сумі складають ширину b_i .

Помножимо і розділимо праву частину виразу (4.3) на загальне число s складових суми, отримаємо вираз для ймовірності Р:

$$P = \exp \left\{ s \sum_{i=1}^{\Delta b} \frac{m_i}{s} \ln [F(L_{sti}) + F(L_{pti})] \right\}.$$

Відношення $\frac{m_i}{s}$ є частотою повторення значення ширини допустимої області, що дорівнює рівній b_i . Оскільки значення ширини b допустимої області змінюється від мінімального значення $b_{\min}$ до максимального $b_{\max}$, то розподіл частот $\frac{m_i}{s}$ за значеннями ширини b області D є характеристикою допустимої області, що дозволяє формалізувати її ступінь обмеженості. Зазначена характеристика є розподілом частот за значеннями ширини допустимої області та формально представляти у вигляді щільності розподілу (аналогічно щільності розподілу ймовірностей), яка позначена $\varphi(b)$. При цьому вираз для ймовірності P і, отже, апіорної ймовірності P_{bn} приймає наступний вигляд:

$$P_{bn} = \exp \left\{ s \sum_{i=1}^{\Delta b} \varphi(b_i) \ln [F(L_{sti}) + F(b_i - L_{sti})] \right\}. \quad (4.4)$$

Отриманий вираз дозволяє зробити апіорну оцінку ймовірності залежно від основних істотних чинників: характеристики обмеженості $\varphi(b)$ допустимої області плавання D ; характеристик точності і керованості судна, що забезпечується системою навігаційного обладнання і виражаються в параметрах функції розподілу $F(b)$; вибору програмної траєкторії $Tr_{pr}(X, Y)$ в допустимій області плавання, що впливає на співвідношення нормальних відстаней L_{st} і $b - L_{st}$ та довжини програмної траєкторії s .

Таким чином, кожна проводка судна за маршрутом в умовах обмеженого простору пов'язана з ймовірністю виникнення аварії $1 - P_{bn}$. Тому число $a_1 + a_3$ можливих посадок суден на міліну через вплив позиційних похибок і аварій

судна через векторну похибку управління судном за інтервал часу τ залежить від частоти потрапляння судна в стислі води q :

$$a_1 + a_3 = (\lambda_1 + \lambda_3)\tau = (1 - P_{bnn})q\tau,$$

де P_{bnn} - усереднене значення ймовірності безаварійного плавання судна P_{bn} в обмежених умовах.

З останнього виразу випливає:

$$\lambda_1 + \lambda_3 = (1 - P_{bnn})q,$$

причому частоту q в першому наближенні можна оцінити відношенням середнього часу перебування суден в обмежених водах T_m до середнього експлуатаційного періоду T_e протягом року. У середньому морські судна в обмежених рухом водах знаходяться 20 % експлуатаційного часу.

Отже, остаточно:

$$\lambda_1 + \lambda_3 = 0,2(1 - P_{bnn}).$$

Очевидно, зниження інтенсивностей $\lambda_1 + \lambda_3$ можливе зменшенням усередненої ймовірності P_{bnn} шляхом вибору необхідних значень істотних параметрів, від яких залежить P_{bnn} .

Для оцінки ймовірності безаварійного плавання судна P_{bn} проводилося імітаційне моделювання за допомогою розробленої комп'ютерної програми, яка генерує випадкові траєкторії руху судна відносно програмної, для чого щодо кожної обсервованої точки випадковим чином формується векторна похибка, підпорядкована розподілу Гаусу із заданою с.к.п. і нульовим математичним очікуванням. Вона визначає справжнє місце судна, а з'єднання всіх таких точок дає реалізацію випадкової траєкторії. Програмою генерується 1000 таких траєкторій і перевіряється приналежність кожної з них до допустимої області безпечного плавання D (рис. 4.1). Частка траєкторій, що належать області D ,

якраз і визначає ймовірність P_{bn} , яка відображається на інформаційному табло. На рис. 4.1 показана ситуація безпечного плавання судна в стиснених водах, коректний вибір програмної траєкторії і допустиме значення с.к.п. відносно обмеженості допустимої області плавання забезпечують значення $P_{bn}=1,000$.

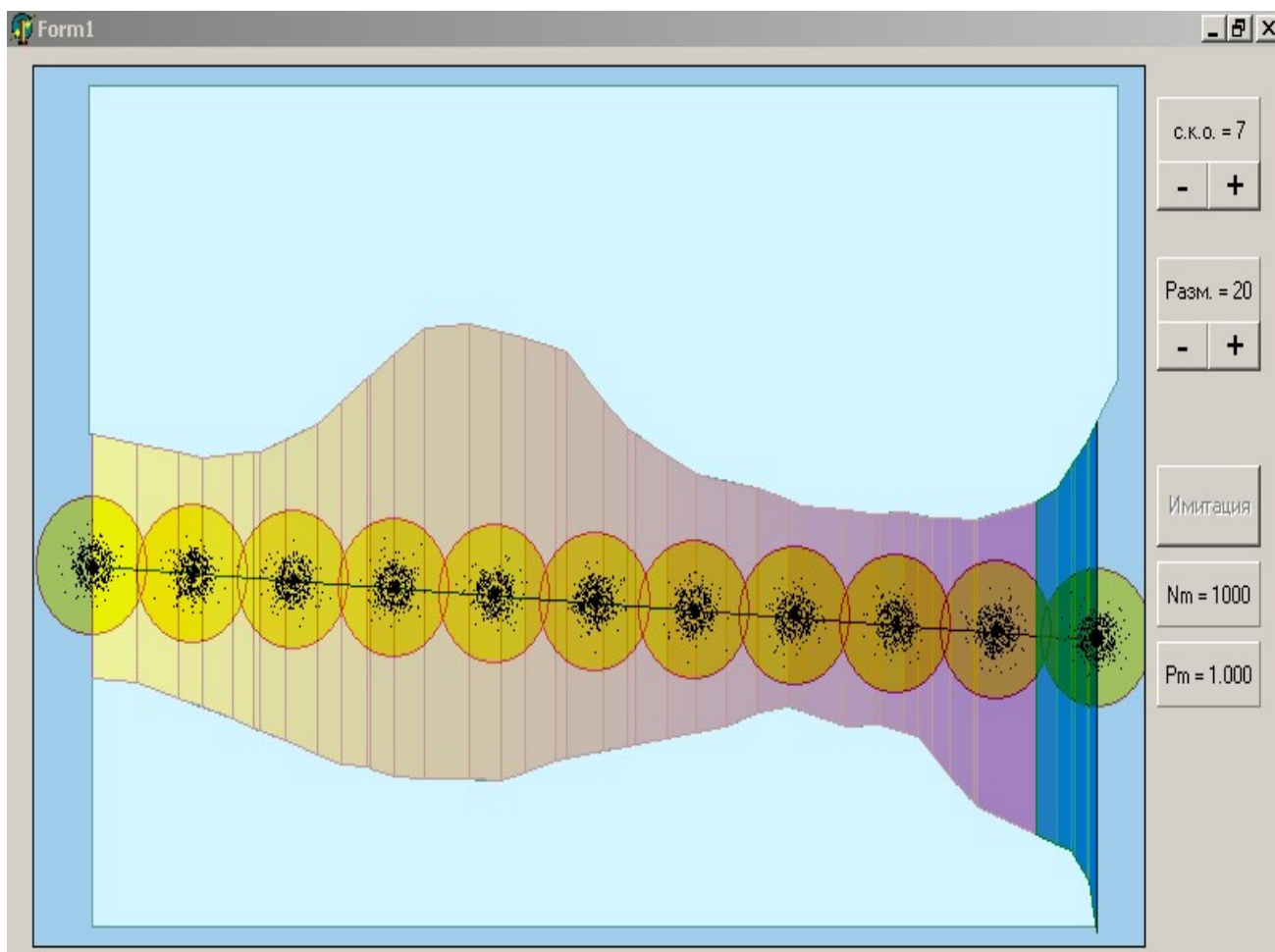


Рисунок 4.1 – Ситуація безпечного плавання судна в стислих водах

На рис. 4.2 наведена ситуація з неприпустимо низькою ймовірністю $P_{bn} = 0,490$, що загрожує посадкою судна на мілину. Причиною такої низької ймовірності є несиметричне розташування програмної траєкторії щодо меж безпечної області плавання і велика стислість області щодо с.к.п. позиційної векторної похибки, що виражається великою кількістю (більше половини) ймовірних траєкторій руху судна, які ведуть до посадки судна на мілину.

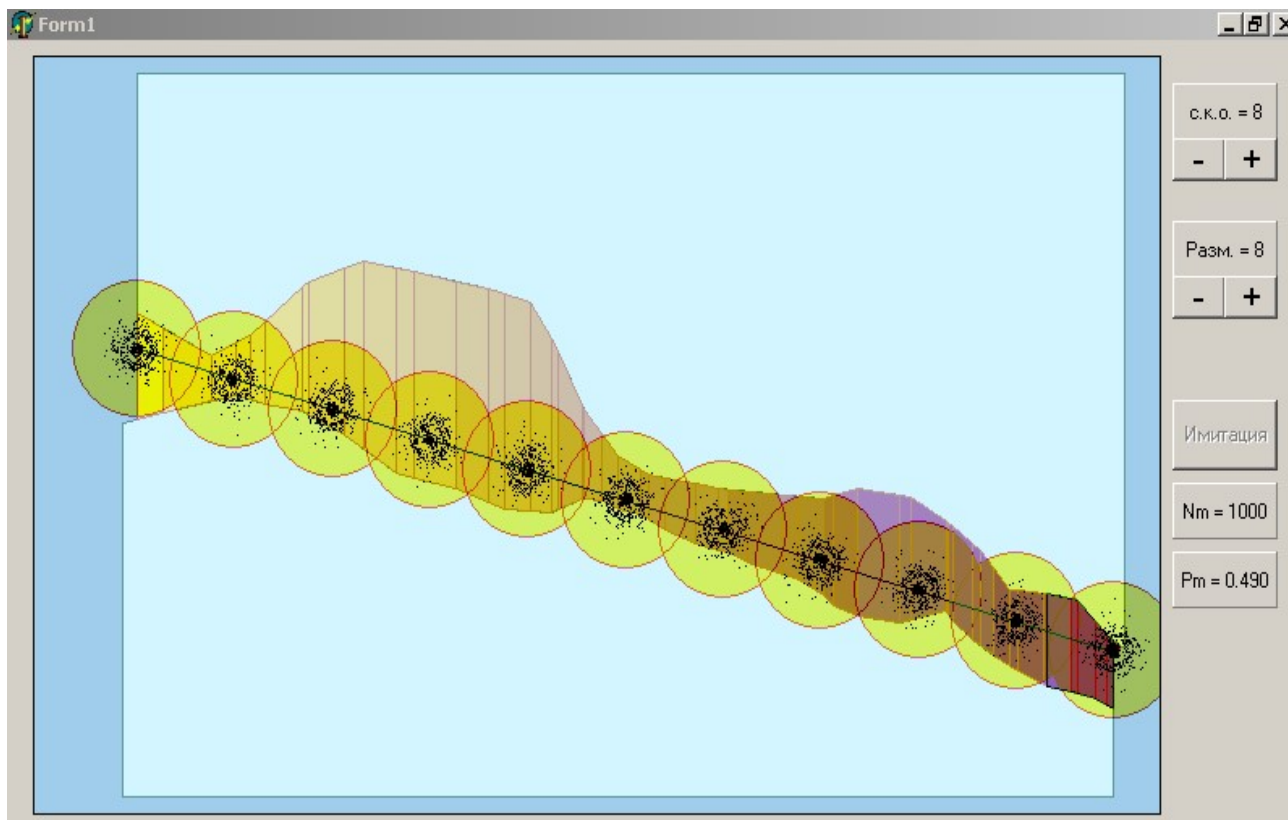


Рисунок 4.2 – Ситуація плавання судна в обмежених водах з неприпустимою

$$P_{bn}$$

4.1. Зв'язок одновимірної щільності похибки бічного відхилення з двовимірною щільністю векторної траєкторної похибки

Для оцінки ймовірності безаварійного плавання судна за вибраним маршрутом доцільно застосувати математичну модель з одновимірною щільністю розподілу бокового відхилення судна від програмної траєкторії руху, коли відома двовимірна щільність розподілу векторної траєкторної похибки. Тому потрібно знайти вираз одновимірної щільності $f_b(s)$ бокового відхилення s за заданою двовимірною щільністю розподілу ймовірностей траєкторної похибки $f_{\Sigma}(x, y)$.

Траєкторна векторна похибка ξ_{Σ} є сумою позиційної векторної похибки ξ_p , яка виникає під час визначення місця судна, і векторної похибки управління ξ_c , яка обумовлена похибками обраних параметрів керуючих впливів.

Припустимо, що вихідні векторної похибки ξ_p і ξ_c підпорядковані сталому закону розподілу, наприклад, нормальному, тоді і траєкторна центрована похибка ξ_{Σ} розподілена за нормальним законом з щільністю:

$$f_{\Sigma}(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_{\Sigma x}\sigma_{\Sigma y}} \exp\left[-\left(\frac{x^2}{\sigma_{\Sigma x}^2} + \frac{y^2}{\sigma_{\Sigma y}^2} + 2\frac{xy}{\sigma_{\Sigma xy}}\right)\right],$$

де $\sigma_{\Sigma x}$ і $\sigma_{\Sigma y}$ - середні квадратичні відхилення векторної траєкторної похибки ξ_{Σ} відповідно по осях x і y , причому:

$$\sigma_{\Sigma x} = \sqrt{D_{\Sigma x}} = \sqrt{D_{px} + D_{cx}}, \quad \sigma_{\Sigma y} = \sqrt{D_{\Sigma y}} = \sqrt{D_{py} + D_{cy}} \quad \text{и} \quad \sigma_{\Sigma xy} = \sqrt{D_{\Sigma xy}}.$$

В останніх виразах D_{px} , D_{cx} і D_{py} , D_{cy} - дисперсії складових похибок ξ_p і ξ_c відповідно до осей x і y .

Систему залежних випадкових величин при нормальному законі розподілу можна замінити системою незалежних, перетворюючи другий змішаний момент $D_{\Sigma xy}$ в нуль. Для цього необхідно розрахувати кут γ , який визначається умовою [85]:

$$\operatorname{tg} 2\gamma = \frac{2D_{\Sigma xy}}{D_{\Sigma x} - D_{\Sigma y}}$$

і з його допомогою визначити ортогональну матрицю перетворення, в результаті чого змінюються значення дисперсій $D_{\Sigma x}$ і $D_{\Sigma y}$, приймаючи значення $D_{\Sigma x1}$ і $D_{\Sigma y1}$, які обчислюються за допомогою виразів [85]:

$$D_{\Sigma x1} = \frac{1}{2} [D_{\Sigma x} + D_{\Sigma y} + \sqrt{4D_{\Sigma xy}^2 + (D_{\Sigma x} - D_{\Sigma y})^2}];$$

$$D_{\Sigma y1} = \frac{1}{2} [D_{\Sigma x} + D_{\Sigma y} - \sqrt{4D_{\Sigma xy}^2 + (D_{\Sigma x} - D_{\Sigma y})^2}].$$

Звертаємо увагу, що дисперсія модуля векторної похибки до і після перетворення залишається незмінною, тобто

$$D_{\Sigma x1} + D_{\Sigma y1} = D_{\Sigma x} + D_{\Sigma y}.$$

Очевидно, що після зазначених перетворень вираз двовимірної щільності $f_{\Sigma}(x, y)$ приймає наступний вигляд:

$$f_{\Sigma}(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_{\Sigma x1}\sigma_{\Sigma y1}} \exp\left[-\left(\frac{x^2}{\sigma_{\Sigma x1}^2} + \frac{y^2}{\sigma_{\Sigma y1}^2}\right)\right].$$

Таким чином, двовимірна щільність $f_{\Sigma}(x, y)$ при нормальному законі розподілу може бути представлена системою незалежних складових x та y , другий змішаний момент яких дорівнює нулю, а коваріаційна матриця містить дисперсії $D_{\Sigma x1}$ і $D_{\Sigma y1}$.

На рис. 4.3 показана залежність бічного відхилення z від складових x та y векторної позиційної похибки, а також курсу судна K , причому з рисунка видно:

$$z = x \sin\left(K - \frac{\pi}{2}\right) + y \cos\left(K - \frac{\pi}{2}\right),$$

або

$$z = y \sin K - x \cos K.$$

В цьому випадку бічне відхилення z також буде підкорятися нормальному закону з параметрами [83]:

$$m_z = m_y \sin K - m_x \cos K; \quad \sigma_z^2 = \sigma_{\Sigma x1}^2 \cos^2 K + \sigma_{\Sigma y1}^2 \sin^2 K,$$

де m_z і σ_z^2 - відповідно математичне очікування і дисперсія бічного відхилення; m_x і m_y - математичні очікування складових x і y векторної похибки.

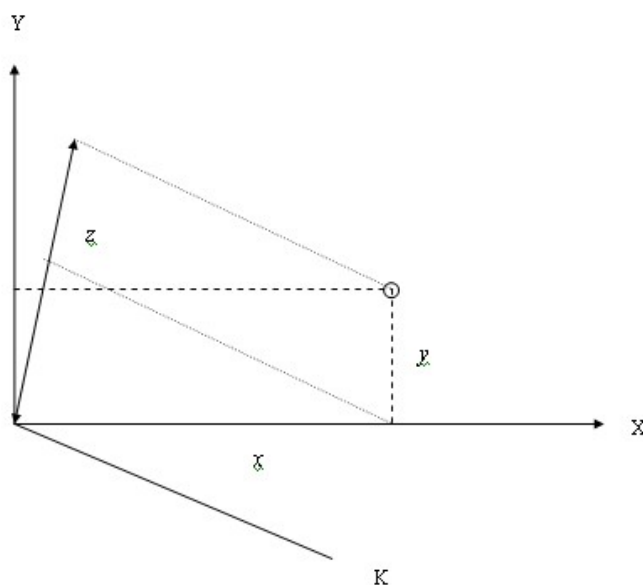


Рисунок 4.3 – Залежність бокового відхилення z від складових x і y

Тому:

$$f_b(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \exp\left[-\frac{(z - m_z)^2}{2\sigma_z^2}\right], \text{ або}$$

$$f_b(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(\sigma_{\Sigma x1}^2 \cos^2 K + \sigma_{\Sigma y1}^2 \sin^2 K)}} \exp\left\{-\frac{[z - (m_y \sin K - m_x \cos K)]^2}{2(\sigma_{\Sigma x1}^2 \cos^2 K + \sigma_{\Sigma y1}^2 \sin^2 K)}\right\}, \quad (4.5)$$

де $m_x = S_x^{(d)} = V_o \text{Abs}(t_n - \tilde{t}_n) \sin K_o$ и $m_y = S_y^{(d)} = V_o \text{Abs}(t_n - \tilde{t}_n) \cos K_o$ - складові систематичної векторної похибки.

Таким чином, отримана процедура перетворення двовимірної щільності нормального розподілу позиційної помилки в одновимірну щільність похибки бічного відхилення судна від програмної траєкторії руху, яка залежить від дисперсій та інших змішаних моментів позиційної помилки і похибки управління, що дозволяє виконувати чисельну оцінку безпеки судноводіння в обмежених рухом водах за допомогою виразу (4.5).

Якщо розглядати оцінку навігаційної безпеки окремого повороту судна з однієї ділянки програмної траєкторії руху на наступний, то слід враховувати тільки векторну траєкторну похибку управління судном $S^{(c)}$, враховуючи наявність систематичної векторної похибки $S^{(d)}$ та випадкової $S^{(c)}$ похибок, причому випадкова складова є сумою векторної похибки $S^{(\beta)}$, яка виникає через похибки перекладки пера керма $\Delta\beta_k$, а також векторної похибки $S^{(t)}$, котра виникає через похибку вибору моменту часу початку повороту Δt_n . Причому двовимірна щільність розподілу ймовірностей похибки $S^{(c)}$ має вигляд (3.26).

Будемо припускати, що, в районі повороту судна, задана безпечна, в навігаційному відношенні, область плавання S_b , яка є частиною безпечної області D плавання судна, тобто $S_b \subset D$. Причому S_b є собою водна акваторія з глибинами, що дозволяють судну здійснювати безпечне плавання. Аналітично безпечна область плавання судна S_b характеризується двома межами, де використовуються граничні ізобати, що відокремлюють безпечну область від навігаційних небезпек. Права межа безпечної області S_b позначена $G_{st}(X, Y)$, а ліва - $G_{pt}(X, Y)$. Кожна з меж представлена шматково-лінійною апроксимацією, представленої масивом точок зламу $\{X_{si}, Y_{si}\}$ для правої межі і $\{X_{pi}, Y_{pi}\}$ - для лівої (рис. 4.4).

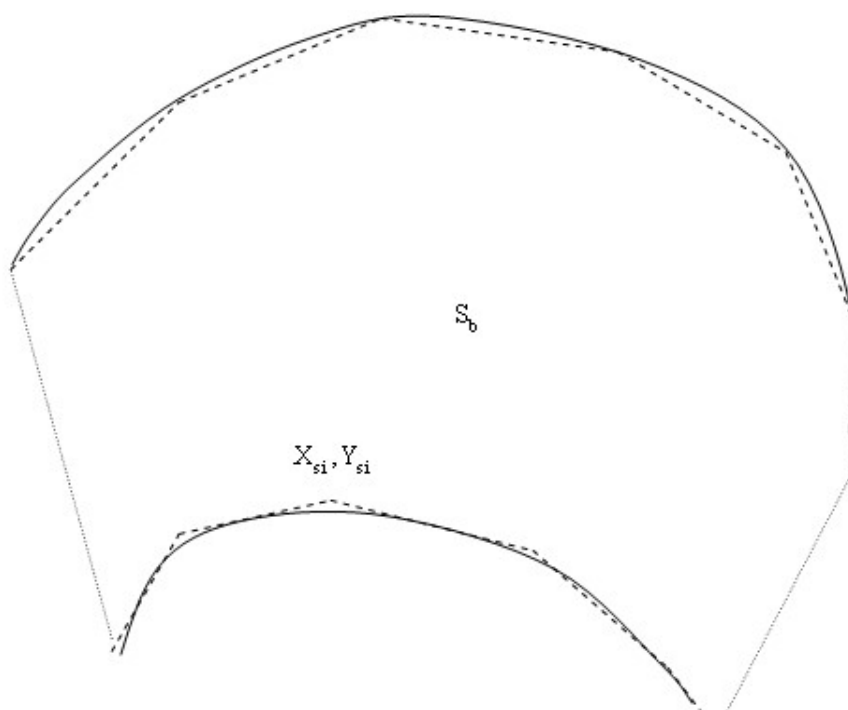


Рисунок 4.4 – Область безпечного плавання S_b

Поворот є безпечним, якщо криволінійна траєкторія судна під час повороту належить безпечній області S_b . У першому наближенні це означає, що початок і кінець криволінійної траєкторії належать області S_b . Тому ймовірність приналежності криволінійної траєкторії безпечної області S_b є добутком ймовірностей приналежності її початку та кінця цієї ж області. Якщо позначити ймовірність безпечного повороту через P_b , а ймовірності приналежності початку і кінця криволінійної траєкторії безпечної області відповідно через P_n и P_k , то очевидно справедливе співвідношення:

$$P_b = P_n \cdot P_k.$$

Зокрема, ймовірно P_n та P_k можна знайти, маючи в своєму розпорядженні можливості розподілу початкової $f_o(x, y)$ і кінцевої $f_\Sigma(x, y)$ точок криволінійної траєкторії руху судна під час повороту, а також аналітичним

описом безпечної області S_b . Очевидно, ймовірності P_n та P_k визначаються за допомогою виразів:

$$P_n = \iint_{S_b} f_o(x, y) dx dy, \quad P_k = \iint_{S_b} f_{\Sigma}(x, y) dx dy,$$

причому щільність розподілу $f_o(x, y)$ є двовимірною щільністю $f_{pzn}(x, y)$ розподілу позиційної векторної похибки ξ_p , що складається з векторних похибок обсервації і числення, а щільність $f_{\Sigma}(x, y)$ являється щільністю векторної похибки управління ξ_c , яка характеризується двовимірною щільністю розподілу ймовірностей $f_c^S(x, y)$, представленої виразом (3.26), тобто $f_{\Sigma}(x, y) = f_c^S(x, y)$.

Для пошуку значень ймовірностей P_n та P_k необхідно скористатися кусочно-лінійною апроксимацією безпечної області S_b , представляючи її у вигляді доданків ΔS_{bi} , причому справедливі наступні співвідношення, що впливають із рис. 4.5 і представляють розподіл розбиття безпечної області S_b на складові ΔS_{bi} :

$$S_b = \sum_i \Delta S_{bi}; \quad P_n = \sum_i \iint_{\Delta S_{bi}} f_{pzn}(x, y) dx dy; \quad P_k = \sum_i \iint_{\Delta S_{bi}} f_c^S(x, y) dx dy,$$

Причому розподіл розбиття області S_b на складові ΔS_{bi} для обох інтегралів однаковий.

Як показано на рис. 4.5, розподіл розбиття безпечної області S_b на складові ΔS_{bi} доцільно виконати таким чином. Точки зламу правої $\{X_{si}, Y_{si}\}$ і лівої $\{X_{pi}, Y_{pi}\}$ межі служать для поділу вертикальними лініями безпечної

області S_b на складові площі ΔS_{bi} , причому вертикальні кордону кожної з площ ΔS_{bi} визначаються значеннями абсциси a_i і a_{i+1} , в горизонтальні межі виражаються лінійними рівняннями, параметри яких є функціями точок масивів $\{X_{si}, Y_{si}\}$ і $\{X_{pi}, Y_{pi}\}$. значення a_i визначаються однією з точок зламу X_{sj} чи X_{pj} , і послідовність значень $a_1, a_2, \dots, a_i, a_{i+1}, \dots$ є упорядкована за зростанням сукупності значень X_{si} і X_{pi} .

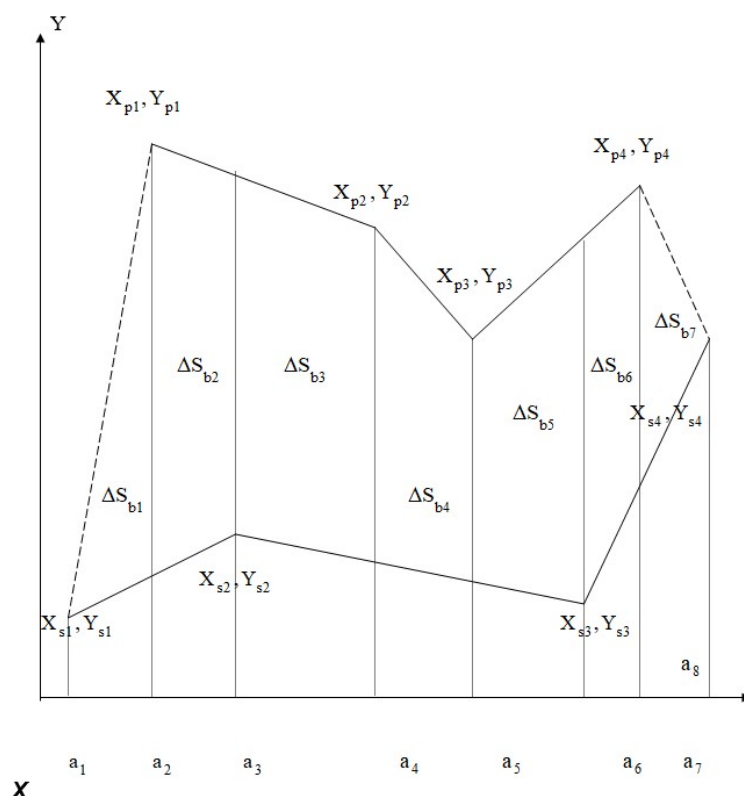


Рисунок 4.5 – Розбиття безпечної області S_b на складові ΔS_{bi}

Так, в прикладі на рис. 4.5 вертикальні кордони між площами ΔS_{bi} визначаються значеннями $a_1 = X_{s1}$, $a_2 = X_{p1}$, $a_3 = X_{s2}$, $a_4 = X_{p2}$, $a_5 = X_{p3}$ та т. д. Звертаємо увагу на те, що кожна зі складових площ ΔS_{bi} містить дві суміжні точки зламу з протилежних меж або з однієї і тієї ж межі. Як надано на рис. 4.5, площа ΔS_{b1} містить дві точки зламу (X_{s1}, Y_{s1}) та (X_{p1}, Y_{p1}) з різних меж, одночасно як площа ΔS_{b4} містить точки (X_{p2}, Y_{p2}) та (X_{p3}, Y_{p3}) з однієї межі.

Вказана обставина дозволяє записати лінійні вираження для горизонтальних меж з площ між a_i і a_{i+1} , котрі визначають залежність координати кожної межі області від координати x у вигляді:

$$y_{pi} = f_{pi}(x) = b_{pi} + c_{pi}x; \quad y_{si} = f_{si}(x) = b_{si} + c_{si}x.$$

Продовжуючи розглядати, як приклад, рис. 4.5, для площі ΔS_{b1} горизонтальні кордони можна записати в такий спосіб:

$$y_{p1} = f_{p1}(x) = Y_{s1} + \frac{Y_{p1} - Y_{s1}}{X_{p1} - X_{s1}}x; \quad y_{s1} = f_{s1}(x) = Y_{s1} + \frac{Y_{s2} - Y_{s1}}{X_{s2} - X_{s1}}x, \quad x \in [a_1, a_2]$$

Тут, очевидно, $b_{p1} = b_{s1} = Y_{s1}$, $c_{p1} = \frac{Y_{p1} - Y_{s1}}{X_{p1} - X_{s1}}$, $c_{s1} = \frac{Y_{s2} - Y_{s1}}{X_{s2} - X_{s1}}$.

Для чергової площі ΔS_{b2} справедливі наступні співвідношення:

$$y_{p2} = f_{p2}(x) = Y_{p1} + \frac{Y_{p2} - Y_{p1}}{X_{p2} - X_{p1}}x; \quad y_{s2} = f_{s2}(x) = f_{s1}(a_2) + \frac{Y_{s2} - Y_{s1}}{X_{s2} - X_{s1}}x, \quad x \in [a_2, a_3].$$

В отриманих виразах $b_{p2} = Y_{p1}$, $b_{s2} = f_{s1}(a_2)$, $c_{p2} = \frac{Y_{p2} - Y_{p1}}{X_{p2} - X_{p1}}$, $c_{s2} = \frac{Y_{s2} - Y_{s1}}{X_{s2} - X_{s1}}$.

У загальному випадку вирази для горизонтальних меж мають вигляд:

$$y_{pi} = f_{pi}(x) = b_{pi} + c_{pi}x; \quad y_{si} = f_{si}(x) = b_{si} + c_{si}x, \quad x \in [a_i, a_{i+1}]$$

де $b_{pi} = f_{p(i-1)}(a_i)$, $b_{si} = f_{s(i-1)}(a_i)$, $c_{pi} = \frac{Y_{pi} - Y_{p(i-1)}}{X_{pi} - X_{p(i-1)}}$, $c_{si} = \frac{Y_{si} - Y_{s(i-1)}}{X_{si} - X_{s(i-1)}}$.

Таким чином, межі складових площ ΔS_{bi} однозначно виражаються через точки масивів, що описують межі області безпечного плавання S_b . Тому вираз для оцінки ймовірностей P_n і P_k , а, отже, і ймовірності безпечного повороту P_b , можна записати в явному вигляді наступним чином:

$$P_n = \sum_i \int_{a_i}^{a_{i+1}} \int_{f_{si}(x)}^{f_{pi}(x)} f_{pzn}(x,y) dy dx; \quad P_k = \sum_i \int_{a_i}^{a_{i+1}} \int_{f_{si}(x)}^{f_{pi}(x)} f_c^S(x,y) dy dx.$$

$$P_b = \left[\sum_i \int_{a_i}^{a_{i+1}} \int_{f_{si}(x)}^{f_{pi}(x)} f_{pzn}(x,y) dy dx \right] \left[\sum_i \int_{a_i}^{a_{i+1}} \int_{f_{si}(x)}^{f_{pi}(x)} f_c^S(x,y) dy dx \right]. \quad (4.6)$$

Отримані вирази дозволяють зробити чисельну оцінку шуканої ймовірності безпечного повороту P_b для різних законів розподілу ймовірностей $f_{pzn}(x,y)$ и $f_c^S(x,y)$ векторних похибок.

Якщо ж розглянута область безпечного плавання судна D містить програмну траєкторію з n поворотами, то можна виділити для кожного програмного повороту локальну область S_{bi} ($i=1...n$), причому $S_{bi} \subset D$. Межі кожної з областей S_{bi} перетворюються до розглянутого вище виду, що дозволяє при використанні щільності розподілу ймовірностей $f_{pzn}(x,y)$ и $f_c^S(x,y)$ векторних похибок визначити ймовірність виконання безпечного повороту P_{bi} за допомогою виразу (4.12). З урахуванням всіх поворотів програмної траєкторії ймовірність безпечного проходження області безпечного плавання D з урахуванням тільки векторної похибки управління судном P_{bc} можна оцінити добутком всіх ймовірностей P_{bi} , тобто:

$$P_{bc} = \prod_{i=1}^n P_{bi},$$

або

$$P_{bc} = \prod_{j=1}^n \left\{ \left[\sum_{i=1}^n \int_{a_i}^{a_{i+1}} \int_{f_{si}(x)}^{f_{pi}(x)} f_{pzn}(x, y) dy dx \right] \left[\sum_{i=1}^n \int_{a_i}^{a_{i+1}} \int_{f_{si}(x)}^{f_{pi}(x)} f_c^S(x, y) dy dx \right] \right\}_j.$$

За допомогою отриманого виразу можна оцінити інтенсивність λ_3 аварійних подій через причину посадок на міліну і навали через векторну похибку управління.

$$\lambda_3 = (1 - P_{bc})q.$$

Науковим результатом рішення другої допоміжної задачі став іноваційний спосіб кількісного визначення критерію оцінки безпечного плавання судна в стислих умовах отриманого ймовірносним методом адаптованим за принципами ідентифікації до елементів *e*-навігації.

4.2. Висновки за четвертим розділом

У розділі міститься рішення другої допоміжної задачі шляхом розгляду двовимірної щільності розподілу векторної похибки управління судном, яка є сумою систематичної похибки, що виникає через відмінності динамічної моделі прогнозу обертального руху судна від реального процесу його повороту та випадкової похибки, причому випадкова складова є сумою векторної похибки, яка виникає через похибки перекладки пера керма, і векторної похибки, яка виникає через похибки вибору моменту часу початку повороту судна.

Отримані вирази для складових векторної похибки управління судном і формули двовимірної щільності випадкових складових у разі нормального закону розподілу. Показано, що систематичну похибку можна розглядати як математичне очікування випадкової складової.

Наведено дві процедури оцінки безпеки судноводіння, в яких характеристикою безпеки є ймовірність безпечної проводки судна за заданим обмеженим рухом маршрутом. Для кожної з процедур необхідно аналітичне завдання меж безпечної області плавання судна, а також програмної траєкторії руху судна. Також необхідні характеристики точності траєкторного управління судном виражені двовимірною щільністю розподілу векторної траєкторної похибки. Для оцінки ймовірності безпечної проводки судна першою процедурою використовується двовимірна щільність розподілу векторної траєкторної похибки і поточний фрагмент безпечної області плавання. Більш просто проводиться оцінка ймовірності безпечної проводки судна другою процедурою, яка використовує одновимірний розподіл ймовірностей бічного ухилення судна щодо програмної траєкторії руху. У цьому випадку допустима безпечна область плавання судна задається нормальними відстанями від програмної траєкторії його руху до правої і лівої меж області.

Запропоновано проводити опис процесу виникнення аварійних випадків суден за допомогою найпростішого потоку випадкових подій, який є сумою декількох незалежних потоків. Показано зв'язок інтенсивності потоку з ймовірністю безпечної проводки судна за заданим маршрутом. Отримані аналітичні вирази залежності інтенсивності потоку подій через вплив векторної позиційної помилки і векторної похибки управління судном.

Досліджено зв'язок одновимірної щільності похибки бічного відхилення з двовимірною щільністю векторної траєкторної похибки і отримана аналітична залежність похибки бокового відхилення від векторної траєкторної похибки, яка дозволила знайти вираз для одновимірної щільності похибки бічного відхилення, маючи двовимірну щільність векторної траєкторної похибки в разі нормального закону розподілу похибок навігаційних вимірювань. Наведено формалізацію меж безпечної області плавання судна і показана процедура оцінки ймовірності безпечного повороту судна при відомій двовимірній щільності розподілу векторної траєкторної похибки.

Результати розділу викладені в роботах [1, 2, 3, 13, 14, 18, 21] автора.

РОЗДІЛ 5

ОПЕРАТИВНА ОЦІНКА БЕЗПЕКИ ПЛАВАННЯ МЕТОДОМ ЗЧИСЛЕННЯ
ТА ВИЗНАЧЕННЯ ІНТЕГРАЛЬНОЇ ТРАЄКТОРНОЇ ПОХИБКИ ПОВОРоту
СУДНА МЕТОДОМ ОБСЕРВАЦІЇ В УКСПЛУАТАЦІЙНИХ УМОВАХ

Для вирішення третьої допоміжної задачі треба сформулювати графічний спосіб зачислення з відображенням поля точності штатної поточної навігаційної ситуації на електронній карті.

5.1. Відображення навігаційної ситуації з інформацією про небезпечне судноводіння

Врахування траєкторної похибки повороту судна повинно здійснюватися оперативно в процесі управління судном спільно з іншими джерелами можливої аварійності судна. Тому розглянемо процедуру оперативної оцінки безпеки плавання в заданому районі, яка відображена електронною картою, з урахуванням раніше вивчених основних чинників, що впливають на безпеку судноводіння. До цих чинників належать, перш за все, характеристики позиційної векторної похибки, для опису яких доцільно використовувати показник точності D_{md} , запропонований в роботі [86]. Показник D_{md} є дисперсією модуля траєкторної похибки в заданій точці. Тому з урахуванням можливостей отримання двох ліній розташування (за пеленгом та дистанцією) від кожного орієнтиру, на електронній карті можна відобразити поле точності, кожна точка якого характеризується значенням показника D_{md} , залежно від кількості використаних орієнтирів.

Для відображення поля точності на електронній карті в районі плавання судна спочатку необхідно вибрати орієнтири, за якими здійснюється контроль місця судна. Залежно від числа та взаємного положення орієнтирів для кожної точки судноплавного району розраховується значення показника точності D_{md} .

У випадку, коли спостереження судна проводяться за одним орієнтиром - його пеленгу та дистанції, розрахунок показника точності D_{md1} проводиться за формулою:

$$D_{md1} = \frac{\frac{1}{\sigma_D^2} + \frac{1}{\sigma_P^2}}{\frac{1}{\sigma_D^2 \sigma_P^2}} = \sigma_D^2 + \sigma_P^2,$$

де σ_D^2 і σ_P^2 - дисперсії похибок ліній положення дистанції та пеленга.

Оскільки дисперсії ліній положення σ_D^2 і σ_P^2 зростають із зростанням дистанції між судном і орієнтиром, то величина показника точності D_{md1} залежить тільки від цієї дистанції.

Якщо для визначення місця судна вибирається два орієнтири (два пеленги і дві дистанції), то показник точності D_{md2} для кожної точки плавання району розраховується за допомогою аналітичного виразу:

$$D_{md2} = \frac{\frac{1}{\sigma_{D1}^2} + \frac{1}{\sigma_{P1}^2} + \frac{1}{\sigma_{D2}^2} + \frac{1}{\sigma_{P2}^2}}{\frac{1}{\sigma_{D1}^2 \sigma_{P1}^2} + \frac{1}{\sigma_{D2}^2 \sigma_{P2}^2} + \left(\frac{1}{\sigma_{D1}^2 \sigma_{D2}^2} - \frac{1}{\sigma_{P1}^2 \sigma_{P2}^2}\right) \sin^2 \beta_{12} + \left(\frac{1}{\sigma_{D1}^2 \sigma_{P2}^2} - \frac{1}{\sigma_{P1}^2 \sigma_{D2}^2}\right) \cos^2 \beta_{12}}.$$

Значення D_{md2} залежить не тільки від дисперсій ліній положення σ_{D1}^2 , σ_{D2}^2 , σ_{P1}^2 і σ_{P2}^2 , але і від кута β_{12} між орієнтирами, визначеного з точки, в якій оцінюється значення показника точності.

У разі, коли обсервація місця судна проводиться за трьома орієнтирами, то показник точності D_{md3} , який може бути розрахований для будь-якої точки в

околицях розташування орієнтирів, що належать району плавання судна, обчислюється за наступним аналітичним виразом:

$$D_{\text{md3}} = \frac{\frac{1}{\sigma_{D1}^2} + \frac{1}{\sigma_{P1}^2} + \frac{1}{\sigma_{D2}^2} + \frac{1}{\sigma_{P2}^2} + \frac{1}{\sigma_{D3}^2} + \frac{1}{\sigma_{P3}^2}}{S + C}, \quad (5.1)$$

де величини S та C визначаються з наступних формул:

$$S = \left(\frac{1}{\sigma_{D1}^2} + \frac{1}{\sigma_{P1}^2} \right) \sin^2 \beta_{12} + \left(\frac{1}{\sigma_{D1}^2} + \frac{1}{\sigma_{P1}^2} \right) \sin^2 \beta_{13} + \left(\frac{1}{\sigma_{D2}^2} + \frac{1}{\sigma_{P2}^2} \right) \sin^2 \beta_{23},$$

$$C = \left(\frac{1}{\sigma_{D1}^2} + \frac{1}{\sigma_{P1}^2} \right) \cos^2 \beta_{12} + \left(\frac{1}{\sigma_{D1}^2} + \frac{1}{\sigma_{P1}^2} \right) \cos^2 \beta_{13} + \left(\frac{1}{\sigma_{D2}^2} + \frac{1}{\sigma_{P2}^2} \right) \cos^2 \beta_{23}.$$

Кути β_{12} , β_{13} і β_{23} є кутами між кожною парою орієнтирів в точці, де визначається значення D_{md3} .

Оскільки вся інформація, що характеризує поточну навігаційну ситуацію, пов'язана з графічним відображенням, то основою інтегрованого синтезу навігаційної ситуації є електронна карта району плавання судна, на якій можна побачити поточні позиції судна і найближчих цілей.

Як приклад, для імітаційного моделювання використана електронна карта підходів до порту Севастополь, яка показана на рис. 5.1. На карті показано прогнозоване положення судна після завершення повороту праворуч для входу в порт. Його напрямок руху показано вектором швидкості.

Відображення поля точності на електронній карті в районі плавання вимагає вибору орієнтирів, за якими контролюється місце судна шляхом вимірювання дистанцій і пеленгів кожного з них. Будемо формувати поле точності трьох орієнтирів, проводячи розрахунок значень D_{md3} для кожної точки за допомогою виразу (5.1).

Кожен з обраних орієнтирів відзначається світло зеленим колом, центр якого збігається з орієнтиром. На рис. 5.2. показаний варіант вибору трьох орієнтирів обсервації, якими є маяк мису Херсонес, маяк Любимівка та мис Костянтинівський. Також на карту нанесено ціль, яка рухається в південному напрямку і створює загрозу зіткнення для судна.

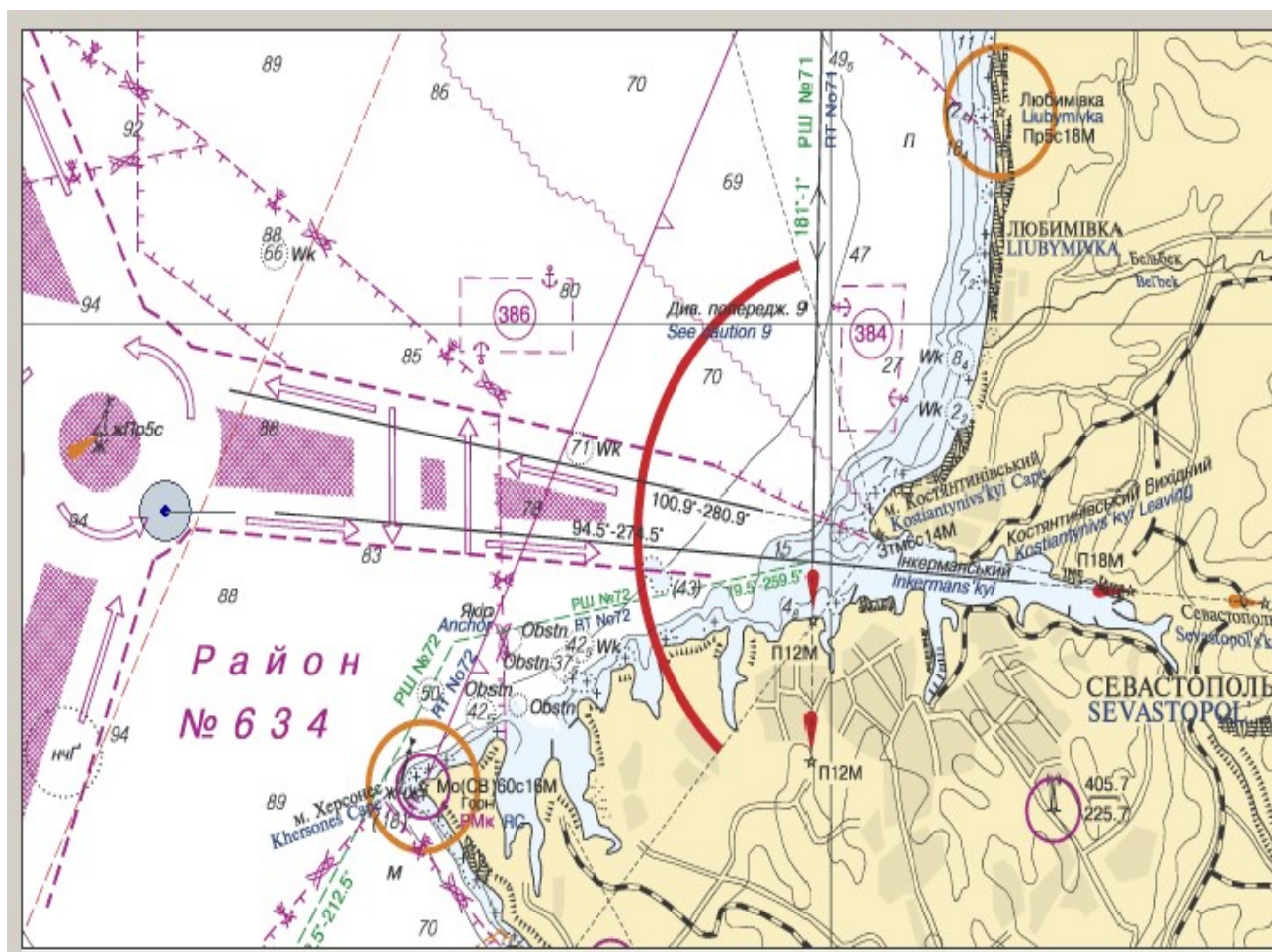


Рисунок 5.1 – Електронна карта підходів до порту Севастополь

Після вибору орієнтирів проводиться відображення поля точності на електронній карті району плавання. Можливі два варіанти відображення: з оцифруванням і без такого. Якщо оцифровка при відображенні поля точності не передбачена, то після розрахунку значень D_{md3} пов'язана з ним елементарна ділянка забарвлюється у сірий колір, ступінь темряви якого залежить від величини D_{md3} , а потім у графічному режимі прозорості накладається на

електронну карту, як показано на рис. 5.3. Іншими словами, чим більша величина показника D_{md3} , тим темніший колір елементарної ділянки.

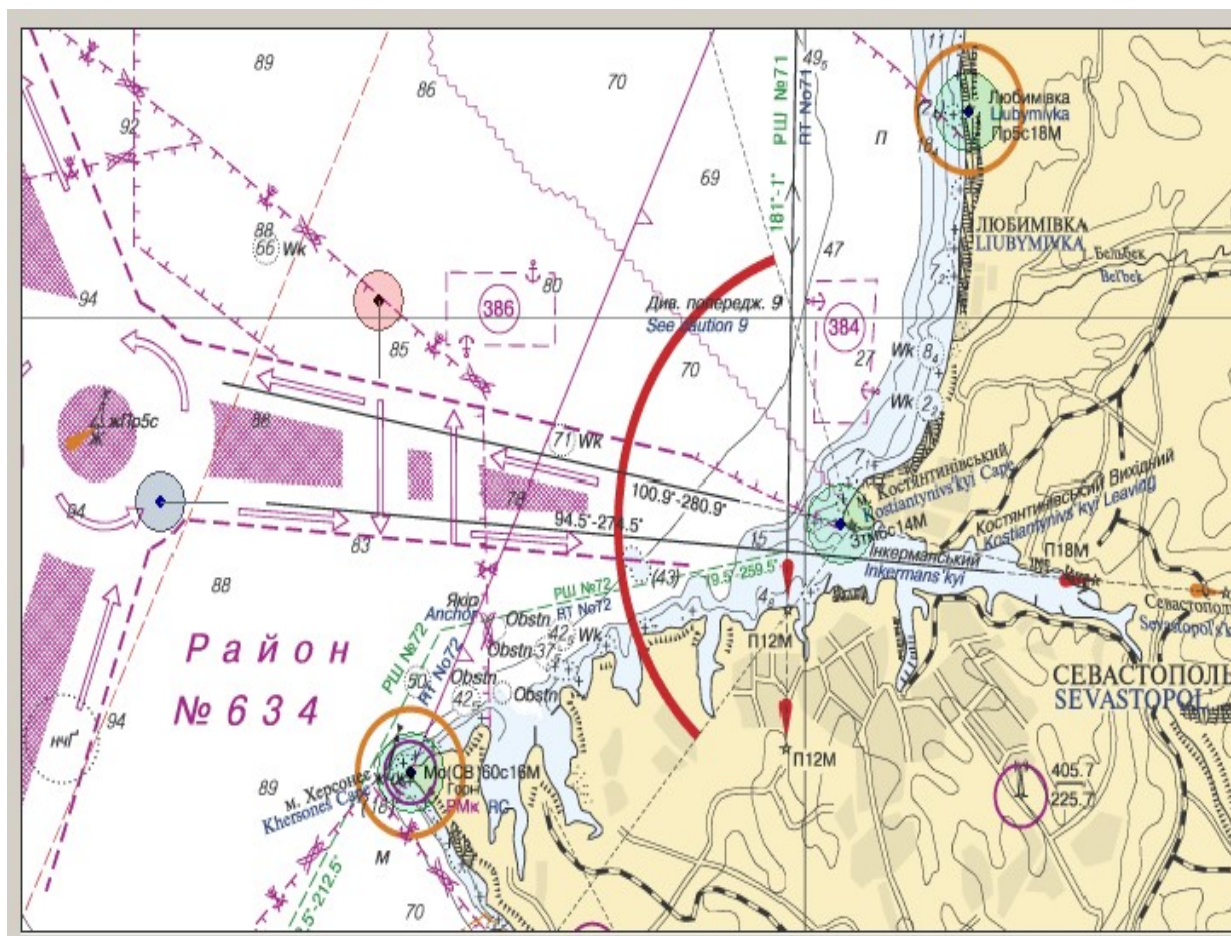


Рисунок 5.2 – Вибір орієнтирів для обсервації місця судна

При використанні режиму оцифрування поле точності відображається на електронній карті з нанесенням значень 95 % кругової похибки в метрах. Якщо значення похибки перевищує 100 м, то оцифрування такої ділянки не проводиться.

На рис. 5.4. приведено поле точності з нанесеними значеннями 95 % кругової похибки. Значення похибки в лівому нижньому кутку перевершує 100 м, тому оцифрування показаного району не проведено.

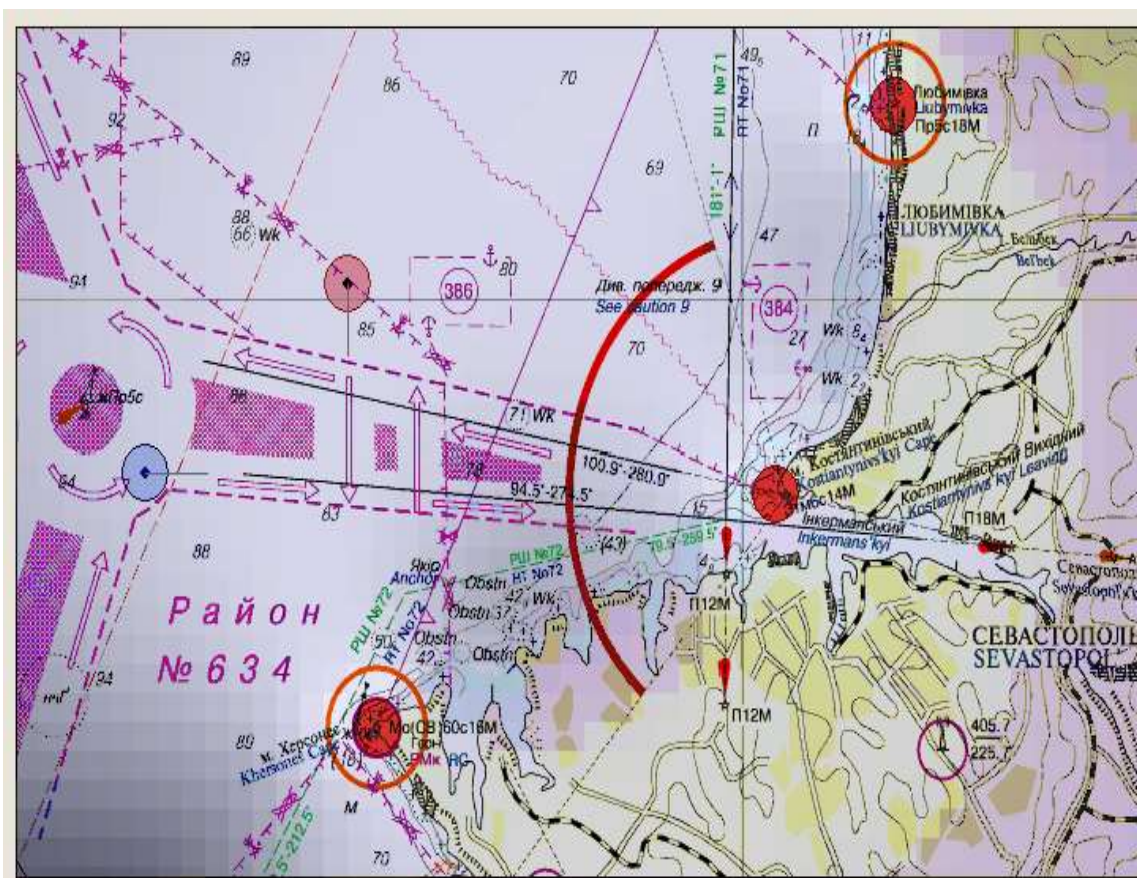


Рисунок 5.3 – Відображення поля точності без оцифрування

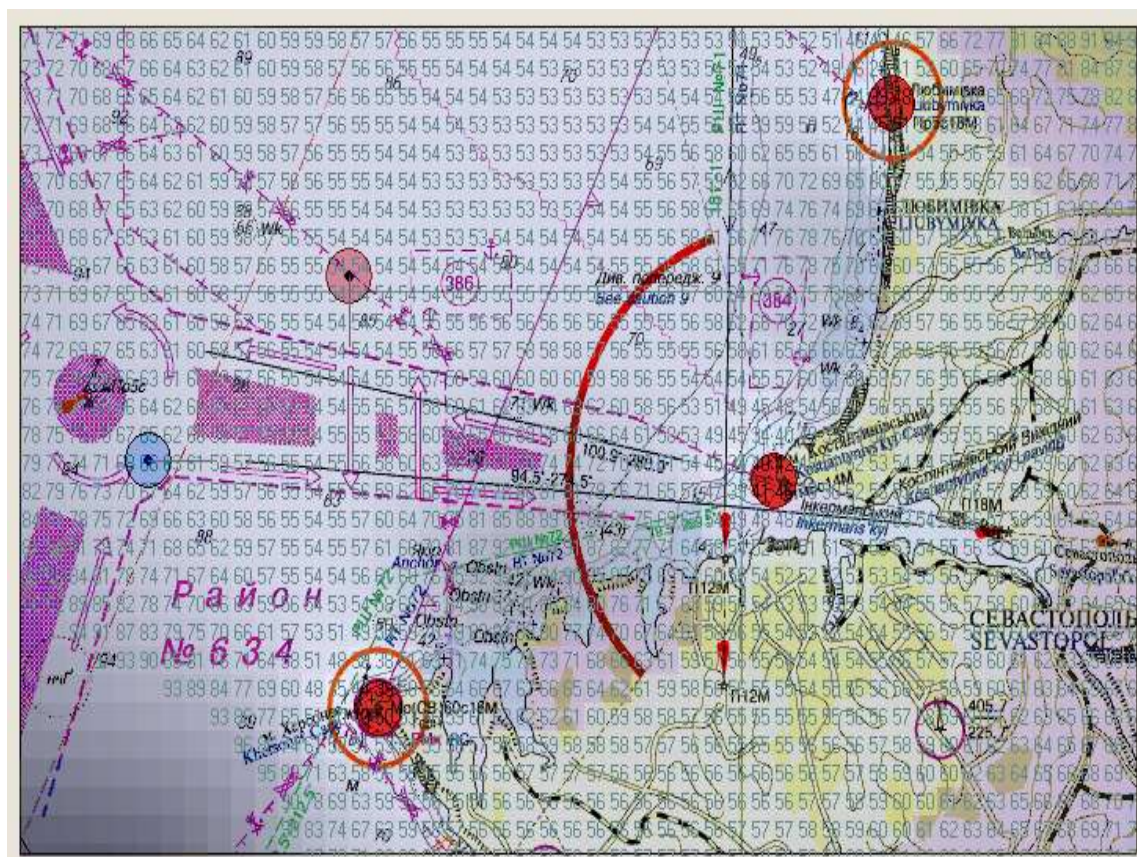


Рисунок 5.4 – Відображення поля точності з оцифруванням

Для порівняння розглянемо другий варіант обраних для обсервації місця судна орієнтирів, які показані на рис. 5.5, причому точність проходження судна програмним маршрутом, виражена середнім значенням кругової 95 % похибки, яка впливає з поля точностей, становить 54 метри.



Рисунок 5.5 – Другий варіант обраних для обсервації орієнтирів

Вплив траєкторної похибки повороту судна полягає в тому, що до моменту завершення повороту судна його дійсне положення щодо прогнозованої позиції через похибки моменту початку повороту і кута кладки пера керма може бути оцінений максимальними зсувами щодо програмної траєкторії руху. Вони обмежують смугу можливого переміщення судна після завершення повороту, як показано на рис. 5.6 і 5.7.

На рис. 5.7 показаний збільшений фрагмент електронної карти, що містить прогнозовану позицію судна разом з смугою руху.

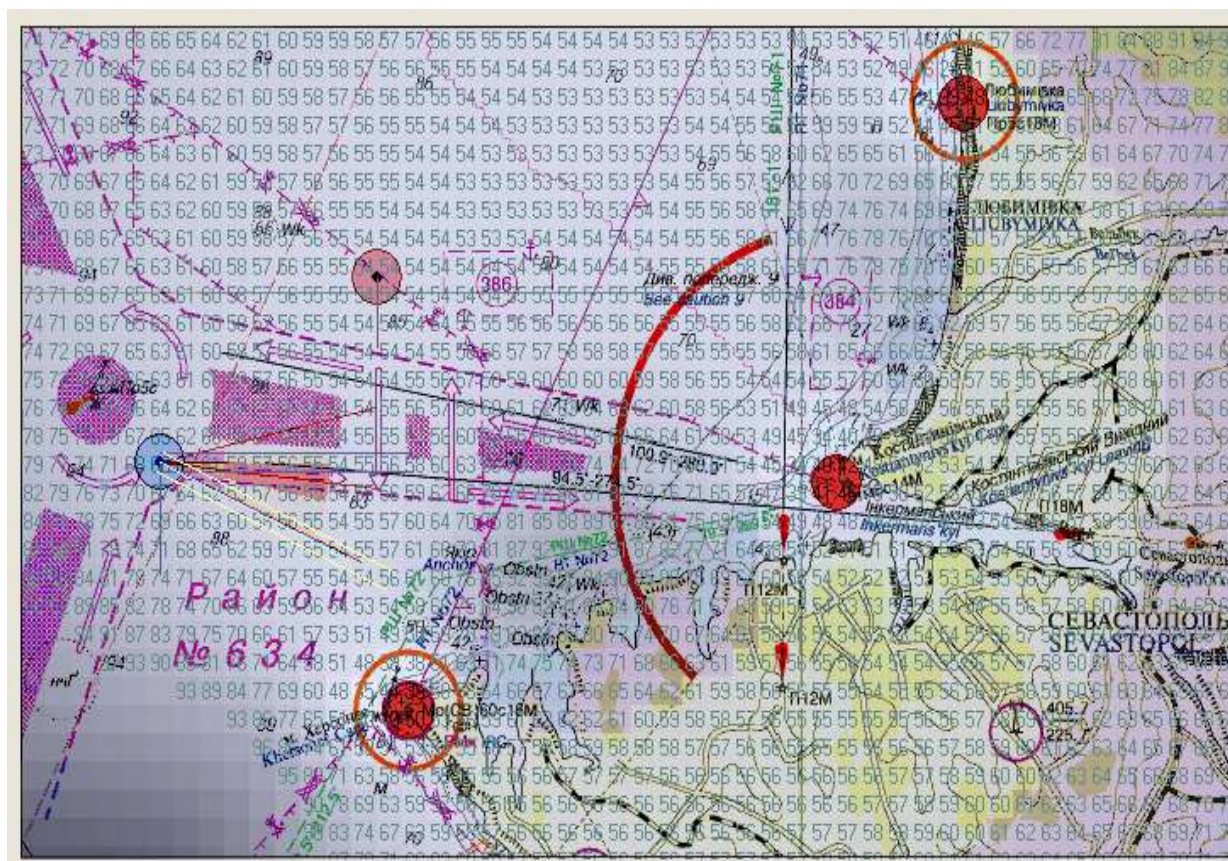


Рисунок 5.9 – Вибір безпечної траєкторії руху судна

Прогноз подальшого руху судна і цілі показує безпеку розходження судна з ціллю що представлено на рис. 5.10. Звертаємо увагу на те, що на даному рисунку наведений збільшений фрагмент ситуації найкоротшого зближення судна з ціллю, що підтверджує безпеку процесу розходження. Очевидно, судно, досягнувши рекомендованого шляху № 72, поверне ліворуч на його реалізацію для подальшого проходження в порт.

Розглянемо оперативну оцінку безпеки плавання та вибір безпечного маршруту проводки судна під час проходження в порт Чорноморськ (Іллічівськ), для чого використовуємо електронну карту підходів до порту Іллічівськ, яка наведена на рис. 5.11.

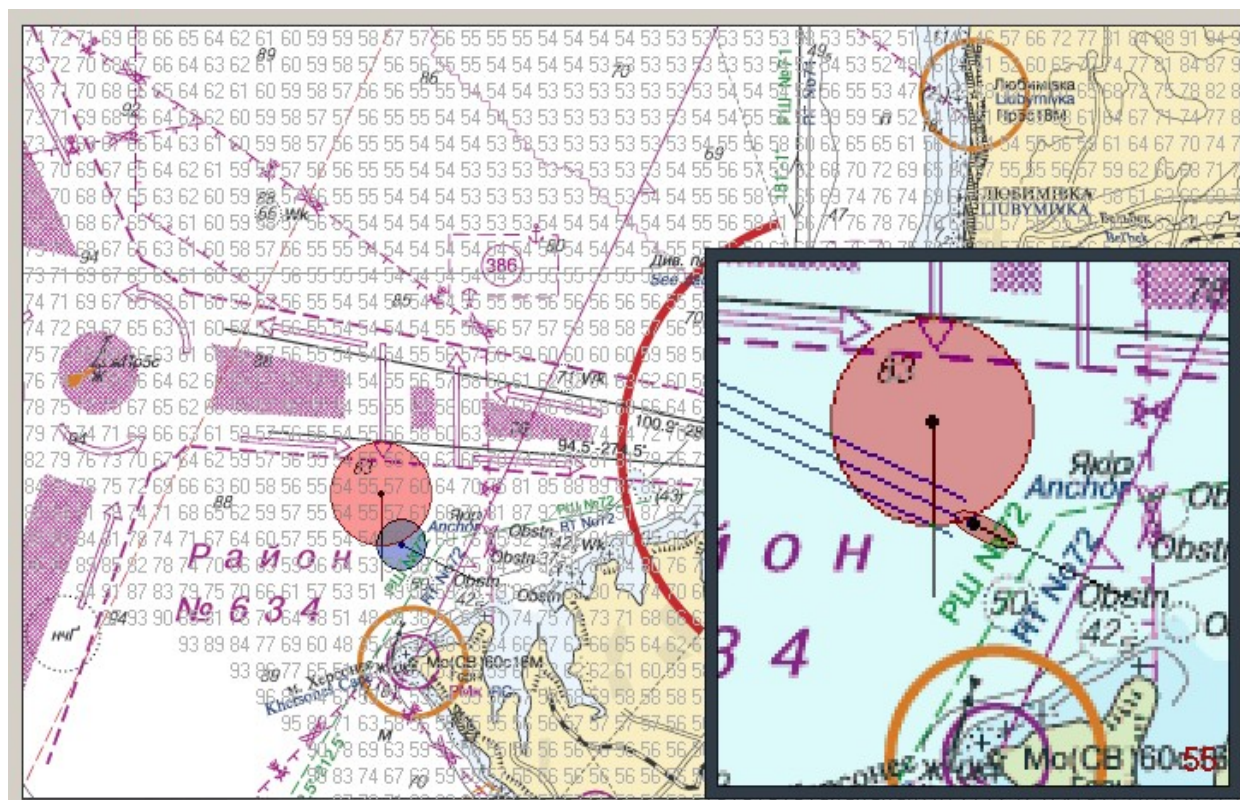


Рисунок 5.10 – Вибір безпечної траєкторії руху судна

Зокрема, на рис. 5.12. показано прогнозоване положення судна після завершення повороту праворуч на курс 285° для входу в порт. Відзначимо, що попередній курс дорівнював 165° . Його напрямок руху показано вектором швидкості.

Після попереднього аналізу поточної навігаційної обстановки, оцінюючи можливі орієнтири для визначення місця судна в процесі подальшої проводки за обраним маршрутом для проходження в порт Чорноморськ, було прийнято рішення в якості трьох орієнтирів для визначення місця судна вибрати орієнтири, показані на рис. 5.13., які відзначені колами зеленого кольору.

З урахуванням відносного розташування обраних орієнтирів та значень дисперсій похибок вимірювань дистанції і пеленга для кожної елементарної ділянки електронної карти були розраховані значення показника D_{md3} , які

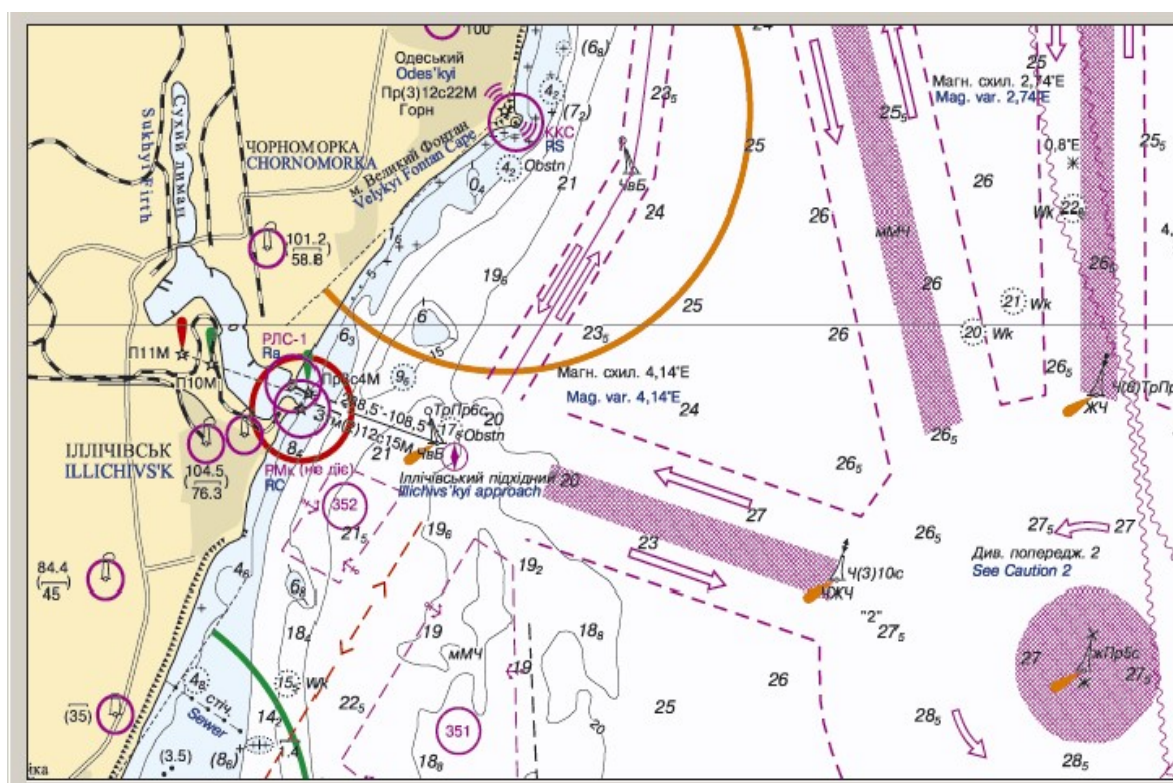


Рисунок 5.11 – Електронна карта підходів до порту Чорноморськ

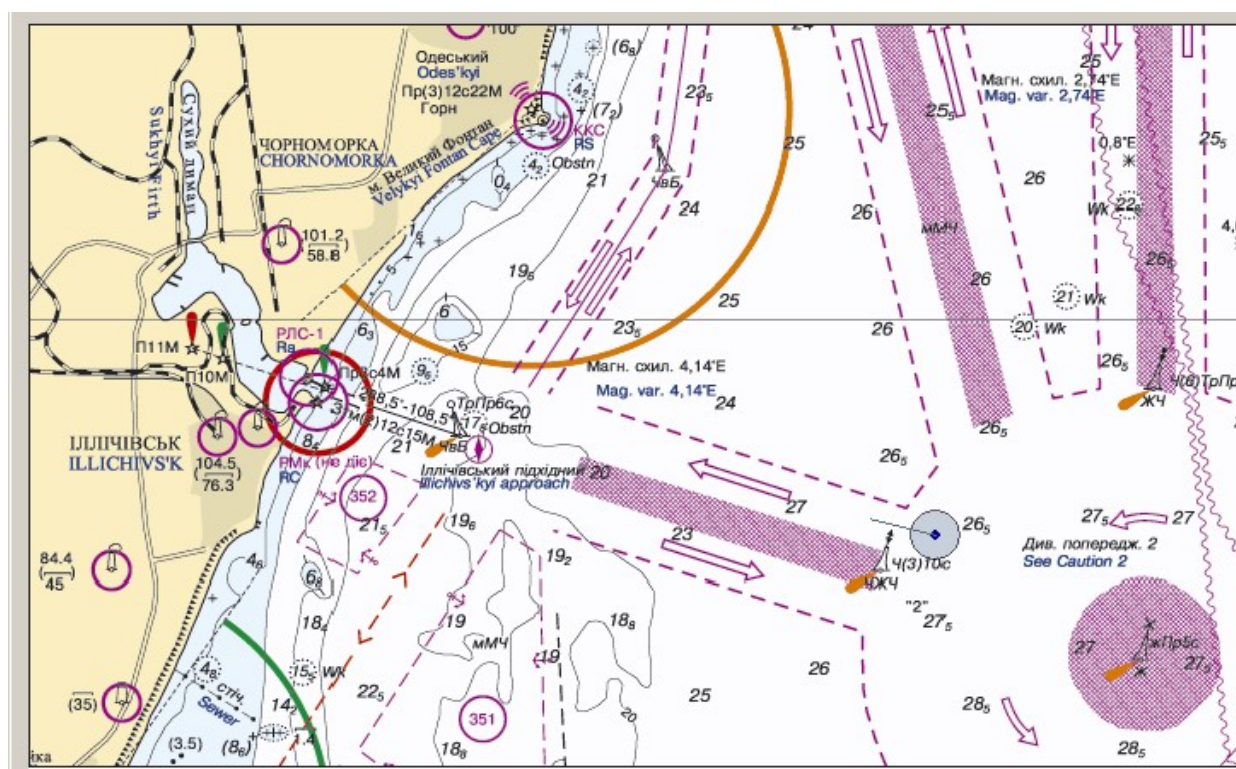


Рисунок 5.12 – Прогнозоване положення судна після закінчення повороту

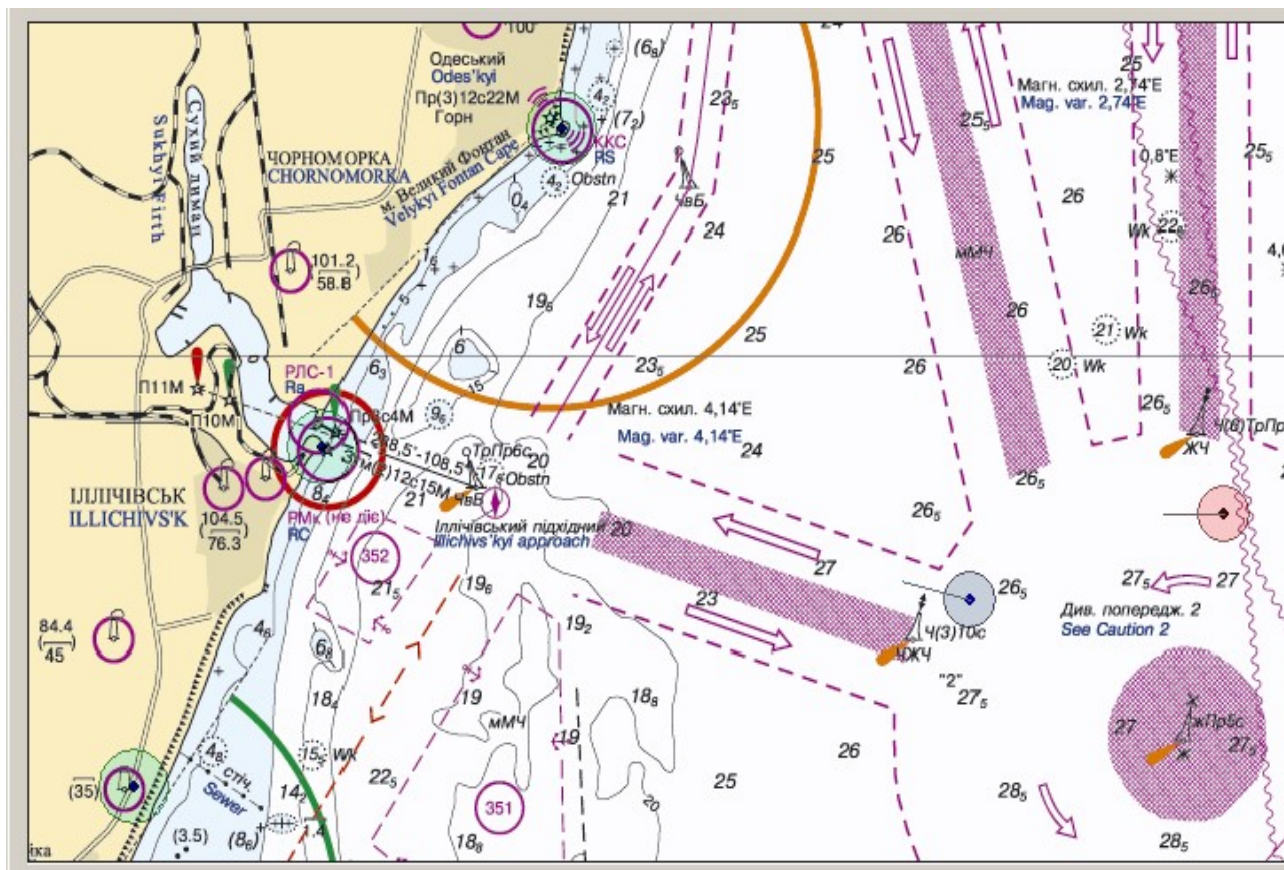


Рисунок 5.13 – Вибір трьох орієнтирів для визначення місця судна

необхідні для формування поля точності без оцифрування, яке показано на рис. 5.14. На рис. 5.15. представлено точності поле обраних орієнтирів з оцифруванням, аналіз якого показав, що точність проходження судна програмним маршрутом, виражена середнім значенням кругової 95% похибки, як видно з поля точностей, становить близько 60 метрів. Звертаємо увагу, що значення показника D_{md3} приблизно однакові щодо прогнозованого маршруту проводки судна в порт.

Після повороту судна через траєкторну похибку повороту виникає смуга руху судна, в якій воно може знаходитися під час проходження в порт після повороту. Смуга руху судна відображена на електронній карті і показана на рис. 5.16.

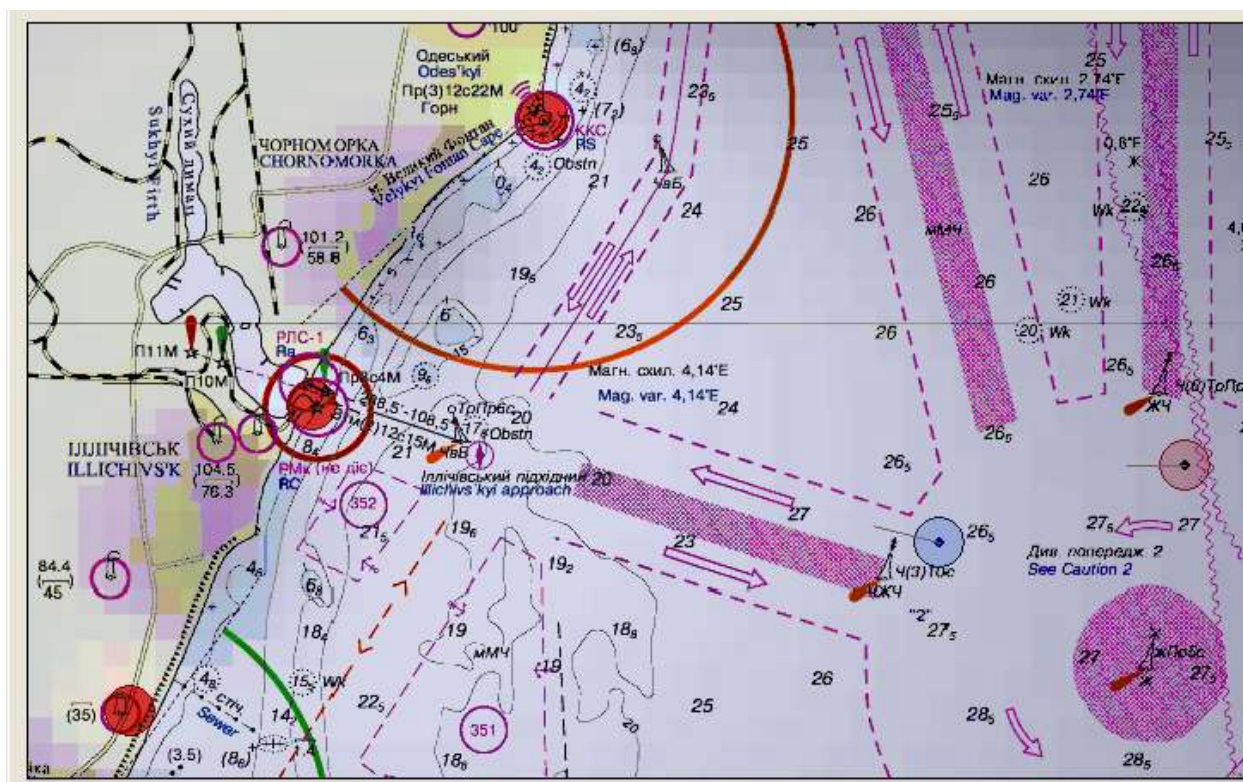


Рисунок 5.14 – Відображення поля точності без оцифрування



Рисунок 5.15 – Відображення поля точності з оцифруванням

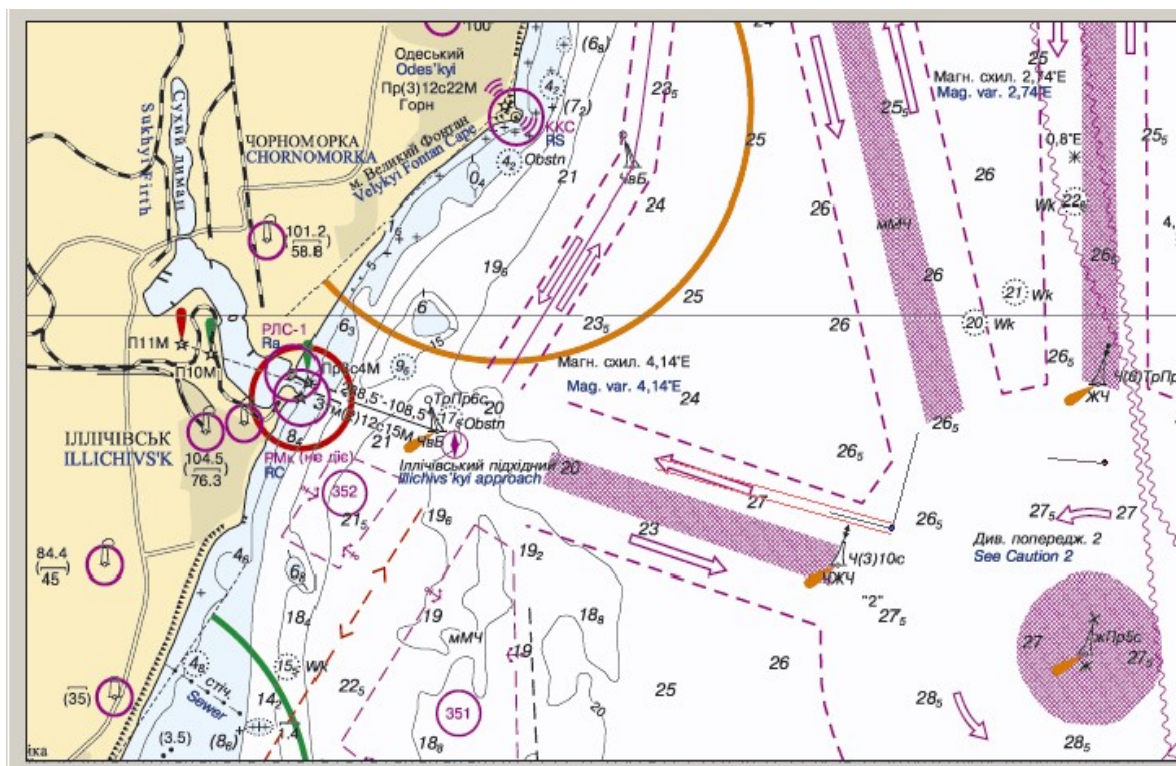


Рисунок 5.16 – Смуга руху судна після повороту

На рис. 5.17. показаний збільшений фрагмент електронної карти, що містить смугу руху судна через траєкторну похибку повороту, яка знаходиться в межах системи розподілу руху, тому і є загрозою виникнення аварії. З урахуванням безпечного руху цілі та інших істотних чинників обрана безпечна траєкторія руху судна показана на рис. 5.18. У даному випадку вона збігається з рекомендованим маршрутом проводки судна в порт Іллічівськ, який вибирається як безпечний.

Науковим результатом рішення третьої допоміжної задачі стала процедура відображення на електронній карті безпечної траєкторії руху з визначенням величини траєкторної похибки повороту судна шляхом зіставлення збільшення координат судна за час повороту, розрахованих з використанням повної динамічної моделі обертального руху судна зміни курсу судна ΔX_{md} і ΔY_{md} з приростами координат ΔX_{GPS} і ΔY_{GPS} отриманих за допомогою DGPS для вибраного маневру зміни курсу.

5.2. Верифікація динамічної моделі руху судна типу Ro-Ro дотоннажністю 18021 тонн

Вирішення головного завдання дослідження, яке полягає у визначенні величин траєкторних похибок повороту судна шляхом порівняння збільшення координат судна за час повороту, розрахованих динамічною моделлю обертального руху судна ΔX_{md} і ΔY_{md} з приростами координат ΔX_{GPS} і ΔY_{GPS} , отриманих за допомогою DGPS, для вибраного маневру зміни курсу.

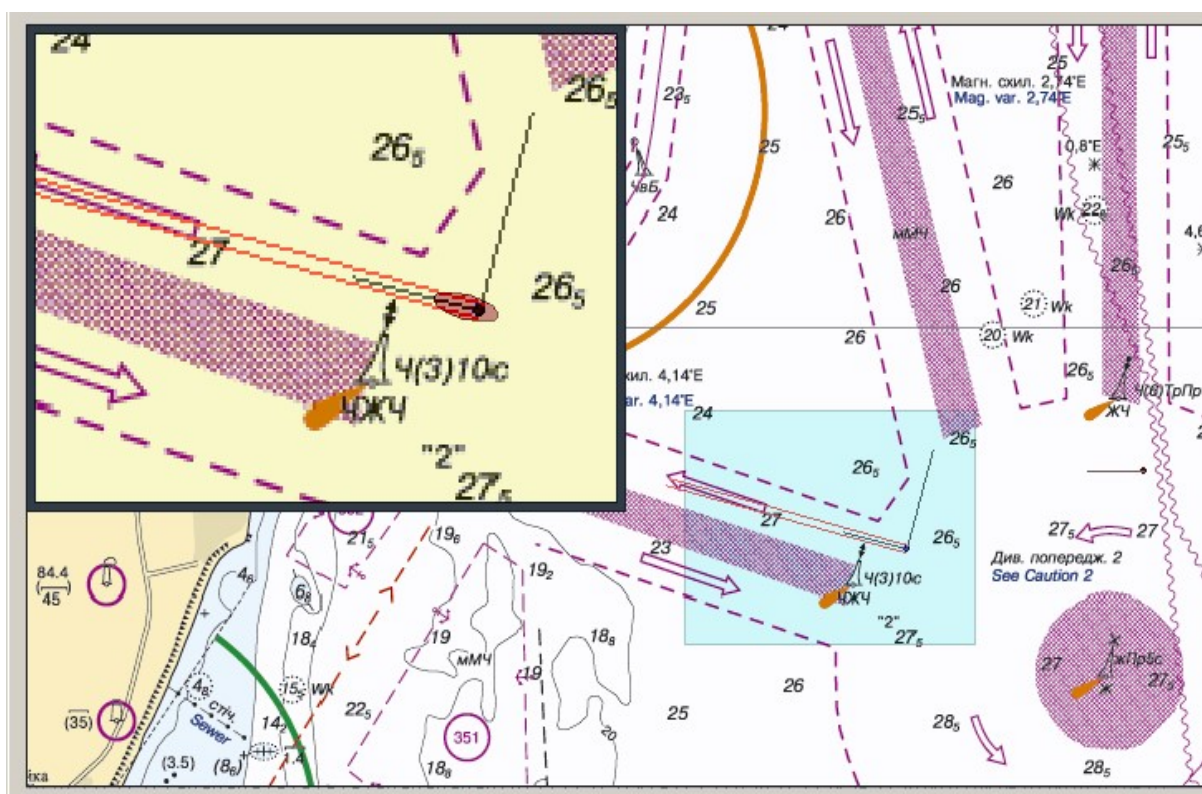


Рисунок 5.17 – Смуга руху судна після повороту

Як динамічна модель обертального руху судна застосована третя динамічна модель зміни курсу судна, яка описується неоднорідним лінійним диференціальним рівнянням третього порядку з постійними коефіцієнтами. Її докладне дослідження наведено в третьому розділі роботи. Верифікація моделі проведена для теплохода "Celandine" типу Ro-Ro, водотоннажністю 18031 т. Параметри моделі (постійні часу T_1 , T_2 , а також сталі значення кутової

швидкості повороту судна a_{ω}) визначені для повороту судна з кутами кладки пера керма від 5 до 30 градусів включно.



Рисунок 5.18 – Безпечна траєкторія руху судна після повороту

За заданим значенням збільшення курсу ΔK повороту судна тривалість першої Δt_k та другої Δt фаз повороту визначається методом простих ітерацій за допомогою виразів (3.20) і (3.21), після чого обчислюються значення приросту координат судна ΔX_{md} і ΔY_{md} за формулами (3.22) та (3.23) чисельним інтегруванням методом Сімпсона. Потім виконується реальний поворот судна з тим же збільшенням курсу ΔK і кладкою пера керма, а навігаційною системою DGPS проводиться високоточне вимірювання приріст координат судна ΔX_{GPS} і ΔY_{GPS} за час його маневру. Величина модуля траєкторної похибки R_t визначається як відстань між прогнозованою та обсервованою точкою завершення маневру, тобто з допомогою виразу, який представляє цільову функцію управління:

$$R_t = \sqrt{(\Delta X_{\text{GPS}} - \Delta X_{\text{md}})^2 + (\Delta Y_{\text{GPS}} - \Delta Y_{\text{md}})^2}. \quad (5.2)$$

Траєкторні похибки R_t визначалися для серії поворотів судна з кутами кладки пера керма β от 5 до 30 градусів через 5 градусів з приростами курсу ΔK , які дорівнюють 60° , 45° и 30° . Спочатку наведемо розрахунки модельних збільшень координат ΔX_{md} і ΔY_{md} для вказаної серії поворотів судна, причому кінцевий курс судна $K_k = 90^\circ$.

У табл. 5.1. наведені результати поворотів судна для кута кладки пера керма $\beta = 5^\circ$, причому вказані моменти часу початку t_n та кінця t_k маневру в секундах.

Таблиця 5.1 – Характеристики повороту при $\beta = 5^\circ$

ΔK°	t_n с	t_k с	Δt_k с	Δt с	ΔX_{md} м	ΔY_{md} м
60	52	135	75	8	928,8	588,9
45	63	129	58	8	818,0	374,0
30	73	122	41	8	655,1	195,4

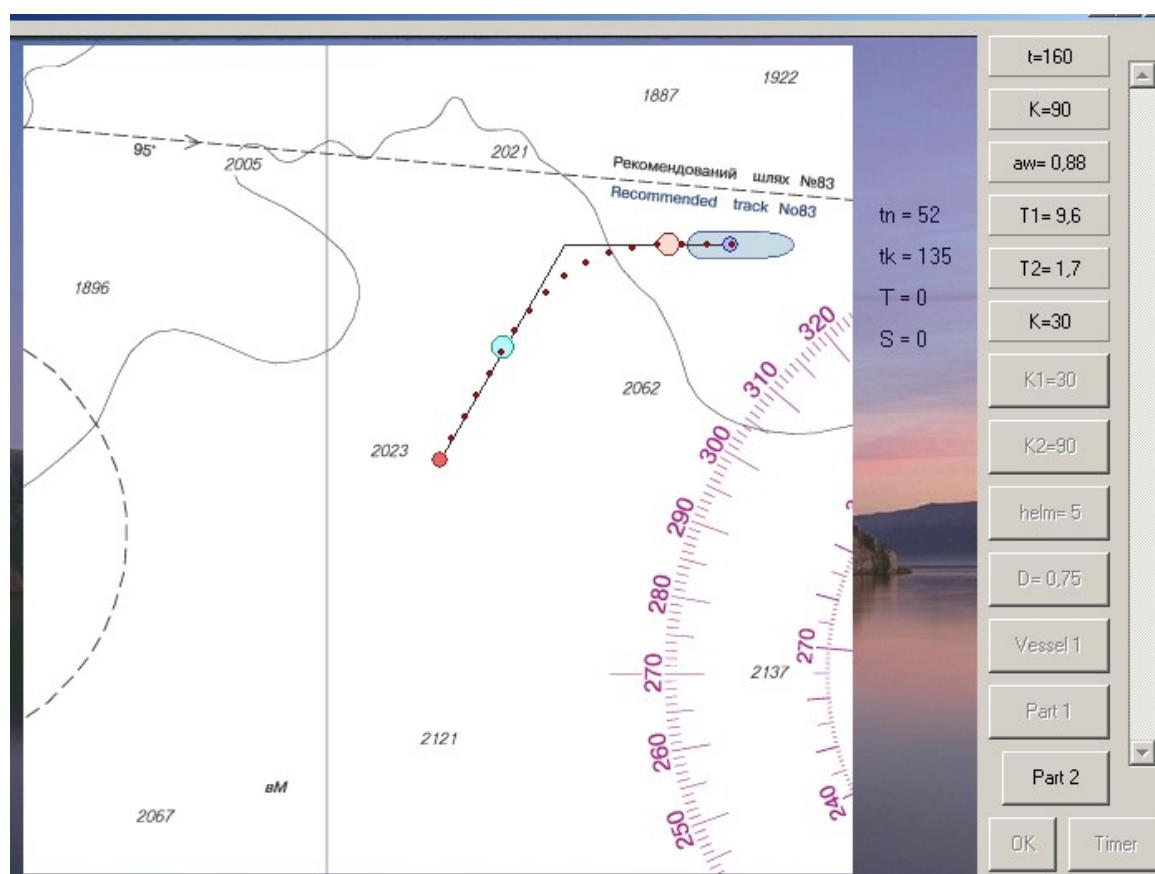
Для розрахунку характеристик повороту була розроблена комп'ютерна програма, яка крім цього відображає траєкторію повороту судна, на якій позначені точки його початку і закінчення. Тому на рис. 5.19. -5.21. показані траєкторії повороту судна для кута кладки пера керма $\beta = 5^\circ$ відповідно для збільшень курсу ΔK 60, 45 і 30 градусів.

Звертаємо увагу на наступні дві обставини, що впливають з аналізу табл. 5.1. По-перше, тривалість утримування судна під час повороту не залежить від ΔK і є постійною, причому вона дорівнює 8 с. По-друге, збільшення координат ΔX_{md} і ΔY_{md} зменшуються при скороченні величини ΔK .

Результати прогнозування поворотів судна для кута кладки пера керма $\beta = 10^\circ$ наведені в табл. 5.2. для тих же трьох збільшень курсів судна.

Таблиця 5.2 – Характеристики повороту при $\beta = 10^\circ$

ΔK	t_n	t_k	Δt_k	Δt	ΔX_{md}	ΔY_{md}
60	64	125	53	8	681,7	435,3
45	72	121	41	8	608,4	289,2
30	79	116	30	7	497,1	150,1

Рисунок 5.19 – Поворот судна при $\beta = 5^\circ$ і $\Delta K = 60^\circ$

Траєкторії повороту судна з кутом кладки пера керма $\beta = 10^\circ$ для збільшень курсу ΔK 60, 45 і 30 градусів показані на рис. 5.22. - 5.24.

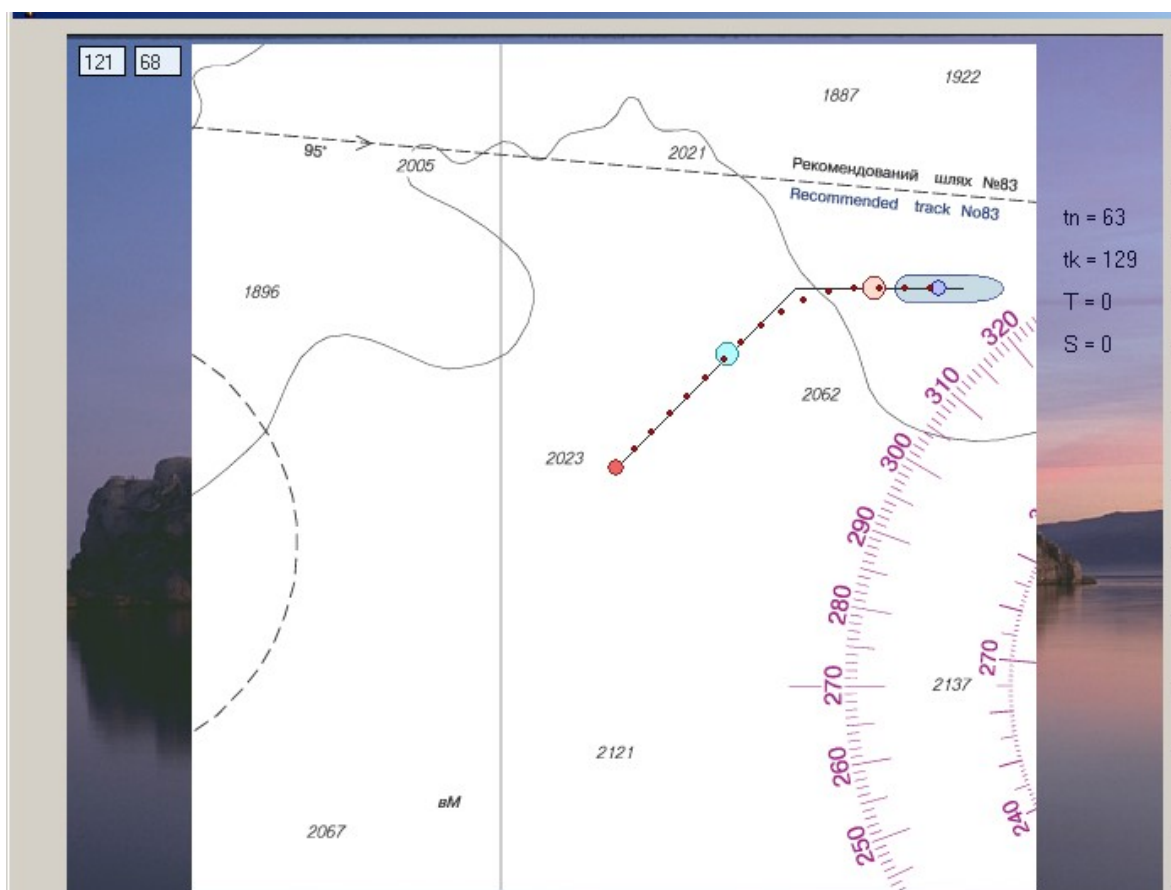


Рисунок 5.20 – Поворот судна при $\beta = 5^\circ$ і $\Delta K = 45^\circ$

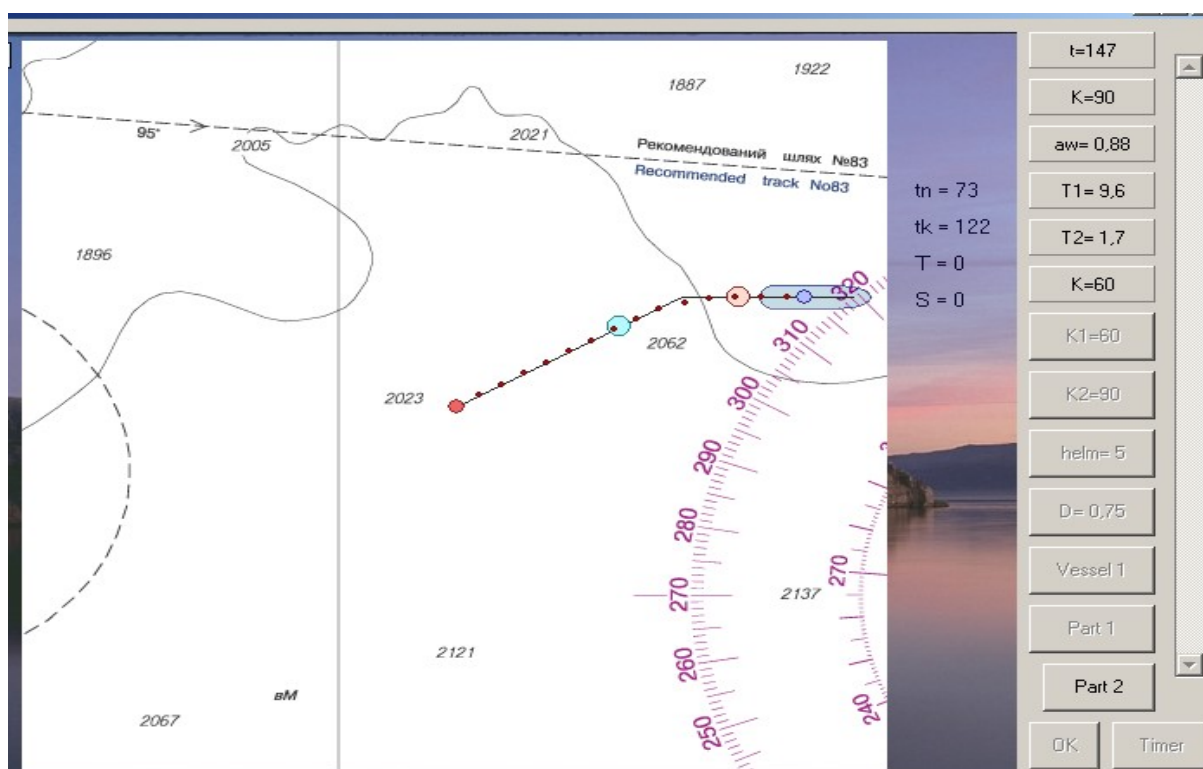
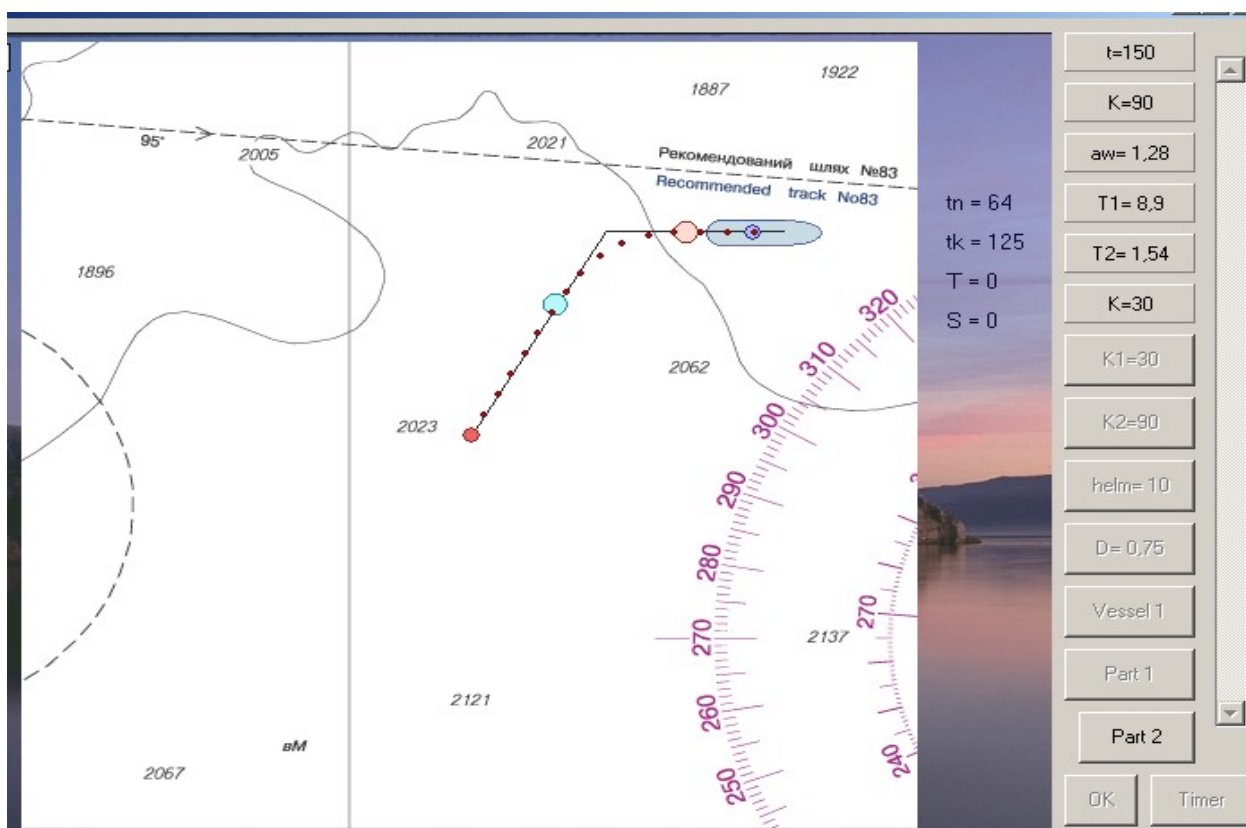
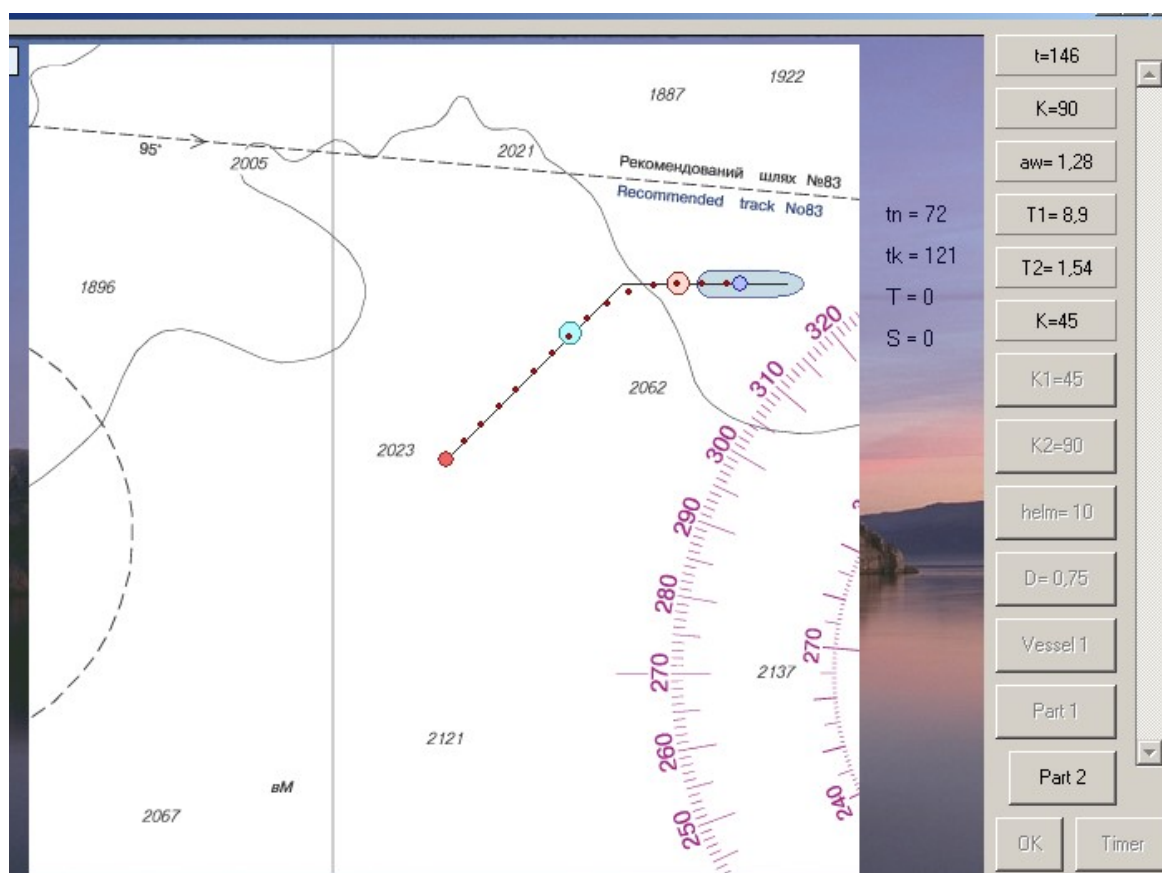


Рисунок 5.21 – Поворот судна при $\beta = 5^\circ$ і $\Delta K = 30^\circ$

Рисунок 5.22 – Поворот судна при $\beta = 10^\circ$ і $\Delta K = 60^\circ$ Рисунок 5.23 – Поворот судна при $\beta = 10^\circ$ і $\Delta K = 45^\circ$

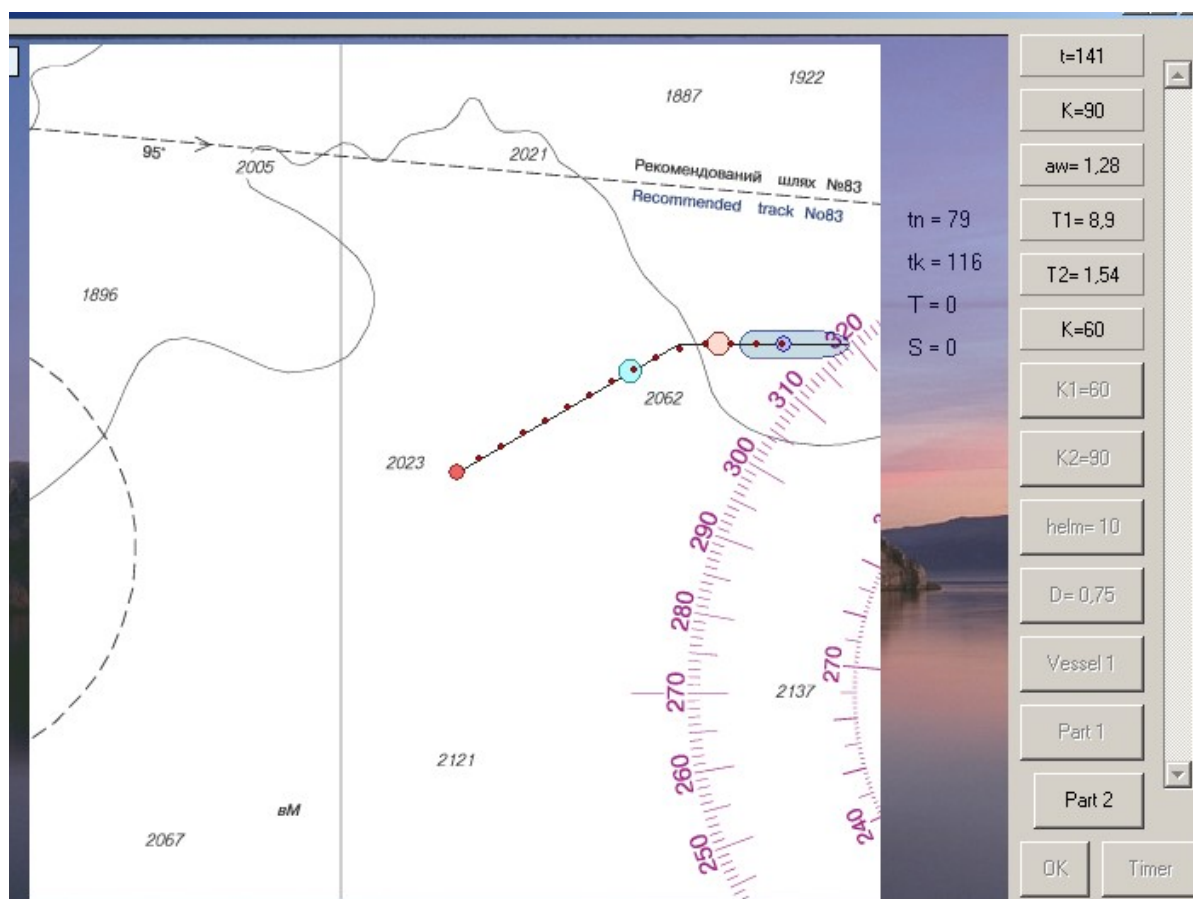


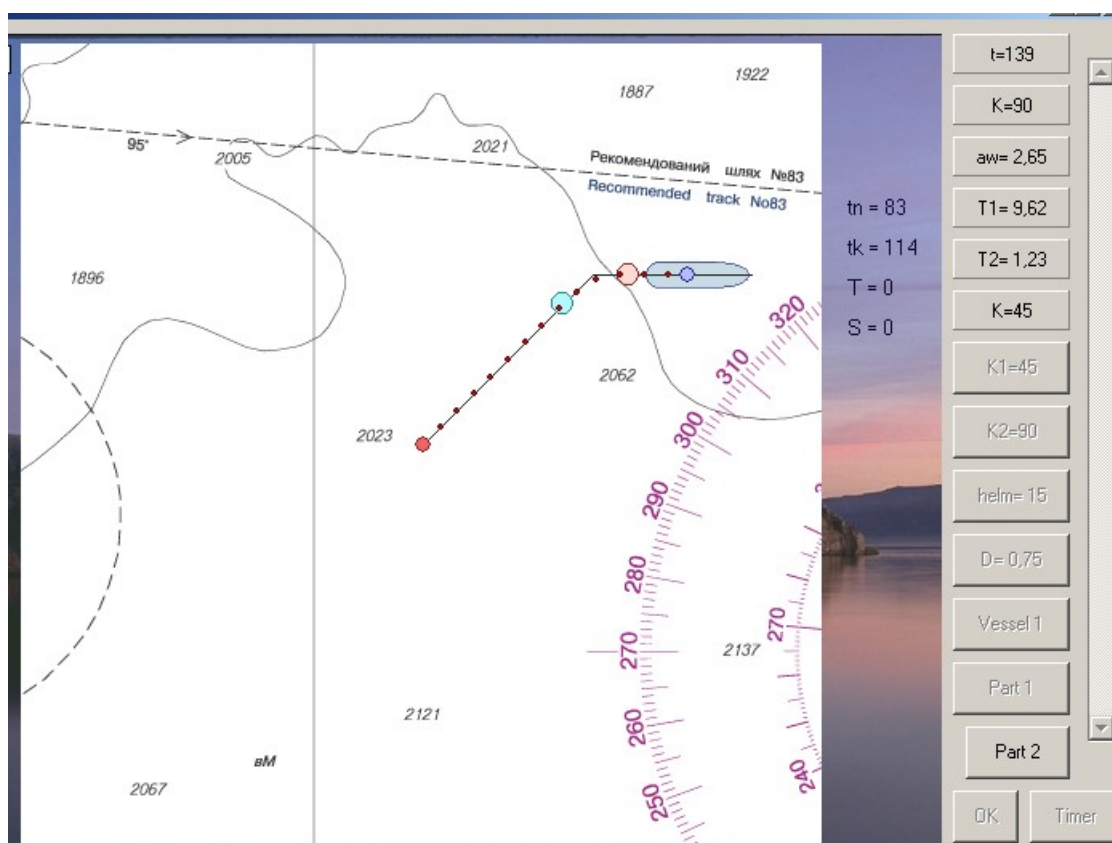
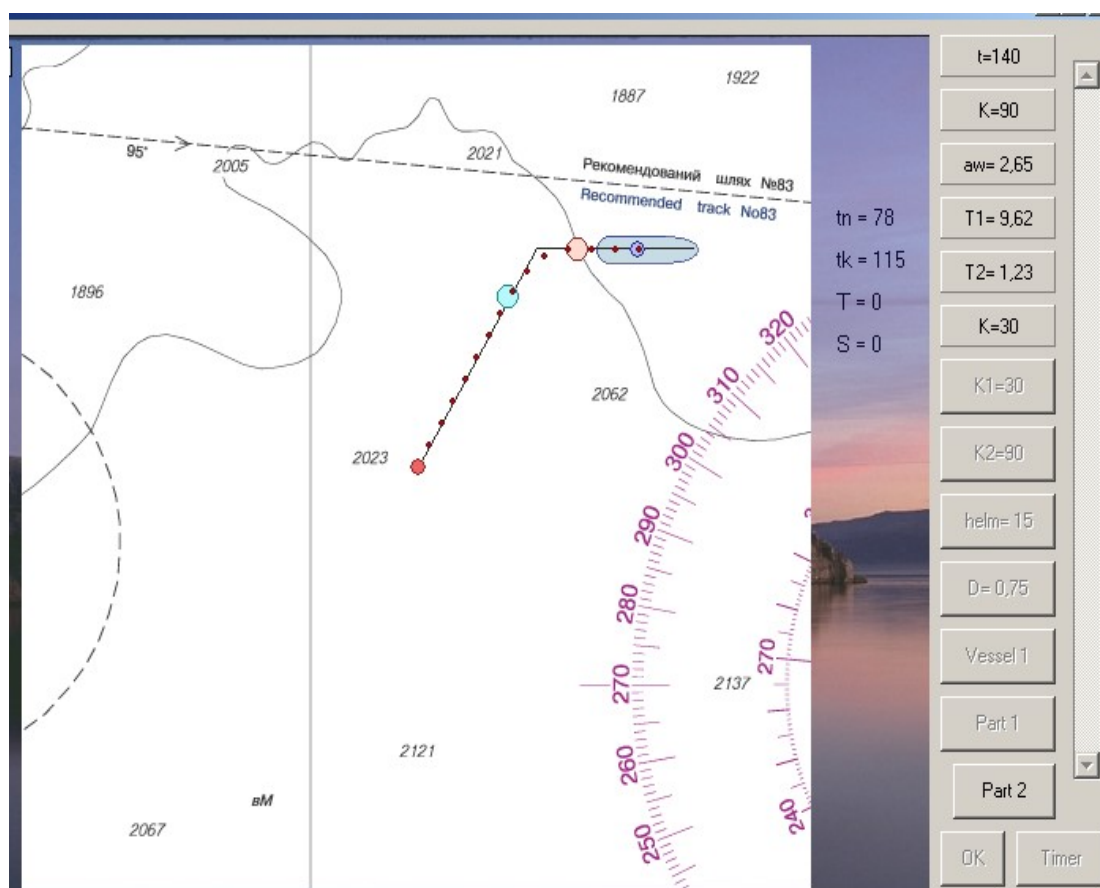
Рисунок 5.24 – Поворот судна при $\beta = 10^\circ$ і $\Delta K = 30^\circ$

Для кута кладки пера керма $\beta = 15^\circ$ в табл. 5.3 представлені характеристики поворотів судна з раніше зазначеними значеннями збільшень курсів судна ΔK .

Таблиця 5.3 – Характеристики повороту при $\beta = 15^\circ$

ΔK	t_n	t_k	Δt_k	Δt	ΔX_{md}	ΔY_{md}
60	78	115	29	8	413,5	267,0
45	83	114	23	8	374,3	177,6
30	87	111	17	7	326,8	98,0

Рис. 5.25. - 5.27. відображають траєкторії повороту судна з кутом кладки пера керма $\beta = 15^\circ$ для збільшень курсу ΔK відповідно 60, 45 та 30 градусів.



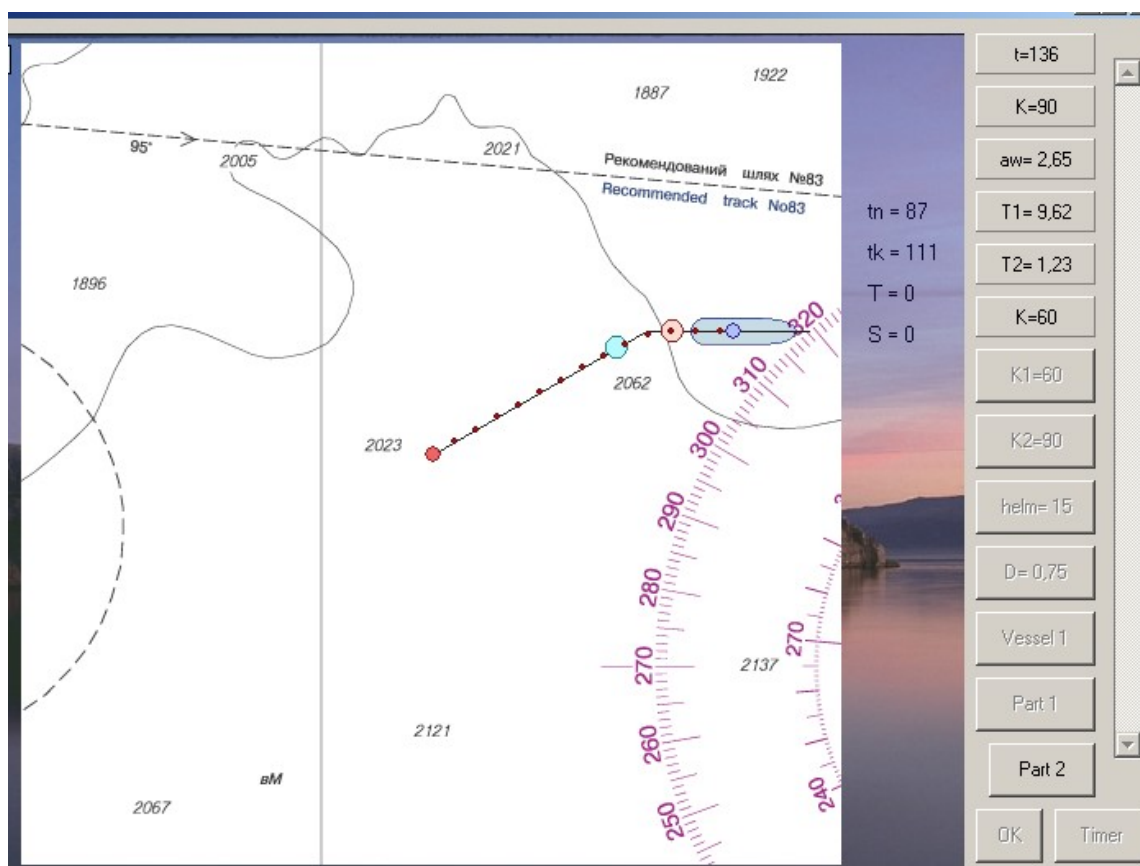


Рисунок 5.27 – Поворот судна при $\beta = 15^\circ$ і $\Delta K = 30^\circ$

Чергові три повороти судна розраховані для кута кладки пера керма $\beta = 20^\circ$ і в табл. 5.4. представлені їх характеристики.

Таблиця 5.4 – Характеристики повороту при $\beta = 20^\circ$

ΔK	t_n	t_k	Δt_k	Δt	ΔX_{md}	ΔY_{md}
60	82	113	24	7	345,0	228,5
45	85	111	19	7	325,95	154,64
30	88	109	14	7	287,06	86,5

Траекторії повороту судна з кутом кладки пера керма $\beta = 20^\circ$ показані на рис. 5.28. - 5.30. для збільшень курсу ΔK відповідно 60, 45 і 30 градусів.

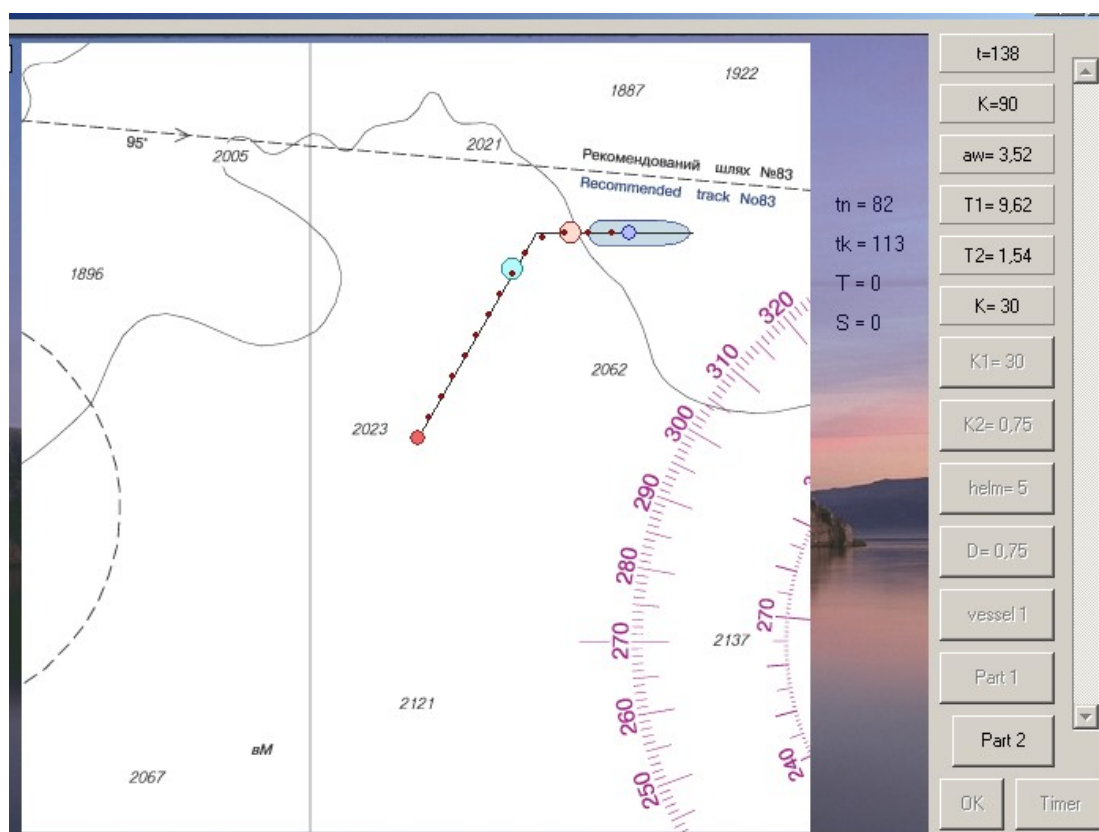


Рисунок 5.28 – Поворот судна при $\beta = 20^\circ$ і $\Delta K = 60^\circ$

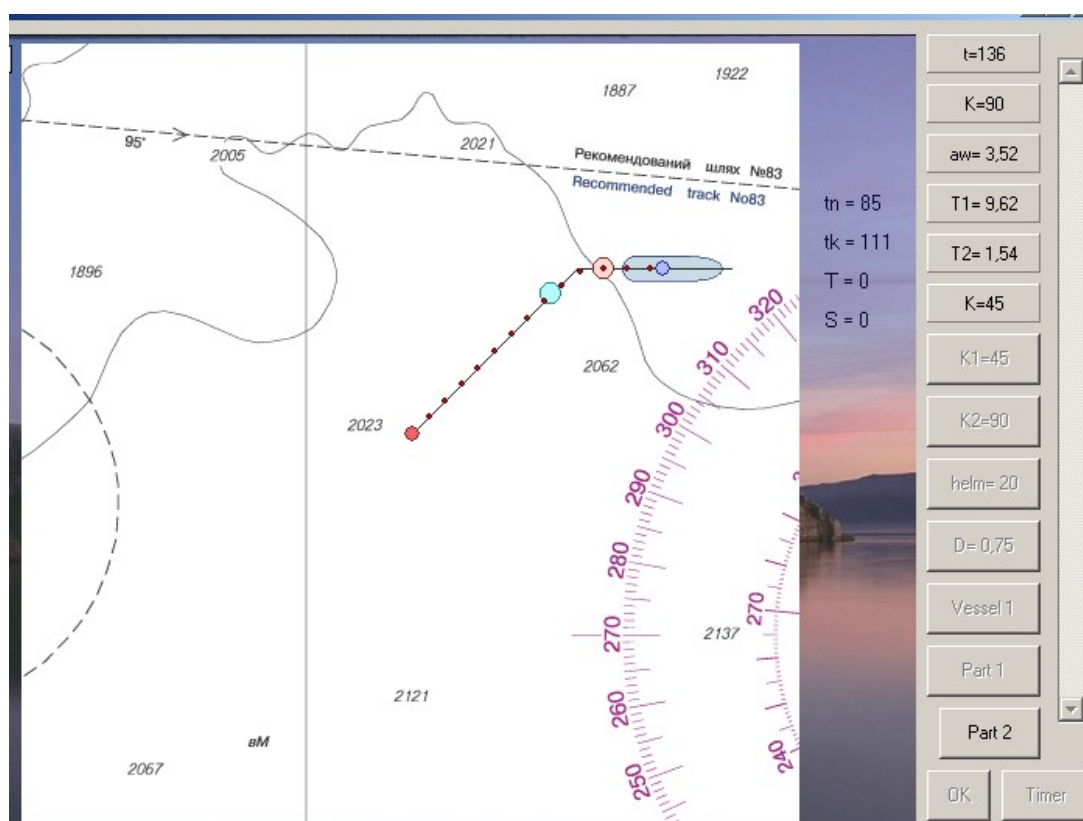


Рисунок 5.29 – Поворот судна при $\beta = 20^\circ$ і $\Delta K = 45^\circ$

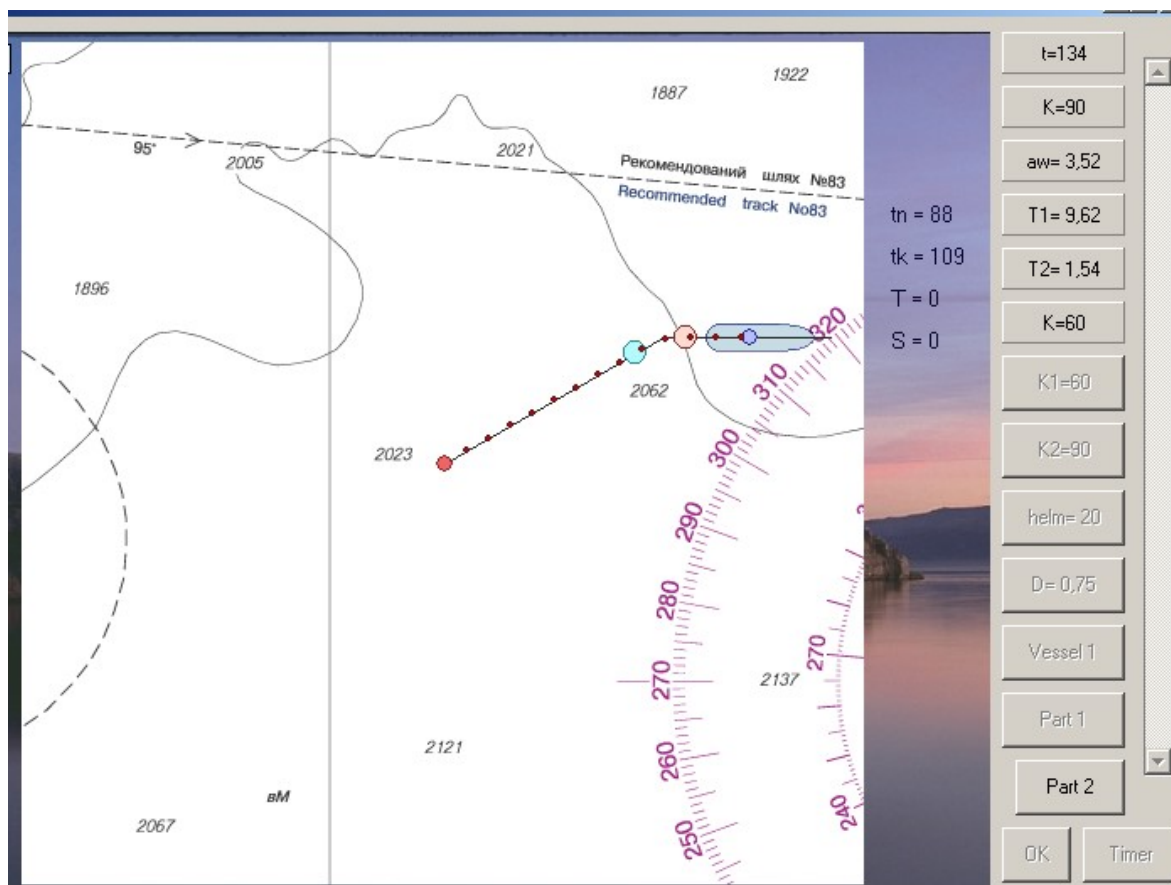


Рисунок 5.30 – Поворот судна при $\beta = 20^\circ$ і $\Delta K = 30^\circ$

У табл. 5.5. наведені результати поворотів судна для кута кладки пера керма $\beta = 25^\circ$, причому вказані моменти часу початку t_n та кінця t_k маневру.

Таблиця 5.5. – Характеристики повороту при $\beta = 25^\circ$

ΔK	t_n	t_k	Δt_k	Δt	ΔX_{md}	ΔY_{md}
60	83	111	21	7	313,4	204,6
45	86	110	17	7	302,15	140,8
30	89	108	12	7	261,1	80,6

На рис. 5.31. -5.33. показані траєкторії повороту судна для кута кладки пера керма $\beta = 25^\circ$ відповідно для збільшень курсу ΔK 60, 45 і 30 градусів.

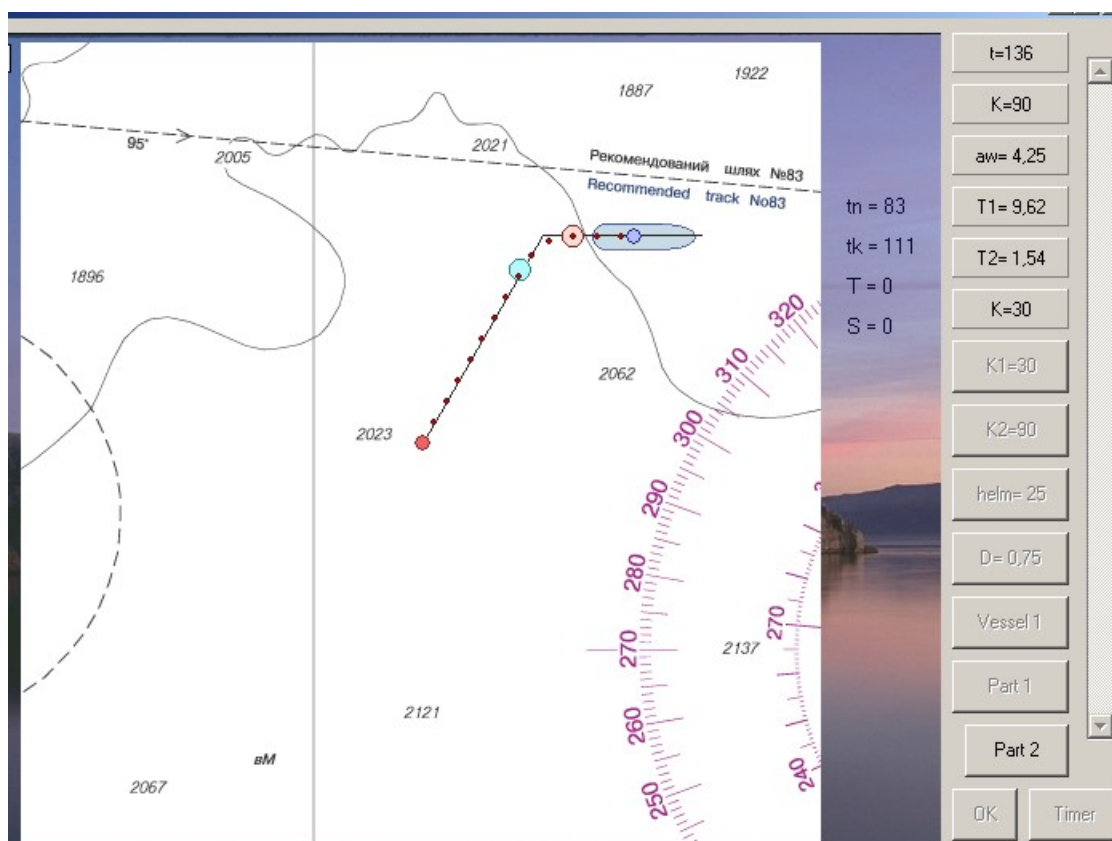


Рисунок 5.31 – Поворот судна при $\beta = 25^\circ$ і $\Delta K = 60^\circ$

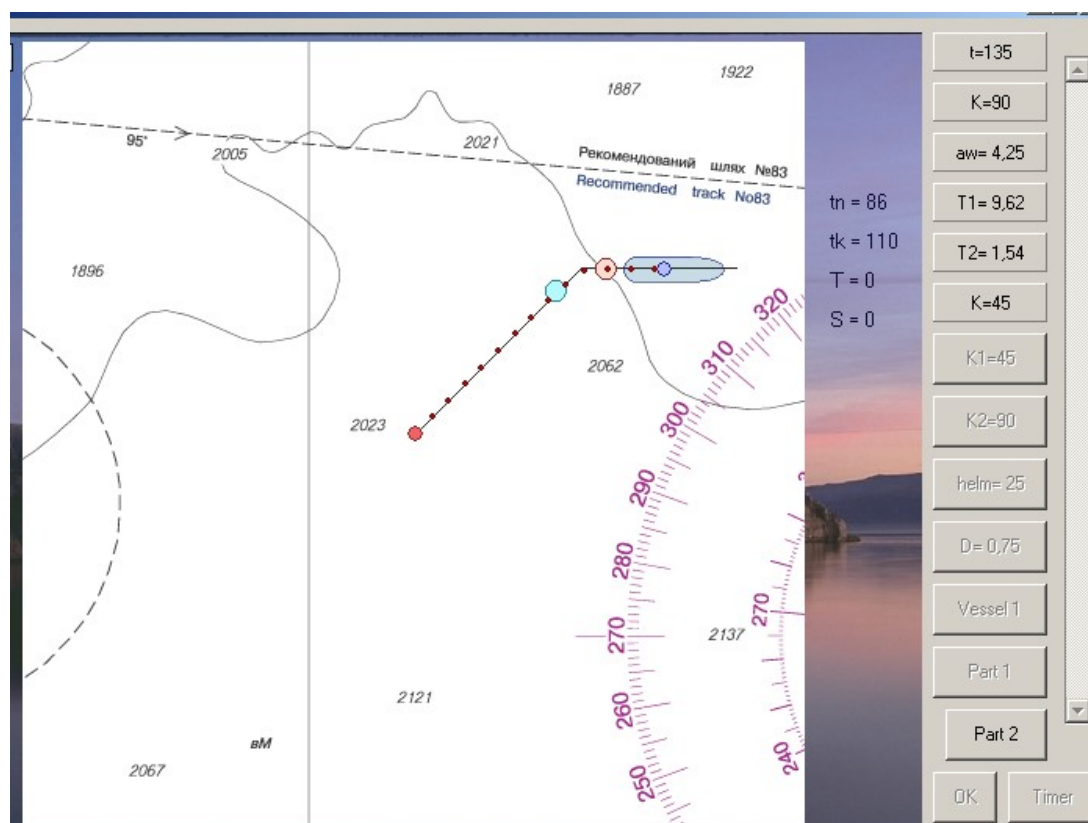


Рисунок 5.32 – Поворот судна при $\beta = 25^\circ$ і $\Delta K = 45^\circ$

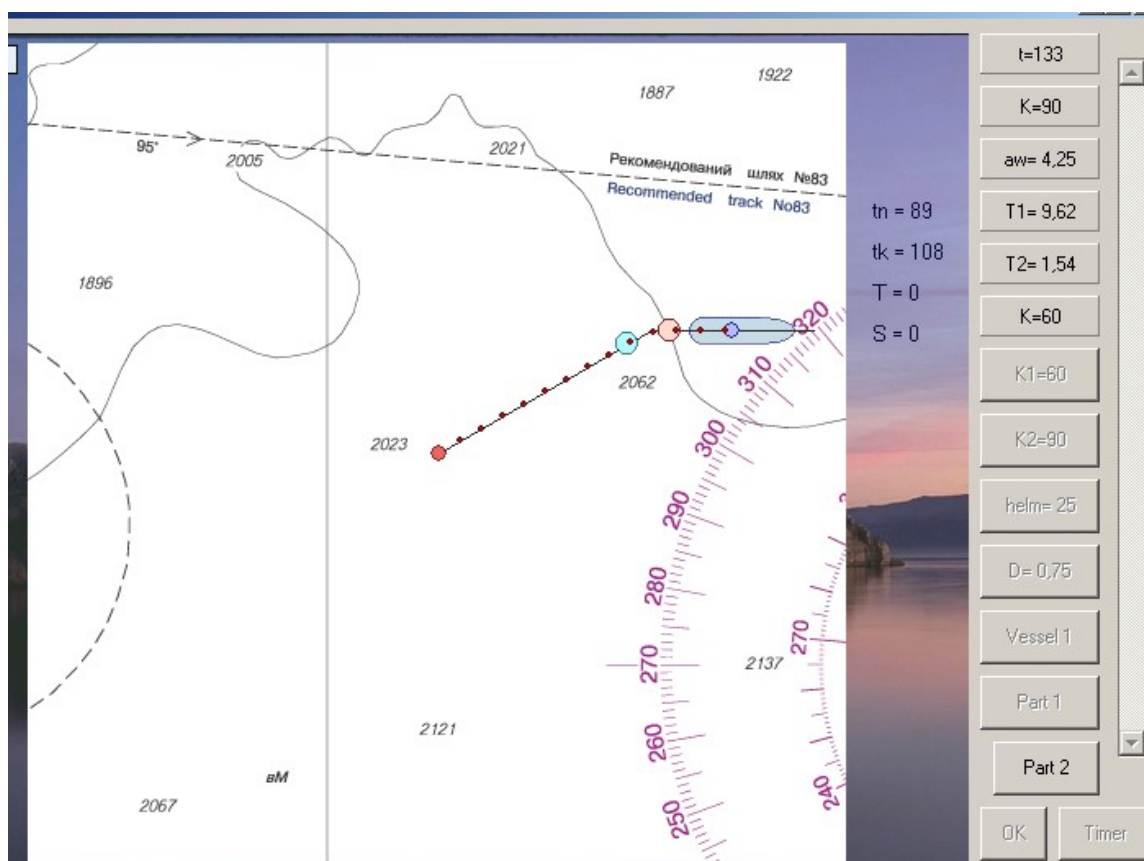


Рисунок 5.33 – Поворот судна при $\beta = 25^\circ$ і $\Delta K = 30^\circ$

Результати прогнозування поворотів судна для кута кладки пера керма $\beta = 30^\circ$ наведені в табл. 5.6. для тих же трьох збільшень курсів судна.

Таблиця 5.6. – Характеристики повороту при $\beta = 30^\circ$

ΔK	t_n	t_k	Δt_k	Δt	ΔX_{md}	ΔY_{md}
60	86	111	18	7	279,28	187,3
45	88	110	15	7	278,2	128,7
30	91	109	11	7	248,4	71,9

Траєкторії повороту судна з кутом кладки пера керма $\beta = 30^\circ$ показані на рис.

5.34. - 5.36. для збільшень курсу ΔK відповідно 60, 45 і 30 градусів.

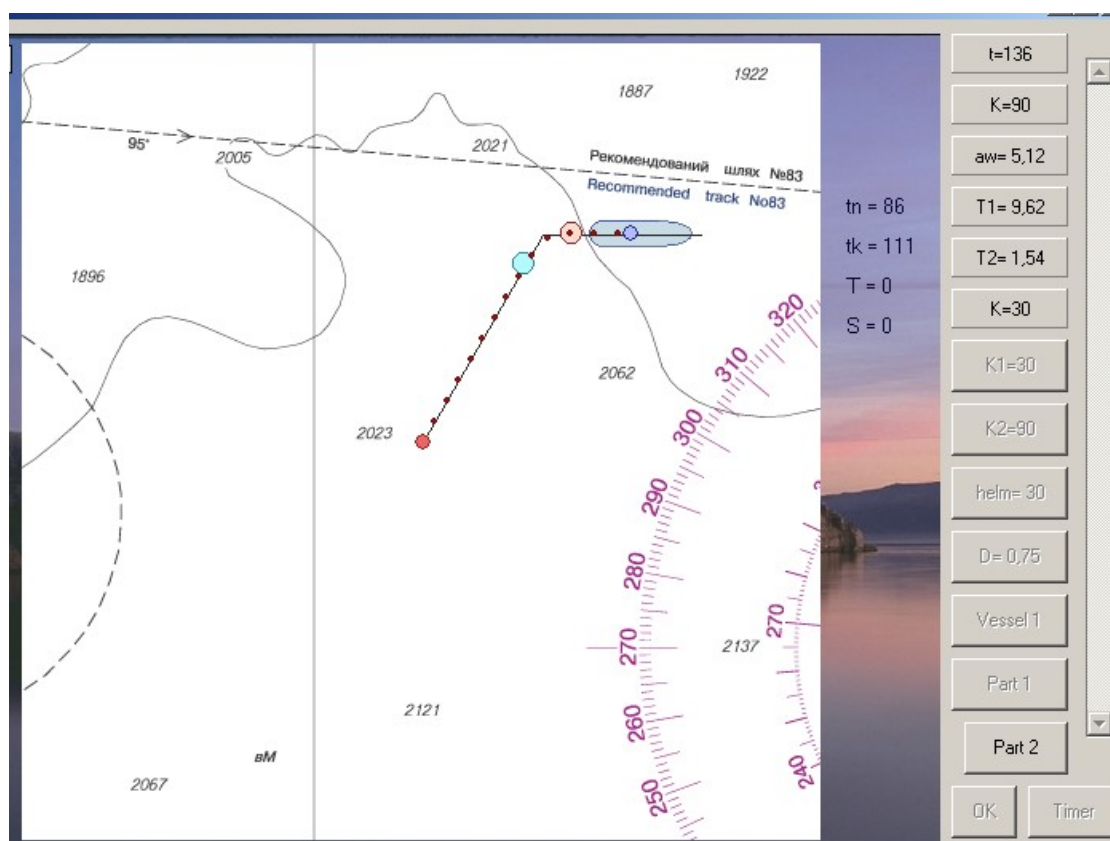


Рисунок 5.34 – Поворот судна при $\beta = 30^\circ$ і $\Delta K = 60^\circ$

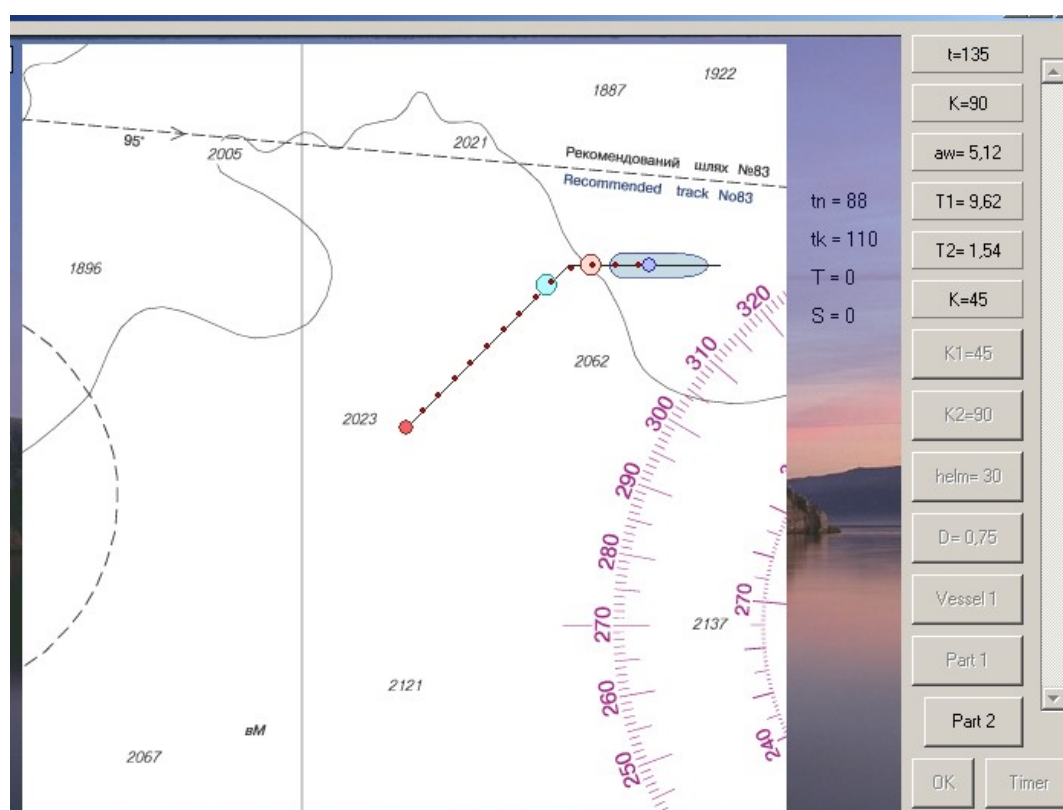


Рисунок 5.35 – Поворот судна при $\beta = 30^\circ$ і $\Delta K = 45^\circ$

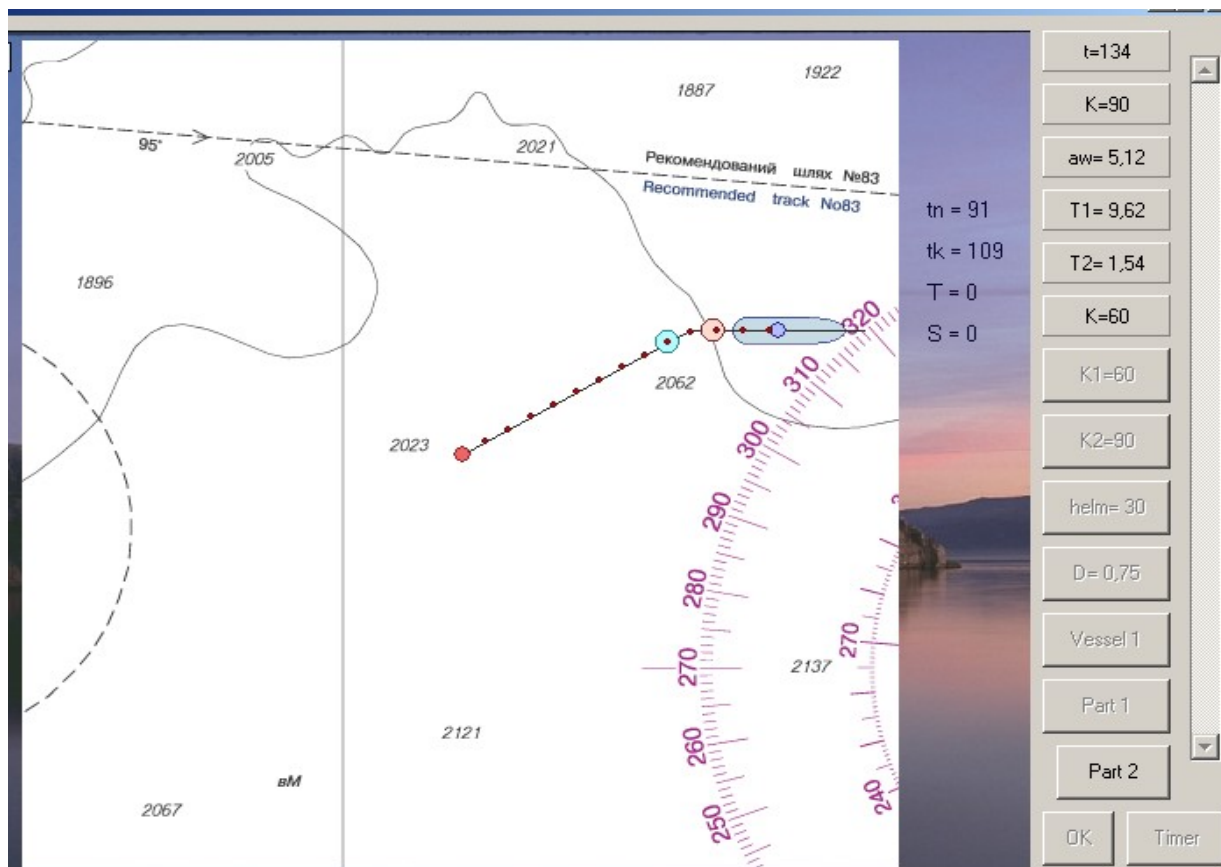


Рисунок 5.36 – Поворот судна при $\beta = 30^\circ$ і $\Delta K = 30^\circ$

Друга частина дослідження траєкторної похибки повороту судна полягала у високоточному визначенні приросту координат судна ΔX_{GPS} і ΔY_{GPS} в результаті повороту за допомогою навігаційної системи DGPS, для чого в момент часу початку кожного повороту судна і в момент часу його завершення визначалися координати судна, а їх різниця становила шукані значення збільшень ΔX_{GPS} и ΔY_{GPS} . Зведені результати оцінки значень величини траєкторної похибки повороту R_t , яка розраховувалася за виразом (5.2), представлені в табл. 5.7.

Аналіз табл. 5.7 показує, що траєкторна похибка повороту для виконуваних поворотів в середньому дорівнює 55,7 м, причому вона має тенденцію зростати зі збільшенням кута перекладки пера керма.

Таблиця 5.7 – Оцінки значень величини траєкторної похибки повороту

β°	K_n°	K_k°	ΔX_{md} м	ΔY_{md} м	ΔX_{GPS} м	ΔY_{GPS} м	R_t м
5	30	90	928,8	588,9	890,0	614,8	46,6
5	45	90	818,0	374,0	853,0	350,6	42,4
5	60	90	655,1	195,4	623,3	216,6	38,2
10	30	90	681,7	435,3	722,8	462,7	49,4
10	45	90	608,4	289,2	570,5	263,9	45,6
10	60	90	497,1	150,1	531,6	173,1	41,5
15	30	90	413,5	267,0	458,5	237,0	53,9
15	45	90	374,3	177,6	331,7	206,0	51,2
15	60	90	326,8	98,0	286,2	125,1	48,8
20	30	90	345,0	228,5	293,7	262,8	61,7
20	45	90	325,95	154,64	375,0	187,4	59,0
20	60	90	287,06	86,5	239,5	118,3	57,2
25	30	90	313,4	204,6	368,9	167,6	66,7
25	45	90	302,15	140,8	248,8	176,4	64,2
25	60	90	261,1	80,6	312,7	46,2	62,0
30	30	90	279,28	187,3	216,8	145,6	75,2
30	45	90	278,2	128,7	337,8	168,4	71,6
30	60	90	248,4	71,9	304,8	109,5	67,8

За даними наведеної таблиці побудована номограма, яка представлена на рис. 5.37. З її допомогою можлива попередня оцінка величини траєкторної похибки повороту для конкретного судна.

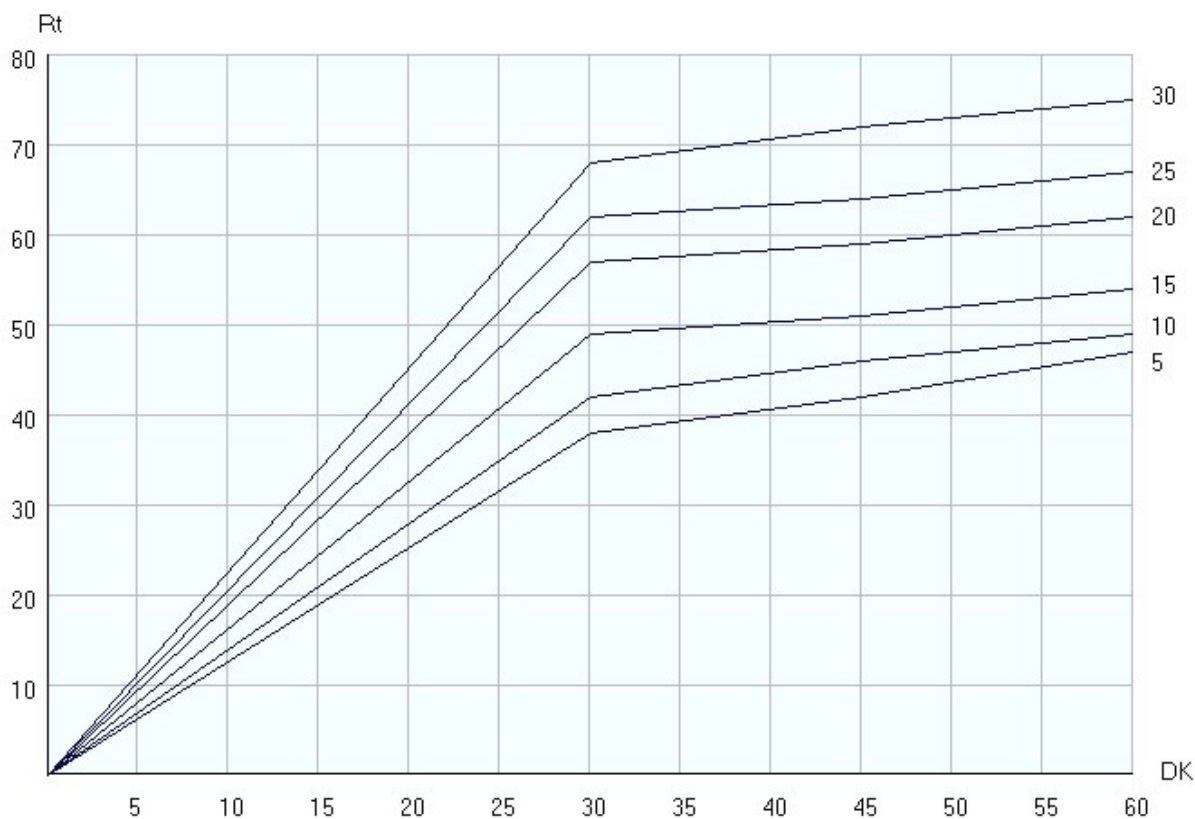


Рисунок 5.37 – Номограма визначення траєкторної похибки повороту

Науковим результатом рішення головної задачі став удосконалений спосіб вибору оптимальної безпечної траєкторії руху за мінімумом середньоквадратичної похибки між зчисленими та обсервованими точками з урахуванням похибки повороту.

5.3. Висновки за п'ятим розділом

Знайдений інтенсифікаційний спосіб оперативної оцінки безпеки плавання судна в обмежених рухом водах з урахуванням істотних чинників та результати верифікації оцінки траєкторної похибки повороту судна.

Для оперативної оцінки безпеки плавання судна застосована електронна карта району плавання з полем точності, яке може оцифровуватися або бути без оцифрування. Після прогнозу повороту на електронну карту програмно наноситься смуга руху судна, ширина якої визначається можливою траєкторної похибкою повороту, дозволяє вибирати безпечний маршрут плавання.

Для оцінки можливих значень траєкторних похибок повороту визначена залежність величини траєкторної похибки від кута кладки пера керма і збільшення курсу за час повороту. Цільова функція ефективності повороту наведена таблично, аналітично (5.2) та графічно, мінімум якої забезпечує безпечний прохід судна запрограмованими ділянками.

Матеріали 5-го розділу опубліковані в роботах [1, 11] автора.

ВИСНОВКИ

У дисертації отримано теоретичне узагальнення і нове вирішення задачі забезпечення безпеки судноводіння шляхом створення способу вибору безпечної траєкторії руху судна під час плавання в стислих водах морського порту з урахуванням траєкторної похибки його повороту, який реалізовано у вигляді комп'ютерної програми за мінімумом середньоквадратичної похибки зчислення та обсервації в умовах експлуатації судна.

У дисертаційній роботі:

- удосконалена процедура оцінювання величини траєкторної похибки повороту судна залежно від динамічної моделі його прогнозу;
- отримав подальший розвиток спосіб визначення залежності вірогідності безпечної проводки судна від випадкових траєкторних похибок повороту;
- отримав подальший розвиток графоаналітичний спосіб комп'ютерного відображення навігаційної ситуації на електронній карті та мінімаксний вибір безпечної траєкторії руху судна з урахуванням похибок повороту.

Практичні результати дисертаційного дослідження впроваджені приватним вищим навчальним закладом «Інститут післядипломної освіти» «Одеський морський тренажерний центр» для підготовки судноводіїв (акт впровадження від 05.09.2018 р.), компанією «СМА SHIPS» для перепідготовки судноводіїв компанії (акт впровадження від 09.09. 2018 р.). Матеріали дисертаційного дослідження використовуються в навчальному процесі на кафедрі управління судном під час викладання дисципліни «Маневрування і управління судном» (акт від 17.09.2018 р.).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кондрашихин В. Т. Справочник судоводителя по навигационной безопасности мореплавания / В. Т. Кондрашихин, Б. В. Бердинских, А. С. Мальцев, Л. А. Козырь – Одесса: Маяк, 1990. – 168 с.
2. Бурмака И. А. Управление судами в ситуации опасного сближения / И. А. Бурмака., Э. Н. Пятаков., А. Ю. Булгаков - LAP LAMBERT Academic Publishing, - Саарбрюккен (Германия), – 2016. - 585 с.
3. Мальцев А. С. Управление движением судна / А. С. Мальцев – Одесса: Весть, 1995. - 230 с.
4. Цымбал Н. Н. Гибкие стратегии расхождения судов / Н. Н. Цымбал, И. А. Бурмака, Е. Е. Тюпиков – Одесса: КП ОГТ, 2007. – 424 с.
5. Вагущенко Л. Л. Расхождение с судами смещением на параллельную линию пути / Л. Л. Вагущенко. – Одесса: Фенікс, 2013. – 180 с.
6. Пятаков Э. Н. Взаимодействие судов при расхождении для предупреждения столкновения / Э. Н. Пятаков, Р. Ю. Бужбецкий, И. А. Бурмака, А. Ю. Булгаков – Херсон: Гринь Д.С., 2015. -312 с.
7. Бурмака И. А. Экстренная стратегия расхождения при чрезмерном сближении судов / И. А. Бурмака, А. И. Бурмака, Р. Ю. Бужбецкий– LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 202 с.
8. Бурмака И. А. Применение областей недопустимых значений параметров движения судов для безопасного расхождения/ И.А. Бурмака, Э. Н. Пятаков // Austria - science, Issue: 11, 2018. - С. 34 - 39.
9. Бурмака И. А. Предупреждение столкновений судов методами внешнего управления процессом расхождения / И. А. Бурмака, Г. Е. Калиниченко, М. А. Кулаков // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, V(14), Issue: 132, 2017.- С. 56 - 60.
10. Вагущенко Л. Л. Системы автоматического управления движением судна/ Л. Л. Вагущенко, Н. Н. Цымбал - Одесса: Латстар, 2002. - 310 с.

11. Вагущенко Л. Л. Бортовые автоматизированные системы контроля мореходности / Л. Л. Вагущенко, А. Л. Вагущенко, С. И. Заичко - Одесса: Феникс, 2005. - 274 с.
12. Чапчай Е. П. Экспериментальное исследование моделей поворотливости судна / Е. П. Чапчай // Судовождение. – 2006. - № 11. – С. 139 – 142.
13. Чапчай Е. П. Учет времени перекладки пера руля при повороте судна/ Е. П. Чапчай // Судовождение. – 2005. - № 9. – С. 110 – 113.
14. Лукомский Ю. А. Общие закономерности и специфические особенности в математических моделях морских подвижных объектов/ Ю. А. Лукомский, А. Л. Стариченков // Гироскопия и навигация. - 1997. - № 2. - С. 44-52.
15. Оськин Д. А. Система управления морским судном с использованием нейросетевой идентификационной модели / Д. А. Оськин // Вестн. Мор. гос. ун-та. 2008. - № 27, С. 3-12.
16. Дмитриев С. П. Обоснование возможности использования линейно-квадратичного подхода при стабилизации судна на траектории / С. П. Дмитриев, А. Е. Пелевин // Гироскопия и навигация. - 1997. - № 4. - С. 65-82.
17. Лентарёв А. А. Статистическое моделирование движения судов по фарватеру / А. А. Лентарёв, А. Ю. Льюков // Вестн. Мор. гос. ун-та. 2005. - № 9, С. 78-83.
18. Шпекторов А. Г. Организация двухуровневой системы управления движением скоростного судна. / А. Г. Шпекторов, Тхань Тунг Ле.: Навигация и управление движением: Материалы 8 Конференции молодых ученых: 1 этап, Санкт-Петербург, Ц-16 марта, 2006; 2 этап, Санкт-Петербург (в Интернете), 1 июня-31 окт., 2006; 3 этап, Санкт-Петербург, 25-29 сент., 2006 СПб: ЦНИИ "Электроприбор". 2007. - С. 125-130.

19. Богданов В. П. Синергетика и нейросетевые системы управления курсом судна / В. П. Богданов, Я. Л. Виткалов, С. В. Глушков, А. С. Потапов и др. – Питер, 2006. - 205 с.
20. Попов А. В. О повышении управляемости судна при ветре посредством ввода интеллектуальной составляющей в алгоритм авторулевого/ А. В. Попов // Вести. ВГАВТ. 2005.- № 14, С. 27-35.
21. K. Benedict. Simulation Augmented Manoeuvring Design and Monitoring – a New Method for Advanced Ship Handling/ K. Benedict, M. Kirchhoff, M. Gluch, S. Fischer, M. Schaub, M. Baldauf, S. Klaes// TransNav, International magazine on marine navigation and safety of marine transport, Vol. 8, № 1, page 131-141, 2014.
22. Вагущенко Л. Л. Судовые навигационно-информационные системы/ Л. Л. Вагущенко - Одесса: Феникс, 2004. - 302 с.
23. Paulauskas V. External forces influence on ships steering in extreme conditions /Paulauskas V., Paulauskas D., Steenberg C. M. Transport Means 2006: Proceedings of the 10 International Conference, Kaunas, Oct. 19-20, 2006. Kaunas: Technologija. 2006, p. 158-160.
24. Глушков С. В. Использование нечеткой логики в системе автоматического управления курсом судна / Глушков С. В. // Приборы и системы: Упр., контроль, диагност. 2007, № 8, с. 28-32.
25. Юдин Ю. И Маневренные характеристики судна как функции параметров его математической модели / Ю. И. Юдин, С. И. Позняков // Вестн. МГТУ (Мурманск). 2006. 9, № 2, с. 234-240.
26. K. Benedict. Manoeuvring Simulation on the Bridge for Predicting Motion of Real Ships and as Training Tool in Ship Handling Simulators/ K. Benedict, M. Kirchhoff, M. Gluch, S. Fischer, M. Baldauf // TransNav, International magazine on marine navigation and safety of marine transport, Vol. 3, № 1, page 25-30, 2009.
27. C.J. Shi. Identification of Ship Maneuvering Model Using Extended Kalman Filters/ C.J. Shi, D. Zhao, J. Peng, C. Shen// TransNav, International magazine on marine navigation and safety of marine transport, Vol. 3, № 1, page 105-110, 2009.
28. Ahmed Y.A. Consistently Trained Artificial Neural Network for Automatic

Ship Berthing Control/ Ahmed Y.A., Hasegawa K. // TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 9, No. 3, page 417-426, 2015.

29. M. Ljacki. Intelligent Prediction of Ship Maneuvering / M. Ljacki // TransNav, International magazine on marine navigation and safety of marine transport, Vol. 10, № 3, page 511-516, 2016.

30. Степахно Р. Г. Разработка способов идентификации математической модели судна с целью решения прикладных задач судовождения: автореф. дис. на со-иск. уч. степ. канд. техн. наук/ Р. Г. Степахно - Мурманск, 2005, 22 с.

31. Nguyen Due-Hung. Designs of self-tuning control systems for ships / Nguyen Due-Hung, Park Jin-Seok, Ohtsu Kohei. // Nihon kokai gakkai ronbunshu. - J. Jap. Inst. Navig. — 1998.- № 99. – P. 235-245.

32. Ohtsu K. New look at a ship handling manoeuvre / Ohtsu K. // Nihon kokai gakkai-shi-Navigation. - 1997.- № 134. - P. 38-46.

33. Пат. 2224279 Россия, МПК7 G 05 D 1/00, В 63 Н 25/04. Устройство управления продольным движением судна / Ю. И. Бородин, Г. М. Довгоброд, Клячко Л. М. - № 2002129032/28; заявл. 30.10.2002; опубл. 20.02.2004.

34. Клячко Л. М. Способы автоматического управления судном при наличии приемника СНС и носового подруливающего устройства / Л. М. Клячко, Острцов Г. Э. // Судостроение (Санкт-Петербург). – 2004. - № 1. - С. 48-49.

35. Senda Shoichi. Study on the characteristics of ship-handling on passing fairway / Senda Shoichi, Kobayashi Hiroaki, Mizuno Hiroyuki, Arai Shiro. // Nihon kokai gakkai ronbun-shu - J. Jap. Inst. Navig. - 2000. - №102. -P. 301-308.

36. Fujimoto Shoji. Maneuvering ship using wheel-over position / Fujimoto Shoji, Hakozaki Tetsuya. // Nihon kokai gakkai-shi-Navigation. - 1997. - № 132. - P. 42-50.

37. Сатаев В. В. Разработка адаптивных алгоритмов работы интеллектуального авторулевого, использующих динамические особенности

неустойчивых на курсе судов: автореф. дис. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук: Волж., гос. акад. водн. трансп./ В. В. Сатаев - Нижний Новгород, 2001. - 23 с.

38. Шпекторов А. Г. Стабилизация скоростного судна на заданном маршруте / А. Г. Шпекторов, В. А. Зуев // Гироскопия и навигация. - 2002. - № 3, с. 143-144.

39. Краевски Кристиан. АРГО-электронная система информации о состоянии фарватера / Краевски Кристиан. // ИНФОРМОСТ - "Радиоэлектрон, и телекоммуникации". - 2002. - № 1. - с. 62-66.

40. Бродский Е. Л. Комплексование и интеграционные процессы в информационных системах связи и местопределения подвижных объектов речных региональных структур "Речные информационные службы" / Е. Л. Бродский, А. А. Сикарев // Наукоем. технол.- 2003. - 4, № 8, с. 13-19.

41. Ростопшин Д. Я. О проблемах использования данных автоматической идентификационной системы в задачах управления движением судов / Д. Я. Ростопшин, Д. А. Антонова // Мехатрон. - 2007, № 9, прил., с. 9-14.

42. Зайков В. И. Современное состояние математических моделей управляемого движения судна и их применение для проектирования водных путей/ В. И. Зайков // Внутр. вод. пути России: Ист. Современность Перспективы: Матер, и тез. докл. регион, науч.-техн. конф., посвящ. 200-летию гос. упр. вод. коммуникациями России, Санкт-Петербург, 13 марта, 1998. – СПб. – 1998. - С. 91-101.

43. Ince A.N. Modelling and simulation for safe and efficient navigation in narrow waterways / A.N. Ince, E.J. Topuz // Navigation. - 2004. - 57, № 1. – P. 53-71.

44. Полоз В. К. Математическая модель процесса захода судна в шлюз / В. К. Полоз // Тр. Волж. гос. акад. вод. трансп. - 1999. - № 284. - С. 26-27.

45. Тихонов В. И. Управления движения судна / Тихонов В. И. // Тр. Волж. гос. акад. вод. трансп. - 1999. - № 284. - С. 27-28.

46. Taha M.Y. Vessel Traffic Services in Egypt/ Taha M.Y., Hafez M.A.- Egypt, 2002.-78 p.

47. Май Ба Линь. Повышение точности процесса безопасного расхождения судов с стесненных условиях / Май Ба Линь. Автореф. дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук по спец. 05.22.16 Судовождение. – Одесса, 2004. – 21 с.

48. Алексишин А. В. Использование зоны безопасности судна для снижения аварийности / А. В. Алексишин // Судовождение. – 2005. - № 10. – С. 3 – 8.

49. Алексишин А. В. Учет динамики судна при формировании его безопасной зоны/ А. В. Алексишин // Судовождение. – 2006. - № 11. – С. 3 – 8.

50. Алексишин В. Г. Зависимость параметров судовой безопасной зоны от стохастических позиционных погрешностей / А. В. Алексишин, А.В. Алексишин // Судовождение. – 2006. - № 12. – С. 3 – 10.

51. Алексишин А. В. Плавание в стесненных водах с учетом судовой безопасной зоны / А. В. Алексишин // Судовождение. – 2007. - № 13. – С. 3 – 8.

52. Алексишин В. Г. Формирование судовой безопасной зоны с учетом поворотливости судна / В. Г. Алексишин, А. В. Алексишин // Судовождение. – 2007. - № 14. – С. 3- 8.

53. Goodwin E. M. A Statistical Study of Ship Domains // The Journal of Navigation. – 1975. - 28, № 3. - P. 328 – 341.

54. Мальцев А. С. Учет маневренных характеристик для обеспечения безопасности плавания// Судостроение и ремонт. – 1989. - №9. – с. 29 – 31.

55. Lamb W. G. P. Colcuiation of the geometry of ship collision zones // The Journal of Navigation. – 1989. – 42, № 2. – P. 298 - 305.

56. Ворохобин И. И. Эквивалентность оценки вероятности безаварийного плавания судна в стесненном районе/ И. И. Ворохобин, В. В. Северин, Ю. В. Казак // Судовождение: Сб. научн. трудов. ОНМА, Вып. 25. – Одесса: «ИздатИнформ», 2015 - С. 40-47.

57. Ворохобин И. И. Количественная оценка безопасности судовождения/ И. И. Ворохобин, В. В. Северин, **Ю. В. Казак** // Автоматизация судовых

технических средств: науч. - техн. сб. – 2015. – Вып. 21. Одесса: ОНМА. – С. 34 – 39.

58. Северин В. В. Стохастическая характеристика бокового отклонения судна при проводке по заданному маршруту / В. В. Северин, **Ю. В. Казак** // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. – 2016. – Вып. 22. Одесса: НУ"ОМА". – С. 92 – 96.

59. Казак Ю. В. Оценка векториальной погрешности поворота судна и минимизация ее величины / Ю. В. Казак, В. В. Северин // Автоматизация судовых технических средств: науч.- техн. сб. – 2017. – Вып. 23. Одесса: НУ"ОМА". – С. 37 – 43.

60. Ворохобин И.И. Векториальные погрешности, возникающие при повороте судна / И.И. Ворохобин, **Ю.В. Казак** // Судовождение: Сб. научн. трудов: НУ"ОМА", Вып. 26. – Одесса: «ИздатИнформ», 2016 - С. 60-64.

61. Казак Ю.В. Влияние погрешности перекладки пера руля на точность поворота судна/ Ю.В. Казак // Судовождение: Сб. научн. трудов.: НУ"ОМА", Вып. 27. – Одесса: «ИздатИнформ», 2017 - С. 96-101.

62. Казак Ю.В. Учет динамических моделей вращательного движения судна при обеспечении безопасности судовождения / Ю. В. Казак, Г. Е. Калиниченко // Судовождение: Сб. научн. трудов. НУ «ОМА», Вып. 28. – Одесса: «ИздатИнформ», 2018 - С. 63-69.

63. Ворохобин И.И. Плотность распределения векториальной погрешности поворота судна / И. И. Ворохобин, В. В. Северин, **Ю. В. Казак** // Эксплуатация, безопасность и экономика водного транспорта. Вестник Государственного морского университета им. адмирала Ф. Ф. Ушакова. Новороссийск. – 2017. – выпуск 3 (84). – С. 65 - 69.

64. Ворохобин И. И. Траекторная погрешность поворота судна и способы снижения ее величины / И. И. Ворохобин, **Ю. В. Казак**, В. В. Северин // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, V(14), Issue: 132, 2017. - С.101 – 105.

65. Астайкин Д.В. Сравнение способов оценки безопасности плавания в стесненных районах / Д. В. Астайкин, В. В. Северин, **Ю. В. Казак** // East European Scientific Journal, №11 (27), 2017, part 1.- С. 31-39.

66. Казак Ю.В. Определение величины векториальной погрешности поворота судна / Ю. В. Казак, В. В. Северин // Развитие науки в XXI веке: Материалы XXVII международной научно-практической конференции, 15 сентября 2017 - Харьков: научно-информационный центр «Знание», 2017. – С. 34-37.

67. Казак Ю. В. Зависимость погрешности бокового отклонения судна от траекторной погрешности поворота судна / Ю. В. Казак // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, V (16), Issue: 148, 2017.- С. 75-78.

68. Ворохобин И.И. Определение вероятности обеспечения безаварийного плавания судов в стесненных районах / И. И. Ворохобин, В. В. Северин, **Ю. В. Казак** // Материалы научно-методологической конференции „Морські перевезення та інформаційні технології в судноплавстві”, - 18-19 листопада 2014, Одеса. – С. 160-162.

69. Ворохобин И.И. Определение закона распределения бокового отклонения судна / И. И. Ворохобин, В. В. Северин, **Ю. В. Казак** // Материалы научно-методологической конференции „Морські перевезення та інформаційні технології в судноплавстві”, - 19-20 листопада 2015, Одеса. – С. 117-119.

70. Казак Ю.В. Зависимость точности поворота судна от погрешности перекладки пера руля. / Ю. В. Казак // Річковий та морський транспорт: інфраструктура, судноплавство, перевезення, безпека: Матеріали наук.-техн. конф., 16-17 листоп. 2016 – Одеса: ОНМА, 2016. – С. 10–15.

71. Казак Ю. В. Учет динамических моделей вращательного движения судна при обеспечении безопасности судовождения / Ю. В. Казак, Г. Е. Калиниченко // Транспортні технології (морський та річковий флот):інфраструктура, судноплавство, перевезення, автматизація: Матеріали наук.-техн. конф., 16-17 листопада 2017 – Одеса: НУ «ОМА», 2017. – С. 99 -

102.

72. Ворохобин И. И. Формирование процедуры оценки вероятности безаварийного плавания судна в стесненных районах/ И. И. Ворохобин, В. В. Северин, **Ю. В. Казак** // Материалы VII Международной научно-методологической конференции „Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2015)”, - 26-28 травня 2015, Херсон. – С. 99-102.

73. Северин В. В. Определение закона распределения бокового отклонения судна / В. В. Северин, **Ю. В. Казак** // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2016): Матеріали VIII Міжнародної наук.-практ. конф., 24-26 травня. 2016 – Херсон: ХДМА, 2016. – С. 139–142.

74. Казак Ю. В. Влияние погрешности перекладки руля на точность поворота судна / Ю. В. Казак// Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2017): Матеріали IX Міжнародної наук.-практ. конф., 23-25 травня. 2017 – Херсон: ХДМА, 2017. – С. 112–114.

75. Ворохобин И.И. Векториальная погрешность и ее плотность распределения / И. И. Ворохобин, В. В. Северин, **Ю. В. Казак** // Материалы Всеукраинской научно-технической конференции с международным участием. 17-18 мая 2017 г., Николаев, НУК, 2017,- С. 25 – 27.

76. Ворохобин И.И. Оценка навигационной безопасности при плавании судов в стесненных водах / И. И. Ворохобин, **Ю. В. Казак**, В. В. Северин – LAP LAMBERT Academic Publishing, – 2018. - 239 с.

77. Бурмака И.А. Учет динамики судна при выборе маневра расхождения / И. А. Бурмака // Судовождение. – 2002. - №4. – С. 32- 36.

78. Вагущенко Л.Л. Судно как объект автоматического управления / Л.Л. Вагущенко. - Одесса: ОГМА, 2000. – 140 с.

79. Пискунов Н. С. Дифференциальное и интегральное исчисление / Н. С. Пискунов – М.: Наука, 1985. – 560 с.

80. Овчинников П.Ф. Математическое моделирование систем механики, электромеханики и автоматики / П. Ф. Овчинников – К.: ИСИО, 1993. – 280 с.

81. Kalinichenko Y. Analysis of mathematical models of changing the vessel's course when turning./ Y. Kalinichenko, I. Burmaka//Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.- 2016. -6/9 (84). - P. 20 - 31.

82. Бурмака И.А. Безопасное расхождение судов с учетом их инерционности. Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.22.16/ ОНМА. – Одесса, 2004. – 22 с.

83. Вентцель Е.С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель - М.: Наука, 1969. - 576 с.

84. Бурмака И.А. Результаты имитационного моделирования процесса расхождения судов с учетом их динамики / И. А. Бурмака // Судовождение: сб. научн. трудов. – 2005. – №10. – С. 21 – 25.

85. Корн Г. Справочник по математике / Корн Г., Корн Т. - М.: Наука, 1984.- 832 с.

86. Алексишин В.Г. Выбор скалярного критерия точности для оценки эффективности структуры локальных навигационных систем / В. Г. Алексишин, Д. А. Бузовский // Судовождение: Сб. научн. трудов. / ОНМА, – Вып.10. - Одесса: „ИздатИнформ”, 2005. – С. 9 – 14.

Фрагмент коду програми для відображення навігаційної ситуації.

```
unit Unit_Kozak;

interface

uses

  Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs,
  ExtCtrls, StdCtrls;

type
  TForm1 = class(TForm)
    Button1: TButton;
    Image1: TImage;
    Button2: TButton;
    Button3: TButton;
    Image2: TImage;
    Button4: TButton;
    Button5: TButton;
    Button6: TButton;
    Button7: TButton;
    Button8: TButton;
    Button9: TButton;
    Button10: TButton;
    Button11: TButton;
    Button12: TButton;
    Button13: TButton;
    Button14: TButton;
    Panel1: TPanel;
    Panel2: TPanel;
    Panel3: TPanel;
    Image3: TImage;
    Button15: TButton;
```

```
Image4: TImage;
Button16: TButton;
Image5: TImage;
Button17: TButton;
Button18: TButton;
Button19: TButton;
Button20: TButton;
procedure FormCreate(Sender: TObject);
procedure FormDestroy(Sender: TObject);
procedure Button1Click(Sender: TObject);
procedure Button2Click(Sender: TObject);
procedure Button3Click(Sender: TObject);
procedure Button4Click(Sender: TObject);
procedure Image2MouseMove(Sender: TObject; Shift: TShiftState; X,
    Y: Integer);
procedure Button5Click(Sender: TObject);
procedure Button6Click(Sender: TObject);
procedure Button7Click(Sender: TObject);
procedure Image2Click(Sender: TObject);
procedure Button8Click(Sender: TObject);
procedure Button14Click(Sender: TObject);
procedure Button9Click(Sender: TObject);
procedure Button10Click(Sender: TObject);
procedure Button11Click(Sender: TObject);
procedure Button12Click(Sender: TObject);
procedure Button13Click(Sender: TObject);
procedure Button15Click(Sender: TObject);
procedure Button16Click(Sender: TObject);
procedure Button17Click(Sender: TObject);
procedure Image3MouseMove(Sender: TObject; Shift: TShiftState; X, Y: Integer);
procedure Button18Click(Sender: TObject);
procedure Button19Click(Sender: TObject);
```

```

procedure Image4MouseMove(Sender: TObject; Shift: TShiftState; X, Y: Integer);
procedure Image5MouseMove(Sender: TObject; Shift: TShiftState; X, Y: Integer);
procedure Image3Click(Sender: TObject);
procedure Image4Click(Sender: TObject);
procedure Image5Click(Sender: TObject);
procedure Button20Click(Sender: TObject);
private
  { Private declarations }
public
  { Public declarations }
end;

var
  Form1: TForm1;
  Bmp,CopyBmp,ChartBmp,Chart2Bmp,Chart3Bmp,MapBmp : TBitmap;
  N,Nm,Ns,IndMv,IndHd,IndCl,Nb,IndDrg,Nbs : byte;
  Kg,Kgm,Pd,Pn,Dmi,cigD : real;
  Xc,Yc,IndShow,IndD,IndBet : Integer;
  Xb,Yb,Xa,Ya : array[1..11] of Integer;
  Di,Bi,Dj,Bj,Dm,Bm : array[1..10] of real;
  IndBmp : array[1..10] of byte;
  cigMd,cigRl : real;
  Dp,Dpmx,Dpmn,delX : Integer;

  IndMap,Nst,IndCh1,IndCh2,IndCh3,IndMove,IndClick,Ncl,IndReg : byte;
  Xr,Yr : array[1..6] of Integer;

implementation

{$R *.DFM}

uses Unit_2D;

function Pelg(x,y:real):real;
  var C1,Aor,Aol:real;

  begin
    if y<>0 then C1 :=ArcTan(x/y)*57.3

```

```

else
  begin
    if x>0 then C1:=90
    else C1:=270;
    end;
    if y>=0 then Aor :=360 + C1
    else Aor :=180 + C1;
    if Aor >=360 then Aol :=Aor - 360
    else Aol :=Aor;
    Pelg :=Aol;
    end;

function Distn(x,y:real):real;
  var Ds :real;

  begin
    Ds :=Sqrt(Sqr(x)+Sqr(y));
    Distn :=Ds;
    end;

function Cour(x :Integer) : integer;
  begin
    if x<0 then Cour:=360+x
    else
      begin
        if x>=360 then Cour:=x-360
        else Cour:=x;
        end;
      end;

procedure TForm1.FormCreate(Sender: TObject);
var
  i : byte;

begin
  Bmp := TBitmap.Create;

```

```

Bmp.Width:=800;
Bmp.Height:=600;

CopyBmp := TBitMap.Create;
CopyBmp.Width:=650;
CopyBmp.Height:=500;

ChartBmp := TBitMap.Create;
ChartBmp.Width:=800;
ChartBmp.Height:=500;

Chart2Bmp := TBitMap.Create;
Chart2Bmp.Width:=800;
Chart2Bmp.Height:=500;

Chart3Bmp := TBitMap.Create;
Chart3Bmp.Width:=800;
Chart3Bmp.Height:=500;

MapBmp := TBitMap.Create;
MapBmp.Width:=800;
MapBmp.Height:=500;

ColorRect(Bmp,Image1,0,0,609,313,RGB(100,115,120),0);

Ns:=3; Xc:=312; Yc:=50; Xb[1]:=50; Yb[1]:=325; Xb[2]:=575; Yb[2]:=325;
cigD:=0.01; IndShow:=1; IndMv:=0; IndCl:=0; IndDrg:=0; IndD:=0; IndBet:=0;
delX:=0; IndCh1:=1; IndCh2:=1; IndCh3:=1; IndMove:=0; IndClick:=0; IndCh1:=1;

for i:=1 to 10 do IndBmp[i]:=0;
end;

procedure TForm1.FormDestroy(Sender: TObject);
begin
Bmp.Free;
CopyBmp.Free;
ChartBmp.Free;
Chart2Bmp.Free;
Chart3Bmp.Free;

```

```
MapBmp.Free;
```

```
end;
```

```
procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject);
```

```
var
```

```
i,j,k,s : byte;
```

```
Stc,Stc1 : string[5];
```

```
begin
```

```
ColorRect(Bmp,Image1,0,0,609,313,RGB(240,245,255),0);
```

```
Kg:=0.9; Kgm:=0.9; Pd:=0.9; N:=0; Nm:=0;
```

```
Button1.Enabled:=False;
```

```
Button2.Enabled:=True;
```

```
Button2.Visible:=True;
```

```
Button4.Enabled:=False;
```

```
Button4.Visible:=False;
```

```
Image2.Visible:=False;
```

```
Image1.Visible:=True;
```

```
Button3.Enabled:=True;
```

```
Button3.Visible:=True;
```

```
Button15.Visible:=False;
```

```
Button2.Caption:='Pd=900';
```

```
for i:=0 to 12 do
```

```
begin
```

```
ColorLine(Bmp,Image1,4,6+25*i,604,6+25*i,RGB(70,90,90),1,0);
```

```
ColorLine(Bmp,Image1,4+50*i,6,4+50*i,306,RGB(70,90,90),1,0);
```



```

end;

with Image1.Canvas do
begin

Font.Color:=TColor(RGB(195,5,5));
Brush.Color:=TColor(RGB(240,245,255));
TextOut(12,12,'Kg');
TextOut(18,12+(11)*25,'995');

Font.Color:=TColor(RGB(5,5,195));
TextOut(30,12,'Kgm');
TextOut(18+(11)*50,12,'995');

for i:=0 to 9 do
begin
Str(900+10*i,Stc);
Font.Color:=TColor(RGB(5,5,195));
TextOut(18+(i+1)*50,12,Stc);
Font.Color:=TColor(RGB(195,5,5));
TextOut(18,12+(i+1)*25,Stc);
end;
end;

with Image1.Canvas do
begin
Font.Color:=TColor(RGB(5,5,5));

for i:=0 to 10 do
begin
if i<10 then Kg:=0.9+0.01*i
else Kg:=0.995;

```

```

for j:=0 to 10 do
  begin
    N:=0; Nm:=0;

    if j<10 then Kgm:=0.9+0.01*j
    else Kgm:=0.995;

    repeat
      if N=Nm then
        begin
          N:=N+1; Nm:=1;
        end
      else
        begin
          Nm:=Nm+1;
        end;

        Pn:=(1-exp(N*Ln(1-Kg)))*(1-exp(Nm*Ln(1-Kgm)));
      until Pn>=Pd;

      Str(N,Stc);
      Str(Nm,Stc1);

      TextOut(18+(j+1)*50,12+(i+1)*25,Stc+' '+Stc1);

    end;
  end;
end;
end;

```

```

procedure TForm1.Button2Click(Sender: TObject);
var
i,j : byte;
Stc,Stc1 : string[5];

begin
if Pd<0.995 then Pd:=Pd+0.005
else
begin
if Pd<0.999 then Pd:=Pd+0.001
else Pd:=0.9;
end;

Str(Round(1000*Pd),Stc);
Button2.Caption:='Pd='+StC;

ColorRectBor(Bmp,Image1,55,32,603,305,RGB(240,245,255),RGB(240,245,255),0);

Kg:=0.9; Kgm:=0.9;

for i:=0 to 12 do
begin
ColorLine(Bmp,Image1,4,6+25*i,604,6+25*i,RGB(70,90,90),1,0);
ColorLine(Bmp,Image1,4+50*i,6,4+50*i,306,RGB(70,90,90),1,0);
end;

with Image1.Canvas do
begin
Font.Color:=TColor(RGB(5,5,5));

for i:=0 to 10 do
begin

```

```

if i<10 then Kg:=0.9+0.01*i
else Kg:=0.995;

```

```

for j:=0 to 10 do
  begin
    N:=0; Nm:=0;

```

```

    if j<10 then Kgm:=0.9+0.01*j
    else Kgm:=0.995;

```

```

  repeat
    if N=Nm then
      begin
        N:=N+1; Nm:=1;
      end
    else
      begin
        Nm:=Nm+1;
      end;

```

```

  Pn:=(1-exp(N*Ln(1-Kg)))*(1-exp(Nm*Ln(1-Kgm)));
  until Pn>=Pd;

```

```

  Str(N,Stc);
  Str(Nm,Stc1);

```

```

  TextOut(18+(j+1)*50,12+(i+1)*25,Stc+' '+Stc1);

```

```

  end;

```

```

end;

```

```

end;

```

```

end;

```

```
procedure TForm1.Button3Click(Sender: TObject);
begin
  ColorRect(Bmp,Image1,0,0,609,313,RGB(100,115,120),0);

  Form1.Color:=clBtnFace;

  Button5.Left:=656;
  Button5.Top:=8;

  Button1.Enabled:=True;
  Button1.Visible:=True;

  Button4.Enabled:=True;
  Button4.Visible:=True;

  Button2.Enabled:=False;
  Button2.Visible:=False;

  Button3.Enabled:=False;
  Button3.Visible:=False;

  Image1.Visible:=True;
  Image2.Visible:=False;
  Image3.Visible:=False;
  Image4.Visible:=False;
  Image5.Visible:=False;

  Button5.Enabled:=False;
  Button5.Visible:=False;

  Button6.Enabled:=False;
```

Button6.Visible:=False;

Button6.Enabled:=False;

Button6.Visible:=False;

Button7.Enabled:=False;

Button7.Visible:=False;

Button8.Enabled:=False;

Button8.Visible:=False;

Button15.Enabled:=True;

Button15.Visible:=True;

Button9.Visible:=False;

Button10.Visible:=False;

Button11.Visible:=False;

Button12.Visible:=False;

Button13.Visible:=False;

Button14.Visible:=False;

Button16.Visible:=False;

Button17.Visible:=False;

Button18.Visible:=False;

Button19.Visible:=False;

Button20.Visible:=False;

Panel1.Visible:=False;

Panel2.Visible:=False;

Panel3.Visible:=False;

end;

```

procedure TForm1.Button4Click(Sender: TObject);
var
i,j,k,Rd,Gr,B1 : byte;
Xf,Yf,F,A,B,C,A1,B1,{cigD,}cigB : real;
Stc : string[5];

begin
IndReg:=1;
Image1.Visible:=False;
Image2.Visible:=True;
ColorRect(Bmp,Image2,0,0,625,457,RGB(230,245,255),0);
ColorRect(Bmp,Image2,20,20,605,437,RGB(230,245,255),0);
{ColorRectBor(Bmp,Image2,20,20,35,35,RGB(130,245,255),RGB(130-20,245-20,255-
20),0);}

Button4.Enabled:=False;
Button3.Enabled:=True;
Button3.Visible:=True;

Button5.Enabled:=True;
Button5.Visible:=True;

Button6.Enabled:=True;
Button6.Visible:=True;

Button7.Enabled:=True;
Button7.Visible:=True;

Button8.Enabled:=True;
Button8.Visible:=True;

Button14.Enabled:=True;

```

```
Button14.Visible:=True;
```

```
Button15.Visible:=False;
```

```
{N:=3; Xc:=312; Yc:=50; Xb[1]:=50; Yb[1]:=325; Xb[2]:=575; Yb[2]:=325;  
cigD:=0.01;}
```

```
Xa[1]:=Xc; Ya[1]:=Yc;
```

```
for i:=2 to Ns do
```

```
begin
```

```
  Xa[i]:=Xb[i-1]; Ya[i]:=Yb[i-1];
```

```
end;
```

```
Button1.Enabled:=False;
```

```
Button1.Visible:=False;
```

```
with Image2.Canvas do
```

```
begin
```

```
  Font.Color:=TColor(RGB(185,35,5));
```

```
  Font.Size:=6;
```

```
for i:=0 to 38 do
```

```
begin
```

```
  for j:=0 to 27 do
```

```
    begin
```

```
      F:=0;
```

```
      A:=0; A1:=0;
```

```
      B:=0; B1:=0;
```

```
      C:=0;
```

```
      for k:=1 to Ns do
```

```
        begin
```


Xf:=Xa[k]-(20+15*i);

Yf:=20+15*j-Ya[k];

Bi[k]:=Pelg(Xf,Yf);

Di[k]:=Distn(Xf,Yf)/100;

if Di[k]=0 then Di[k]:=0.01;

cigB:=0.015*Di[k];

F:=F+(1/Sqr(cigD)+1/Sqr(cigB));

A:=A+Sqr(cos(Bi[k]/57.3)/cigD);

A1:=A1+Sqr(sin(Bi[k]/57.3)/cigB);

B:=B+Sqr(sin(Bi[k]/57.3)/cigD);

B1:=B1+Sqr(cos(Bi[k]/57.3)/cigB);

C:=C+(sin(Bi[k]/57.3)*cos(Bi[k]/57.3))*(1/Sqr(cigD)-1/Sqr(cigB));

end;

Dmi:=1852*Sqrt(F/((A+A1)*(B+B1)-Sqr(C)));

if Dmi>40 then

begin

Rd:=20; Gr:=20; Bl:=20;

end

else

begin

Rd:=230-Round(5*Dmi); Gr:=230-Round(5*Dmi); Bl:=250-Round(5*Dmi);

end;

ColorRectBor(Bmp,Image2,20+15*i,20+15*j,35+15*i,35+15*j,

RGB({30,245,255}Rd,Gr,Bl),RGB(Rd-0,Gr-0,Bl-0),0);

```

    Str(Round(Dmi),Stc);
    TextOut(21+15*i,21+15*j,Stc);
end;
end;

```

```

Xa[Ns+1]:=Xa[1]; Ya[Ns+1]:=Ya[1];

```

```

for i:=1 to Ns do

```

```

    ColorLine(Bmp,Image2,Xa[i],Ya[i],Xa[i+1],Ya[i+1],RGB(240,230,100),1,0);

```

```

    Pen.Color:=TColor(RGB(205,55,55));

```

```

    Brush.Color:=TColor(RGB(255,105,105));

```

```

    Ellipse(Xc-3,Yc-3,Xc+3,Yc+3);

```

```

    Pen.Color:=TColor(RGB(25,55,205));

```

```

    Brush.Color:=TColor(RGB(105,105,255));

```

```

    for i:=1 to Ns-1 do Ellipse(Xb[i]-3,Yb[i]-3,Xb[i]+3,Yb[i]+3);

```

```

end;

```

```

end;

```

```

procedure TForm1.Image2MouseMove(Sender: TObject; Shift: TShiftState; X,
    Y: Integer);

```

```

var

```

```

    i,j,k,Rd,Gr,Bl : byte;

```

```

    Xf,Yf,F,A,B,C,A1,B1,{cigD,}cigB : real;

```

```

    Stc,Str1: string[5];

```

```

begin

```

```
{ColorRect(Bmp,Image2,598,7,623,25,
RGB(230,240,250),0);
ColorRect(Bmp,Image2,598,29,623,48,
RGB(230,240,250),0);}
```

```
with Image2.Canvas do
```

```
begin
```

```
{Font.Size:=10;
```

```
Font.Style:=[];
```

```
Font.Color:=TColor(RGB(10,10,10));
```

```
Str(X,Str1);
```

```
TextOut(600,8,Str1);
```

```
Str(Y,Str1);
```

```
TextOut(600,30,Str1);}
```

```
{Pen.Mode:=pmMask;}
```

```
if IndMv=1 then
```

```
begin
```

```
IndCl:=0;
```

```
for i:=1 to Ns do
```

```
begin
```

```
IndBmp[i]:=0;
```

```
if Distn(X-Xa[i],Y-Ya[i])<11 then
```

```
begin
```

```
Pen.Mode:=pmMask;
```

```
IndBmp[i]:=1;
```

```
Pen.Color:=TColor(RGB(205,55,55));
```

```
Brush.Color:=TColor(RGB(225,105,105));
```

```
Ellipse(Xa[i]-10,Ya[i]-10,Xa[i]+10,Ya[i]+10);
```

```

    IndCl:=1; Nb:=i;
    Pen.Mode:=pmCopy;
    end
else
    begin
    IndHd:=1;

    for j:=1 to Ns do
        begin
            if IndBmp[j]=1 then IndHd:=0;
            end;

            if IndHd=1 then
                Image2.Canvas.CopyRect(Rect(0,0,625,457),
                CopyBmp.Canvas,Rect(0,0,625,457));

            end;
        end;
    end;

    if IndDrg=1 then
        begin
            ColorRect(Bmp,Image2,0,0,625,457,RGB(200,225,255),0);

            with Image2.Canvas do
                begin
                    Font.Color:=TColor(RGB(185,35,5));
                    Font.Size:=6;

                    for i:=0 to 38 do
                        begin
                            for j:=0 to 27 do

```

```

begin
F:=0;
A:=0; A1:=0;
B:=0; B1:=0;
C:=0;

for k:=1 to Ns do
begin
Xf:=Xa[k]-(20+15*i);
Yf:=20+15*j-Ya[k];
Bi[k]:=Pelg(Xf,Yf);
Di[k]:=Distn(Xf,Yf)/100;
if Di[k]=0 then Di[k]:=0.01;

cigB:=0.015*Di[k];

F:=F+(1/Sqr(cigD)+1/Sqr(cigB));

A:=A+Sqr(cos(Bi[k]/57.3)/cigD);
A1:=A1+Sqr(sin(Bi[k]/57.3)/cigB);

B:=B+Sqr(sin(Bi[k]/57.3)/cigD);
B1:=B1+Sqr(cos(Bi[k]/57.3)/cigB);

C:=C+(sin(Bi[k]/57.3)*cos(Bi[k]/57.3))*(1/Sqr(cigD)-1/Sqr(cigB));
end;

Dmi:=1852*Sqrt(F/((A+A1)*(B+B1)-Sqr(C)));

if Dmi>40 then
begin
Rd:=20; Gr:=20; Bl:=20;

```

```

    end
else
    begin
        Rd:=230-Round(5*Dmi); Gr:=230-Round(5*Dmi); Bl:=250-Round(5*Dmi);
        end;

        ColorRectBor(Bmp,Image2,20+15*i,20+15*j,35+15*i,35+15*j,
            RGB({30,245,255}Rd,Gr,Bl),RGB(Rd-0,Gr-0,Bl-0),0);

    if IndShow=1 then
        begin
            Str(Round(Dmi),Stc);
            TextOut(21+15*i,21+15*j,Stc);
            end;
        end;
    end;
end;

Xa[Ns+1]:=Xa[1]; Ya[Ns+1]:=Ya[1];

for i:=1 to Ns do
    ColorLine(Bmp,Image2,Xa[i],Ya[i],Xa[i+1],Ya[i+1],RGB(240,230,100),1,0);

    Pen.Color:=TColor(RGB(205,55,55));
    Brush.Color:=TColor(RGB(255,105,105));
    Ellipse(Xa[1]-3,Ya[1]-3,Xa[1]+3,Ya[1]+3);

    Pen.Color:=TColor(RGB(25,55,205));
    Brush.Color:=TColor(RGB(105,105,255));

    if Ns>1 then
        for i:=1 to Ns-1 do Ellipse(Xa[i+1]-3,Ya[i+1]-3,Xa[i+1]+3,Ya[i+1]+3);

```

```
CopyBmp.Canvas.CopyRect(Rect(0,0,625,457),
Image2.Canvas,Rect(0,0,625,457));
```

```
with Image2.Canvas do
```

```
begin
```

```
Pen.Mode:=pmMask;
```

```
Pen.Color:=TColor(RGB(25,55,55));
```

```
Brush.Color:=TColor(RGB(115,205,115));
```

```
Ellipse(Xa[Nb]-10,Ya[Nb]-10,Xa[Nb]+10,Ya[Nb]+10);
```

```
Pen.Mode:=pmCopy;
```

```
end;
```

```
Xa[Nb]:=X; Ya[Nb]:=Y;
```

```
end;
```

```
end;
```

```
end;
```

```
procedure TForm1.Button5Click(Sender: TObject);
```

```
var
```

```
i,j,k,Rd,Gr,Bl,Nshow : byte;
```

```
Xf,Yf,F,A,B,C,A1,B1,cigB : real;
```

```
Stc : string[5];
```

```
begin
```

```
IndShow:=-IndShow;
```

```
if IndReg=1 then
```

```

begin
ColorRect(Bmp,Image2,0,0,625,457,RGB(230,245,255),0);

with Image2.Canvas do
begin
Font.Color:=TColor(RGB(185,35,5));
Font.Size:=6;
for i:=0 to 38 do
begin
for j:=0 to 27 do
begin
F:=0;
A:=0; A1:=0;
B:=0; B1:=0;
C:=0;
for k:=1 to Ns do
begin
Xf:=Xa[k]-(20+15*i);
Yf:=20+15*j-Ya[k];
Bi[k]:=Pelg(Xf,Yf);
Di[k]:=Distn(Xf,Yf)/100;
if Di[k]=0 then Di[k]:=0.01;

cigB:=0.015*Di[k];

F:=F+(1/Sqr(cigD)+1/Sqr(cigB));

A:=A+Sqr(cos(Bi[k]/57.3)/cigD);
A1:=A1+Sqr(sin(Bi[k]/57.3)/cigB);

B:=B+Sqr(sin(Bi[k]/57.3)/cigD);
B1:=B1+Sqr(cos(Bi[k]/57.3)/cigB);

```



```
C:=C+(sin(Bi[k]/57.3)*cos(Bi[k]/57.3))*(1/Sqr(cigD)-1/Sqr(cigB));
end;
```

```
Dmi:=1852*Sqrt(F/((A+A1)*(B+B1)-Sqr(C)));
```

```
if Dmi>40 then
```

```
begin
```

```
Rd:=20; Gr:=20; Bl:=20;
```

```
end
```

```
else
```

```
begin
```

```
Rd:=230-Round(5*Dmi); Gr:=230-Round(5*Dmi); Bl:=250-Round(5*Dmi);
```

```
end;
```

```
ColorRectBor(Bmp,Image2,20+15*i,20+15*j,35+15*i,35+15*j,
  RGB({30,245,255} Rd,Gr,Bl),RGB(Rd-0,Gr-0,Bl-0),0);
```

```
if IndShow=1 then
```

```
begin
```

```
Str(Round(Dmi),Stc);
```

```
TextOut(21+15*i,21+15*j,Stc);
```

```
end;
```

```
end;
```

```
end;
```

```
Xa[Ns+1]:=Xa[1]; Ya[Ns+1]:=Ya[1];
```

```
for i:=1 to Ns do
```

```
ColorLine(Bmp,Image2,Xa[i],Ya[i],Xa[i+1],Ya[i+1],RGB(240,230,100),1,0);
```

```
Pen.Color:=TColor(RGB(205,55,55));
```

```
Brush.Color:=TColor(RGB(255,105,105));
Ellipse(Xa[1]-3,Ya[1]-3,Xa[1]+3,Ya[1]+3);
```

```
Pen.Color:=TColor(RGB(25,55,205));
Brush.Color:=TColor(RGB(105,105,255));
```

```
for i:=1 to Ns-1 do Ellipse(Xa[i+1]-3,Ya[i+1]-3,Xa[i+1]+3,Ya[i+1]+3);
end;
end;
```

```
if IndReg=2 then
```

```
begin
if IndShow>0 then Nshow:=29
else Nshow:=47;
```

```
case IndMap of
```

```
1 : Image3.Canvas.CopyRect(Rect(0,0,712,440),
  MapBmp.Canvas,Rect(0,0,712,440));
2 : Image4.Canvas.CopyRect(Rect(0,0,712,440),
  MapBmp.Canvas,Rect(0,0,712,440));
3 : Image5.Canvas.CopyRect(Rect(0,0,712,440),
  MapBmp.Canvas,Rect(0,0,712,440));
end;
```

```
for i:=0 to {Nshow} 47 do
```

```
begin
for j:=0 to 29 do
begin
F:=0;
A:=0; A1:=0;
B:=0; B1:=0;
```

```

C:=0;
for k:=1 to Nst do
  begin
    Xf:=Xr[k]-(20+15*i);
    Yf:=20+15*j-Yr[k];
    Bi[k]:=Pelg(Xf,Yf);

    if IndMap=1 then Di[k]:=Distn(Xf,Yf)/30
    else Di[k]:=Distn(Xf,Yf)/45;

    if Di[k]=0 then Di[k]:=0.01;

    cigB:=0.0087*Di[k];

    F:=F+(1/Sqr(cigD)+1/Sqr(cigB));

    A:=A+Sqr(cos(Bi[k]/57.3)/cigD);
    A1:=A1+Sqr(sin(Bi[k]/57.3)/cigB);

    B:=B+Sqr(sin(Bi[k]/57.3)/cigD);
    B1:=B1+Sqr(cos(Bi[k]/57.3)/cigB);

    C:=C+(sin(Bi[k]/57.3)*cos(Bi[k]/57.3))*(1/Sqr(cigD)-1/Sqr(cigB));
  end;

Dmi:=1852*Sqrt(F/((A+A1)*(B+B1)-Sqr(C)));

if Dmi>70 then
  begin
    Rd:=100; Gr:=100; Bl:=115;
  end
else

```

```

begin
Rd:=240-Round(2*Dmi); Gr:=240-Round(2*Dmi); Bl:=255-Round(2*Dmi);
end;

{if Dmi>70 then
begin
Rd:=30; Gr:=30; Bl:=45;
end
else
begin
Rd:=240-Round(3*Dmi); Gr:=240-Round(3*Dmi); Bl:=255-Round(3*Dmi);
end;}}

case IndMap of
1 : begin
with Image3.Canvas do
begin
Pen.Mode:=pmMask;

ColorRectBor(Bmp,Image3,0+15*i,0+15*j,15+15*i,15+15*j,
RGB(Rd,Gr,Bl),RGB(Rd,Gr,Bl),0);
Pen.Mode:=pmCopy;

if IndShow=1 then
begin
Str(Round(Dmi),Stc);
Font.Color:=TColor(185,35,5);
Font.Size:=6;
TextOut(1+15*i,1+15*j,Stc);
end;
end;
end;
end;

```

```

2 : begin
  with Image4.Canvas do
    begin
      Pen.Mode:=pmMask;

      ColorRectBor(Bmp,Image4,0+15*i,0+15*j,15+15*i,15+15*j,
        RGB(Rd,Gr,Bl),RGB(Rd,Gr,Bl),0);
      Pen.Mode:=pmCopy;

      if IndShow=1 then
        begin
          Str(Round(Dmi),Stc);
          Font.Color:=TColor(RGB(185,35,5));
          Font.Size:=6;
          TextOut(1+15*i,1+15*j,Stc);
        end;
      end;
    end;
  end;
3 : begin
  with Image5.Canvas do
    begin
      Pen.Mode:=pmMask;

      ColorRectBor(Bmp,Image5,0+15*i,0+15*j,15+15*i,15+15*j,
        RGB(Rd,Gr,Bl),RGB(Rd,Gr,Bl),0);
      Pen.Mode:=pmCopy;

      if IndShow=1 then
        begin
          Str(Round(Dmi),Stc);
          Font.Color:=TColor(RGB(185,35,5));
          Font.Size:=6;
          TextOut(1+15*i,1+15*j,Stc);

```

```

        end;
    end;
end;
end;

{with Image3.Canvas do
begin
Pen.Mode:=pmMask;

ColorRectBor(Bmp,Image3,0+15*i,0+15*j,15+15*i,15+15*j,
    RGB(Rd,Gr,Bl),RGB(Rd,Gr,Bl),0);

Pen.Mode:=pmCopy;

if IndShow=1 then
begin
    Str(Round(Dmi),Stc);
    Font.Color:=TColor(185,35,5);
    Font.Size:=6;
    TextOut(1+15*i,1+15*j,Stc);
end;

end;}
end;
end;
end;

for i:=1 to Nst do
begin
case IndMap of
1 : RLSShow_1(Bmp,Image3,Xr[i],Yr[i],1);
2 : RLSShow_1(Bmp,Image4,Xr[i],Yr[i],2);

```

```

3 : RLSShow_1(Bmp,Image5,Xr[i],Yr[i],3);
    end;

end;

end;

procedure TForm1.Button6Click(Sender: TObject);
var
i,j,k,Rd,Gr,Bl : byte;
Xf,Yf,F,A,B,C,A1,B1,{cigD,}cigB : real;
Stc : string[5];

begin
if Ns<10 then Ns:=Ns+1
else Ns:=1;

Str(Ns,Stc);
Button6.Caption:='N'+Stc;

ColorRect(Bmp,Image2,0,0,625,457,RGB(230,245,255),0);
case Ns of
1: begin
    Xc:=312; Yc:=228;
    end;
2: begin
    Xc:=208; Yc:=228; Xb[1]:=416; Yb[1]:=228;
    end;
3: begin
    Xc:=312; Yc:=50; Xb[1]:=50; Yb[1]:=325; Xb[2]:=575; Yb[2]:=325;
    end;
4: begin

```

```
Xc:=312; Yc:=50; Xb[1]:=50; Yb[1]:=228; Xb[2]:=312; Yb[2]:=407;
Xb[3]:=575; Yb[3]:=228;
end;
```

5: begin

```
Xc:=312; Yc:=50; Xb[1]:=50; Yb[1]:=150; Xb[2]:=100; Yb[2]:=375;
Xb[3]:=525; Yb[3]:=375; Xb[4]:=575; Yb[4]:=150;
end;
```

6: begin

```
Xc:=312; Yc:=50; Xb[1]:=50; Yb[1]:=150; Xb[2]:=50; Yb[2]:=300;
Xb[3]:=312; Yb[3]:=425; Xb[4]:=575; Yb[4]:=300; Xb[5]:=575; Yb[5]:=150;
end;
```

7: begin

```
Xc:=312; Yc:=50; Xb[1]:=100; Yb[1]:=150; Xb[2]:=50; Yb[2]:=300;
Xb[3]:=150; Yb[3]:=400; Xb[4]:=525; Yb[4]:=400;
Xb[5]:=575; Yb[5]:=300; Xb[6]:=525; Yb[6]:=150;
end;
```

8: begin

```
Xc:=312; Yc:=50; Xb[1]:=100; Yb[1]:=150; Xb[2]:=50; Yb[2]:=250;
Xb[3]:=150; Yb[3]:=300; Xb[4]:=312; Yb[4]:=400;
Xb[5]:=475; Yb[5]:=300;
Xb[6]:=575; Yb[6]:=250; Xb[7]:=525; Yb[7]:=150;
end;
```

9: begin

```
Xc:=312; Yc:=50; Xb[1]:=100; Yb[1]:=120; Xb[2]:=50; Yb[2]:=200;
Xb[3]:=150; Yb[3]:=300; Xb[4]:=200; Yb[4]:=380;
Xb[5]:=425; Yb[5]:=380;
Xb[6]:=475; Yb[6]:=300; Xb[7]:=575; Yb[7]:=200; Xb[8]:=525; Yb[8]:=120;
end;
```

10: begin

```
Xc:=312; Yc:=90; Xb[1]:=200; Yb[1]:=90; Xb[2]:=200; Yb[2]:=180;
Xb[3]:=200; Yb[3]:=270; Xb[4]:=200; Yb[4]:=360;
Xb[5]:=312; Yb[5]:=360;
```



```

Xb[6]:=425; Yb[6]:=360; Xb[7]:=425; Yb[7]:=270; Xb[8]:=425; Yb[8]:=180;
Xb[9]:=425; Yb[9]:=90;
end;
end;

```

```

Xa[1]:=Xc; Ya[1]:=Yc;

```

```

for i:=2 to Ns do
begin
Xa[i]:=Xb[i-1]; Ya[i]:=Yb[i-1];
end;

```

```

with Image2.Canvas do
begin
Font.Color:=TColor(RGB(185,35,5));
Font.Size:=6;

```

```

for i:=0 to 38 do
begin
for j:=0 to 27 do
begin
F:=0;
A:=0; A1:=0;
B:=0; B1:=0;
C:=0;
for k:=1 to Ns do
begin
Xf:=Xa[k]-(20+15*i);
Yf:=20+15*j-Ya[k];
Bi[k]:=Pelg(Xf,Yf);
Di[k]:=Distn(Xf,Yf)/100;
if Di[k]=0 then Di[k]:=0.01;

```

```
cigB:=0.015*Di[k];
```

```
F:=F+(1/Sqr(cigD)+1/Sqr(cigB));
```

```
A:=A+Sqr(cos(Bi[k]/57.3)/cigD);
```

```
A1:=A1+Sqr(sin(Bi[k]/57.3)/cigB);
```

```
B:=B+Sqr(sin(Bi[k]/57.3)/cigD);
```

```
B1:=B1+Sqr(cos(Bi[k]/57.3)/cigB);
```

```
C:=C+(sin(Bi[k]/57.3)*cos(Bi[k]/57.3))*(1/Sqr(cigD)-1/Sqr(cigB));
```

```
end;
```

```
Dmi:=1852*Sqrt(F/((A+A1)*(B+B1)-Sqr(C)));
```

```
if Dmi>40 then
```

```
begin
```

```
Rd:=20; Gr:=20; Bl:=20;
```

```
end
```

```
else
```

```
begin
```

```
Rd:=230-Round(5*Dmi); Gr:=230-Round(5*Dmi); Bl:=250-Round(5*Dmi);
```

```
end;
```

```
ColorRectBor(Bmp,Image2,20+15*i,20+15*j,35+15*i,35+15*j,
```

```
RGB({30,245,255} Rd,Gr,Bl),RGB(Rd-0,Gr-0,Bl-0),0);
```

```
if IndShow=1 then
```

```
begin
```

```
Str(Round(Dmi),Stc);
```

```
TextOut(21+15*i,21+15*j,Stc);
```

```
end;
```

```

end;
end;

```

```

Xa[Ns+1]:=Xa[1]; Ya[Ns+1]:=Ya[1];

```

```

for i:=1 to Ns do

```

```

ColorLine(Bmp,Image2,Xa[i],Ya[i],Xa[i+1],Ya[i+1],RGB(240,230,100),1,0);

```

```

Pen.Color:=TColor(RGB(205,55,55));

```

```

Brush.Color:=TColor(RGB(255,105,105));

```

```

Ellipse(Xc-3,Yc-3,Xc+3,Yc+3);

```

```

Pen.Color:=TColor(RGB(25,55,205));

```

```

Brush.Color:=TColor(RGB(105,105,255));

```

```

if Ns>1 then

```

```

for i:=1 to Ns-1 do Ellipse(Xa[i+1]-3,Ya[i+1]-3,Xa[i+1]+3,Ya[i+1]+3);

```

```

end;

```

```

CopyBmp.Canvas.CopyRect(Rect(0,0,625,457),

```

```

Image2.Canvas,Rect(0,0,625,457));

```

```

end;

```

```

procedure TForm1.Button7Click(Sender: TObject);

```

```

begin

```

```

IndMv:=1;

```

```

CopyBmp.Canvas.CopyRect(Rect(0,0,625,457),

```

```

Image2.Canvas,Rect(0,0,625,457));

```

```

end;

```

```

procedure TForm1.Image2Click(Sender: TObject);

```

```

begin

```

```

if IndCl=1 then
begin
IndMv:=0; IndDrg:=1; IndCl:=0;

Image2.Canvas.CopyRect(Rect(0,0,625,457),
CopyBmp.Canvas,Rect(0,0,625,457));

with Image2.Canvas do
begin
Pen.Mode:=pmMask;

Pen.Color:=TColor(RGB(25,55,55));
Brush.Color:=TColor(RGB(115,205,115));
Ellipse(Xa[Nb]-10,Ya[Nb]-10,Xa[Nb]+10,Ya[Nb]+10);

Pen.Mode:=pmCopy;
end;
end
else
begin
IndDrg:=0;

Image2.Canvas.CopyRect(Rect(0,0,625,457),
CopyBmp.Canvas,Rect(0,0,625,457));

{with Image2.Canvas do
begin
Pen.Color:=TColor(RGB(25,55,205));
Brush.Color:=TColor(RGB(105,105,255));

Ellipse(Xa[Nb]-3,Ya[Nb]-3,Xa[Nb]+3,Ya[Nb]+3);
end; }

```

```

end;
end;

procedure TForm1.Button8Click(Sender: TObject);
var
i,j,k,s,Rd,Gr,Bl : byte;
Xf,Yf,F,A,B,C,A1,B1,cigB,cigBj,bet,E,E1,cigD1 : real;
Stc : string[5];

begin
ColorRect(Bmp,Image2,0,0,625,457,RGB(230,245,255),0);

with Image2.Canvas do
begin
Font.Color:=TColor(RGB(185,35,5));
Font.Size:=6;

for i:=0 to 38 do
begin
for j:=0 to 27 do
begin
F:=0;

E:=0; E1:=0;
cigD1:=Sqr(cigD);

for k:=1 to Ns do
begin
Xf:=Xa[k]-(20+15*i);
Yf:=20+15*j-Ya[k];
Bi[k]:=Pelg(Xf,Yf);
Di[k]:=Distn(Xf,Yf)/100;

```

```
if Di[k]=0 then Di[k]:=0.01;
```

```
cigB:=0.015*Di[k];
```

```
F:=F+(1/Sqr(cigD)+1/Sqr(cigB));
```

```
for s:=1 to Ns do
```

```
begin
```

```
  Xf:=Xa[s]-(20+15*i);
```

```
  Yf:=20+15*j-Ya[s];
```

```
  Bj[s]:=Pelg(Xf,Yf);
```

```
  Dj[s]:=Distn(Xf,Yf)/100;
```

```
  if Dj[s]=0 then Dj[s]:=0.01;
```

```
  cigBj:=0.015*Dj[s];
```

```
  bet:=Bi[k]-Bj[s];
```

```
  E:=E+(1/Sqr(cigD1)+1/(Sqr(cigB)*Sqr(cigBj)))*Sqr(sin(bet/57.3));
```

```
  E1:=E1+(1/(cigD1*Sqr(cigBj))+1/(cigD1*Sqr(cigB)))*Sqr(cos(bet/57.3));
```

```
end;
```

```
end;
```

```
Dmi:=1852*Sqrt(F/(0.5*(E+E1)));
```

```
if Dmi>40 then
```

```
begin
```

```
  Rd:=20; Gr:=20; Bl:=20;
```

```
end
```

```
else
```

```
begin
```

```
  Rd:=230-Round(5*Dmi); Gr:=230-Round(5*Dmi); Bl:=250-Round(5*Dmi);
```

end;

ColorRectBor(Bmp,Image2,20+15*i,20+15*j,35+15*i,35+15*j,
RGB({30,245,255}Rd,Gr,Bl),RGB(Rd-0,Gr-0,Bl-0),0);

if IndShow=1 then

begin

Str(Round(Dmi),Stc);

TextOut(21+15*i,21+15*j,Stc);

end;

end;

end;

Xa[Ns+1]:=Xa[1]; Ya[Ns+1]:=Ya[1];

for i:=1 to Ns do

ColorLine(Bmp,Image2,Xa[i],Ya[i],Xa[i+1],Ya[i+1],RGB(240,230,100),1,0);

Pen.Color:=TColor(RGB(205,55,55));

Brush.Color:=TColor(RGB(255,105,105));

Ellipse(Xa[1]-3,Ya[1]-3,Xa[1]+3,Ya[1]+3);

Pen.Color:=TColor(RGB(25,55,205));

Brush.Color:=TColor(RGB(105,105,255));

for i:=1 to Ns-1 do Ellipse(Xa[i+1]-3,Ya[i+1]-3,Xa[i+1]+3,Ya[i+1]+3);

end;

ColorRectBor(Bmp,Image2,20+15,20+15,35+15,35+15,

RGB(30,245,255),RGB(0,0,0),0);

end;

procedure TForm1.Button14Click(Sender: TObject);

```

var
i,j,k : byte;
Rd,Gr,B1 : byte;
Xf,Yf,F,A,B,C,A1,B1,cigB : real;
Stc : string[5];
Ds : Integer;
A1,Sum : real;

```

```

begin

```

```

Button14.Enabled:=False;

```

```

Button9.Enabled:=True;

```

```

Button9.Visible:=True;

```

```

Button10.Enabled:=True;

```

```

Button10.Visible:=True;

```

```

Button11.Enabled:=True;

```

```

Button11.Visible:=True;

```

```

{Button12.Enabled:=True;}

```

```

Button12.Visible:=True;

```

```

{Button13.Enabled:=True;}

```

```

Button13.Visible:=True;

```

```

Panel1.Visible:=True;

```

```

Panel2.Visible:=True;

```

```

Panel3.Visible:=True;

```

```

Button5.Enabled:=False;

```

```

Button5.Visible:=False;

```

```

Button6.Enabled:=False;

```

```

Button6.Visible:=False;

```

```

Button7.Enabled:=False;

```

```

Button7.Visible:=False;

```

```

Button8.Enabled:=False;

```


Button8.Visible:=False;

Ds:=200; Al:=30/57.3; Sum:=0; Nbs:=3;

Xa[1]:=313; Ya[1]:=229-Ds+30;

Xa[2]:=313-Round(Ds*cos(Al)); Ya[2]:=229+Round(Ds*sin(Al))+30;

Xa[3]:=313+Round(Ds*cos(Al)); Ya[3]:=229+Round(Ds*sin(Al))+30;

{Ds:=170; Al:=30/57.3; Sum:=0; Nbs:=4;

Xa[1]:=313-Ds; Ya[1]:=229-Ds;

Xa[2]:=313+Ds; Ya[2]:=229-Ds;

Xa[3]:=313+Ds; Ya[3]:=229+Ds;

Xa[4]:=313-Ds; Ya[4]:=229+Ds;}

{Ds:=180; Al:=72/57.3; Sum:=0; Nbs:=5;

Xa[1]:=313; Ya[1]:=229+30-Ds;

Xa[2]:=313+Round(Ds*sin(Al)); Ya[2]:=229+30-Round(Ds*cos(Al));

Xa[3]:=313+Round(Ds*sin(2*Al)); Ya[3]:=229+30-Round(Ds*cos(2*Al));

Xa[4]:=313+Round(Ds*sin(3*Al)); Ya[4]:=229+30-Round(Ds*cos(3*Al));

Xa[5]:=313+Round(Ds*sin(4*Al)); Ya[5]:=229+30-Round(Ds*cos(4*Al));}

{Ds:=180; Al:=60/57.3; Sum:=0; Nbs:=6;

Xa[1]:=313; Ya[1]:=229-Ds;

Xa[2]:=313+Round(Ds*sin(Al)); Ya[2]:=229-Round(Ds*cos(Al));

Xa[3]:=313+Round(Ds*sin(2*Al)); Ya[3]:=229-Round(Ds*cos(2*Al));

Xa[4]:=313+Round(Ds*sin(3*Al)); Ya[4]:=229-Round(Ds*cos(3*Al));

Xa[5]:=313+Round(Ds*sin(4*Al)); Ya[5]:=229-Round(Ds*cos(4*Al));

Xa[6]:=313+Round(Ds*sin(5*Al)); Ya[6]:=229-Round(Ds*cos(5*Al));}

with Image2.Canvas do

```

begin
Font.Color:=TColor(RGB(185,35,5));
Font.Size:=6;

for i:=0 to 38 do
begin
for j:=0 to 27 do
begin
F:=0;
A:=0; A1:=0;
B:=0; B1:=0;
C:=0;
for k:=1 to Nbs do
begin
Xf:=Xa[k]-(20+15*i);
Yf:=20+15*j-Ya[k];
Bi[k]:=PeIg(Xf,Yf);
Di[k]:=Distn(Xf,Yf)/100;
if Di[k]=0 then Di[k]:=0.01;

cigB:=0.015*Di[k];

F:=F+(1/Sqr(cigD)+1/Sqr(cigB));

A:=A+Sqr(cos(Bi[k]/57.3)/cigD);
A1:=A1+Sqr(sin(Bi[k]/57.3)/cigB);

B:=B+Sqr(sin(Bi[k]/57.3)/cigD);
B1:=B1+Sqr(cos(Bi[k]/57.3)/cigB);

C:=C+(sin(Bi[k]/57.3)*cos(Bi[k]/57.3))*(1/Sqr(cigD)-1/Sqr(cigB));
end;

```

```
Dmi:=1852*Sqrt(F/((A+A1)*(B+B1)-Sqr(C)));
```

```
Sum:=Sum+Dmi;
```

```
if Dmi>40 then
```

```
begin
```

```
Rd:=20; Gr:=20; Bl:=20;
```

```
end
```

```
else
```

```
begin
```

```
Rd:=220-Round(5*Dmi); Gr:=250-Round(5*Dmi); Bl:=255-Round(5*Dmi);
```

```
end;
```

```
ColorRectBor(Bmp,Image2,20+15*i,20+15*j,35+15*i,35+15*j,
```

```
RGB({30,245,255}Rd,Gr,Bl),RGB(Rd-0,Gr-0,Bl-0),0);
```

```
Str(Round(Dmi),Stc);
```

```
TextOut(21+15*i,21+15*j,Stc);
```

```
end;
```

```
end;
```

```
Xa[Nbs+1]:=Xa[1]; Ya[Nbs+1]:=Ya[1];
```

```
Pen.Color:=TColor(RGB(255,15,15));
```

```
Brush.Color:=TColor(RGB(255,15,15));
```

```
if (Nbs=3) or (Nbs=5) then Ellipse(313-2,229-2+30,313+2,229+30+2)
```

```
else Ellipse(313-2,229-2,313+2,229+2);
```

```
for i:=1 to Nbs do
```

```
ColorLine(Bmp,Image2,Xa[i],Ya[i],Xa[i+1],Ya[i+1],RGB(255,255,255),1,0);
```

```

Pen.Color:=TColor(RGB(255,15,15));
for i:=1 to Nbs do
Ellipse(Xa[i]-3,Ya[i]-3,Xa[i]+3,Ya[i]+3);
end;

```

```

cigMd:=Sum/1092;
Str(Round(cigMd*100),StC);
Panel1.Caption:=Stc;
Dp:=Ds; Dpmx:=Ds+30; Dpmn:=Ds-80;
end;

```

```

procedure TForm1.Button9Click(Sender: TObject);
var
i,j,k : byte;
Rd,Gr,B1 : byte;
Xf,Yf,F,A,B,C,A1,B1,cigB : real;
Stc : string[5];
Ds : Integer;
Al,Sum : real;

```

```

begin
if Nbs<6 then Nbs:=Nbs+1
else Nbs:=3;

```

```

delX:=0;

```

```

case Nbs of

```

```

3 : begin

```

```

    Ds:=200; Al:=30/57.3; Sum:=0;
    Xa[1]:=313; Ya[1]:=229-Ds+30;
    Xa[2]:=313-Round(Ds*cos(Al)); Ya[2]:=229+Round(Ds*sin(Al))+30;
    Xa[3]:=313+Round(Ds*cos(Al)); Ya[3]:=229+Round(Ds*sin(Al))+30;

```

end;

4 : begin

Ds:=170; Al:=30/57.3; Sum:=0;
 Xa[1]:=313-Ds; Ya[1]:=229-Ds;
 Xa[2]:=313+Ds; Ya[2]:=229-Ds;
 Xa[3]:=313+Ds; Ya[3]:=229+Ds;
 Xa[4]:=313-Ds; Ya[4]:=229+Ds;
 end;

5 : begin

Ds:=180; Al:=72/57.3; Sum:=0;
 Xa[1]:=313; Ya[1]:=229+30-Ds;
 Xa[2]:=313+Round(Ds*sin(Al)); Ya[2]:=229+30-Round(Ds*cos(Al));
 Xa[3]:=313+Round(Ds*sin(2*Al)); Ya[3]:=229+30-Round(Ds*cos(2*Al));
 Xa[4]:=313+Round(Ds*sin(3*Al)); Ya[4]:=229+30-Round(Ds*cos(3*Al));
 Xa[5]:=313+Round(Ds*sin(4*Al)); Ya[5]:=229+30-Round(Ds*cos(4*Al));
 end;

6 : begin

Ds:=180; Al:=60/57.3; Sum:=0;
 Xa[1]:=313; Ya[1]:=229-Ds;
 Xa[2]:=313+Round(Ds*sin(Al)); Ya[2]:=229-Round(Ds*cos(Al));
 Xa[3]:=313+Round(Ds*sin(2*Al)); Ya[3]:=229-Round(Ds*cos(2*Al));
 Xa[4]:=313+Round(Ds*sin(3*Al)); Ya[4]:=229-Round(Ds*cos(3*Al));
 Xa[5]:=313+Round(Ds*sin(4*Al)); Ya[5]:=229-Round(Ds*cos(4*Al));
 Xa[6]:=313+Round(Ds*sin(5*Al)); Ya[6]:=229-Round(Ds*cos(5*Al));
 end;
 end;

for i:=1 to Nbs do

begin

Xb[i]:=Xa[i]; Yb[i]:=Ya[i];

end;

Dp:=Ds; Dpmx:=Ds+30; Dpmn:=Ds-80;

Str(Nbs,Stc);

Button9.Caption:='N='+Stc;

with Image2.Canvas do

begin

Font.Color:=TColor(RGB(185,35,5));

Font.Size:=6;

for i:=0 to 38 do

begin

for j:=0 to 27 do

begin

F:=0;

A:=0; A1:=0;

B:=0; B1:=0;

C:=0;

for k:=1 to Nbs do

begin

Xf:=Xa[k]-(20+15*i);

Yf:=20+15*j-Ya[k];

Bi[k]:=Pelg(Xf,Yf);

Di[k]:=Distn(Xf,Yf)/100;

if Di[k]=0 then Di[k]:=0.01;

cigB:=0.015*Di[k];

F:=F+(1/Sqr(cigD)+1/Sqr(cigB));

A:=A+Sqr(cos(Bi[k]/57.3)/cigD);

A1:=A1+Sqr(sin(Bi[k]/57.3)/cigB);

```
B:=B+Sqr(sin(Bi[k]/57.3)/cigD);
```

```
B1:=B1+Sqr(cos(Bi[k]/57.3)/cigB);
```

```
C:=C+(sin(Bi[k]/57.3)*cos(Bi[k]/57.3))*(1/Sqr(cigD)-1/Sqr(cigB));
```

```
end;
```

```
Dmi:=1852*Sqrt(F/((A+A1)*(B+B1)-Sqr(C)));
```

```
Sum:=Sum+Dmi;
```

```
if Dmi>40 then
```

```
begin
```

```
Rd:=20; Gr:=20; Bl:=20;
```

```
end
```

```
else
```

```
begin
```

```
Rd:=220-Round(5*Dmi); Gr:=250-Round(5*Dmi); Bl:=255-Round(5*Dmi);
```

```
end;
```

```
ColorRectBor(Bmp,Image2,20+15*i,20+15*j,35+15*i,35+15*j,
```

```
RGB({30,245,255} Rd,Gr,Bl),RGB(Rd-0,Gr-0,Bl-0),0);
```

```
Str(Round(Dmi),Stc);
```

```
TextOut(21+15*i,21+15*j,Stc);
```

```
end;
```

```
end;
```

```
Xa[Nbs+1]:=Xa[1]; Ya[Nbs+1]:=Ya[1];
```

```
Pen.Color:=TColor(RGB(255,15,15));
```

```
Brush.Color:=TColor(RGB(255,15,15));
```

```

if (Nbs=3) or (Nbs=5) then Ellipse(313-2,229-2+30,313+2,229+30+2)
else Ellipse(313-2,229-2,313+2,229+2);

```

```

for i:=1 to Nbs do
ColorLine(Bmp,Image2,Xa[i],Ya[i],Xa[i+1],Ya[i+1],RGB(255,255,255),1,0);

```

```

Pen.Color:=TColor(RGB(255,15,15));
for i:=1 to Nbs do
Ellipse(Xa[i]-3,Ya[i]-3,Xa[i]+3,Ya[i]+3);
end;

```

```

cigMd:=Sum/1092;
Str(Round(cigMd*100),StC);
Panel1.Caption:=Stc;

```

```

end;

```

```

procedure TForm1.Button10Click(Sender: TObject);
begin
IndD:=1; IndBet:=0;
Button12.Enabled:=True;
Button13.Enabled:=True;
end;

```

```

procedure TForm1.Button11Click(Sender: TObject);
begin
IndBet:=1; IndD:=0;
Button12.Enabled:=True;
Button13.Enabled:=True;
end;

```



```

procedure TForm1.Button12Click(Sender: TObject);
var
  i,j,k : byte;
  Rd,Gr,B1 : byte;
  Xf,Yf,F,A,B,C,A1,B1,cigB : real;
  Stc : string[5];
  Ds : Integer;
  A1,Sum : real;
  Lst : real;

begin
  if IndD=1 then
    begin
      Button13.Enabled:=True;
      if Dp<Dpmx then
        begin
          Dp:=Dp+1;
          Ds:=Dp;
          case Nbs of
            3 : begin
                  A1:=30/57.3; Sum:=0;
                  Xa[1]:=313; Ya[1]:=229-Ds+30;
                  Xa[2]:=313-Round(Ds*cos(A1)); Ya[2]:=229+Round(Ds*sin(A1))+30;
                  Xa[3]:=313+Round(Ds*cos(A1)); Ya[3]:=229+Round(Ds*sin(A1))+30;
                end;
            4 : begin
                  A1:=30/57.3; Sum:=0;
                  Xa[1]:=313-Ds; Ya[1]:=229-Ds;
                  Xa[2]:=313+Ds; Ya[2]:=229-Ds;
                  Xa[3]:=313+Ds; Ya[3]:=229+Ds;
                  Xa[4]:=313-Ds; Ya[4]:=229+Ds;
                end;
          end;
        end;
      end;
    end;
  end;

```

```

end;
5 : begin
    Al:=72/57.3; Sum:=0;
    Xa[1]:=313; Ya[1]:=229+30-Ds;
    Xa[2]:=313+Round(Ds*sin(Al)); Ya[2]:=229+30-Round(Ds*cos(Al));
    Xa[3]:=313+Round(Ds*sin(2*Al)); Ya[3]:=229+30-Round(Ds*cos(2*Al));
    Xa[4]:=313+Round(Ds*sin(3*Al)); Ya[4]:=229+30-Round(Ds*cos(3*Al));
    Xa[5]:=313+Round(Ds*sin(4*Al)); Ya[5]:=229+30-Round(Ds*cos(4*Al));
end;
6 : begin
    Al:=60/57.3; Sum:=0;
    Xa[1]:=313; Ya[1]:=229-Ds;
    Xa[2]:=313+Round(Ds*sin(Al)); Ya[2]:=229-Round(Ds*cos(Al));
    Xa[3]:=313+Round(Ds*sin(2*Al)); Ya[3]:=229-Round(Ds*cos(2*Al));
    Xa[4]:=313+Round(Ds*sin(3*Al)); Ya[4]:=229-Round(Ds*cos(3*Al));
    Xa[5]:=313+Round(Ds*sin(4*Al)); Ya[5]:=229-Round(Ds*cos(4*Al));
    Xa[6]:=313+Round(Ds*sin(5*Al)); Ya[6]:=229-Round(Ds*cos(5*Al));
end;
end;
Lst:=Distn(Xa[2]-Xa[1],Ya[2]-Ya[1]);
Str(Round(Lst),StC);
Panel3.Caption:=Stc;
end
else Button12.Enabled:=False;
end;
if IndBet=1 then
begin
Button13.Enabled:=True;
if (Nbs=3) then
begin
if Dp<Dpmx then
begin

```

```
Dp:=Dp+1;
```

```
Al:=30/57.3; Sum:=0; Ds:=200;
```

```
Xa[1]:=313; Ya[1]:=229-Dp+30;
```

```
Xa[2]:=313-Round(Ds*cos(Al)); Ya[2]:=229+Round(Ds*sin(Al))+30;
```

```
Xa[3]:=313+Round(Ds*cos(Al)); Ya[3]:=229+Round(Ds*sin(Al))+30;
```

```
end
```

```
else Button12.Enabled:=False;
```

```
end;
```

```
if Nbs>3 then
```

```
begin
```

```
if delX<100 then
```

```
begin
```

```
delX:=delX+1;
```

```
Sum:=0;
```

```
case Nbs of
```

```
4 : begin
```

```
    Xa[1]:=Xb[1]+delX;
```

```
    Xa[2]:=Xb[2]+delX;
```

```
    Xa[3]:=Xb[3]-delX;
```

```
    Xa[4]:=Xb[4]-delX;
```

```
end;
```

```
5 : begin
```

```
    Xa[1]:=Xb[1]+delX;
```

```
    Xa[2]:=Xb[2]+delX;
```

```
    Xa[3]:=Xb[3]-delX;
```

```
    Xa[4]:=Xb[4]-delX;
```

```
    Xa[5]:=Xb[5]+delX;
```

```
end;
```

```
6 : begin
```

```

    Xa[1]:=Xb[1]+delX;
    Xa[2]:=Xb[2]+delX;
    Xa[3]:=Xb[3]-delX;
    Xa[4]:=Xb[4]-delX;
    Xa[5]:=Xb[5]-delX;
    Xa[6]:=Xb[6]+delX;
    end;
end;
end
else Button12.Enabled:=False;
end;

{if Dp<Dpmx then
begin
Dp:=Dp+1;

case Nbs of
3 : begin
    Al:=30/57.3; Sum:=0; Ds:=200;
    Xa[1]:=313; Ya[1]:=229-Dp+30;
    Xa[2]:=313-Round(Ds*cos(Al)); Ya[2]:=229+Round(Ds*sin(Al))+30;
    Xa[3]:=313+Round(Ds*cos(Al)); Ya[3]:=229+Round(Ds*sin(Al))+30;
    end;
end;
end
else Button12.Enabled:=False;}
end;

with Image2.Canvas do
begin
Font.Color:=TColor(RGB(185,35,5));
Font.Size:=6;

```

```

for i:=0 to 38 do
begin
for j:=0 to 27 do
begin
F:=0;
A:=0; A1:=0;
B:=0; B1:=0;
C:=0;
for k:=1 to Nbs do
begin
Xf:=Xa[k]-(20+15*i);
Yf:=20+15*j-Ya[k];
Bi[k]:=Pelg(Xf,Yf);
Di[k]:=Distn(Xf,Yf)/100;
if Di[k]=0 then Di[k]:=0.1;
cigB:=0.015*Di[k];

F:=F+(1/Sqr(cigD)+1/Sqr(cigB));

A:=A+Sqr(cos(Bi[k]/57.3)/cigD);
A1:=A1+Sqr(sin(Bi[k]/57.3)/cigB);

B:=B+Sqr(sin(Bi[k]/57.3)/cigD);
B1:=B1+Sqr(cos(Bi[k]/57.3)/cigB);

C:=C+(sin(Bi[k]/57.3)*cos(Bi[k]/57.3))*(1/Sqr(cigD)-1/Sqr(cigB));
end;

Dmi:=1852*Sqrt(F/((A+A1)*(B+B1)-Sqr(C)));

Sum:=Sum+Dmi;

```

```

if Dmi>40 then
  begin
    Rd:=20; Gr:=20; Bl:=20;
  end
else
  begin
    Rd:=220-Round(5*Dmi); Gr:=250-Round(5*Dmi); Bl:=255-Round(5*Dmi);
  end;

```

```

ColorRectBor(Bmp,Image2,20+15*i,20+15*j,35+15*i,35+15*j,
  RGB({30,245,255} Rd,Gr,Bl),RGB(Rd-0,Gr-0,Bl-0),0);

```

```

Str(Round(Dmi),Stc);
TextOut(21+15*i,21+15*j,Stc);
end;
end;

```

```

Xa[Nbs+1]:=Xa[1]; Ya[Nbs+1]:=Ya[1];

```

```

Pen.Color:=TColor(RGB(255,15,15));
Brush.Color:=TColor(RGB(255,15,15));

```

```

if (Nbs=3) or (Nbs=5) then Ellipse(313-2,229-2+30,313+2,229+30+2)
else Ellipse(313-2,229-2,313+2,229+2);

```

```

for i:=1 to Nbs do
  ColorLine(Bmp,Image2,Xa[i],Ya[i],Xa[i+1],Ya[i+1],RGB(255,255,255),1,0);

```

```
Pen.Color:=TColor(RGB(255,15,15));  
for i:=1 to Nbs do  
  Ellipse(Xa[i]-3,Ya[i]-3,Xa[i]+3,Ya[i]+3);  
end;  
  
cigR1:=Sum/1092;  
Str(Round(cigR1*100),StC);  
Panel2.Caption:=Stc;  
end;  
  
end.
```

Список публікацій здобувача

1. Ворохобин И.И. Оценка навигационной безопасности при плавании судов в стесненных водах / И. И. Ворохобин, **Ю. В. Казак**, В. В. Северин – LAP LAMBERT Academic Publishing, – 2018. - 239 с.
2. Ворохобин И.И. Эквивалентность оценки вероятности безаварийного плавания судна в стесненном районе / И. И. Ворохобин, В. В. Северин, **Ю. В. Казак** // Судовождение: Сб. научн. трудов. ОНМА, Вып. 25. – Одесса: «ИздатИнформ», 2015. - С. 40-47.
3. Ворохобин И.И. Количественная оценка безопасности судовождения / И.И. Ворохобин, В. В. Северин, **Ю. В. Казак** // Автоматизация судовых технических средств: научн. - техн. сб. – 2015. – Вып. 21. Одесса: ОНМА. – С. 34 – 39.
4. Северин В. В. Стохастическая характеристика бокового отклонения судна при проводке по заданному маршруту / В. В. Северин, **Ю. В. Казак** // Автоматизация судовых технических средств: научн. -техн. сб. – 2016. – Вып. 22. Одесса: НУ"ОМА". – С. 92 – 96.
5. Казак Ю. В. Оценка векториальной погрешности поворота судна и минимизация ее величины / **Ю. В. Казак**, В. В. Северин // Автоматизация судовых технических средств: научн.- техн. сб. – 2017. – Вып. 23. Одесса: НУ"ОМА". – С. 37 – 43.
6. Ворохобин И.И. Векториальные погрешности, возникающие при повороте судна / И. И. Ворохобин, **Ю. В. Казак** // Судовождение: Сб. научн. трудов: НУ"ОМА", Вып. 26. – Одесса: «ИздатИнформ», 2016. - С. 60-64.
7. Казак Ю.В. Влияние погрешности перекладки пера руля на точность поворота судна/ Ю. В. Казак // Судовождение: Сб. научн. трудов.: НУ"ОМА", Вып. 27. – Одесса: «ИздатИнформ», 2017. - С. 96 - 101.
8. Казак Ю.В. Учет динамических моделей вращательного движения судна при обеспечении безопасности судовождения / Ю.В. Казак, Г. Е. Калиниченко //

Судовождение: Сб. научн. трудов. НУ «ОМА», Вып. 28. – Одесса: «ИздатИнформ», 2018. - С. 63-69.

9. Ворохобин И.И. Плотность распределения векториальной погрешности поворота судна / И. И. Ворохобин, В. В Северин., **Ю. В. Казак** // Эксплуатация, безопасность и экономика водного транспорта. Вестник Государственного морского университета им. адмирала Ф. Ф. Ушакова. Новороссийск. – 2017. – выпуск 3 (84). – С. 65 - 69.

10. Ворохобин И. И. Траекторная погрешность поворота судна и способы снижения ее величины / И. И. Ворохобин, **Ю. В. Казак**, Северин В. В. // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, V (14), Issue: 132, 2017. - С.101 – 105.

11. Астайкин Д.В. Сравнение способов оценки безопасности плавания в стесненных районах / Д. В. Астайкин, В. В. Северин, **Ю. В. Казак** // East European Scientific Journal, №11 (27), 2017, part 1. - С. 31-39. (SCOPUS)

12. Казак Ю.В. Определение величины векториальной погрешности поворота судна / **Ю. В. Казак**, В. В. Северин. // Развитие науки в XXI веке: Материалы XXVII международной научно-практической конференции, 15сентября 2017 - Харьков: научно-информационный центр «Знание», 2017. – С. 34-38.

13. Казак Ю.В. Зависимость погрешности бокового отклонения судна от траекторной погрешности поворота судна / Ю.В. Казак // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, V (16), Issue: 148, 2017.- С. 75-77.

14. Ворохобин И. И. Определение вероятности обеспечения безаварийного плавания судов в стесненных районах / И. И. Ворохобин, В. В. Северин, **Ю. В. Казак** //Материалы научно-методологической конференции «Морські перевезення та інформаційні технології в судноплавстві», - 18-19 листопада 2014, Одеса. – С. 160-163.

15. Ворохобин И. И. Определение закона распределения бокового

отклонения судна / И. И. Ворохобин, В. В. Северин, **Ю. В. Казак** // Материалы научно-методологической конференции „Морські перевезення та інформаційні технології в судноплавстві”, - 19-20 листопада 2015, Одеса. – С. 117-119.

16. Казак Ю. В. Зависимость точности поворота судна от погрешности перекладки пера руля. / Ю. В. Казак // Річковий та морський транспорт: інфраструктура, судноплавство, перевезення, безпека: Матеріали наук.-техн. конф., 16-17 листопада 2016 – Одеса : ОНМА, 2016. – С. 10–15.

17. Казак Ю. В. Учет динамических моделей вращательного движения судна при обеспечении безопасности судовождения / **Ю. В. Казак**, Г. Е. Калиниченко // Транспортні технології (Морський та річковий флот): інфраструктура, судноплавство, перевезення, автоматизація: Матеріали наук.-техн. конф., 16-17 листоп. 2017 – Одеса: НУ «ОМА», 2017. – С. 99 - 102.

18. Ворохобин И. И. Формирование процедуры оценки вероятности безаварийного плавания судна в стесненных районах/ И. И. Ворохобин, В. В. Северин, **Ю. В. Казак** // Материалы VII Международной научно-методологической конференции «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2015)», - 26-28 мая 2015, Херсон. – С. 99-102.

19. Северин В. В. Определение закона распределения бокового отклонения судна / В. В. Северин, **Ю. В. Казак** // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2016): Матеріали VIII Міжнародної наук.-практ. конф., 24-26 травня. 2016 – Херсон: ХДМА, 2016. – С. 139–145.

20. Казак Ю. В. Влияние погрешности перекладки руля на точности поворота судна / Ю. В. Казак // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2017): Матеріали IX Міжнародної наук. - практ. конф., 23-25 травня. 2017 – Херсон: ХДМА, 2017. – С. 112–114.

21. Ворохобин И. И. Векториальная погрешность и ее плотность распределения / И. И. Ворохобин, В. В. Северин, **Ю. В. Казак** // Материалы Всеукраинской научно-технической конференции с международным участием. 17-18 мая 2017 г., Николаев, НУК, 2017.- С. 25 – 27.

Відомості про апробацію результатів дисертації.

Основні результати і положення роботи доповідалися, обговорювалися і були схвалені на науково-практичних, науково-технічних і науково-методичних конференціях:

науково-методологічна конференція „Морські перевезення та інформаційні технології в судноплавстві” (Одеса, 18-19 листопада 2014 р.), науково-методологічна конференція „Морські перевезення та інформаційні технології в судноплавстві” (Одеса, 19-20 листопада 2015 р.), науково-технічна конференція «Річковий та морський транспорт: інфраструктура, судноплавство, перевезення, безпека » (Одеса, 16-17 листопада 2016 р.), науково-технічна конференція «Річковий та морський транспорт: інфраструктура, судноплавство, перевезення, безпека» (Одеса, 16-17 листопада 2017 р.), VI Міжнародна науково - практична конференція «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2015)» (Херсон, 26-28 травня 2015 р.), VIII Міжнародна науково - практична конференція «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2016)» (Херсон, 24-26 травня 2016 р.), IX Міжнародна науково - практична конференція «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2017)» (Херсон, 23-25 травня 2017 р.), Всеукраїнська науково-технічна конференція «Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд» (Миколаїв, 17-18 травня 2017 р.), XXVII Международная конференция «Развитие науки в XXI веке» (Харків, 15 вересня 2017 р.).

Акти впровадження результатів дисертації

А К Т В П Р О В А Д Ж Е Н Н Я

Цим актом підтверджується, що в приватному вищому навчальному закладі «Інститут післядипломної освіти» «Одеський морський тренажерний центр» одержали впровадження в навчальний процес спосіб зниження траєкторної похибки повороту судна з урахуванням його динаміки та метод відображення навігаційної ситуації на електронній карті, які розроблені в дисертаційній роботі Казака Юрія Владиславовича на тему „Розробка способу урахування траєкторної похибки повороту судна при оцінці безпеки судноводіння”.

Директор

Інституту післядипломної освіти
«Одеський морський тренажерний центр»,

к. т. н., професор

5.09.2018 р.



Пашенко Ю.В.



«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Перший проректор НУ „ОМА”

професор Шемякін О.М.
(П.І.Б.)

«__» _____ 2018 р.

А К Т

про використання результатів дисертаційної роботи здобувача Казака Юрія Владиславовича на тему „Розробка способу урахування траєкторної похибки повороту судна при оцінці безпеки судноводіння” у навчальному процесі університету

Ми, що нижче підписалися, начальник навчального відділу Пархоменко М. М., декан судноводійного факультету д. т. н., професор Цимбал М. М. і завідуючий кафедрою Управління судном к. т. н., доцент Бурмака І. О. склали цей акт в тому, що результати кандидатської дисертації здобувача Казака Юрія Владиславовича на тему „Розробка способу урахування траєкторної похибки повороту судна при оцінці безпеки судноводіння” впроваджені у навчальний процес на кафедрі Управління судном в дисципліні “Маневрування і управління судном”.

Начальник навчального
відділу

Пархоменко М. М.

Декан судноводійного факультету,
д. т. н., професор

Цимбал М. М.

Завідуючий кафедрою Управління судном,
к. т. н., доцент

Бурмака І.О.