

Національний університет «Одеська морська академія»
Міністерства науки і освіти України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Калініченко Євгеній Володимирович

УДК 656.61.052

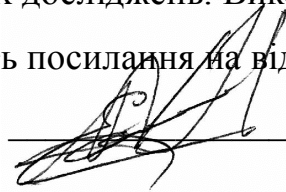
ДИСЕРТАЦІЯ

ВДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ ІНФОРМАЦІЙНОГО ЗАБЕЗЧЕННЯ МАНЕВРУВАННЯ СУДЕН

Спеціальність 05.22.13 – навігація та управління рухом

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
(271 «Річковий та морський транспорт»)

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



Калініченко Є. В.

Науковий керівник д. т. н., професор Мальцев А.С.

АНОТАЦІЯ

Калініченко Є.В. Вдосконалення алгоритмів інформаційного забезпечення маневрування суден. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.22.13 – навігація та управління рухом (271 «Річковий та морський транспорт»). – Національний Університет "Одеська морська академія", Одеса, 2017.

В роботі виконано огляд літературних джерел та проведено аналіз основних напрямків вирішення проблеми забезпечення безпеки судноводіння і зниження аварійності суден, в результаті якого було виявлено, що основними напрямками вирішення даної проблеми є вдосконалення методів управління судном під час плавання в стислих районах та розробка безпечних методів розходження суден при їх небезпечних зближеннях. Обґрунтовано основні напрями дисертаційного дослідження, які присвячені проблемі вдосконалення комп'ютерного інформаційного забезпечення маневрування судна. Об'єктом дослідження є маневрування судна, а предметом дослідження є методи вибору параметрів маневру судна.

Методологічна структура дисертаційного дослідження відображена в технологічній карті, за допомогою якої здійснено методологічне забезпечення дисертаційної роботи. Мета дисертаційного дослідження і його головне завдання, яка розділена на три незалежні складові задачі, представлені в технологічній карті.

Запропоновано і підтверджено робочу гіпотезу наукового дослідження, показано, що отримані наукові результати дисертаційної роботи є рішеннями незалежних складових задач. Також сформульовано основне наукове положення, показано практичну цінність і значимість дисертаційного дослідження, а також наведено зміст натурного експерименту. Наведено методику вирішення поставлених в роботі задач, яка описує основні етапи наукового дос-

лідження за темою дисертації і являє собою узагальнений алгоритм реалізації дисертаційного дослідження, що включає розробку теоретичних моделей і проведення імітаційного моделювання.

В основній частині дисертації розглянуто теоретичні основи маневрування судна, отримані математичні моделі, що враховують динаміку судна при зміні його курсу і швидкості. Особливості поворотності судна описані п'ятьма моделями його обертального руху з різним ступенем урахування істотних чинників, аж до врахування часу перекладки пера керма, які з різним рівнем адекватності відображають рух судна в залежності від кута перекладки пера керма.

По експериментальним даним обертального руху судна встановлено, що з прийнятною для практичного застосування точністю рух судна при повороті може бути описано третьою динамічною моделлю, в якій зміна курсу судна формалізується диференціальним рівнянням третього порядку.

Вирішено чотири задачі визначення параметрів повороту судна при програмній зміні його курсу і в разі ухилення від цілі, що небезпечно зближується. При цьому розглянуто ситуацію невеликих змін курсу, коли можна вважати швидкість судна при повороті незмінною, і ситуація значного повороту судна з падінням швидкості на циркуляції.

Отримано коректні вирази, що характеризують рух судна при активному і пасивному гальмуванні. Розглянуто задачу зупинки судна в заданій точці при активному і пасивному гальмуванні з урахуванням течії в районі маневрування. Аналітичні вирази для розрахунку параметрів маневрів представлені у вигляді, зручному для застосування чисельних методів розрахунку.

Для формування інформаційної системи забезпечення маневрування судна в дисертаційній роботі розглянута програмна реалізація шести найважливіших задач маневрування судна з урахуванням характеристик поворотності і інерційно-гальмівних характеристик. Для кожної із задач розроблений алгоритм її рішення і приведені необхідні аналітичні вирази. На базі складеного

алгоритму рішення кожній із задач розроблений модуль комп'ютерної програми, який дозволяє розрахувати параметри маневру і провести його імітаційне моделювання.

Перші дві задачі, можуть бути застосованими при невеликих поворотах судна, коли падінням його швидкості на циркуляції можна нехтувати. Перша задача дозволяє розрахувати моменти часу початку і закінчення повороту судна з однієї ділянки програмної траєкторії руху на наступну ділянку з урахуванням характеристик поворотності судна. Друга задача дозволяє розрахувати курс ухилення від цілі при небезпечному зближенні, а також моменти часу початку і закінчення маневру ухилення.

Чергові третя і четверта задачі аналогічні попереднім двом, з тією лише різницею, що вибір параметрів маневрів розраховується з урахуванням падіння швидкості судна при повороті. Причому при імітаційному моделюванні здійснюється відображення траєкторії судна, як при урахуванні падіння швидкості судна, так і без такого урахування.

П'ята задача передбачає використання пасивного гальмування для зупинки судна у вибраній позиції, причому виконується розрахунок моментів часу початку гальмування і його закінчення. Зупинка судна активним гальмуванням складає зміст шостої задачі з розрахунком параметрів маневру гальмування. У задачах гальмування враховується течія в районі маневрування судна. Для моделювання маневрів судна використовувалися параметри поворотності і інерційності реальних суден, одержані експериментально в реальних умовах експлуатації.

У заключному розділі роботи наведено способи визначення параметрів маневру судна з експериментальних даних, отриманих у натурних спостереженнях. В якості маневрів судна розглянуті його повороти, активне і пасивне гальмування. Отримано значення постійних часу T_1 і T_2 поворотності судна, що описують його обертальний рух третьою динамічною моделлю, за вихідними даними декількох поворотів з різними кутами перекладки пера керма. Для розрахунку використовувався метод найменших квадратів, що дозволяє

скласти нелінійні нормальні рівняння, розв'язання яких знаходиться методом Ньютона. Моделювання повороту судна з отриманими параметрами показали хорошу збіжність результатів моделювання з експериментальним матеріалом.

Розглянуто альтернативний метод розрахунку параметрів активного і пасивного гальмування судна: дистанції і часу вибігу судна. Отримано аналітичні вирази для розрахунку часу і дистанції вибігу судна. За допомогою запропонованого альтернативного методу проведено розрахунок параметрів теплохода «Уелен», значення яких практично збігаються зі значеннями, отриманими при швартовних випробуваннях.

Розглянуто вплив попутної і зустрічної течій на довжину гальмівного шляху судна, отримані формульні вирази для розрахунку характеристик гальмування. Проведена їх оцінка для конкретного судна. Виконано розрахунок інерційно-гальмівних характеристик контейнеровоза "ELQUI" для завантаженого стану і у баласті. Представлені у табличному вигляді залежності величини і часу вибігу судна при активному гальмуванні від швидкості судна перед гальмуванням. Крім табличних залежностей наведені графічні криві, що відображають залежність параметрів від швидкості судна, отриманих за допомогою комп'ютерної програми.

В результаті дисертаційного дослідження встановлено, що розрахунок параметрів активного та пасивного гальмування альтернативним підходом дає змогу підвищити точність результатів, яка знаходиться в межах 3 % відносно експериментальних даних.

Наукова новизна отриманих в дисертації результатів полягає в створенні нового методу визначення параметрів маневру судна за допомогою процедур, реалізованих в комп'ютерному модулі, який відрізняється урахуванням динаміки судна і верифікацією динамічних моделей маневрування судна даними натурного експерименту.

У дисертаційній роботі:

- вперше розроблені методи розрахунку параметрів маневрів судна в залежності від його динаміки;

- вперше запропоновано спосіб розрахунку інерційно-гальмівних характеристик судна з використанням альтернативного підходу;
- отримали подальший розвиток методи визначення параметрів маневру судна за рахунок їх комп'ютерної реалізації;
- вдосконалені процедури верифікації динамічних моделей маневрування судна даними натурного експерименту.

Практичне значення отриманих в дисертації результатів полягає в тому, що вони можуть бути використані на судах в процесі експлуатації, а також 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 28.02.2017 р.), крїїнговою компанією «ВіШіпс Україна» для навчання, підготовки і перепідготовки офіцерів морських суден по напрямку «Судноводіння» з метою забезпечення безпеки плавання (акт впровадження від 27.02.2017 р.). Матеріали дисертаційного дослідження використовуються в навчальному процесі при викладанні дисципліни «Забезпечення навігаційної безпеки плавання» (акт від 09.03.2017 р.).

Ключові слова: безпека судноводіння, маневрування суден, динамічні моделі поворотності судна, математичні моделі гальмування, інформаційне забезпечення маневрування судна.

Основні результати дисертаційного дослідження здобувача опубліковані в наступних наукових працях:

Основні наукові результати дисертації.

1. Яркін П.И. Определение характеристик активного торможения судна. Альтернативный подход/ Яркін П.И., Калиниченко Е.В. // Сб. научн. трудов: «Судовождение», ОНМА. – Одесса: ФЕНИКС, 2003. – Вып. 6. – С. 159-165.

2. Яркин П.И. Расчет безопасной скорости и минимально-допустимого расстояния сближения судов/ Яркин П.И., Калиниченко Е.В. // Судовождение: Сб. научн. трудов, ОНМА. – Вып. 7. – Одесса: Фенікс, 2004. С. 87-92.

3. Калиниченко Е.В. Методика расчета инерционно-тормозных характеристик морского судна при реверсе/ Калиниченко Е.В.// Судовождение: Сб. научн. трудов, ОНМА. – Вып. 9. – Одесса: Фенікс, 2005. С. 36-44.

4. Калиниченко Е.В. Практический расчет инерционно-тормозных характеристик судна/ Калиниченко Е.В.// Судовождение: Сб. научн. трудов, ОНМА. – Вып. 10. – Одесса: Фенікс, 2005. С. 58-63.

5. Яркин П.И. Определение характеристик разгона и подтормаживания судна. Альтернативный подход/ Яркин П.И., Мальцев А.С., Калиниченко Е.В. // Вісник ОНМУ: Сб. научн. трудов, ОНМУ, – Вып. 13. – Одесса: Фенікс, 2007. С. 63-71.

6. Калиниченко Е.В. Расчет моментов времени начала и окончания поворота судна с учетом характеристик его поворотливости/ Калиниченко Е.В.// Судовождение: Сб. научн. трудов, ОНМА, Вып. 24. – Одесса: «ИздатИнформ», 2014 – С. 68-74.

7. Калиниченко Е.В. Учет в системах принятия решений динамических характеристик судна при расчете момента времени его поворота на программный курс/ Калиниченко Е.В. // Проблеми техніки: Науково-виробничий журнал. – 2014. № 1. – С. 118-122.

8. Калиниченко Е.В. Учет характеристик поворотливости при расчете параметров поворота судна/ Калиниченко Е.В. // Водный транспорт. – 2014. №2 (20).– С. 63 – 67.

9. Калиниченко Е.В. Обеспечение требуемой точности поворота судна способом перемещения его криволинейной траектории / Калиниченко Е.В. //Автоматизация судовых технических средств. – 2014. – № 20. – С. 52-58.

10. Y. Kalinichenko. 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.

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації.

11. Калиниченко Е.В. Определение времени и скорости разгона судна на задний ход // Материалы международной научн.-техн. конференции. Часть 1. ОНМА, 2004.

12. Калиниченко Е.В. Выбор момента времени начала поворота с учетом падения скорости судна на циркуляции/ Калиниченко Е.В., Пятаков Э.Н. // Морські перевезення та інформаційні технології в судноплавстві: Матеріали наук.-техн. конф., 18-19 листоп. 2014 – Одеса: ОНМА, 2014. – С. 176–179.

13. Калиниченко Е.В. Обеспечение безопасности расхождения маневром изменения курса/ Калиниченко Е.В., Пятаков Э.Н. // Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд: Матеріали Всеукраїнської наук.-тех. конф., 21-23 травня 2014 р. – Миколаїв: МУК, 2014. – С. 40–42.

14. Калиниченко Е.В. Расчет параметров поворота судна/ Калиниченко Е.В. // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2014): Матеріали VI Міжнародної наук.-практ. конф., 27-29 травня. 2014 – Херсон: ХДМА, 2014. – С. 123-126.

15. Калиниченко Е.В. Совершенствование расчетных методов определения инерционно-тормозных характеристик судна / Калиниченко Е.В. // Стан та проблеми судноводіння: Матеріали наук.-техн. конф., 24-26 жовтня 2005 – Одеса: ОНМА, 2005. – С. 58–60.

16. Калиниченко Е.В. Имитационное моделирование активного торможения судна с учетом течения/ Калиниченко Е.В. // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2015): Матеріали VI Міжнародної наук.-практ. конф., 26-28 травня. 2015 – Херсон: ХДМА, 2015. – С. 106-109.

ANNOTATION

Kalinichenko E.V. Perfection of algorithms of the informative providing of manoeuvring of ships. It is Qualifying scientific labor on rights for a manuscript. Dissertation on the receipt of scientific degree of candidate of engineering sciences (Ph.D.) after speciality 05.22.13 – navigation and traffic control (271 “River and sea transport”). It is the National University "Odessa marine academy", Odessa, 2017.

In work the review of literary sources is executed and conducted the analysis of basic directions of decision of problem of providing of safety of navigation and decline of accident rate of ships, which it was exposed as a result of, that perfections of methods of management by a ship are basic directions of decision of this problem during sailing in the compressed districts and development of safe methods of divergence of ships at their dangerous rapprochements. It is grounded basic directions of dissertation research, which are devoted to the problem of perfection of the computer informative providing of manoeuvring of ship. Manoeuvring of ship is a research object, and the methods of choice of parameters of manoeuvre of ship are the article of research.

The methodological structure of dissertation research is represented in a technological card, which the methodological providing of dissertation work is carried out by. Purpose of dissertation research and his above all task, which it is parted on three independent component tasks, represented in a technological card.

It is offered and confirmed the working hypothesis of scientific research, shown that the got scientific dissertation job performances are the decisions of independent component tasks. A substantive scientific provision is also formulated, shown a practical value and meaningfulness of dissertation research, and also resulted maintenance of model experiment. The method of decision the problems set in work, which describes the basic stages of scientific research after the theme of dissertation and is the generalized algorithm of realization of dissertation research,

is resulted, that includes development of theoretical models and conducting of imitation design.

Theoretical bases of maneuvering of ship, got mathematical models which take into account the dynamics of ship at the change of his course and speed, are considered in basic part of dissertation. The features of turn of ship are described by five models of his rotatory motion with a different degree of account of substantial factors, up to the account of time of movement of feather of helm, which with a different level of adequacy represent motion of ship depending on the corner of feather of helm.

On experimental information of rotatory motion of ship is certain that with exactness acceptable to the practical necessities motion of ship at a turn can be described by the third dynamic model, in which the change of course of ship is formalized by differential equalization of the third order.

Four tasks of determination of parameters of turn of ship are considered at the programmatic change of his course and in the case of deviation from a purpose, that is dangerously drawn together. The situation of small changes of course is thus considered, when it is possible to consider speed of ship at a turn unchanging, and situation of considerable turn of ship with falling of speed on circulation.

Correct expressions which characterize motion of ship at the active and passive braking are got. The task of stop of ship is considered in the set point at the active and passive braking taking into account the flow in the district of maneuvering. Analytical expressions for the calculation of parameters of maneuvers are represented in a kind comfortable for application of numeral methods of calculation.

For forming of the informative system of providing of maneuvering of ship in dissertation work the considered programmatic realization of six major tasks of maneuvering of ship taking into account descriptions of turning and inertia-brake descriptions. For each of tasks the developed algorithm of its decision and resulted necessary analytical expressions. On the base of the made algorithm of decision to

each of tasks the developed computer program unit which allows to expect the parameters of maneuver and conduct his imitation design.

First two tasks, can be applied at the small turns of ship, when by falling of his speed it is possible to scorn on circulation. The first task allows to expect moments of time of beginning and ending of turn of ship from one area of programmatic trajectory of motion on a next area taking into account descriptions of turning of ship. The second task allows to expect course of deviation from a purpose at dangerous rapprochement, and also moments of time of beginning and ending of maneuver of deviation.

Duty third and fourth tasks similar previous two, with that only difference, that the choice of parameters of maneuvers settles accounts taking into account falling of speed of ship at a turn. Thus at the imitation design the reflection of trajectory of ship is carried out, both at the account of falling of speed of ship and without such account.

A fifth task foresees the use of the passive braking for the stop of ship in the chosen position, the calculation of moments of time of beginning of braking and his ending is thus executed. The stop of ship makes maintenance of sixth task the active braking with the calculation of parameters of maneuver of braking. The flow in the district of maneuvering of ship is taken into account in the tasks of braking. For the design of maneuvers of ship the parameters of turning and inertia of the real ships were used, got experimentally in the real external environments.

In the final section of work the methods of determination of parameters of maneuver of ship are resulted from the experimental information got in the model supervisions. In quality the maneuvers of ship his turns, active and passive braking, are considered. The value of permanent is got to time T_1 and T_2 turn of ship, that describe his rotatory motion by the third dynamic model, from basic data of a few turns with different corners of feather of helm. For a calculation a least-squares method was used, that allows to work out nonlinear normal equations, the decision of which is the method of Newton. The designs of turn of ship with the

got parameters showed good co-ordination of results of design with experimental material.

The alternative method of calculation of parameters of the active and passive braking of ship is considered: distance and time of braking ship. Analytical expressions are got for the calculation of time and distance of braking ship. By the offered alternative method the calculation of parameters of the motor ship «Uelen» is conducted, the values of which practically coincide with the values got at the mooring tests.

Influence of passing and head tides is considered on length of braking distance of ship, got analytical expressions for the calculation of descriptions of braking. Their estimation for a concrete ship is conducted. The calculation of inertia-brake descriptions of m/v "ELQUI" is executed for the loaded state and in a ballast. Dependences of size and time of braking ship at the active braking from speed of ship before braking are represented in a tabular kind. Except for tabular dependences there are the resulted graphic curves which represent dependence of parameters on speed of ship, got by the computer program.

The scientific novelty of the results got in dissertation consists in creation of a new method of determination of parameters of maneuver of ship by the procedures, realized in the computer module which differs by the account of dynamics of ship and verification of dynamic models of maneuvering of ship by information of model experiment.

In dissertation work:

- first developed methods of calculation of parameters of maneuvers of ship depending on his dynamics;
- the method of calculation of inertia-brake descriptions of ship is first offered with the use of alternative approach;
- the methods of determination of parameters of maneuver of ship due to their computer realization got subsequent development;
- improved procedures of verification of dynamic models of maneuvering of ship by information of model experiment.

The practical value of the results got in dissertation consists in that they can be used on ships in the process of exploitation, and also developers of the ship navigation informative systems.

The practical results of dissertation research are inculcated by private higher educational establishment «Institute of after diploma education» the «Odessa marine trainer center» for preparation of officers (act of introduction from 28.02.2017), by the company «VShips Ukraine» for studies, preparation and re-training of officers of marine ships to direction of «Navigator» with the purpose of providing of safety of sailing (act of introduction from 27.02. 2017). Materials of dissertation research are used in an educational process at teaching of discipline of «Providing of navigation safety of sailing» (act from 09.03.2017).

Keywords: safety of navigation, maneuvering of ships, dynamic models of turning of ship, mathematical models of braking, informative providing of maneuvering of ship.

The basic results of dissertation research of bread-winner are published in the following scientific labours:

Basic scientific results of dissertation.

1. Яркий П.И. Определение характеристик активного торможения судна. Альтернативный подход/ Яркий П.И., Калиниченко Е.В. // Сб. научн. трудов: «Судовождение», ОНМА. –Одесса: ФЕНИКС, 2003. – Вып. 6. – С. 159-165.

2. Яркий П.И. Расчет безопасной скорости и минимально-допустимого расстояния сближения судов/ Яркий П.И., Калиниченко Е.В. // Судовождение: Сб. научн. трудов, ОНМА. – Вып. 7. – Одесса: Фенікс, 2004. С. 87-92.

3. Калиниченко Е.В. Методика расчета инерционно-тормозных характеристик морского судна при реверсе/ Калиниченко Е.В.// Судовождение: Сб. научн. трудов, ОНМА. – Вып. 9. – Одесса: Фенікс, 2005. С. 36-44.

4. Калиниченко Е.В. Практический расчет инерционно-тормозных характеристик судна/ Калиниченко Е.В.// Судовождение: Сб. научн. трудов, ОНМА. – Вып. 10. – Одесса: Фенікс, 2005. С. 58-63.

5. Яркин П.И. Определение характеристик разгона и подтормаживания судна. Альтернативный подход/ Яркин П.И., Мальцев А.С., Калиниченко Е.В. // Вісник ОНМУ: Сб. научн. трудов, ОНМУ,– Вып. 13. – Одесса: Фенікс, 2007. С. 63-71.

6. Калиниченко Е.В. Расчет моментов времени начала и окончания поворота судна с учетом характеристик его поворотливости/ Калиниченко Е.В.// Судовождение: Сб. научн. трудов, ОНМА, Вып. 24. – Одесса: «ИздатИнформ», 2014 – С. 68-74.

7. Калиниченко Е.В. Учет в системах принятия решений динамических характеристик судна при расчете момента времени его поворота на программный курс/ Калиниченко Е.В. // Проблеми техніки: Науково-виробничий журнал. – 2014. № 1. – С. 118-122.

8. Калиниченко Е.В. Учет характеристик поворотливости при расчете параметров поворота судна/ Калиниченко Е.В. // Водный транспорт. – 2014. №2 (20).– С. 63 – 67.

9. Калиниченко Е.В. Обеспечение требуемой точности поворота судна способом перемещения его криволинейной траектории / Калиниченко Е.В. //Автоматизация судовых технических средств. – 2014. – № 20. – С. 52-58.

10. Y. Kalinichenko. 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.

Publications which certify approbation of materials of dissertation.

11. Калиниченко Е.В. Определение времени и скорости разгона судна на задний ход // Материалы международной научн.-техн. конференции. Часть 1. ОНМА, 2004.

12. Калиниченко Е.В. Выбор момента времени начала поворота с учетом падения скорости судна на циркуляции/ Калиниченко Е.В., Пятаков Э.Н. // Морські перевезення та інформаційні технології в судноплавстві: Матеріали наук.-техн. конф., 18-19 листоп. 2014 – Одеса: ОНМА, 2014. – С. 176–179.

13. Калиниченко Е.В. Обеспечение безопасности расхождения маневром изменения курса/ Калиниченко Е.В., Пятаков Э.Н. // Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд: Матеріали Всеукраїнської наук.-тех. конф., 21-23 травня 2014 р. – Миколаїв: МУК, 2014. – С. 40–42.

14. Калиниченко Е.В. Расчет параметров поворота судна/ Калиниченко Е.В. // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2014): Матеріали VI Міжнародної наук.-практ. конф., 27-29 травня. 2014 – Херсон: ХДМА, 2014. – С. 123-126.

15. Калиниченко Е.В. Совершенствование расчетных методов определения инерционно-тормозных характеристик судна / Калиниченко Е.В. // Стан та проблеми судноводіння: Матеріали наук.-техн. конф., 24-26 жовтня 2005 – Одеса: ОНМА, 2005. – С. 58–60.

16. Калиниченко Е.В. Имитационное моделирование активного торможения судна с учетом течения/ Калиниченко Е.В. // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2015): Матеріали VI Міжнародної наук.-практ. конф., 26-28 травня. 2015 – Херсон: ХДМА, 2015. – С. 106-109.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	18
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРИ ЩОДО ОСНОВНИХ АСПЕКТІВ ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ СУДНОВОДІННЯ І ВИБІР ТЕМИ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ.....	23
1.1. Аналіз літературних джерел щодо вирішення проблеми забезпечення безпечного плавання суден	23
1.2. Вибір основного напрямку дисертаційного дослідження	41
1.3. Висновки за першим розділом	42
РОЗДІЛ 2. ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ	43
2.1. Визначення теми наукового дослідження	43
2.2. Методи дослідження дисертаційної роботи.....	45
2.3. Методика проведення дослідження за темою дисертації.....	50
2.4. Висновки за другим розділом	51
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ПАРАМЕТРІВ МАНЕВРІВ СУДНА ВІД ЙОГО ДИНАМІКИ	53
3.1. Динамічні моделі поворотності судна.....	53
3.2. Розрахунок часових параметрів повороту судна з однієї програмної ділянки траєкторії на другу.....	79
3.3. Особливості розрахунку моментів часу початку і закінчення повороту судна при розходженні з ціллю на заданій дистанції.....	83
3.4. Врахування падіння швидкості судна при повороті	86
3.5. Розрахунок параметрів маневру судна зміною швидкості	89
3.6. Висновки за третім розділом	97
РОЗДІЛ 4. СІНТЕЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ В СУДНОВІЙ ІНФОРМАЦІЙНІЙ КОМП'ЮТЕРНІЙ СИСТЕМІ	99

4.1. Імітаційна модель розрахунку параметрів повороту судна з одного програмного курсу траєкторії на наступний курс	100
4.2. Імітаційне моделювання ситуації повороту судна при розходженні з ціллю на заданій дистанції	107
4.3. Врахування в імітаційних моделях падіння швидкості судна при повороті.....	116
4.4. Імітаційна модель зупинки судна в заданій точці активним і пасивним гальмуванням.....	120
4.5. Висновки за четвертим розділом	128
РОЗДІЛ 5. РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК ПОВОРОТНОСТІ І ІНЕРЦІЙНО-ГАЛЬМІВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СУДНА ЗА ДАНИМИ НАТУРНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ	130
5.1. Визначення характеристик T_1 та T_2 поворотності судна з натурних спостережень в реальних умовах експлуатації судна.....	130
Знайдемо граничні значення $\bar{T}_2$, для чого з (5.1) запишемо вираз: ...	133
5.2. Розрахунок інерційно-гальмівних характеристик з використанням альтернативного підходу.....	140
5.3. Визначення впливу попутної і зустрічної течії на довжину гальмівного шляху судна.....	145
5.4. Розрахунок інерційно-гальмівних характеристик контейнеровоза “ELQUI”	147
5.5. Висновки за п'ятим розділом	159
ВИСНОВКИ	160
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	162
ДОДАТОК А. Лістинг програм для розрахунку інерційно-гальмівних характеристик судна.....	178
ДОДАТОК В. Список публікацій здобувача та відомості про апробацію результатів дисертації	243
ДОДАТОК С. Акти упровадження результатів дисертації.....	247

ВСТУП

Актуальність теми. Забезпечення безпеки судноводіння є однією з найважливіших проблем безаварійного мореплавання в обмежених водах, що є найскладнішими за своїми умовами районами плавання, в яких відбувається понад 80% всіх навігаційних аварій, що свідчить не тільки про високу складність умов плавання, але і про недосконалість методів судноводіння в таких районах.

При виконанні маневру судна його інерційно-гальмівні характеристики і характеристики повороткості враховуються приблизно, що знижує точність реалізації програмної траєкторії руху судна і веде до збільшення ймовірності виникнення навігаційних аварій. Тому необхідна розробка процедури розрахунку параметрів маневру судна, які в значній мірі залежать від обраної моделі руху судна, яка враховує його інерційність. В даний час на судах використовуються навігаційні інформаційні системи, в яких доцільна розробка функції розрахунку параметрів маневру судна для заданих вихідних даних. Тому розробка методів інформаційного забезпечення маневрування суден, чому присвячена дана робота, є актуальним і перспективним науковим напрямком.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалася відповідно до положень Транспортної стратегії України на період до 2020 р. (розпорядження Кабінету Міністрів України від 20.10.2010 р., №2174-р), рішення 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), а також в рамках планів наукових досліджень Одеської національної морської академії за держбюджетною темою "Забезпечення безпеки судноводіння в стислих районах плавання" (№ ГР 0115U003580, 2015-го.), в якій здобувач виконав окремий розділ.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційного дослідження є підвищення безпеки судноводіння шляхом вдосконалення методів інформаційного забезпечення маневрування судна за допомогою розробки аналітичних процедур розрахунку параметрів маневру, реалізованих в комп'ютерному пакеті.

Робоча гіпотеза дослідження полягає в існуванні можливості підвищення точності і оперативності маневру судна за допомогою комп'ютерного пакету розрахунку параметрів маневру.

Головна задача дослідження полягає в розробці алгоритмів розрахунку параметрів маневру судна для формування окремого модуля комп'ютерної інформаційної системи судна.

Рішення головної задачі досягнуто шляхом дослідження складових задач:

- визначення залежності параметрів маневрів судна від його динаміки;
- розробка графічного способу комп'ютерного моделювання процедур розрахунку параметрів маневрів судна;
- верифікація динамічних моделей маневрування судна експериментальними даними натурного експерименту.

Об'єктом дослідження дисертації є маневрування судна.

Предметом дослідження є методи вибору параметрів маневру судна.

Методи дослідження. У дисертаційному дослідженні для пошуку рішень поставлених задач були застосовані методи:

- дедукції при аналізі основних підходів вирішення проблеми безпеки судноводіння;
- системного аналізу для вибору теми дисертаційної роботи і при формуванні технології наукового дослідження;
- дослідження операцій для декомпозиції головної задачі дисертації на незалежні складові задачі;
- теоретичної механіки для складання диференціальних рівнянь руху судна;

- математичного аналізу для вирішення рівнянь руху судна і пошуку залежності параметрів руху судна від керуючих впливів.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в створенні нового методу визначення параметрів маневру судна за допомогою процедур, реалізованих в комп'ютерному модулі, який відрізняється урахуванням динаміки судна і верифікацією динамічних моделей маневрування судна даними натурального експерименту.

У дисертаційній роботі:

- вперше розроблені методи розрахунку параметрів маневрів судна в залежності від його динаміки;
- вперше запропоновано спосіб розрахунку інерційно-гальмівних характеристик судна з використанням альтернативного підходу;
- отримали подальший розвиток методи визначення параметрів маневру судна за рахунок їх комп'ютерної реалізації;
- вдосконалені процедури верифікації динамічних моделей маневрування судна даними натурального експерименту.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що вони можуть бути використані на судах в процесі експлуатації, а також 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 28.02.2017 р.), крїїнговою компанією «ВіШіпс Україна» для навчання, підготовки і перепідготовки офіцерів морських суден по напрямку «Судноводіння» з метою забезпечення безпеки плавання (акт впровадження від 27.02.2017 р.). Матеріали дисертаційного дослідження використовуються в навчальному процесі при викладанні дисципліни «Забезпечення навігаційної безпеки плавання» (акт від 09.03.2017 р.).

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота виконана дисертантом самостійно без співавторів: їм проведено інформаційний пошук і викона-

ний аналіз основних підходів вирішення проблеми забезпечення безпеки судноводіння, обґрунтовано методологічне забезпечення дисертаційного дослідження, розроблений і викладений метод визначення параметрів маневрів судна з урахуванням його динаміки, а також розроблені необхідні алгоритми, що дозволяють формування комп'ютерної системи інформаційного забезпечення маневрування судна, виконано імітаційне моделювання, впроваджені результати роботи в виробничий процес. З наукових праць, опублікованих у співавторстві, в дисертації використані лише ті положення, які належать автору особисто: формалізація альтернативного підходу для аналітичного опису процесу активного гальмування судна [143], процедура розрахунку безпечної швидкості судна [141], визначення характеристик розгону судна за допомогою альтернативного підходу [147], математична модель падіння швидкості судна на циркуляції [138], процедура розрахунку параметрів маневру безпечного розходження зміною курсу [136], огляд динамічних моделей обертального руху судна без урахування часу перекладання пера керма [131].

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

науково-технічна конференція «Сучасні проблеми підвищення безпеки судноводіння»(Одеса, 7-8 листопаду 2004 р.), науково-технічна конференція «Стан та проблеми судноводіння» (Одеса, 24-26 жовтня 2005р.), Всеукраїнська науково-технічна конференція «Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд» (Миколаїв, 21-23 травня 2014 р.), VI Міжнародна науково – практична конференція «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2014)» (Херсон, 27-29 травня 2014 р.), науково-технічна конференція «Морські перевезення та інформаційні технології в судноплавстві» (Одеса, 18-19 листопаду 2014 р.), VII Міжнародна науково – практична конференція «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2015)» (Херсон, 26-28 травня 2015 р.).

Публікації. За результатами виконаних досліджень автором опубліковано 16 наукових праць (з них 10 одноосібно), в тому числі: в наукових профільних виданнях, що входять до переліку МОН України – 9 наукових статей [127, 129, 134, 140, 141, 143, 145-147]; в зарубіжних наукових профільних виданнях – 1 наукова стаття [131]; в збірниках матеріалів наукових конференцій – 6 тез доповідей [135, 136, 138, 139, 148, 149].

Структура роботи. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних літературних джерел (149 найменувань) і додатків. Загальний обсяг роботи становить 254 сторінок і містить 38 рисунків та 13 таблиць, зокрема: 167 сторінок основного тексту, 16 сторінок списку використаних джерел, 71 сторінок додатків.

РОЗДІЛ 1.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРИ ЩОДО ОСНОВНИХ АСПЕКТІВ ВИРІШЕННЯ
ПРОБЛЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ СУДНОВОДІННЯ І ВИБІР ТЕМИ
ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ1.1. Аналіз літературних джерел щодо вирішення проблеми
забезпечення безпечного плавання суден

Як показав огляд і аналіз літературних джерел, актуальними напрямками вирішення проблеми забезпечення безаварійного плавання суден є:

1. Розробка заходів щодо попередження зіткнень суден.

3. Застосування сучасних інформаційно-керуючих технологій і засобів для забезпечення безпеки судноводіння.

Проблемі забезпечення безпеки судноводіння в цілому присвячені роботи відомих вчених [1-13]. В роботі [1] викладено основні проблеми керування і управління морських суден, а в роботах [2-5] розглянуті питання розрахунку інерційних характеристик суден, а також їх перехідних процесів руху. В роботі [6] викладено питання навігаційної безпеки судноводіння. У роботах [7,8] розглянуті питання теорії і практики управління суден в різних ситуаціях і основні аспекти проблеми попередження зіткнення суден.

Основні питання проблеми безпечного розходження суден і шляхи їх вирішення викладені в роботі [9], а в роботі [10] відображено застосування сучасних систем автоматичного управління рухом судна для забезпечення безпеки судноводіння.

Проблема управління судами при розбіжності на невеликих дистанціях, яка пов'язана з явищем присмоктування суден, розглянута в роботах [11-13].

Як наголошується в роботах [11,12], згідно зі статистичними даними часто аварії від зіткнень відбуваються внаслідок явища «присмоктування» суден при їх відносному переміщенні на невеликих відстанях. При вивченні

процесу взаємодії суден що розходяться, як показано в роботі [12], гідродинамічну поперечну силу і гідродинамічний момент можна вважати залежними тільки від взаємного розташування суден в даний момент часу. У роботі вказується, що така постановка гідродинамічної задачі можлива, і її рішення в принципі можливо. В роботі [11] показано, що явище взаємодії суден при спільному русі на невеликих відстанях між ними добре вивчено і це дозволяє встановити найбільш небезпечні фази процесу взаємодії і запропонувати заходи щодо запобігання зіткнення суден.

В роботі [13] показано, що при плаванні в каналах і на мілководді при русі суден паралельними курсами, коли відстані між ними є незначними, можлива втрата їх керованості, що загрожує їх зіткненням. Це виникає через появу значних за величиною гідродинамічних поперечних сил і моментів ризику, які перевершують за величиною керуючі моменти рульового пристрою. Для попередження появ таких ситуацій потрібно вибирати достатні мінімальні відстані між суднами і знижувати швидкість їх ходу.

У ряді публікацій [14-39] розглянуті питання моделювання руху судна в умовах обмеженого простору, які присвячені питанням виконання суднами різних маневрів, які сприяють більш ефективному і безпечному плаванню.

Розробці високоточного управління судна в умовах обмеженого простору на криволінійних ділянках руху присвячені роботи [14,15].

У публікації [16] вказується, що широке впровадження сучасних методів і засобів комплексної автоматизації на суднах забезпечує зростання їх провізної здатності, скорочення експлуатаційних витрат, зниження рівня аварійності за рахунок виключення суб'єктивних факторів з процесу управління судном.

В роботі [17] для різних типів морських рухомих об'єктів, що рухаються з постійною швидкістю, пропонується уніфікована математична модель руху у вигляді нелінійного матричного дифференціального рівняння, аналіз якого визначає вимоги до систем управління морськими рухомими об'єктами, формуються як задачі оптимального управління.

У більшості сучасних систем управління складними динамічними об'єктами, як зазначається в роботі [18], для формування керуючих впливів використовується модель керованого об'єкта, для отримання якої використовуються нейронні мережі. Стверджується, що морські рухомі об'єкти і, зокрема, морські судна відносяться до класу так званих невизначених об'єктів.

Основні відомості щодо бортових автоматизованих систем для оцінки, прогнозу і оптимізації мореплавства викладені в роботі [19]. Висвітлено методи прогнозу мореплавства, а також розглянуто принципи вибору рішень для забезпечення безпеки у штормових умовах. Висвітлено особливості відображення інформації, наведено характеристики функціональних можливостей таких засобів.

Завдання синтезу управління рухом судна при стабілізації на траєкторії за точнісним і комплексним економічним критерієм з урахуванням нелінійної моделі судна і збурень формалізована у роботі [20]. Обґрунтовується застосування лінійно-квадратичного методу, причому пропонується ідентифікація математичної моделі судна з використанням багатоальтернативної фільтрації.

В роботі [21] описаний спосіб виконання аналізу даних нестационарних переміщень корпусу морського судна, який запропонований університетом галузі морського транспорту (Японія). Завдання вирішене способом авторегресійного моделювання зі змінними в часі значеннями коефіцієнтів.

В роботі [22] представлені програма і результати статистичного моделювання процесу руху суден по лінійному фарватеру. На першому етапі отримані основні результати, які стосуються залежностей кількості ситуацій небезпечного зближення від різних параметрів, що характеризують навігаційні умови плавання.

В роботі [23] розглянуто питання про вплив відстояння рульового органу від центру мас судна на зв'язок між кутом його дрейфу і кутовою швидкістю, а процес моделювання руху суден в скупченні описується в роботі [24] і за отриманими результатами запропоновані рекомендації для визначення оптимальних параметрів поведінки суден в скупченні.

В роботі [25] пропонується структура системи управління рухом швидкісних суден, що складається зі стратегічного і виконавчого рівнів. При цьому наводиться структура дворівневої системи, визначається її склад на прикладі двох типів швидкісних суден, описані підходи до проектування локальних підсистем керування.

Теорія управління динамічними об'єктами зі змінними параметрами з позицій синергетики викладена в роботі [26]. В роботі розглянуті нейромережі і їх архітектура, описані традиційні системи управління і управління на основі нечіткої логіки. Наведені приклади нейронного управління і результати синтезу нейромережевих систем управління.

В роботі [27] запропоновано математичні моделі оптимізації параметрів водних шляхів у вигляді цільових функцій і результати оптимізації імітаційним моделюванням повороту на фарватері Свіноуйсце – Щецин, а також західного поромного причалу Центрум в Свіноуйсьце.

В роботі [28] розглядається нелінійна задача управління морським об'єктом з метою його утримання в заданій точці і з заданим курсом. Для формування необхідного закону керування синтезується алгоритм нелінійного фільтра Калмана з локальними ітераціями, за допомогою якого проводиться оцінка поточного стану системи. Наводяться результати моделювання, що підтверджують можливість утримання судна в межах 4-8 м від заданої точки при стабілізації за курсом не гірше 2° .

Оцінка адекватності прийнятої до дослідження математичної моделі шляхом дослідження впливу додаткових нелінійних членів на режими руху судна проведена в роботі [29]. Розглянуто залежність біфуркаційної картини від зміни вітру. Введення інтелектуальної складової до алгоритму авторувального дозволило не тільки істотно підвищити його ефективність, але і долати певний рівень некерованості.

В даний час, як вказується у роботі [30], проводиться розробка інформаційної системи імітаційного моделювання руху суден зі складними динамічними моделями, у залежності від кута кладки керма і оборотів двигуна.

Дана система дозволить забезпечити новий тип планування маневрів судна і контроль реалізації заданого маневру. Передбачено у процесі маневрування відображати задані маневри одночасно з фактичним рухом судна та з індикацією прогнозованої траєкторії, яка визначається реальними вхідними даними від датчиків судна. Слід зазначити, що така система вирішує пряму задачу відображення прогнозованої траєкторії по заданих параметрах маневру, хоча попереду стоїть зворотня задача визначення параметрів майбутнього маневру по заданій програмній траєкторії руху. Іншими словами, слід розрахувати момент часу початку повороту та його тривалість для заданого кута кладки пера керма, забезпечивши вихід судна у задану точку.

Як зазначається в роботі [31], значну роль у забезпеченні безпеки судноводіння грають навігаційно-інформаційні системи (НІС) судна. У роботі докладно представлені відомості про них та електронних картах, наведені характеристики складових частин, функціональних можливостей та розглянуто особливості відображення інформації НІС. Виконано аналіз сучасних датчиків оперативної навігаційної інформації, а також вказуються обмеження та недоліки розглянутих систем.

Питання управління судном в екстремальних умовах розглянуті в роботі [32]. Для цього потрібно провести розрахунок впливу всіх зовнішніх сил, що мають відношення до управління судном в складних умовах. У статті представлені основні принципи оцінки зовнішніх сил на управління судном та можливість використовувати ці сили в екстремальних умовах з урахуванням необхідності використання буксирів.

Питанням розробки системи управлінь курсом судна авторульовим з використанням принципів нечіткої логіки присвячено окрему статтю [33], в якій розглядаються питання адаптації системи, що враховують складну динаміку та нелінійності математичної моделі судна як об'єкта управління при випадково змінюваних умовах роботи системи.

Поняття коефіцієнтів впливу параметрів математичної моделі судна на його маневрені характеристики введено в роботі [34]. Розраховані коефіцієн-

ти впливу для радіуса сталої циркуляції судна, висуву, початкової поворотності судна та всіх характеристик одержування.

В роботі [35] відзначається, що зростання вантажопідйомності сучасних суден викликає необхідність застосування вдосконалених комп'ютерних систем для їх безпечного плавання. У таких системах використовуються прогностні інструменти руху суден, які успішно застосовуються протягом тривалого часу. Однак спрощення існуючих прогнозів обмежує їх використання в частині негайного відображення руху судна при зміні положення керма та обертів двигуна. Необхідна точність реалізації криволінійної траєкторії руху судна може бути забезпечена більш вдосконаленими прогностними моделями руху судна.

У статті [36] вводиться мета дослідження, його метод дослідження та коротко описаний безпілотний автономний морський об'єкт. Основна проблема дослідження стосується комбінованої моделі руху транспортного засобу, в тому числі навантажень підйомної сили та гідродинамічного характеру. Модель враховує гравітаційні сили та переміщення, опір та сили тяги, підйомної сили та інші гідродинамічні сили. Одним з основних завдань дослідження є забезпечення точного прогнозу положення транспортного засобу. Для цього необхідна розробка інтегрованої моделі формування, аналізу та обробки сигналів, які можуть бути використані для точного управління кермом транспортного засобу. Показано, що транспортний засіб повинен бути обладнаний системою стабілізації. У статті коротко представлена інформація про комплексний підхід рульового управління, позиціонування та системи стабілізації транспортного засобу. Така система дозволяє отримати повністю автономний транспортний засіб.

Робота [37] присвячена питанням ідентифікації судових моделей маневрування, які є ключем до дослідження маневреності судна, проектування систем управління рухом суден та розвитку систем управління судовими тренажерами. У даній роботі на основі аналізу гідродинаміки судна сформована нелінійна модель маневрування судна. Теорія ідентифікації систем вико-

ристовується для оцінки параметрів моделі, для розрахунку яких пропонується алгоритм, заснований на розширеній теорії фільтра Калмана. Для отримання вхідних та вихідних даних системи, які необхідні для ідентифікації параметрів експерименту, використовувалися циркуляція та зигзагоподібний маневр, які виконуються на імітаторі управління судном. За допомогою цього алгоритму усуваються похибки, внесені під час процесу вимірювання.

Послідовне навчання контролера штучної нейронної мережі для автоматичного причалювання суден обговорюється в статті [38]. Для цього запропоновано нову концепцію під назвою "віртуальне вікно", яка забезпечує мінімальний за часом маневр швартування. Такі узгоджені дані потім використовуються для навчання двох окремих багат шарових нейронних мереж покладці пера керма та реверсу енергетичної установки. Після належного навчання нейронних мереж за допомогою моделювання методом Монте-Карло проводилася оцінка ефективності запропонованого контролера. Після отримання прийнятної відсотка успіху, навчені мережі реалізуються для експерименту з моделлю судна. Також проведені дослідження поведінки мережі під час таких експериментів на предмет можливого впливу початкових умов та наявності вітру. Для забезпечення безпеки судно за допомогою контролера виводиться в кінцеву точку, яка знаходиться на деякій відстані від фактичного пірсу, тому в статті також обговорюється доцільність дослідження автоматичної допомоги буксира для остаточного виведення судна до фактичного пірсу.

В роботі [39] автор розглядає інтелектуальну систему прогнозування руху судна, яка імітує процес навчання автономного блоку управління, створеного за допомогою штучної нейронної мережі. Блок управління спостерігає вхідні сигнали та обчислює значення необхідних параметрів маневрування судна в обмежених водах. Основним завданням системи є безперервний контроль навігаційних параметрів судна та прогноз їх значень після певного інтервалу часу. Результат прогнозування може використовуватися, як попередження судноводія про виникаючу загрозу.

Центральною проблемою забезпечення безаварійного судноводіння є

попередження зіткнень судів у прибережних районах інтенсивного судноплавства.

У статті [40] описані шість методів оптимальної теорії ігор та штучної нейронної мережі для синтезу безпечного управління в ситуаціях небезпечного зближення суден в морі. Показано застосування оптимальних алгоритмів керування методами теорії ігор для визначення безпечної траєкторії власного судна при розбіжності з іншими суднами для умов гарної та обмеженої видимості. Наведено порівняння безпечного управління судном у ситуації небезпечного зближення за допомогою методів антагоністичної та кооперативної ігор, були також розглянуті багатокрокові позиційні некооперативні та кооперативні ігри. Отримані міркування були проілюстровані прикладами комп'ютерного моделювання для визначення безпечних власних судових траєкторій у ситуації зближення із вісьмома зустрічними цілями.

У статті [41] представлена базова модель процесу безпечного управління судном у ситуації загрози зіткнення із використанням моделі гри J об'єктів, яка включає у себе нелінійні рівняння стану та нелінійні, змінювані в часі обмеження змінних стану, а також якість індексу управління грою у формах гри інтегральної оплати та остаточного платежу. Наближеною моделлю управління процесом розбіжності прийнята модель багатокрокової матричної гри у вигляді двоїстої задачі лінійного програмування. Комп'ютерна програма ігрового управління GSC була розроблена у програмному забезпеченні Matlab / Simulink для визначення безпечної траєкторії власного судна. Аналітичні результати були підтверджені прикладами комп'ютерного моделювання із використанням програми GSC для визначення безпечної траєкторії судна у реальній навігаційної обстановці. При моделюванні були прийняті п'ять наборів стратегій власного судна та зустрічних суден.

Як показано у роботі [42], індекс ризику зіткнення суден є основним та важливим поняттям у області попередження зіткнень суден. У даній роботі вказуються переваги та недоліки різних методів розрахунку індексу ризику зіткнення суден. Запропоновано модель оцінки ризику зіткнення суден на ос-

нові комплексної площини, яка може також компенсувати недоліки широко використовуваної моделі оцінки, запропонованої Keaton J. Виходячи з цього, розрахунок індексу ризику зіткнення будується для ситуацій мультикоманд суден у вигляді тривимірного зображення просторової кривої індексу ризику. Для реалізації запропонованої моделі використовується одиночний мікрокомп'ютер чіп, який доцільно використовувати для системи прийняття рішень щодо забезпечення безпечного судноводіння.

Проблема зіткнення суден або виникнення ситуацій небезпечного зближення суден на морі, часто викликаних людською помилкою через неповну або домінуючу інформації, із ростом морських перевезень стає все більш та більш важливою [43]. Підходи, засновані на постачанні судноводіїв та служб руху суден експертними знаннями, що дозволяють сформувати безпечні траєкторії для всіх суден, засновані на принципах повного зовнішнього управління процесом розходження суден. На відміну від цього, у статті пропонується процедура планування траєкторії із використанням спеціалізованих алгоритмів узгодження траєкторій шляхом домовленостей, поки не буде знайдено рішення, яке буде прийнятно для всіх суден. Рішення підпорядковується правилам запобігання зіткнень включає у себе динамічну модель всіх суден та проведення переговорів з метою оптимізації траєкторій без зовнішнього управління. Процедура поєднує у собі всі компоненти, необхідні для вирішення проблеми зіткнення з декількома суднами та тестується у даний час у моделюванні та на декількох випробувальних стендах. Перші результати показують швидкий процес сходження до оптимального рішення, яке досягається після декількох раундів переговорів та забезпечує безпечні траєкторії розходження.

В роботі [44] вказується, що в результаті зіткнення суден збиток і витрати можуть бути астрономічними. Тому для судноводіїв вкрай важливо мати інформацію про безпечні траєкторії розбіжності, особливо, коли в одному районі небезпечно зближуються кілька суден. Розглянуто кілька способів запобігання зіткнень суден, таких як оглядових, радіолокації і УКХ-радіо. Та-

кож охарактеризовані більш просунуті методики, такі як домен судна, теорії нечітких множин і генетичного алгоритму. Ці методи добре працюють в ситуаціях бінарних взаємодій, але їх важче застосувати в ситуаціях небезпечного зближення групи суден. Тому в роботі запропоновано розподілений локальний Алгоритм пошуку (DLSA) для попередження зіткнень суден. DLSA є розподілений алгоритм, в якому кілька суден спілкуються один з одним в межах певної області і УКХ-радіо. DLSA обчислює ризик зіткнення, ґрунтуючись на інформації, отриманої від сусідніх суден. Проте, DLSA страждає синдромом квазілокального мінімуму (QLM), який забороняє судну зміну курсу навіть тоді, коли виникає ризик зіткнення. В даному дослідженні зроблено децентралізований Табу Алгоритм пошуку (DTSA). DTSA використовує список табу, щоб уникнути синдрому QLM шляхом модифікації функції вартості і збільшення розмірів домену судна для підвищення ефективності Табу Алгоритм пошуку. Були проведені експерименти порівняльної ефективності алгоритмів DLSA і DTSA. Результати показали, що DTSA перевершив DLSA.

Вирішення задачі формування оптимального управління судном при розходженні методами теорії оптимальних дискретних процесів запропоновано в роботах [45,46]. При цьому передбачається відсутність зовнішніх збурень і сталість швидкостей і курсів зустрічних суден. У задачі присутні обмеження щодо безпечного розходження, а узагальнений облік динаміки оперуючого судна, як і облік умов району плавання і судноплавної обстановки, є особливостями вирішення поставленого завдання при даному підході. Пошук локально оптимальної безпечної траєкторії розбіжності судна з цілями проводиться з використанням ЕОМ. Через аналітичний тип критерію оптимальності і накладених обмежень рішення задачі в явному вигляді неможливо і наводиться алгоритм її чисельного рішення, що використовує апарат теорії оптимальних дискретних процесів.

Питання розходження судна з поодинокі ціллю досліджувалися в роботах [47-49], причому навігаційні небезпеки і інерційні характеристики ма-

невруючого судна в даних роботах не враховувалися, а параметри руху зустрічної цілі приймалися незмінними. Результатами робіт є аналітичні вирази, що описують допустимі області безпечних курсів і швидкостей маневруючих суден в залежності від їх початкового відносного положення і параметрів руху. У роботах також розглянуті залежності між істинними і відносними параметрами руху оперуючого судна для різних випадків. Задача в запропонованій постановці вирішена коректно за допомогою методів оптимального управління.

У монографії [50] розглянуто ряд особливостей задачі розходження суден в морі шляхом зміщення на паралельну лінію шляху. У роботі відзначається, що підвищення ефективності запобігання зіткнень в даний час може досягатися створенням, як нових алгоритмів, так і інтелектуальних систем. В роботі для розходження застосовується одна стратегія – зміщення на паралельну лінію шляху під тим або іншим кутом до лінії вихідного курсу. З множини можливих варіантів такої стратегії знаходиться оптимальна по комплексному критерію, який відображає вимоги до безпеки, завчасності, помітності та економічності маневру для запобігання зіткнення. В роботі [51] відображені основні напрями забезпечення безаварійного плавання суден.

Процес розходження суден в роботах [52-56] описується, як взаємодія конфліктуючих сторін на ґрунті пересічення інтересів економічності руху.

Початковий етап досліджень, який характерний спробою формалізації процесу розходження судна із кількома цілями методами теорії оптимального управління з урахуванням вимог МППЗС-72, викладено в роботі [52]. Для вирішення задачі розходження в роботі запропонована двошкальна система управління, яка за допомогою моделі динамічного стану керованого судна і алгоритму пошуку безпечного маневру дозволяє прогнозувати рух судна і небезпечних цілей при заданих збуреннях і різних керуючих впливах. У цьому випадку за прийнятим критерієм оптимальності можна визначити необхідні керуючі впливи з урахуванням розглянутої в роботі формалізації МППЗС.

Новий підхід до розуміння і формалізації процесу розходження, заснова-

ний на методах теорії ігор, сформувався з появою теорії позиційних диференційних різницевих ігор. Тому первісна модель в подальшому була значно доповнена, а її подальший розвиток здійснювався методами позиційних диференційно-різницевих ігор і знайшло своє відображення в роботах [53-55]. У запропонованій математичній моделі оперуюче судно і всі цілі видаються у вигляді динамічної системи, поточний стан якої описується фазовим вектором, який змінюється в часі відповідно до диференціальним рівнянням руху. Задача пошуку оптимальних значень позиційної стратегії, як і в роботі [52], трансформується в завдання лінійного програмування, для чого проводиться лінеаризація нелінійних обмежень за безпекою розходження і врахування навігаційних небезпек.

Відзначимо, що застосування диференційних ігор до формалізації процесу розходження також детально розглянуто в роботі [56].

Роботи [57-60] присвячені застосуванню методу нелінійної інтегральної інваріантності [57,58] для опису процесу розходження суден і створення системи попередження зіткнень. В роботі [58] вказується, що метод нелінійної інтегральної інваріантності дозволяє синтезувати стратегію управління динамічною системою, яка забезпечує інваріантність деяких фазових координат керованої системи щодо виникаючих зовнішніх збурень, в якості яких розглянуто $2n$ -мірний вектор швидкостей і курсів n зустрічних суден, що ускладнюють рух оперуючого судна. У цій задачі інваріантними координатами обрані відстані від оперуючого судна до зустрічних суден. У роботі стверджується, що за допомогою згаданого методу, виходячи з можливих найгірших для процесу розходження значень параметрів руху кожного із зустрічних суден, можна знайти допустиму область безпечних однокрокових стратегій оперуючого судна.

У роботах [59,60] пропонується підхід врахування та алгоритмізації МППЗС-72 при виборі однокрокових стратегій розходження. Оскільки як МППЗС-72 застосовується при розбіжності тільки пари суден, тобто вони носять характер бінарної координації, то в роботах розглянута система парних

відносин на множині всіх спостережуваних суден і композиції, породжуваних ними функцій. Причому фіксується судно, щодо якого необхідно вирішувати задачу вибору, і виділяється множина суден, що зближуються з ним.

Інверсний метод планування траєкторії руху об'єктів управління, згідно з яким в кінематичні рівняння руху об'єкта вводиться негативний час, а в якості початкових умов вибирається бажаний фінальний стан об'єкта, викладено в роботі [61]. Момент часу початку маневру і його параметри перебувають в результаті рішення такого кінематичного рівняння. Проблема врахування маневрених характеристик судна для забезпечення безпеки плавання в обмежених умовах розглянута в роботі [62].

У роботах [63-67] представлені докладні дослідження ситуації небезпечного зближення пари суден і отримані умови існування множини безпечних маневрів розходження, а також розглянуто процедуру вибору оптимального маневру. Питання оцінки ситуації розходження суден розглянуті в роботах [68-71].

Питання вибору оптимального курсу для розходження суден при криволінійному русі розглянуто в публікації [72], а в роботах [73-79] розглянуто розрахунок параметрів маневру безпечного розходження суден з урахуванням їх інерційності, при цьому використовуються різні моделі повороткості судна.

Практична реалізація пропонованих сучасних теоретичних концепцій створення систем синтезу безпечного маневру, як зазначається в роботах [80,81], зустрічає значні труднощі в частині синтезу множини безпечних маневрів розходження, які відповідають обмеженням, що накладаються щодо безпечного розходження з цілями, врахуванню навігаційних небезпек і заважаючих суден, а також не суперечать МППЗС-72. Запропоновано спосіб індивідуального врахування кожного з перелічених обмежень, на базі чого був розроблений метод їх спільного врахування. Врахування навігаційних небезпек при виборі безпечного маневру розходження судна з ціллю розглянуто в роботах [82-84].

Формалізація МППЗС за допомогою алгебри логіки запропоновано в ро-

боті [85]. Розглядаються три області в системі координат з осями часу і дистанції найкоротшого зближення. При попаданні судна до кожної з областей реалізується поведінка обох суден відповідно до вимог МППЗС. Питанням обчислення гранично-допустимої дистанції найкоротшого зближення і розробки аналітичного апарату визначення реалізованої області взаємних обов'язків суден, що небезпечно зближуються, присвячені роботи [86-88].

Задача вибору оптимального маневру розходження дуже складна, як зазначається в роботах [89-91], оскільки процес управління рухом судна є багатовимірним з нелінійними і нестационарними характеристиками, причому задача носить ігровий характер. У статті [92] розглянуто модель автоматизованої системи попередження зіткнень суден, яка може використовуватися для побудови бази знань. Також запропонований алгоритм моделі і програма, що імітує зближення суден. Результати імітаційного моделювання доводять здійсненність, можливість застосування і ефективність моделі.

В роботі [93] розбираються правила щодо запобігання зіткненню суден на морі, зокрема коментуються положення пунктів 2 і 3 статті 17 цих Правил. При цьому обговорюється, чи можливе застосування принципу – Principle of Confidence при спільних діях (Cooperated action) в ситуації ухилення від зіткнення при розборі випадку в Морському арбітражному суді. Пропонується, що пункт 2 статті повинен мати перевагу перед пунктом 3 статті через те, що розміри суден і їх швидкості збільшилися і потрібно більше часу і більша відстань до їх повної зупинки. Можливі критерії встановлення факту зближення суден протилежними курсами безпосередньо одне на друге проаналізовані в роботі [94]. Показано, що за жодним з них не можливо впевнено судити про зближення суден безпосередньо одного на інше, тому в реальності слід орієнтуватися на рекомендації правила 14 МППЗС-72, тобто. Е. Завчасно відвертати вправо.

Оціночна система дій щодо ухилення від зіткнення з поодиноким судном розглянуто в роботі [95]. У статті описується трирівнева моделююча схема, що базується на технології синтезу. Модулі, що описують трасу руху судна і

параметри руху, базуються на перетворенні координат і геометричній моделі. За цими даними визначаються ідентифікація маневрування, оцінка ризику зіткнення і етапи дій щодо ухилення від зіткнення.

У статті [96] вказується, що глобальний контроль систем управління став занадто дорогим і неефективним, тому що він вимагає великого числа вимірювань вектора управління і визначення статусу процесу. При цьому слід враховувати, що керуючі впливи залежать від течії, вітру і хвилювання моря, а динаміка судна описується нелінійними і нестационарними характеристиками.

СУРС як правило не має технічних можливостей контролювати рух суден на ділянках скупчення суден для забезпечення безпеки судноплавства [97]. У статті як додаток до засобів можливості ухилення від зіткнення системи СУРС / АІС запропонований новий fuzzy-метод. Введення даних СУРС спільно з даними АІС в Морську географічну інформаційну систему MGIS (Marine Geographic Information System) дає платформу для розрахунку даних про область знаходження судна, інерційних сил, що діють на судно, а також використовується для визначення моделі захисного кола і небезпечного індексу. Використовуючи аналітичну модель морської системи GIS може бути отримано точне прогнозування часу зіткнення і позиції. Запропонований метод дає оператору СУРС можливість прийняття рішень щодо попередження зіткнення суден.

У роботах [98-100] обговорюються питання екстреного маневрування суден для розходження в ситуації надмірного зближення.

Для суден, що прямують зустрічними курсами безпосередньо одне на інше, в роботі [101] зроблено спробу визначити мінімально допустиму дистанцію між судами для здійснення маневру безпечного розходження на заданій відстані найкоротшого зближення з урахуванням маневрених характеристик суден.

Для підвищення безпеки та ефективності управління суднами, як показано в статті [102], розроблена система ATSM (Autonomous Traffic

Management System), в якій спочатку використовуються дані AIC, одержувані з судна – тренажера Shioji Maru і дані про переміщення суден в Токійській затоці, одержувані за радіолокаційним спостереженнями для оцінки умов судноплавства. Розрахунок оптимальних траєкторій для всіх суден в районі за системою ATSM, використовуючи програми Forward Dynamics Programming, є наступним етапом роботи системи. Оптимальний шлях, пропонується за системою ATSM, дозволяє скоротити час проходження на 3,88% при вході в Токійську затоку.

В роботі [103] вказується, що університет галузі морського транспорту (Китай) розробив систему підтримки прийняття рішень управління морським судном, яка мінімізує ризики зіткнення суден. Застосування системи буде актуально, оскільки в даний час не менше 60% всіх аварій з морськими суднами мають основною причиною зіткнення. Перспективи використання сучасних технічних засобів для управління суднами в умовах обмеженого простору плавання з метою попередження зіткнень суден розглянуті в роботі [104].

У статті [105] контроль і управління рухом судна розглядається, як багаторівнева система, яка управляє системами судна при його переході між портами, причому судовим підсистемам поставлені у відповідність шари системи контролю.

У статті [106] запропонований метод розрахунку дистанції і часу найкоротшого зближення за спостереженнями зі свого судна, який дозволяє безпосередньо отримати інформацію про величину ризику зіткнення свого судна з судном-ціллю. Це забезпечує вахтового офіцера і експертну систему із запобігання зіткнення ефективним засобом для уточнення прийнятих рішень щодо ухилення від зіткнення.

Розуміння змісту автономної судової системи ухилення від зіткнення СА (Collision avoidance) та її теоретичне обґрунтування викладається в роботі [107]. Спільно з алгоритмом з ухилення від зіткнення розглянуті додатково пізнавальні можливості людини і Правила ухилення від зіткнення COLREG. З урахуванням факторів, що впливають на процес ухилення від зіткнення,

розглядаються вимоги до автономної навігації. Ці фактори здатна оцінити людина та здійснити управління судном на задовільному рівні, проте прийняті рішення є суб'єктивними та можуть бути помилковими, в результаті чого може виникнути зіткнення. Дослідження щодо автоматизації управління судном можуть бути представлені в класичній або комп'ютерній категоріях.

Класична техніка заснована на математичних моделях та алгоритмах. Програма базується на використанні штучного інтелекту AI (Artificial Intelligence). Областю AI для систем автономного ухилення від зіткнення, що розглядаються в статті, є еволюційні алгоритми, логіка fuzzy, експертні методи, нейромережа NN (Neural networks) та комбінація цих методів – гібридні системи (hybrid system).

В роботі [108] розглянуті складні ситуації в обмежених водах, коли обмежена пропускна здатність сприйняття інформації судноводієм не дає можливості провести переробку її необхідного обсягу, та ускладнює прийняття коректних рішень, особливо в ситуаціях небезпечного зближення.

В роботі [109] вказується, що однією з фундаментальних дій при ухиленні від зіткнення є вимір азимутального пеленга цілі, причому безпека власного судна залежить також від швидкості змін курсового кута. Дистанція до цілі є найважливішим фактором при розрахунку за числовою формулою. У висновку зазначено, що вираз, що використовує час (ТСРА), має більше значення, ніж відстань до цілі.

Нетрадиційний підхід завчасного визначення ситуації зближення суден обговорюється в роботі [110]. Він полягає в знаходженні моментів часу одночасного виходу їх на однакові широти та однакові довготи, враховуючи інформацію про рух суден за допомогою АІС. При збігу цих моментів часу неминуче зіткнення суден, та відразу за значенням їх отримуємо час до зіткнення. Якщо ці моменти часу не рівні, то судна не зможуть одночасно вийти в одну й ту ж точку та зіткнення не відбудеться.

В роботі [111] розглянуто проблему безпечного розходження суден з урахуванням особливостей їх взаємодії, що виникає при небезпечному збли-

женні й визначає процес розбіжності. Проведена формалізація бінарної координації, яка реалізована для регламентації взаємодії суден в МППЗС-72. Запропоновано стратегію екстреної розбіжності при надмірному зближенні суден в ситуації невизначеності їх подальшої поведінки й відсутності координації.

Модель, що дозволяє оцінити ризик зіткнення високошвидкісних суден, представлена в статті [112]. За допомогою моделі прогнозується ступінь ризику в результаті повороту керма, зміни швидкості та величини дистанції найкоротшого зближення, що дозволяє вахтовому помічнику визначити, де може статися зіткнення та робити висновок про ступінь ризику.

Метод *neural fuzzy system* для оцінки ризику зіткнення суден, отриманий на основі результатів останніх досліджень технічних проблем морського судноплавства, пропонується в роботі [113]. З урахуванням переваги штучної нейронної мережі в системі *fuzzy* може бути створений новий тип системи *neural network system*. Велику ефективність нового методу в порівнянні з традиційними методами показали отримані в роботі результати.

Як характеристики взаємодії суден при їх небезпечному зближенні в роботі [114] розглянуті координованість бінарних взаємодій та їх ефективність, отримано аналітичні вирази для їх чисельної оцінки. Запропоновано математичну модель взаємодії групи суден, що небезпечно зближуються, при різних типах управління.

Питанням вдосконалення технології управління рухом суден в районах контролю СУРС посвячена робота [115], а в роботах [116-121] розглянуті питання вибору маневру розбіжності декількох суден зміною курсів.

Питанням формування суднової безпечної зони присвячені публікації [122-125]. У них запропоновані математичні моделі, що містять системний облік істотних факторів, які орієнтовані на практичне використання в процесі плавання судна в різних умовах. Питанням методології маневрування суден в ситуації зближення присвячена робота [126].

1.2. Вибір основного напрямку дисертаційного дослідження

Як випливає з виконаного огляду та аналізу літературних джерел з питань забезпечення безаварійного судноводіння, одним з аспектів вирішення проблеми зниження навігаційної аварійності є вдосконалення сучасних інформаційно-керуючих технологій та засобів для забезпечення безпеки судноводіння в першу чергу розробки заходів щодо підвищення точності та надійності маневрування суден. Ця проблема особливо актуальна при плаванні суден в обмежених водах, які характеризуються підвищеною інтенсивністю судноплавства та великою кількістю навігаційних небезпек, що ускладнюють безпечну навігацію суден.

Саме в обмежених водах виникає необхідність частого маневрування суден зміною курсу або швидкості, особливо при провідці фарватерами, при підході до якірних стоянок або заходах в порти. Необхідність маневрування в обмежених водах також виникає при небезпечних зближеннях суден. У таких ситуаціях актуальним є оперативний та коректний вибір маневру судна з урахуванням його інерційно-гальмівних характеристик та характеристик поворотності. Для вибору коректного маневру судна необхідно мати у своєму розпорядженні залежності параметрів маневрів судна від його динаміки, причому параметри динамічних моделей руху судна, за якими розраховується маневр, повинні бути визначені експериментально в процесі експлуатації судна. Тому слід розробити процедури верифікації динамічних моделей маневрування судна експериментальними даними натурного експерименту. Оперативний та коректний розрахунок маневру судна зміною курсу або швидкості може бути досягнуто застосуванням комп'ютерних обчислювальних засобів.

Тому питання вдосконалення комп'ютерного інформаційного забезпечення маневрування судна з метою підвищення його оперативності, точності та надійності є актуальною та перспективною тематикою та становить основний напрямок даної дисертаційної роботи.

1.3. Висновки за першим розділом

У першому розділі виконано огляд літературних джерел та проведений аналіз основних напрямків вирішення проблеми забезпечення безпеки судноводіння та зниження аварійності суден, в результаті якого було виявлено, що основними напрямками вирішення даної проблеми є вдосконалення методів управління судном під час плавання в обмежених районах та розробка безпечних методів розходження суден при їх небезпечних зближеннях.

Обґрунтовано основні напрями дисертаційного дослідження, які присвячені проблемі вдосконалення комп'ютерного інформаційного забезпечення маневрування судна.

Об'єктом дослідження є маневрування судна, а предметом дослідження є методи вибору параметрів маневру судна.

РОЗДІЛ 2.

ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Визначення теми наукового дослідження

Як було показано в попередньому розділі, одним з актуальних аспектів забезпечення безпеки судноводіння є вдосконалення комп'ютерного інформаційного забезпечення маневрування судна з метою підвищення його оперативності, точності та надійності. Особливо це актуально при плаванні в районах підвищеної інтенсивності судноплавства та великої кількості навігаційних небезпек.

Для вирішення зазначеного завдання потрібне, по-перше, вибір або в разі необхідності розробка математичних моделей зміни параметрів руху судна в залежності від кута кладки пера керма та сили упору гвинта з урахуванням динаміки судна, які найбільш адекватні реальним процесам повороту судна, його гальмування та розгону. По-друге, на базі обраних динамічних моделей руху судна слід знайти залежності параметрів маневру судна від значень керуючих сигналів та розробити відповідні процедури розрахунку параметрів маневру з урахуванням динамічних характеристик судна, після чого процедури реалізувати у вигляді комп'ютерної інформаційної системи.

Для коректного та ефективного функціонування такої системи кожному судну слід визначити параметри своїх динамічних моделей, що вимагає розробки процедур верифікації динамічних моделей маневрування судна експериментальними даними натурного експерименту.

Отже, проблема вдосконалення інформаційного забезпечення маневрування судна за допомогою розробки комп'ютерного модуля навігаційної системи є актуальною та перспективною, і це дозволяє зробити вибір теми дисертації, яка формулюється так: «Удосконалення алгоритмів інформаційного забезпечення маневрування суден».

Для вирішення задачі із зазначеної проблематики слід розглянути такі основні питання:

- методами системного підходу виконати декомпозицію головного завдання дисертаційного дослідження на кілька складових незалежних завдань;
- розробити динамічні моделі зміни курсу судна і його швидкості в залежності від кута кладки пера керма і упору гвинта і визначити залежності параметрів маневрів судна від його динаміки;
- сформулювати графічний спосіб комп'ютерного моделювання процедур розрахунку параметрів маневрів судна;
- удосконалювати процедури верифікації динамічних моделей маневрування судна експериментальними даними натурного експерименту.

Актуальність тематики дисертаційного дослідження визначають необхідність підвищення рівня безпеки судноводіння і вдосконалення методів розрахунку параметрів маневру судна.

Наукову новизну дослідження може скласти розробка процедури вибору параметрів маневру судна з урахуванням його динаміки та формування способу розрахунку інерційно-гальмівних характеристик з використанням альтернативного підходу.

Можлива економічна ефективність може бути досягнута за рахунок скорочення збитків від зниження рівня аварійності через запобігання навігаційних аварій.

Передбачувана ефективність дисертаційного дослідження також можлива від забезпечення безпеки судноводіння, яка призводить до зменшення ймовірності людських жертв та екологічних катастроф, що виникають при аваріях.

Реалізація пропонованого наукового дослідження полягає в розробці теоретичної частини роботи, яку потрібно перевірити за допомогою імітаційного моделювання та експериментальних досліджень.

Об'єктом дослідження дисертації є маневрування судна.

Предметом дослідження є методи вибору параметрів маневру судна.

Тематика обраного дисертаційного дослідження відповідає напрямку наукових досліджень колективу, в якому працює здобувач.

2.2. Методи дослідження дисертаційної роботи

Технологічну карту методологічного забезпечення дослідження за темою дисертації представлено на рис. 2.1, яка представляє схему застосування методів системного підходу для вирішення головного завдання дисертаційної роботи.

Сучасними запитами практики є необхідність підвищення рівня безпеки судноводіння та розробки засобів інформаційного забезпечення маневрування судна.

Метою дисертаційного дослідження є підвищення безпеки судноводіння шляхом вдосконалення методів інформаційного забезпечення маневрування судна за допомогою розробки аналітичних процедур розрахунку параметрів маневру, реалізованих в комп'ютерному пакеті.

Прийнято гіпотезу про існування можливості підвищення точності та оперативності маневру судна за допомогою комп'ютерного пакету розрахунку параметрів маневру.

Головне завдання дослідження полягає в розробці алгоритмів розрахунку параметрів маневру судна для формування окремого модуля комп'ютерної інформаційної системи судна.

Рішення головної задачі дисертації було отримано за допомогою її декомпозиції на окремі складові задачі, які були отримані за допомогою методів теорії дослідження операцій.

Проведений аналіз показав, що головну задачу дисертаційного дослідження доцільно розділити на наступні три часткові складові задачі:

1. Визначення залежності параметрів маневрів судна від його динаміки.
2. Розробка графічного способу комп'ютерного моделювання процедур розрахунку параметрів маневрів судна.
3. Верифікація динамічних моделей маневрування судна експериментальними даними натурного експерименту.

Розгляд першої часткової складової задачі вимагає, перш за все, вибору або розробки динамічних моделей зміни курсу судна та його швидкості в залежності від кута кладки пера керма або сили упору гвинта. Спочатку слід розглянути динамічні моделі обертального руху судна, які представлені диференційними рівняннями до третього порядку включно, причому три моделі припускають миттєву перекладку пера керма, а дві моделі враховують час перекладки пера керма. Тому необхідно провести аналіз всіх п'яти динамічних моделей обертального руху судна та вибрати найбільш придатну, яка поєднує прийнятну ступінь адекватності реальному процесу повороту та досить проста для обчислення. Для цього необхідно провести імітаційне моделювання кожної динамічної моделі з метою отримання криволінійної траєкторії повороту та результати порівняти з експериментальною траєкторією, в результаті чого вибрати модель, що дає добре узгодження з експериментальною. Після вибору такої базової моделі обертального руху необхідно розробити спосіб розрахунку параметрів повороту судна, до яких відноситься момент початку повороту та його тривалість.

Потім необхідно розглянути динамічні моделі гальмування та розгону судна. Для динамічних моделей процесу гальмування судна потрібно розглянути ситуації активного та пасивного гальмування. Для зупинки судна в заданій точці активним чи пасивним гальмуванням з урахуванням можливої течії в районі маневрування необхідно розробити аналітичні процедури розрахунку моменту часу початку гальмування та алгоритм управління судном в процесі гальмування.

Таким чином проводиться визначення залежності параметрів маневрів судна зміною курсу або швидкості від його динаміки.

Розробка графічного способу комп'ютерного моделювання процедур розрахунку параметрів маневрів судна є другою частковою складовою задачею. Для вирішення даної задачі необхідно виділити основні задачі маневрування судна та за допомогою імітаційного моделювання перевірити коректність отриманих процедур розрахунку параметрів маневру. З цією метою слід розробити комп'ютерну імітаційну програму, яка містить окремі модулі розрахунку параметрів маневру судна з подальшим відтворенням маневру в графічному вигляді для оцінки коректності його виконання.

Надалі така імітаційна програма може послужити для розробки навігаційної інформаційної системи яка забезпечує коректне маневрування судна. Імітаційна програма повинна містити наступні модулі:

- модуль динамічних моделей обертального руху судна та моделей активного та пасивного гальмування, а також параметри динамічних моделей, отримані в натурних спостереженнях;
- модуль введення вихідних даних обраного маневру судна з розвиненим графічним інтерфейсом;
- модуль розрахунку параметрів обраного маневру з урахуванням інерційно-гальмівних характеристик судна;
- модуль програвання маневру в графічному режимі з використанням комп'ютерної графіки;
- модуль архівування маневру та в разі необхідності його повторного відтворення.

Рішення третьої часткової складової задачі передбачає розробку способу верифікації динамічних моделей маневрування судна експериментальними даними натурального експерименту.

Для вирішення зазначеної задачі спочатку слід розробити процедури для отримання експериментальних даних при натурних спостереженнях виконання необхідного маневру судна. Так, для отримання параметрів динамічної моделі обертального руху судна слід при повороті фіксувати поточне значення курсу судна в задані моменти часу. Потім експериментальна крива згла-

джується теоретичною кривою, отриманою методом найменших квадратів. При цьому знаходяться постійні часу, які є параметрами динамічної моделі обертального руху судна. Аналогічно фіксуються значення швидкостей судна в задані моменти часу в процесі експериментального активного та пасивного гальмування, що дозволяє знайти відношення коефіцієнта опору до маси судна при заданому значенні початкової швидкості.

Для формального опису процесу зміни швидкості судна, тобто активного та пасивного гальмування, розгону судна та його пригальмовування розглянуто альтернативний підхід, який підтверджує коректність запропонованих динамічних моделей руху судна зі змінною швидкістю. Перевірку обґрунтованості альтернативного підходу здійснено проведенням експериментальних маневрів для різних суден.

Рішенням кожної із складових незалежних задач є відповідний науковий результат (НР1, НР2 та НР3):

- науковим результатом першої складової задачі НР1 є способи розрахунку параметрів маневрів судна в залежності від його динаміки;
- графічний спосіб визначення параметрів маневрів судна за рахунок їх комп'ютерної реалізації є науковим результатом НР2 другої складової задачі;
- процедури верифікації динамічних моделей маневрування судна даними натурного експерименту є науковий результат НР3 третьої складової задачі.

В роботі слід провести комп'ютерне імітаційне моделювання основних результатів дисертаційного дослідження в частині розробки методу розрахунків параметрів маневрування судна зміною курсу або швидкості.

Отримані в дисертаційній роботі теоретичні результати та імітаційне моделювання підтвердили прийняту наукову гіпотезу про існування можливості підвищення точності та оперативності маневру судна за допомогою комп'ютерного пакету розрахунку параметрів маневру.

Практична значимість проведеного дисертаційного дослідження полягає в тому, що його результати можуть бути використані на судах в процесі екс-

платуації, а також розробниками суднових навігаційних інформаційних систем.

Результати дисертаційної роботи мають практичну цінність, яка визначається тим, що отримані в роботі алгоритми та програми можуть бути застосовані при навчанні та підвищенні кваліфікації судноводіїв.

Отримані в дисертаційному дослідженні наукові результати та результати проведеного імітаційного моделювання визначають наукове положення дисертаційної роботи, яке формулюється в такий спосіб:

Розроблено новий метод визначення параметрів маневру судна за допомогою процедур, реалізованих в комп'ютерному модулі, який відрізняється урахуванням динаміки судна та верифікацією динамічних моделей маневрування судна експериментальними даними натурного експерименту.

2.3. Методика проведення дослідження за темою дисертації

Розглянемо короткий виклад методики проведення дослідження за темою дисертаційної роботи із зазначенням методів, які для цього необхідні.

За допомогою методів дедукції слід провести аналіз основних підходів вирішення проблеми безпеки судноводіння, в результаті якого можливо здійснити вибір основного напрямку та теми дисертаційного дослідження.

Черговим етапом роботи є декомпозиція головної задачі дисертації на три незалежні складові задачі, для чого використовуються методи дослідження операцій, при цьому здійснюється методологічне забезпечення дисертаційного дослідження.

За допомогою методів теоретичної механіки необхідно скласти диференціальні рівняння обертального руху судна в залежності від кута кладки пера керма. Також слід скласти диференціальні рівняння руху судна при активному та пасивному гальмуванні в залежності від початкової швидкості та з урахуванням його інерційно-гальмівних характеристик. Потім за допомогою мето-

дів математичного аналізу знайти рішення диференціальних рівнянь, які і будуть динамічними моделями руху судна при зміні курсу та швидкості.

За допомогою отриманих моделей методами аналітичної геометрії необхідно розробити процедури визначення параметрів маневру судна, тобто моментів часу початку повороту і його тривалості при зміні судном курсу або моменту часу початку гальмування при зміні швидкості судна.

Наступним етапом роботи є розробка алгоритмів обчислення параметрів маневру судна і реалізація їх на комп'ютері у вигляді імітаційної програми для перевірки коректності отриманих аналітичних процедур.

На завершення роботи необхідно сформулювати процедури верифікації динамічних моделей маневрування судна експериментальними даними натурного експерименту.

2.4. Висновки за другим розділом

У другому розділі дисертаційної роботи представлено вибір теми дисертаційного дослідження і його основні напрямки.

Методологічна структура дисертаційного дослідження відображена в технологічній карті, за допомогою якої вироблено методологічне забезпечення дисертаційної роботи.

Мета дисертаційного дослідження і його головне завдання, яка розділена на три незалежні складові задачі, представлені в технологічній карті.

Запропоновано і підтверджено робочу гіпотезу наукового дослідження, показано, що отримані наукові результати дисертаційної роботи є рішеннями незалежних складових задач.

В цьому розділі сформульовано основне наукове положення, показано практичну цінність і значимість дисертаційного дослідження, а також наведено зміст натурного експерименту. Також коротко наведено методику вирішення поставлених в роботі задач, яка описує основні етапи наукового дослідження.

дження за темою дисертації і являє собою узагальнений алгоритм реалізації дисертаційного дослідження, що включає розробку теоретичних моделей і проведення імітаційного моделювання.

РОЗДІЛ 3.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ПАРАМЕТРІВ МАНЕВРІВ СУДНА ВІД ЙОГО ДИНАМІКИ

3.1. Динамічні моделі поворотності судна

Поворот судна складається з двох фаз [127]. Спочатку, на першій фазі, в початковий момент часу t_n , коли судно прямує курсом K_o , проводиться перекладка пера керма на кут β_k і кермо утримується в такому положенні протягом інтервалу часу Δt_k . Потім, на другій фазі повороту, проводиться одержування судна, тобто проводиться перекладка керма на протилежний борт на ту ж величину і гаситься інерція повороту судна протягом інтервалу часу Δt , по закінченню якого судно виходить на заданий курс, кутова швидкість повороту перетворюється в нуль, перо керма приводиться в діаметральну площину судна, а судно виходить на курс K_y (рис. 3.1).

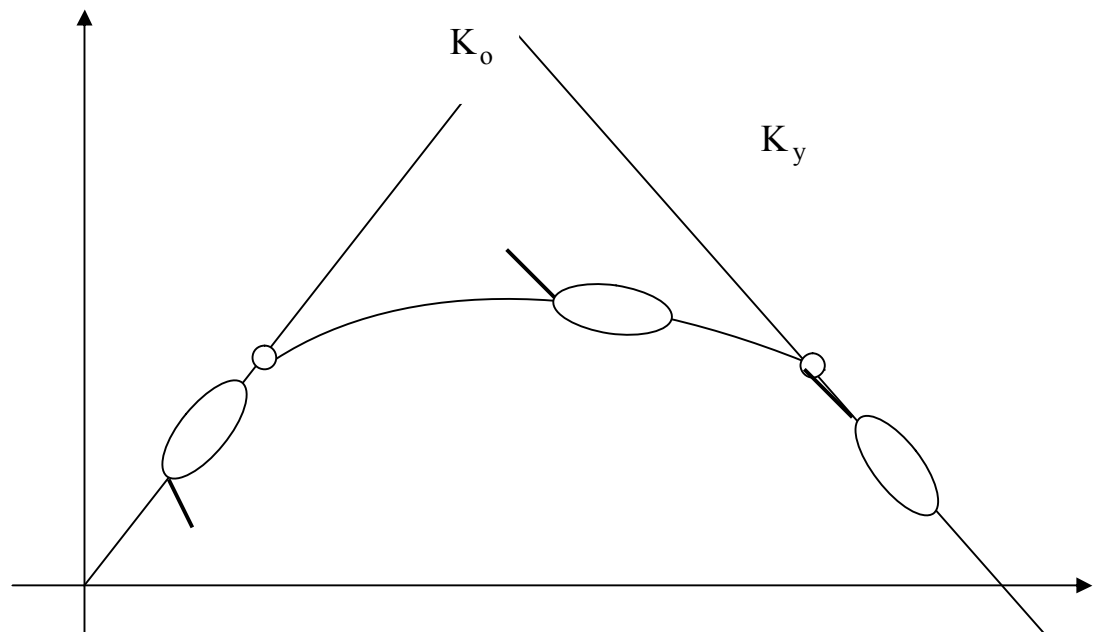


Рис. 3.1. Поворот судна

Для опису повороту судна розглянемо наступні моделі його обертально-го руху [15,73,128]: перша модель, –спрощена, яка описує поворот судна з незмінною кутовою швидкістю, друга і третя моделі враховують наявність постійних часу, що характеризують динаміку судна, і четверта модель, яка крім динаміки судна враховує час перекладки керма. Відзначимо, що перша модель служить початковим наближенням при ітераційному розв'язанні виразів, отриманих за більш складними моделями 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:

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

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

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

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

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

Прирошення координат оперуючого 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 :

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

Позначимо $\Im s = \int_0^{\tau} \sin(a_{\omega} t) dt$ та $\Im c = \int_0^{\tau} \cos(a_{\omega} t) dt$. Тоді останній

вираз для Δx_o приймає наступний вигляд:

$$\Delta x_o = V_o (\sin K_o \Im c + \cos K_o \Im s).$$

Знайдемо вирази для $\Im s$ та $\Im c$:

$$\Im s = \int_0^{\tau} \sin(a_{\omega} t) dt = -\frac{1}{a_{\omega}} \cos(a_{\omega} t) \Big|_0^{\tau} = -\frac{1}{a_{\omega}} [\cos(a_{\omega} \tau) - 1].$$

$$\Im c = \int_0^{\tau} \cos(a_{\omega} t) dt = \frac{1}{a_{\omega}} \sin(a_{\omega} t) \Big|_0^{\tau} = \frac{1}{a_{\omega}} \sin(a_{\omega} \tau).$$

З урахуванням отриманих виразів для шуканих інтегралів запишемо прирощення координати Δx_o 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 $\Delta K = a_{\omega} \tau$, тому вираз для Δx_o приймає вигляд:

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

Звертаємо увагу, що справедливе співвідношення $K_o + \Delta K = K_y$, де K_y – курс другої ділянки програмної траєкторії судна, тому можна остаточно записати вираз для Δx_o :

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

Тепер знайдемо вираз для прирощення другої координати Δy_o :

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

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

$$\Delta y_o = V_o (\cos K_o \Im c - \sin K_o \Im s).$$

Підставляємо значення раніше отриманих інтегралів $\Im c$ та $\Im s$:

$$\Delta y_o = V_o (\cos K_o \Im c - \sin K_o \Im s) \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{V_o}{a_\omega} \{ \cos K_o \sin(a_\omega \tau) + \sin K_o [\cos(a_\omega \tau) - 1] \},$$

або аналогічно попередньому випадку для Δy_o отримуємо:

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

або

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

Таким чином, підбиваючи отримані підсумки, можна відзначити, що розрахунок прирощення координат Δx_o та Δy_o здійснюється за наступними формулами:

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

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

Отримані вирази служать для початкової оцінки величини поправки за інерційність судна [129], а також в якості початкового наближення рішення 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 [128]:

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

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

k_ω – коефіцієнт ефективності керма.

Знайдемо рішення наведеного диференціального рівняння, для чого запишемо його відносно кутової швидкості ω , враховуючи, що $\omega = \dot{K}$:

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

Розглянуте рівняння неоднорідне, тому його спільне рішення є сумою рішення відповідного однорідного рівняння і частинного розв'язання [130], тобто:

$$\omega = \omega_{od} + \omega_r , \quad (3.1)$$

де ω_{od} та ω_r – відповідне розв'язання аналогічного однорідного рівняння і частинний розв'язок.

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

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

якому відповідає наступне характеристичне рівняння:

$$T_1 k + 1 = 0 ,$$

з коренем $k = -1/T_1$. Отже [130], розв'язанням однорідного диференціального

рівняння є:

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

Тому вираз (3.1) приймає наступний вигляд:

$$\omega = C_1 \exp(-t/T_1) + \omega_r. \quad (3.2)$$

Постійну інтегрування C_1 знаходимо з початкових умов при $t = 0$. Початкове значення кутової швидкості позначимо через ω_o і, підставляючи в

(3.2) $t = 0$, отримаємо вираз для постійної інтегрування C_1 :

$$C_1 = \omega_o - \omega_r. \quad (3.3)$$

Тоді, підставляючи (3.3) в (3.2), для ω остаточно отримаємо такий вираз:

$$\omega = (\omega_o - \omega_r) \exp(-t/T_1) + \omega_r. \quad (3.4)$$

Вираз для поточного курсу судна K отримаємо, інтегруючи останнє рівняння, тобто:

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

Введемо наступне позначення для визначеного інтеграла в попередньому рівнянні:

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

і знайдемо для нього вираз. Очевидно, що:

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

або

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

Остаточно для інтеграла J_o отримуємо такий вираз:

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

Тому вираз для курсу судна має такий вигляд:

$$K = K_o + \omega_r t - T_1 (\omega_r - \omega_o) [1 - \exp(-t/T_1)]. \quad (3.5)$$

Знайдемо вирази для поточного значення курсу судна на першій і другій фазах його повороту, які відрізняються положенням пера керма щодо діаметральної площині судна [131].

На першій фазі повороту, тривалість якої становить інтервал часу Δt_k , початкове ω_o і усталене ω_r значення кутової швидкості виражаються наступним чином:

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

В цьому випадку вираз (3.5) набуває такого вигляду:

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

або

$$K = K_o + a_\omega \{t - T_1 [1 - \exp(-t/T_1)]\}. \quad (3.6)$$

На другій фазі повороту в момент часу $t_n + \Delta t_k$ відбувається переключення керма на протилежний борт на кут $-\beta_k$ і протягом інтервалу часу Δt відбувається одержання судна. В цьому випадку початкове значення кутової швидкості на момент часу Δt_k визначається виразом $\omega_o = a_\omega [1 - \exp(-\Delta t_k/T_1)]$, а усталене значення кутової швидкості $\omega_r = -a_\omega$. Підставляємо отримані значення до (3.5):

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

Тому значення поточного курсу описується залежністю:

$$\tilde{K} = K + a_\omega \{T_1 [2 - \exp(-\Delta t_k/T_1)] [1 - \exp(-t/T_1)] - t\}. \quad (3.7)$$

Для обчислення інтервалів часу Δt_k та Δt необхідно скласти систему

рівнянь, яка в загальному випадку формалізує вимоги повороту на задане приращення курсу ΔK , а також втрату кутової швидкості на момент часу виходу на новий курс і має такий вигляд:

$$\begin{cases} \Delta K = K(\Delta t_k) + \tilde{K}(\Delta t) \\ \omega(\Delta t_k, \Delta t) = 0 \end{cases} \quad (3.8)$$

Запишемо перше рівняння системи (3.8) в явному вигляді, використовуючи вирази (3.6) і (3.7) для складових $K(\Delta t_k)$ та $\tilde{K}(\Delta t)$:

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

Розділимо обидві частини отриманого рівняння на величину a_ω і отримаємо:

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

звідки знаходимо вираз для розрахунку Δt_k методом простих ітерацій [132]:

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

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

У наведеному виразі для простих ітерацій необхідно ще знайти зв'язок між перемінними Δt_k та Δt , тобто величину Δt необхідно виразити через Δt_k . Для цього скористаємося другим рівнянням системи (3.8) 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 (3.4), отримаємо:

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

тобто

$$a_\omega [1 - \exp(-\Delta t_k / T_1) + 1] \exp(-\Delta t / T_1) - a_\omega = 0$$

або

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

з цього виразу можна записати:

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

тобто

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

логарифмуючи обидві частини останнього рівняння, отримаємо:

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

або

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

Останнє отримане рівняння дозволяє зв'язати перемінні Δt_k та 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 приращення координат Δx_o та Δy_o оперуючого 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 та Δy_o приймають такий вигляд:

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

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

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

$$\Delta y_o = \int_0^{\Delta t_k} V_o \cos [K_o + K] dt + \int_0^{\Delta t} V_o \cos [K_o + K(\Delta t_k) + \tilde{K}] dt .$$

Підставляючи вирази (3.6) і (3.7) в попередні рівняння, отримаємо спочатку вираз для прирощення Δx_o :

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

або, виносячи постійні величини з-під знака інтеграла:

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

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

Знайдемо вираз для прирощення координати Δy_o :

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

Виносимо постійні величини з-під знака інтеграла і отримаємо:

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

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

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

Звертаємо увагу на ту обставину, що визначені інтеграли, які входять у вирази для Δx_o та Δy_o , не виражаються в елементарних функціях і їх значення знаходяться чисельними методами, наприклад, використовується метод трапецій або, що дає більш точні результати, метод Сімпсона.

Третя динамічна модель зміни курсу судна K при його повороті описується неоднорідним лінійним диференціальним рівнянням третього порядку з постійними коефіцієнтами, яке має наступний вигляд [128]:

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

де T_1 та T_2 – постійні часу, що характеризують інерційні властивості судна.

Знайдемо розв'язання даного диференціального рівняння, для чого запишемо його в залежності від кутової швидкості ω , враховуючи, що $\omega = \dot{K}$:

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

Загальне рішення даного неоднорідного рівняння другого порядку є сумою розв'язання відповідного однорідного рівняння ω_{od} і частинного розв'язання ω_r , т. є.:

$$\omega = \omega_{od} + \omega_r ,$$

Спочатку знайдемо розв'язання ω_{od} , для чого запишемо відповідне однорідне диференціальне рівняння:

$$T_1 T_2 \ddot{\omega} + (T_1 + T_2) \dot{\omega} + \omega = 0 , \quad (3.9)$$

яке має наступне характеристичне рівняння:

$$T_1 T_2 k^2 + (T_1 + T_2) k + 1 = 0, \quad (3.10)$$

корені якого необхідно визначити.

З (3.10) отримуємо:

$$k^2 + \frac{T_1 + T_2}{T_1 T_2} k + \frac{1}{T_1 T_2} = 0,$$

звідки знаходимо вирази для коренів рівняння:

$$\begin{aligned} k_{1,2} &= -(T_1 + T_2)/2T_1 T_2 \pm [(T_1 + T_2)^2/4T_1^2 T_2^2 - 1/T_1 T_2]^{1/2} = \rightarrow \\ &= -(T_1 + T_2)/2T_1 T_2 \pm [(T_1^2 + T_2^2 + 2T_1 T_2 - 4T_1 T_2)/4T_1^2 T_2^2]^{1/2} = \rightarrow \\ &= -(T_1 + T_2)/2T_1 T_2 \pm [(T_1^2 + T_2^2 - 2T_1 T_2)/4T_1^2 T_2^2]^{1/2} = \rightarrow \\ &= -(T_1 + T_2)/(2T_1 T_2) \pm (T_1 - T_2)/(2T_1 T_2). \end{aligned}$$

З останнього рівняння знаходимо такі вирази для шуканих коренів характеристичного рівняння:

$$\begin{aligned} k_1 &= -(T_1 + T_2)/(2T_1 T_2) + (T_1 - T_2)/(2T_1 T_2), \quad \text{або} \quad k_1 = -1/T_1, \\ k_2 &= -(T_1 + T_2)/(2T_1 T_2) - (T_1 - T_2)/(2T_1 T_2), \quad \text{або} \quad k_2 = -1/T_2. \end{aligned}$$

За отриманими значеннями коренів $k_1 = -1/T_1$ та $k_2 = -1/T_2$ можна записати розв'язання вихідного диференційного рівняння (3.10) для кутової швидкості ω [129]:

$$\omega = C_1 \exp(-t/T_1) + C_2 \exp(-t/T_2) + \omega_r. \quad (3.11)$$

Постійні інтегрування C_1 та C_2 знаходимо з початкових умов при $t = 0$. Початкове значення кутової швидкості позначимо через ω_o , а кутове прискорення $\dot{\omega}_o = 0$. Підставляючи початкові значення при $t = 0$ до (3.11), отримуємо наступний вираз:

$$\omega_o = C_1 + C_2 + \omega_r,$$

Для другого виразу необхідно записати аналітичний вид першої похідної $\dot{\omega}$. Для цього необхідно продиференціювати (3.11):

$$\dot{\omega} = -C_1/T_1 \exp(-t/T_1) - C_2/T_2 \exp(-t/T_2),$$

при $t = 0$ отримаємо другий вираз для визначення C_1 та C_2 :

$$\dot{\omega}_0 = -C_1/T_1 - C_2/T_2,$$

або

$$C_1 T_2 + C_2 T_1 = 0.$$

З двох отриманих рівнянь записуємо такі вирази:

$$C_1 + C_2 = \omega_0 - \omega_r, \quad C_1 T_2 + C_2 T_1 = 0.$$

З другого рівняння отримуємо $C_1 = -C_2 T_1/T_2$, що при підстановці в перше рівняння дає:

$$-C_2 T_1/T_2 + C_2 = \omega_0 - \omega_r,$$

звідки:

$$C_2 = -T_2(\omega_0 - \omega_r)/(T_1 - T_2), \quad C_1 = T_1(\omega_0 - \omega_r)/(T_1 - T_2).$$

Тому вираз для кутової швидкості ω приймає вигляд:

$$\omega = \omega_r + (\omega_0 - \omega_r)[T_1 \exp(-t/T_1) - T_2 \exp(-t/T_2)]/(T_1 - T_2). \quad (3.12)$$

Інтегруючи отриманий вираз, знаходимо аналітичну залежність для поточного значення курсу судна в загальному вигляді:

$$K = \int_0^t \omega d\tau = \frac{(\omega_0 - \omega_r)}{(T_1 - T_2)} \int_0^t [T_1 \exp(-\tau/T_1) - T_2 \exp(-\tau/T_2)] d\tau + \int_0^t \omega_r d\tau;$$

$$K = K_0 + \frac{(\omega_0 - \omega_r)}{(T_1 - T_2)} [-T_1^2 \exp(-\tau/T_1) + T_2^2 \exp(-\tau/T_2)] \Big|_0^t + \omega_r t.$$

Підставляючи межі інтегрування, отримуємо наступний вираз для поточного курсу судна K :

$$K = K_0 + \omega_r t + (\omega_0 - \omega_r) \{ T_1^2 [1 - \exp(-t/T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-t/T_2)] \} / (T_1 - T_2).$$

Знайдемо вираз для K , підставляючи в отримане рівняння значення початкової та усталеної кутової швидкості повороту судна на першій фазі, причому $\omega_0 = 0$ та $\omega_r = a_\omega$:

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

або

$$K = K_o + a_{\omega} \{ t - \{ T_1^2 [1 - \exp(-t/T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-t/T_2)] \} / (T_1 - T_2) \}. \quad (3.13)$$

Вираз для поточного курсу судна на другій фазі повороту $\tilde{K}$ отримуємо, підставляючи в вихідний вираз формули для $\omega_o = \omega(\Delta t_k)$ та $\omega_r = -a_{\omega}$. Спочатку знайдемо вираз для $\omega(\Delta t_k)$, враховуючи, що момент часу Δt_k є моментом закінчення першої фази повороту судна. Тому в (3.12) підставляємо Δt_k з урахуванням початкових даних для першої фази повороту:

$$\omega(\Delta t_k) = a_{\omega} - a_{\omega} [T_1 \exp(-\Delta t_k / T_1) - T_2 \exp(-\Delta t_k / T_2)] / (T_1 - T_2),$$

тобто

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

Підставляючи отримані значення ω_o та ω_r в вихідний вираз для поточного курсу судна K , отримаємо:

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

або

$$\begin{aligned} \tilde{K} = K - a_{\omega} t + a_{\omega} \{ 2 - [T_1 \exp(-\Delta t_k / T_1) - T_2 \exp(-\Delta t_k / T_2)] / (T_1 - T_2) \} \times \\ \{ T_1^2 [1 - \exp(-t/T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-t/T_2)] \} / (T_1 - T_2). \end{aligned} \quad (3.14)$$

Вирази (3.13) і (3.14) дозволяють записати перше рівняння для заданої зміни курсу ΔK при повороті оперуючого судна. Однак необхідно спочатку записати вирази для прирощення курсу на першій фазі повороту $K(\Delta t_k)$ і на другій $\tilde{K}(\Delta t)$.

Підставляємо значення Δt_k у вираз (3.13) 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 (3.14) дозволяє отримати вираз для прирошення курсу на другій фазі повороту $\tilde{K}(\Delta t)$:

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

Підставляємо отримані вирази в формулу прирошення курсу

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

і отримаємо наступний аналітичний вираз:

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

Розділимо обидві частини рівняння на величину a_{ω} :

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

З останнього виразу записуємо залежність Δt_k від Δt :

$$\begin{aligned} \Delta t_k = & \Delta t + \{ T_1^2 [1 - \exp(-\Delta t_k / T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-\Delta t_k / T_2)] \} / (T_1 - T_2) - \\ & - \{ 2 - [T_1 \exp(-\Delta t_k / T_1) - T_2 \exp(-\Delta t_k / T_2)] / (T_1 - T_2) \} \times \\ & \{ T_1^2 [1 - \exp(-\Delta t / T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-\Delta t / T_2)] \} / (T_1 - T_2) + \Delta K / a_{\omega}. \end{aligned} \quad (3.15)$$

Друге рівняння складаємо, підставляючи до (3.12) значення початкової та усталеної кутової швидкості на другій фазі повороту і прирівнюючи отриманий вираз до нуля, тобто:

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

$$[T_1 \exp(-\Delta t/T_1) - T_2 \exp(-\Delta t/T_2)]/(T_1 - T_2) - a_\omega = 0.$$

Скорочуючи обидві частини на a_ω , отримуємо наступне рівняння:

$$\{2 - [T_1 \exp(-\Delta t_k/T_1) - T_2 \exp(-\Delta t_k/T_2)]/(T_1 - T_2)\} \times \\ [T_1 \exp(-\Delta t/T_1) - T_2 \exp(-\Delta t/T_2)]/(T_1 - T_2) - 1 = 0,$$

або

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

Проведемо елементарні перетворення в останньому рівнянні:

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

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

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

Логарифмуємо обидві частини останнього рівняння і отримаємо:

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

звідки можна записати наступний вираз:

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

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, що зв'язує Δt_k з Δt :

$$\Delta t = -T_1 \ln \{ (T_2/T_1) \exp(-\Delta t/T_2) + [(T_1 - T_2)/T_1] L^{-1} \}. \quad (3.16)$$

Таким чином, для розрахунку величин Δt_k та Δt методом простих іте-

рацій, задаючись попереднім значенням Δt_k , за допомогою виразу (3.16) обчислюється значення Δt , яке потім підставляється в вираз (3.15) для розрахунку подальшого значення Δt_k .

Знайдемо вирази для розрахунку приращень координат оперуючого судна Δx_o та Δy_o за час повороту τ . Як раніше було показано, шукані приращення координат виражаються наступним чином за допомогою визначених інтегралів:

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

Також враховуємо, що кожен з наведених інтегралів є сумою двох інтегралів, відповідним приращенню координат на першій і другій фазі повороту, тобто:

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

Спочатку знайдемо вираз для приращення Δx_o , виносячи з-під знака інтеграла постійні величини:

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

потім, підставляючи в останній вираз формули (3.13) і (3.14), отримаємо наступну аналітичну залежність:

$$\Delta x_o = V_o \sin K_o \int_0^{\Delta t_k} \cos \{ a_{\omega} \{ t - \{ T_1^2 [1 - \exp(-t/T_1)] \} -$$

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

Аналогічно знаходимо вираз для Δy_o :

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

або, підставляючи вирази для K та $\tilde{K}$, отримаємо:

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

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

Таким чином проводиться розрахунок прирощення координат оперуючого судна за час його повороту з урахуванням третьої динамічної моделі руху по куту рискання.

Розглянуті три динамічні моделі обертального руху припускають миттєву перекладку пера керма. Однак в роботі [15] запропоновано ще дві моделі, в яких враховується час перекладки пера керма.

Розглянемо вплив часу перекладки пера керма на величину поточного значення курсу судна. Будемо припускати, що перекладка пера керма виконується кінцевий час, рівний $\Delta t_{\beta s}$ зі швидкістю V_β і до кінця перекладки кут перекладки пера досягає сталого значення рівного β_o . У першому наближенні будемо вважати, що кут перекладки β змінюється лінійно протягом інтервалу $\Delta t_{\beta s}$, тобто:

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

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

Розглянемо четверту модель повороту судна, яка описується за допомогою диференційного рівняння:

$$T_1 \ddot{K} + \dot{K} = k_\omega \beta, \quad \text{при } t > \Delta t_{\beta s},$$

$$T_1 \ddot{K} + \dot{K} = b_\beta t, \quad \text{при } t \leq \Delta t_{\beta s},$$

де $b_\beta = k_\omega V_\beta$.

Запис наведеного диференційного рівняння відносно кутової швидкості

повороту ω має вигляд:

$$T_1 \dot{\omega} + \omega = b_\beta t. \quad (3.17)$$

Розв'язання відповідного однорідного рівняння (3.17) має такий же вигляд, як і для другої динамічної моделі, а частинний розв'язок, виходячи з аналітичного виду правої частини (3.17), будемо шукати у вигляді [133]:

$$\omega_r = A_o t.$$

З виразу (3.17) знаходимо:

$$A_o = b_\beta;$$

Тому частинний розв'язок має вигляд:

$$\omega_r = b_\beta t.$$

Отже, розв'язання неоднорідного рівняння (3.17) приймає наступний вигляд:

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

Інтегруючи останнє рівняння, одержимо:

$$\begin{aligned} \tilde{K} &= K_o + \int_0^t [(\omega_o - \omega_r) \exp(-\tau/T_1) + \omega_r] d\tau = \\ &= K_o + \int_0^t \omega_o \exp(-\tau/T_1) d\tau - \int_0^t \omega_r \exp(-\tau/T_1) d\tau + \int_0^t \omega_r d\tau. \end{aligned} \quad (3.18)$$

Знайдемо розв'язання кожного з інтегралів у натуральному вираженні (3.18), позначаючи:

$$\mathfrak{I}_1 = \int_0^t \omega_o \exp(-\tau/T_1) d\tau;$$

$$\mathfrak{I}_2 = \int_0^t \omega_r \exp(-\tau/T_1) d\tau;$$

$$\mathfrak{I}_3 = \int_0^t \omega_r d\tau.$$

Розглянемо перший етап повороту судна, коли початкова кутова швид-

кість судна дорівнює нулю $\omega_o = 0$, а $\omega_r = \omega_r = b_\beta t$. В цьому випадку $\mathfrak{I}_1 = 0$, а два наступних інтеграла визначаються виразами:

$$\mathfrak{I}_2 = \int_0^t b_\beta \tau \exp(-\tau / k_1) d\tau; \quad \mathfrak{I}_3 = \int_0^t b_\beta \tau d\tau.$$

Розв'язання інтеграла $\mathfrak{I}_2$ можна знайти, застосовуючи спосіб інтегрування частинами. Для цього позначимо $u = \tau$, $\exp(-\tau / T_1) d\tau = dv$, звідки знаходимо:

$$du = d\tau \quad \text{та} \quad v = \int_0^t b_\beta \exp(-\tau / T_1) d\tau = -T_1 b_\beta \exp(-\tau / T_1).$$

Тому для інтеграла $\mathfrak{I}_2$ справедливі співвідношення:

$$\mathfrak{I}_2 = uv \Big|_0^t - \int_0^t v du = -\tau T_1 b_\beta \exp(-\tau / T_1) \Big|_0^t + T_1 b_\beta \int_0^t \exp(-\tau / T_1) d\tau,$$

або

$$\mathfrak{I}_2 = -\tau T_1 b_\beta \exp(-\tau / T_1) \Big|_0^t - T_1^2 b_\beta \exp(-\tau / T_1) \Big|_0^t = -T_1 b_\beta (\tau + T_1) \exp(-\tau / T_1) \Big|_0^t,$$

звідки впливає такий вираз для шуканого інтеграла:

$$\mathfrak{I}_2 = b_\beta T_1 \{T_1 - (t + T_1) [\exp(-t / T_1)]\}.$$

Вираз для інтеграла $\mathfrak{I}_3$ має такий вигляд:

$$\mathfrak{I}_3 = \int_0^t (b_\beta \tau) d\tau = b_\beta \frac{t^2}{2}.$$

Отже, вираз (3.18) для поточного курсу судна $\tilde{K}$ на інтервалі перекладки пера керма набирає вигляду:

$$\tilde{K} = b_\beta \frac{t^2}{2} - b_\beta T_1 \{T_1 - (t + T_1) [\exp(-t / T_1)]\}$$

або

$$\tilde{K} = b_\beta \left\{ \frac{t^2}{2} - T_1 [T_1 - (t + T_1) \exp(-t / T_1)] \right\}. \quad (3.19)$$

У загальному випадку, коли розглядається перший етап повороту судна з урахуванням часу перекладки пера керма, то, використовуючи вираз (3.19), можна записати вирази для поточного значення курсу судна $\tilde{K}$:

$$\tilde{K} = K_1 + b_\beta \left\{ \frac{t^2}{2} - T_1 [T_1 - (t + T_1) \exp(-t/T_1)] \right\}, \text{ при } t \leq \Delta t_{\beta 1}. \quad (3.20)$$

Надалі, при $t > \Delta t_{\beta 1}$, зміна курсу відбувається при початковій швидкості відмінною від нуля. У цьому випадку початкова швидкість ω_o дорівнює значенню кутової швидкості в момент часу $t = \Delta t_{\beta 1}$, т. е. $\omega_o = \omega(\Delta t_{\beta 1})$, що дає такий вираз для ω_o :

$$\omega_o = a_\omega [1 - \exp(-\Delta t_{\beta 1}/T_1)].$$

Усталене значення кутової швидкості визначається виразом $\omega_r = a_\omega$. Підставляючи отримані вирази ω_o та ω_r в вихідну формулу для кутової швидкості $\omega = (\omega_o - \omega_r) \exp(-t/T_1) + \omega_r$, отримаємо:

$$\omega = \{a_\omega [1 - \exp(-\Delta t_{\beta 1}/T_1)] - a_\omega\} \exp(-t/T_1) + a_\omega,$$

або

$$\omega = a_\omega [1 - \exp(-\Delta t_{\beta 1}/T_1) \exp(-t/T_1)].$$

Інтегруючи останній вираз, отримаємо формулу для поточного курсу судна $\bar{K}$ при $t > \Delta t_{\beta 1}$:

$$\begin{aligned} \bar{K} &= a_\omega \int_0^t [1 - \exp(-\Delta t_{\beta 1}/T_1) \exp(-\tau/T_1)] d\tau \rightarrow \\ &= \tilde{K}(\Delta t_{\beta 1}) + a_\omega \{t - T_1 \exp(-\Delta t_{\beta 1}/T_1) [1 - \exp(-t/T_1)]\}. \end{aligned}$$

Таким чином, при використанні (3.20) зміна курсу судна з урахуванням тривалості кладки пера керма, вираз для поточного значення курсу $\bar{\psi}_t$ на першому етапі повороту приймає наступний вигляд:

$$\bar{K} = \tilde{K} = K_o + b_\beta \left\{ \frac{t^2}{2} - T_1 [T_1 - (t + T_1) \exp(-t/T_1)] \right\}, \quad \text{при } t \leq \Delta t_{\beta 1} \quad (3.21)$$

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

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

Розглянемо випадок, коли поворот судна описується п'ятою моделлю, аналітичний вигляд якої, заданий відносно кутової швидкості, визначається формулою:

$$k_1 k_2 \ddot{\omega} + (k_1 + k_2) \dot{\omega} + \omega = b_\beta t, \quad (3.22)$$

причому, як і в попередньому випадку, частинний розв'язок наведеного рівняння слід шукати у вигляді:

$$\omega_r = A_o t,$$

що з урахуванням виду вихідного рівняння (3.22) дає можливість отримати вираз для коефіцієнта A_o , тобто $A_o = b_\beta$.

Тому частинний розв'язок має вигляд:

$$\omega_r = b_\beta t.$$

Загальне рішення неоднорідного диференційного рівняння, аналогічно третьої моделі, має вигляд:

$$\omega = \omega_r + (\omega_o - \omega_r) [T_1 \exp(-t/T_1) - T_2 \exp(-t/T_2)] / (T_1 - T_2).$$

Для першого етапу повороту судна початкова кутова швидкість $\omega_o = 0$, тому поточне значення курсу судна на першому етапі з урахуванням часу перекладки керма визначиться виразом:

$$K = \int_0^t \omega d\tau = \int_0^t \omega_r d\tau - \frac{1}{(T_1 - T_2)} \int_0^t \omega_r [T_1 \exp(-\tau/T_1) - T_2 \exp(-\tau/T_2)] d\tau.$$

При підстановці виразу $\omega_r = b_\beta t$ отримаємо:

$$K = \int_0^t b_\beta \tau d\tau - k_3 \int_0^t b_\beta \tau [T_1 \exp(-\tau/T_1) - T_2 \exp(-\tau/T_2)] d\tau, \quad (3.23)$$

де $k_3 = \frac{1}{(k_1 - k_2)}$.

Вираз (3.23) записуємо у вигляді:

$$K = \psi_0 + b_\beta \frac{t^2}{2} - k_3 \left\{ \int_0^t b_\beta \tau [T_1 \exp(-\tau/T_1) - T_2 \exp(-\tau/T_2)] d\tau \right\}. \quad (3.24)$$

Введемо позначення для визначених інтегралів в попередньому виразі:

$$\begin{aligned} \mathfrak{I}_1 &= \int_0^t b_\beta \tau T_1 \exp(-\tau/T_1) d\tau = b_\beta T_1 \int_0^t \tau \exp(-\tau/T_1) d\tau; \\ \mathfrak{I}_2 &= \int_0^t b_\beta \tau T_2 \exp(-\tau/T_2) d\tau = b_\beta T_2 \int_0^t \tau \exp(-\tau/T_2) d\tau. \end{aligned}$$

Раніше були отримані рішення інтегралів, аналогічних $\mathfrak{I}_1$ та $\mathfrak{I}_2$, тому можна записати такі вирази:

$$\mathfrak{I}_1 = b_\beta T_1 [T_1^2 - T_1(t + T_1) \exp(-t/T_1)];$$

$$\mathfrak{I}_2 = b_\beta T_2 [T_2^2 - T_2(t + T_2) \exp(-t/T_2)].$$

З урахуванням отриманих виразів для визначених інтегралів вираз (3.24) записується в наступному вигляді:

$$K = K_0 + b_\beta \frac{t^2}{2} - k_3 (\mathfrak{I}_1 - \mathfrak{I}_2),$$

або

$$\begin{aligned} K = K_0 + b_\beta \frac{t^2}{2} - k_3 \{ & b_\beta T_1 [T_1^2 - T_1(t + T_1) \exp(-t/T_1)] - \\ & - b_\beta T_2 [T_2^2 - T_2(t + T_2) \exp(-t/T_2)] \}, \quad \text{при } t \leq \Delta t_{\beta 1}. \end{aligned} \quad (3.25)$$

Надалі, зі зростанням часу, тобто при $t > \Delta t_{\beta 1}$ вираз для поточного значення курсу знаходиться, виходячи з таких міркувань. До закінчення періоду $\Delta t_{\beta 1}$ значення кутової швидкості стає початковим ω_0 для подальшого поточного часу, тому можна записати:

$$\omega_o = b_{\beta} \Delta t_{\beta 1} - b_{\beta} \Delta t_{\beta 1} [T_1 \exp(-\Delta t_{\beta 1} / T_1) - T_2 \exp(-\Delta t_{\beta 1} / T_2)] / (T_1 - T_2).$$

Враховуючи, що $b_{\beta} \Delta t_{\beta 1} = a_{\omega}$, отримаємо:

$$\omega_o = a_{\omega} \left\{ 1 - \frac{1}{(T_1 - T_2)} [T_1 \exp(-\Delta t_{\beta 1} / T_1) - T_2 \exp(-\Delta t_{\beta 1} / T_2)] \right\}.$$

Сталим значенням кутової швидкості для даного процесу є $\omega_r = a_{\omega}$. Тому поточне значення кутової швидкості при $t > \Delta t_{\beta 1}$ описується виразом:

$$\begin{aligned} \omega = a_{\omega} + \frac{1}{(T_1 - T_2)} \{ a_{\omega} [1 - \frac{1}{(T_1 - T_2)} [T_1 \exp(-\Delta t_{\beta 1} / T_1) - T_2 \exp(-\Delta t_{\beta 1} / T_2)] - a_{\omega} \} \times \\ \times [T_1 \exp(-t / T_1) - T_2 \exp(-t / T_2)]. \end{aligned}$$

Виносячи загальний множник a_{ω} за дужки, отримаємо:

$$\begin{aligned} \omega = a_{\omega} \left\{ 1 - \frac{1}{(T_1 - T_2)^2} [T_1 \exp(-\Delta t_{\beta 1} / T_1) - T_2 \exp(-\Delta t_{\beta 1} / T_2)] \right\} \times \\ \times [T_1 \exp(-t / T_1) - T_2 \exp(-t / T_2)]. \end{aligned}$$

При інтегруванні останньої формули отримаємо вираз для поточного значення курсу $\bar{K}$ при $t > \Delta t_{\beta 1}$, що має вигляд:

$$\bar{K} = K(\Delta t_{\beta 1}) + a_{\omega} t - s [-T_1^2 \exp(-\tau / T_1) + T_2^2 \exp(-\tau / T_2)] \Big|_0^t,$$

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

Підставляючи межі інтегрування і приймаючи $\bar{t} = t - \Delta t_{\beta 1}$, отримаємо:

$$\bar{K} = K(\Delta t_{\beta 1}) + a_{\omega} \bar{t} - s T_1^2 [1 - \exp(-\bar{t} / T_1)] + s T_2^2 [1 - \exp(-\bar{t} / T_2)]. \quad (3.26)$$

Отже, використовуючи вирази (3.25) і (3.26), зміна курсу судна з урахуванням часу перекладки пера керма в загальному випадку на першому етапі повороту можна представити за допомогою виразу:

$$\bar{K} = K_o + b_\beta \frac{t^2}{2} - k_3 \{ b_\beta T_1 [T_1^2 - T_1(t + T_1) \exp(-t/T_1)] - \rightarrow \\ - b_\beta T_2 [T_2^2 - T_2(t + T_2) \exp(-t/T_2)] \}, \quad \text{при } t \leq \Delta t_{\beta 1} \quad (3.27)$$

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

де значення $K(\Delta t_{\beta 1})$ визначається першим рівнянням (3.27) і виражається в такий спосіб:

$$K(\Delta t_{\beta 1}) = K_o + b_\beta \frac{\Delta t_{\beta 1}^2}{2} - k_3 \{ b_\beta T_1 [T_1^2 - T_1(\Delta t_{\beta 1} + T_1) \exp(-\Delta t_{\beta 1}/T_1)] - \rightarrow \\ - b_\beta T_2 [T_2^2 - T_2(\Delta t_{\beta 1} + T_2) \exp(-\Delta t_{\beta 1}/T_2)] \}.$$

Для вибору адекватної моделі обертального руху судна, яка може бути застосована в розв'язанні задачі визначення параметрів повороту, було проведено імітаційне моделювання траєкторій повороту за допомогою експериментального матеріалу. Такий матеріал був отриманий в реальних умовах експлуатації, і він послужив для розрахунку чисельних значень інерційних характеристик суден.

Для балкера «Sheila Ann» в реальних умовах експлуатації були отримані матеріали щодо його повороткості, згідно з якими найкраща відповідність з експериментальною траєкторією повороту судна досягається для п'ятого типу моделі. Моделі перших трьох типів мають набагато нижчі точності характеристики, у яких с. к. в. і траєкторна похибка в 2÷4 рази більше, ніж в моделі п'ятого типу, тобто більше на 27÷125 м.

В роботі [79] також було розглянуто імітаційне моделювання повороту контейнеровоза "Oxford", характеристики повороткості якого були приведені в [78], з розрахунком величини траєкторної похибки на момент часу завершення маневру. Як базова модель, 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 пере-

кладки керма. В результаті імітаційного моделювання повороту на 90° було встановлено, що при використанні для прогнозу криволінійної ділянки математичної моделі першого типу траєкторна похибка склала $150 \div 200$ м, для другого типу моделі ця величина склала $35 \div 40$ м, а для третього – $25 \div 30$ м.

Таким чином, найбільш прийнятною для розв'язання задач розбіжності є математична модель поворотності судна третього типу, оскільки при достатній простоті вона володіє необхідною точністю (максимальна розбіжність експериментальної та модельної траєкторій $25 \div 30$ м для обох експериментів). Тому в подальшому в якості моделі обертального руху судна будемо застосовувати математичну модель поворотності судна третього типу.

3.2. Розрахунок часових параметрів повороту судна з однієї програмної ділянки траєкторії на другу

Розглянемо розрахунок моментів часу початку t_n повороту судна з курсу K_1 на курс K_2 програмної траєкторії руху (рис. 3.2). На рисунку початок системи координат OXY поєднано з початковим положенням судна.

Припустимо, що поворот судна починається в початковий момент часу $t = 0$ і завершується в точці M виходом на курс K_2 . Переміщаючи криволінійну траєкторію повороту судна OM за напрямком курсу K_1 до суміщення точки M з другою програмною ділянкою з курсом K_2 , яка проходить через точку A , визначаємо точку початку повороту з моментом часу t_n .

Розглянемо аналітичний опис запропонованого способу [129]. Рівняння прямолінійного ділянки траєкторії з курсом K_1 має вигляд:

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

Рівняння прямої лінії, що проходить через точку M курсом K_2 , виражається в такий спосіб:

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

Координати точки С (x_c, y_c) знайдемо, враховуючи, що вона є точкою перетину згаданих двох прямих ліній, тобто з системи рівнянь:

$$\begin{cases} y_c = x_c \operatorname{ctg} K_1; \\ y_c = y_m + (x_c - x_m) \operatorname{ctg} K_2 \end{cases} \quad (3.28)$$

Звідки:

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

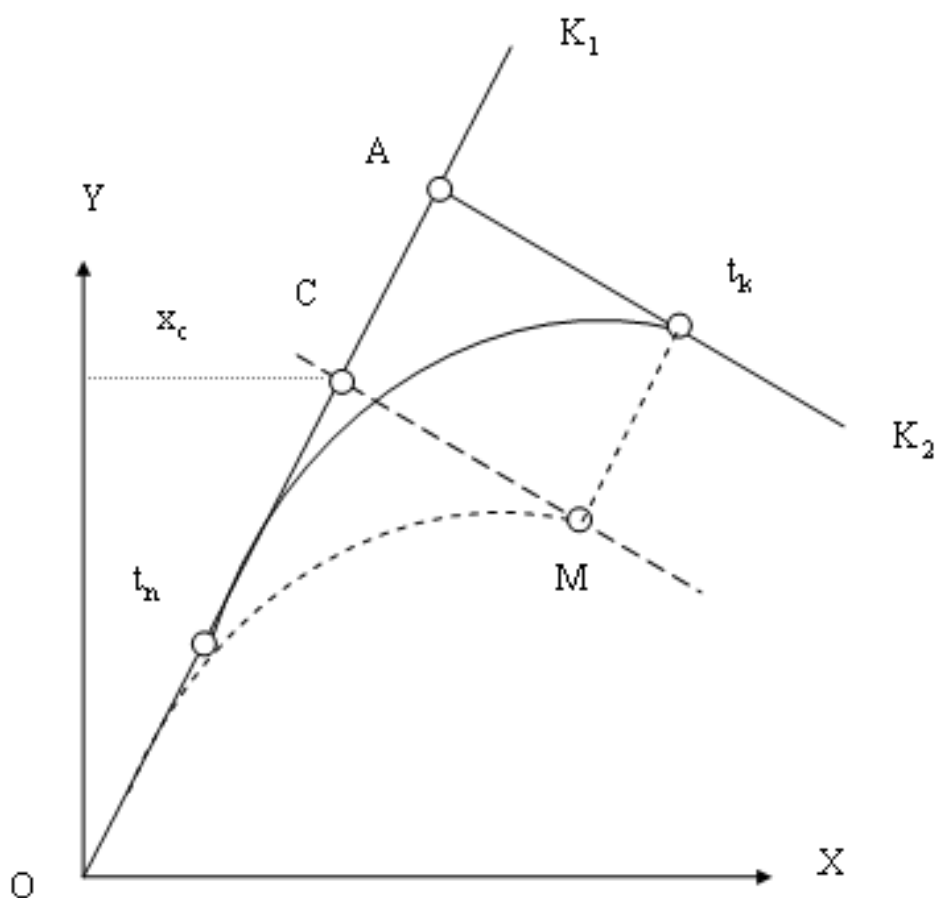


Рис. 3.2. Криволінійна траєкторія руху судна при повороті

З останнього рівняння знаходимо 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 (3.28) отримаємо вираз для ОС:

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

Очевидно, що час початку повороту судна t_n визначається виразом:

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

Для розрахунку значення x_c необхідно визначити приращення координат судна x_m та y_m за час маневру τ , які визначаються наступним чином:

$$x_m = \int_0^{\tau} V_1 \sin[K_1 + K(t)] dt, \quad y_m = \int_0^{\tau} V_1 \cos[K_1 + K(t)] dt. \quad (3.29)$$

Поворот судна складається з двох етапів, причому на першому етапі судно протягом інтервалу часу Δt_1 здійснює поворот під дією перекладеного керма на кут β_k .

Потім, на другому етапі, проводиться перекладка керма на протилежний борт на ту ж величину і протягом інтервалу часу Δt_2 гаситься інерція повороту судна, а судно виходить на курс K_2 .

Отже, вираз (3.29) приймає вид:

$$\begin{aligned} x_m &= \int_0^{\Delta t_1} V_1 \sin[K_1 + K] dt + \int_0^{\Delta t_2} V_1 \sin[K_1 + K(\Delta t_1) + \tilde{K}] dt, \\ y_m &= \int_0^{\Delta t_1} V_1 \cos[K_1 + K] dt + \int_0^{\Delta t_2} V_1 \cos[K_1 + K(\Delta t_1) + \tilde{K}] dt, \end{aligned} \quad (3.30)$$

де K та $\tilde{K}$ – поточне значення курсу судна відповідно на першому і другому етапах повороту, які визначаються виразами:

$$K = K_1 + a_{\omega} \{t - \{T_1^2 [1 - \exp(-t/T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-t/T_2)]\} / (T_1 - T_2)\}. \quad (3.31)$$

$$\begin{aligned} \tilde{K} &= K(\Delta t_1) - a_{\omega} t + a_{\omega} \{2 - [T_1 \exp(-\Delta t_1/T_1) - T_2 \exp(-\Delta t_1/T_2)] / (T_1 - T_2)\} \times \\ &\quad \{T_1^2 [1 - \exp(-t/T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-t/T_2)]\} / (T_1 - T_2), \end{aligned} \quad (3.32)$$

де a_{ω} – усталене значення кутової швидкості повороту судна;

T_1 та T_2 – постійні часу, що враховують інерційність судна.

Для обчислення інтервалів часу Δt_1 та Δt_2 , протягом яких курс судна змінюється на величину $\Delta K = K_2 - K_1$, в загальному вигляді запропонована наступна система рівнянь [134]:

$$\begin{cases} \Delta K = K(\Delta t_1) + \tilde{K}(\Delta t_2) \\ \omega(\Delta t_1, \Delta t_2) = 0 \end{cases}, \quad (3.33)$$

в якій перше рівняння є очевидним співвідношенням, а друге – є умовою звертання в нуль до кінця повороту кутової швидкості ω судна.

Підставляючи в вираз (3.33) формули (3.31) та (3.32), отримаємо залежності, з яких можна розрахувати значення Δt_1 та Δt_2 методом простих ітерацій. Після цього, використовуючи отримані значення Δt_1 і Δt_2 , підставляючи формули (3.31) і (3.32) у вирази (3.30), шукані приращення координат судна x_m та y_m розраховуються наступним чином [135]:

$$x_m = V_1 \left[\int_0^{\Delta t_1} y_1(t) dt + \int_0^{\Delta t_2} y_2(t) dt \right]; \quad y_m = V_1 \left[\int_0^{\Delta t_1} y_3(t) dt + \int_0^{\Delta t_2} y_4(t) dt \right], \quad (3.34)$$

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

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

Кожен з чотирьох інтегралів виразу (3.34) доцільно обчислити методом Сімпсона. У загальному випадку 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 виконується інтегрування, необхідно розбити на парне число n елементарних інтервалів h_j , тривалість кожного з яких доцільно вибрати рівною $h = 1$ 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 справедливе 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 шуканий визначений інтеграл обчислюється за такою формулою:

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

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

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

3.3. Особливості розрахунку моментів часу початку і закінчення повороту судна при розходженні з ціллю на заданій дистанції

Розглянемо ситуацію, коли судно небезпечно зближується з ціллю і дистанція найкоротшого зближення менше гранично-допустимої дистанції D_d (рис. 3.3) [136].

З рис. 3.3 випливає, що аналітичним виразом, що відображає безпечну розбіжність з ціллю в заданій дистанції D_d , є рівність:

$$D(t_{yk}) \sin[\tilde{K}_{oty} - \alpha(t_{yk})] = D_d, \quad (3.35)$$

де ліва частина рівності є виразом для дистанції найкоротшого зближення, причому $D(t_{yk})$ и $\alpha(t_{yk})$ – відповідно дистанція і пеленг на ціль в момент часу t_{yk} закінчення повороту для розходження з ціллю. При цьому врахуємо, що $t_{yk} = t_{yn} + \tau$, де τ – тривалість повороту судна при ухиленні.

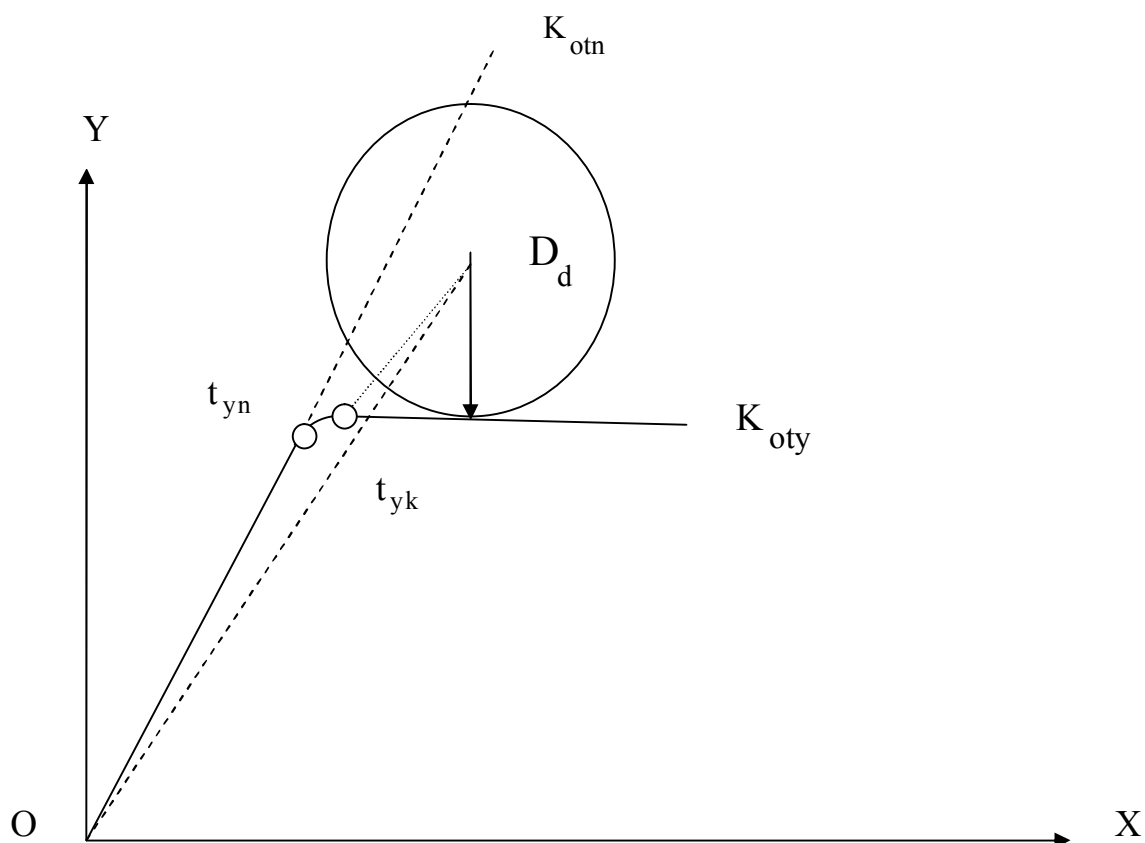


Рис. 3.3. Ілюстрація умови безпечного ухилення судна

Очевидно, що останній вираз (3.35) можна записати в наступному вигляді:

$$D(t_{yk})[\sin K_{oty} \cos \alpha(t_{yk}) - \cos K_{oty} \sin \alpha(t_{yk})] = D_d$$

або

$$\Delta y(t_{yk}) \sin K_{oty} - \Delta x(t_{yk}) \cos K_{oty} = D_d, \quad (3.36)$$

де $\Delta y(t_{yk})$ и $\Delta x(t_{yk})$ – різницю координат цілі і судна в момент часу t_{yk} , причому $\Delta y(t_{yk}) = D(t_{yk}) \cos \alpha(t_{yk})$ та $\Delta x(t_{yk}) = l(t_{yk}) \sin \alpha(t_{yk})$.

З іншого боку різниця координат $\Delta x(t_{yk})$ та $\Delta y(t_{yk})$ визначаються наступними виразами:

$$\Delta y(t_{yk}) = \Delta y_n - V_{otn} t_{yn} \cos K_{otn} - (\Delta y_o - \Delta y_1),$$

$$\Delta x(t_{yk}) = \Delta x_n - V_{otn} t_{yn} \sin K_{otn} - (\Delta x_o - \Delta x_1),$$

де V_{otn} та K_{otn} – початкові відносні швидкість і курс;

$\Delta y_o, \Delta x_o, \Delta y_1, \Delta x_1$ – відповідно приращення координат судна і цілі за інтервал часу τ .

З урахуванням наведених позначень вираз (3.36) можна записати в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} & (\Delta y_n - V_{otn} t_{yn} \cos K_{otn} - \Delta y_o + \Delta y_1) \sin K_{oty} - \rightarrow \\ & \rightarrow (\Delta x_n - V_{otn} t_{yn} \sin K_{otn} - \Delta x_o + \Delta x_1) \cos K_{oty} = D_d, \end{aligned}$$

або

$$\begin{aligned} t_{yn} V_{otn} (\sin K_{otn} \cos K_{oty} - \cos K_{otn} \sin K_{oty}) &= D_d - (\Delta y_n - \Delta y_o + \Delta y_1) \sin K_{oty} \rightarrow \\ &\rightarrow + (\Delta x_n - \Delta x_o + \Delta x_1) \cos K_{oty}, \end{aligned}$$

звідки нескладно знайти вираз для t_{yn} , враховуючи, що $\Delta x_n = D_n \sin \alpha_n$ та

$$\Delta y_n = D_n \cos \alpha_n, \text{ а також } \Delta x_1 = V_1 \tau \sin K_1 \text{ та } \Delta y_1 = V_1 \tau \cos K_1:$$

$$t_{yn} = \hat{t}_{yn} - [\Delta x_o \cos K_{oty} - \Delta y_o \sin K_{oty} + V_1 \tau \sin(K_{oty} - K_1)] / V_{otn} \sin(K_{otn} - K_{oty}), \quad (3.37)$$

де V_1, K_1 – швидкість і курс цілі;

$\hat{t}_{yn}$ – момент часу початку маневру, розрахований без урахування ди-

наміки судна, який визначається виразом:

$$\hat{t}_{yn} = [\hat{D}_d + D_n \sin(\alpha_n - K_{oty})] / V_{otn} \sin(K_{otn} - K_{oty}).$$

Значення величин $\Delta x_o, \Delta y_o$ і τ в вираженні для t_{yn} визначаються динамічною моделлю, яка описує рух судна.

Раніше вказувалося, що поворот судна містить дві фази кладки пера керма. Спочатку, на першій фазі, в початковий момент часу проводиться пере-
кладка керма на кут β_k і кермо утримується в такому положенні протягом ін-
тервалу часу Δt_k . Потім проводиться перекладка керма на протилежний борт
на ту ж величину і гаситься інерція повороту судна протягом інтервалу часу
 Δt , по закінченню якого судно виходить на заданий курс, кутова швидкість

повороту звертається в нуль, а перо керма приводиться в діаметральну площину судна.

Таким чином, для розрахунку величини t_{yn} необхідно обчислити інтервали часу Δt_k та Δt , які в сумі дають величину часу повороту судна τ , а також приращення координат судна Δx_o , Δy_o за цей час.

Поточні значення курсу судна на першій і другій фазах повороту визначаються виразами (3.31) і (3.32), що мають вигляд:

$$K = K_1 + a_{\omega} \{ t - \{ T_1^2 [1 - \exp(-t/T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-t/T_2)] \} / (T_1 - T_2) \}.$$

$$\tilde{K} = K(\Delta t_1) - a_{\omega} t + a_{\omega} \{ 2 - [T_1 \exp(-\Delta t_1/T_1) - T_2 \exp(-\Delta t_1/T_2)] / (T_1 - T_2) \} \times \\ \{ T_1^2 [1 - \exp(-t/T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-t/T_2)] \} / (T_1 - T_2),$$

Величини інтервалів часу Δt_k та Δt розраховуємо за допомогою системи рівнянь (3.33), використовуючи вирази для K та $\tilde{K}$. Після розрахунку величин Δt_k та Δt знаходимо тривалість повороту судна, що дозволяє обчислити приращення координат судна Δx_o , Δy_o , а потім за допомогою формули (3.37) – момент часу початку повороту t_{yn} .

3.4. Врахування падіння швидкості судна при повороті

Як показано в роботах [50,137-130], при повороті судна його швидкість падає на значну величину, – у середньотоннажних суден на сталої циркуляції з максимальною перекладкою керма падіння швидкості в середньому становить 40% від швидкості судна перед циркуляцією.

Відношення швидкості на сталої циркуляції $\bar{V}$ до швидкості V_o судна перед циркуляцією може бути оцінене за допомогою формули [137]:

$$\frac{\bar{V}}{V_o} = \frac{1}{[1 + 10(L/R_c)^2]^{1/3}}. \quad (3.38)$$

При сталій циркуляції її радіус R_c виражається через кутову швидкість a_ω наступним чином:

$$\bar{V} = a_\omega R_c, \text{ звідки випливає: } R_c = \frac{\bar{V}}{a_\omega},$$

тому вираз (3.38), зважаючи, що $a_\omega = k_\omega \beta_k$ приймає вигляд:

$$\bar{V} = \frac{V_o}{[1 + 10(Lk_\omega \beta_k / \bar{V})^2]^{1/3}}.$$

З даного рівняння методом простих ітерацій можна знайти значення сталої швидкості $\bar{V}$ в залежності від кута перекладки керма β_k . Звертаємо увагу, що зміна швидкості від значення V_o до значення $\bar{V}$ відбувається протягом інтервалу часу τ_p , від моменту часу початку перекладки пера керма до моменту часу настання сталої циркуляції. Перехідний закон падіння швидкості судна V можна припустити в такий спосіб [138].

У момент початку перекладки пера керма (нульовий момент часу) швидкість судна дорівнює V_o , протягом інтервалу часу τ_p швидкість судна убыває і при настанні моменту часу τ_p швидкість судна досягає значення $\bar{V}$, і в подальшому вона зберігається незмінною до закінчення циркуляції.

Враховуючи, що падіння швидкості відбувається на першій фазі повороту, то залежність швидкості від часу при циркуляції зручно записати в такий спосіб:

$$\begin{cases} V = V_o - (V_o - \bar{V})[1 - \exp(-\frac{t}{\tau_p - t})], & t \leq \tau_p, \\ V = \bar{V}, & \tau \geq t > \tau_p. \end{cases}$$

або

$$\begin{cases} V = V_o - \Delta V[1 - \exp(-\frac{t}{\tau_p - t})], & t \leq \tau_p, \\ V = \bar{V}, & \tau \geq t > \tau_p. \end{cases}$$

де $\Delta V = V_o - \bar{V}$.

Падіння швидкості судна при циркуляції не впливає на тривалість повороту, проте змінює приращення координат судна за час повороту Δx_0 та Δy_0 .

$$\Delta x_0 = \int_0^{\tau} V \sin[K_0 + K(t)] dt, \quad \Delta y_0 = \int_0^{\tau} V \cos[K_0 + K(t)] dt.$$

Враховуємо, що кожен з наведених інтегралів є сумою трьох інтегралів, два з яких відповідають приращенням координат на першій фазі повороту і третій інтеграл – на другій фазі, тобто:

$$\Delta x_0 = \int_0^{\tau_p} V \sin[K_0 + K] dt + \int_{\tau_p}^{\Delta t k} \bar{V} \sin[K_0 + K] dt + \int_0^{\Delta t} \bar{V} \sin[K_0 + K(\Delta t_k) + \tilde{K}] dt,$$

$$\Delta y_0 = \int_0^{\tau_p} V \cos[K_0 + K] dt + \int_{\tau_p}^{\Delta t k} \bar{V} \cos[K_0 + K] dt + \int_0^{\Delta t} \bar{V} \cos[K_0 + K(\Delta t_k) + \tilde{K}] dt ..$$

Підставляючи вираз для V , отримаємо:

$$\Delta x_0 = \int_0^{\tau_p} \{V_0 - \Delta V[1 - \exp(-\frac{t}{\tau_p - t})]\} \sin[K_0 + K] dt + \int_{\tau_p}^{\Delta t k} \bar{V} \sin[K_0 + K] dt +$$

$$\int_0^{\Delta t} \bar{V} \sin[K_0 + K(\Delta t_k) + \tilde{K}] dt,$$

$$\Delta y_0 = \int_0^{\tau_p} \{V_0 - \Delta V[1 - \exp(-\frac{t}{\tau_p - t})]\} \cos[K_0 + K] dt + \int_{\tau_p}^{\Delta t k} \bar{V} \cos[K_0 + K] dt +$$

$$\int_0^{\Delta t} \bar{V} \cos[K_0 + K(\Delta t_k) + \tilde{K}] dt ..$$

Виносимо постійні величини з-під знака інтеграла:

$$\Delta x_0 = V_0 \int_0^{\tau_p} \sin[K_0 + K] dt - \Delta V \int_0^{\tau_p} [1 - \exp(-\frac{t}{\tau_p - t})] \sin[K_0 + K] dt +$$

$$+ \bar{V} \int_{\tau_p}^{\Delta t k} \sin[K_0 + K] dt + \bar{V} \int_0^{\Delta t} \sin[K_0 + K(\Delta t_k) + \tilde{K}] dt,$$

$$\Delta y_o = V_o \int_0^{\tau_p} \cos[K_o + K] dt - \Delta V \int_0^{\tau_p} [1 - \exp(-\frac{t}{\tau_p - t})] \cos[K_o + K] dt + \\ + \bar{V} \int_{\tau_p}^{\Delta t_k} \cos[K_o + K] dt + \bar{V} \int_0^{\Delta t} \cos[K_o + K(\Delta t_k) + \tilde{K}] dt .$$

В отриманих виразах припущення координат Δx_o та Δy_o враховуємо зміну курсу судна на першій і другій фазах повороту (3.13) і (3.14):

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

3.5. Розрахунок параметрів маневру судна зміною швидкості

В даному підрозділі розглянемо маневр зупинки судна в заданій точці активним чи пасивним гальмуванням, причому потрібно визначити момент часу зупинки двигуна при пасивному гальмуванні або момент його реверсу – при активному гальмуванні.

Для вирішення перерахованих завдань необхідно розглянути математичну модель лінійного руху судна зі змінною швидкістю.

Як вказується в роботі [2], активне гальмування судна при постійному курсі з достатньою для практики точністю описується диференціальним рівнянням залежності швидкості судна V від упору гвинта P , причому сила упору гвинта збігається за знаком з силою опору:

$$(1 + k)m \frac{dV}{dt} + \mu V^2 + P = 0 ,$$

де $(1 + k)m$ – маса судна з приєднаними масами води;

μ – коефіцієнт опору.

Дане рівняння записується в наступному вигляді:

$$(1 + k)m \frac{dV}{dt} = -\mu V^2 - P ,$$

звідки отримуємо рівняння з відокремлюваними змінними:

$$\frac{(1+k)m}{\mu} \frac{dV}{V^2 + \frac{P}{\mu}} = -dt. \quad (3.39)$$

Інтегруємо обидві частини рівняння, і отримаємо:

$$\frac{(1+k)m}{\mu} \frac{\sqrt{\mu}}{\sqrt{P}} \operatorname{arctg}\left(\frac{\sqrt{\mu}}{\sqrt{P}} V\right) = -t + C. \quad (3.40)$$

Постійну інтегрування C знаходимо з початкових умов при $t=0$, в цьому випадку $V = V_0$ і:

$$C = \frac{(1+k)m}{\mu} \frac{\sqrt{\mu}}{\sqrt{P}} \operatorname{arctg}\left(\frac{\sqrt{\mu}}{\sqrt{P}} V_0\right).$$

Тому з (3.40) з урахуванням останнього виразу отримаємо:

$$t = \frac{(1+k)m}{\sqrt{\mu P}} \left[\operatorname{arctg}\left(\frac{\sqrt{\mu}}{\sqrt{P}} V_0\right) - \operatorname{arctg}\left(\frac{\sqrt{\mu}}{\sqrt{P}} V\right) \right]. \quad (3.41)$$

При активному гальмуванні $V = 0$, отже:

$$t_a = \frac{(1+k)m}{\sqrt{\mu P}} \operatorname{arctg}\left(\frac{\sqrt{\mu}}{\sqrt{P}} V_0\right). \quad (3.42)$$

Отримане рівняння характеризує залежність часу t_a до повної зупинки судна від його початкової швидкості V_0 при активному гальмуванні.

З рівняння (3.41) можна отримати залежність поточної швидкості судна V від часу при активному гальмуванні, очевидно:

$$\operatorname{arctg}\left(\frac{\sqrt{\mu}}{\sqrt{P}} V_0\right) - \operatorname{arctg}\left(\frac{\sqrt{\mu}}{\sqrt{P}} V\right) = \frac{\sqrt{\mu P}}{(1+k)m} t, \quad \text{звідки}$$

$$\operatorname{arctg}\left(\frac{\sqrt{\mu}}{\sqrt{P}} V\right) = \operatorname{arctg}\left(\frac{\sqrt{\mu}}{\sqrt{P}} V_0\right) - \frac{\sqrt{\mu P}}{(1+k)m} t.$$

З даного рівняння отримаємо:

$$\frac{\sqrt{\mu}}{\sqrt{P}} V = \operatorname{tg}\left[\operatorname{arctg}\left(\frac{\sqrt{\mu}}{\sqrt{P}} V_0\right) - \frac{\sqrt{\mu P}}{(1+k)m} t\right],$$

або остаточно:

$$V = \frac{\sqrt{P}}{\sqrt{\mu}} \operatorname{tg}[\operatorname{arctg}(\frac{\sqrt{\mu}}{\sqrt{P}} V_0) - \frac{\sqrt{\mu P}}{(1+k)m} t].$$

Дистанцію S_a , яку судно проходить до зупинки при активному гальмуванні, можна визначити наступним чином. Зі співвідношення $t = \frac{S}{V}$ випливає $dt = \frac{dS}{V}$, тому рівняння (3.39) приймає вид:

$$\frac{(1+k)m}{\mu} \frac{dV}{V^2 + \frac{P}{\mu}} = -\frac{dS}{V},$$

або

$$\frac{(1+k)m}{\mu} \frac{VdV}{V^2 + \frac{P}{\mu}} = -dS.$$

Інтегруємо це рівняння:

$$\frac{(1+k)m}{\mu} \int \frac{VdV}{V^2 + \frac{P}{\mu}} = -S + C. \quad (3.43)$$

Розглянемо інтеграл цього виразу:

$$\int \frac{VdV}{V^2 + \frac{P}{\mu}} = \left| \begin{array}{l} x = V^2 + \frac{P}{\mu} \\ dx = 2VdV \end{array} \right| = \frac{1}{2} \int \frac{dx}{x} = \frac{1}{2} \ln|x| = \frac{1}{2} \ln \left| V^2 + \frac{P}{\mu} \right|.$$

Тому вираз (3.43) приймає наступний вигляд:

$$\frac{(1+k)m}{2\mu} \ln \left| V^2 + \frac{P}{\mu} \right| = -S + C.$$

З початкових умов ($S = 0$) знаходимо постійну інтегрування C :

$$C = \frac{(1+k)m}{2\mu} \ln \left| V_0^2 + \frac{P}{\mu} \right|.$$

Тому отримаємо вираз для S :

$$S = \frac{(1+k)m}{2\mu} \left[\ln \left| V_0^2 + \frac{P}{\mu} \right| - \ln \left| V^2 + \frac{P}{\mu} \right| \right].$$

При активному гальмуванні $V = 0$, тому:

$$S_a = \frac{(1+k)m}{2\mu} \left[\ln \left| V_o^2 + \frac{P}{\mu} \right| - \ln \left| \frac{P}{\mu} \right| \right],$$

або

$$S_a = \frac{(1+k)m}{2\mu} \left[\ln \left| \frac{\mu}{P} (V_o^2 + \frac{P}{\mu}) \right| \right].$$

Остаточно для величини шляху активного гальмування отримаємо:

$$S_a = \frac{(1+k)m}{2\mu} \ln \left| 1 + \frac{\mu}{P} V_o^2 \right|.$$

Розглянемо режим пасивного гальмування. В цьому випадку сила упору гвинта дорівнює нулю і вихідне диференціальне рівняння руху судна приймає наступний вигляд:

$$(1+k)m \frac{dV}{dt} + \mu V^2 = 0,$$

або

$$(1+k)m \frac{dV}{dt} = -\mu V^2.$$

Розділимо змінні в цьому рівнянні:

$$\frac{(1+k)m}{\mu} \frac{dV}{V^2} = -dt. \quad (3.44)$$

Інтегруємо отримане рівняння, в результаті чого отримаємо:

$$-\frac{(1+k)m}{\mu V} = -t + C. \quad (3.45)$$

При $t = 0$, очевидно, $V = V_o$ і постійна інтегрування C визначається виразом:

$$C = -\frac{(1+k)m}{\mu V_o},$$

тому з виразу (3.50) випливає:

$$t = \frac{(1+k)m}{\mu} \left(\frac{1}{V} - \frac{1}{V_o} \right), \quad (3.46)$$

звідки впливає вираз для часу зупинки судна t_p при пасивному гальмуванні:

$$t_p = \frac{(1+k)m}{\mu V_o} \left(\frac{V_o}{V_k} - 1 \right), \quad (3.47)$$

де V_k – швидкість судна в кінці гальмування.

Залежність швидкості судна від часу при пасивному гальмуванні можна знайти з виразу (3.46):

$$\frac{1}{V} - \frac{1}{V_o} = \frac{\mu}{(1+k)m} t,$$

або

$$\frac{V_o}{V} = 1 + \frac{V_o \mu}{(1+k)m} t,$$

звідки

$$V = \frac{V_o}{1 + \frac{V_o \mu}{(1+k)m} t}.$$

Знайдемо вираз для дистанції S_p , яку судно проходить при пасивному гальмуванні, за допомогою формули (3.44). З цією метою скористаємося співвідношенням $dt = \frac{dS}{V}$. З виразу (3.44):

$$\frac{(1+k)m}{\mu} \frac{dV}{V^2} = -\frac{dS}{V}.$$

Розділяємо змінні:

$$\frac{(1+k)m}{\mu} \frac{VdV}{V^2} = -dS.$$

Інтегруємо отримане рівняння:

$$\frac{(1+k)m}{\mu} \int \frac{VdV}{V^2} = -S + C. \quad (3.48)$$

В інтегралі отриманого рівняння виконуємо заміну змінної:

$$V^2 = x, \quad dx = 2VdV.$$

Рівняння (3.53) приймає вид:

$$\frac{(1+k)m}{\mu} \frac{1}{2} \int \frac{dx}{x} = -S + C,$$

або

$$\frac{(1+k)m}{\mu} \frac{1}{2} \ln|V^2| = -S + C.$$

З урахуванням початкових умов $t=0$, $S_0=0$ та $V=V_0$ з останнього рівняння знаходимо постійну інтегрування C :

$$C = \frac{(1+k)m}{2\mu} \ln|V_0^2|.$$

З урахуванням отриманого виразу можна записати:

$$S = \frac{(1+k)m}{2\mu} (\ln|V_0^2| - \ln|V^2|),$$

звідки отримаємо:

$$S_p = \frac{(1+k)m}{2\mu} \ln \left| \frac{V_0^2}{V_k^2} \right|,$$

де V_k – швидкість судна в завершенні пасивного гальмування.

Розрахункові формули для активного і пасивного гальмування наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Розрахункові формули t_s та S_s судна в різних режимах руху

	Активне гальмування	Пасивне гальмування
Поточна швидкість	$V_a = \frac{\sqrt{P}}{\sqrt{\mu}} \operatorname{tg}[\arctg(\frac{\sqrt{\mu}}{\sqrt{P}} V_0) - \frac{\sqrt{\mu P}}{(1+k)m} t]$	$V_p = \frac{V_0}{1 + \frac{V_0 \mu}{(1+k)m} t}$
Час гальмування	$t_a = \frac{(1+k)m}{\sqrt{\mu P}} \arctg(\frac{\sqrt{\mu}}{\sqrt{P}} V_0)$	$t_p = \frac{(1+k)m}{\mu V_0} (\frac{V_0}{V_k} - 1)$
Пройдена відстань	$S_a = \frac{(1+k)m}{2\mu} \ln \left 1 + \frac{\mu}{P} V_0^2 \right $	$S_p = \frac{(1+k)m}{2\mu} \ln \left \frac{V_0^2}{V_k^2} \right $

Розглянемо розрахунок часу початку гальмування судна для його зупинки в заданій точці [139].

Спочатку будемо вважати, що течія в районі маневру судна відсутня. За вихідними даними розраховуються значення часу гальмування t_C і дистанції S_C . Якщо позначити дистанцію в початковий момент часу до точки зупинки через D , то, очевидно, момент часу початку гальмування t_n визначається наступним виразом:

$$t_n = \frac{D - S_C}{V_v},$$

де V_v – швидкість судна (м/с).

У разі наявності течії слід розглянути два етапи руху судна: з нульового моменту часу до моменту часу початку гальмування, коли швидкість судна незмінна, і другий етап з моменту часу початку гальмування до зупинки судна, коли швидкість судна зменшується (рис. 3.4).

Для вирішення поставленого завдання спочатку слід визначити відстань S_Σ , для чого розглянемо трикутник DEF.

У цьому трикутнику S_C – відстань гальмування, а відстань S_T характеризує знесення судна течією за час гальмування t_s , причому очевидний такий вираз: $S_T = V_T t_s$, де V_T – швидкість течії.

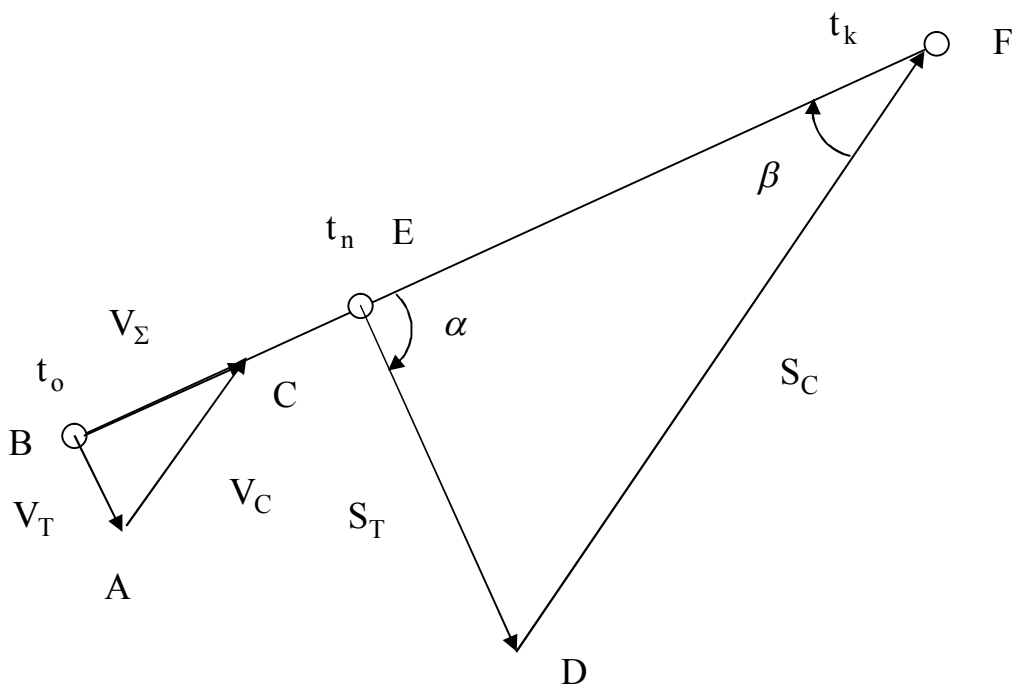


Рис. 3.4. Вплив течії на процес гальмування судна

Кут зносу течією β можна знайти із співвідношення:

$$\frac{\sin \beta}{\sin \alpha} = \frac{S_T}{S_C}, \quad \beta = \arcsin\left(\frac{S_T}{S_C} \sin \alpha\right).$$

В останніх виразах $\sin \alpha = |\sin(K_T - K_V)|$, $\alpha = \arcsin[|\sin(K_T - K_V)|]$,

де K_V – програмний курс судна;

K_T – напрямок течії.

За теоремою косинусів з трикутника DEF випливає:

$$S_\Sigma = \sqrt{S_T^2 + S_C^2 - 2S_T S_C \cos(\pi - \alpha - \beta)}.$$

З рис. 3.5 випливає:

$$t_n = \frac{D - S_\Sigma}{V_\Sigma}, \quad (3.49)$$

де V_Σ – швидкість переміщення судна по програмній траєкторії.

Знайдемо вираз для швидкості V_Σ , вводячи позначення для кутів:

$$\alpha_1 = \angle ABC \quad \text{та} \quad \beta_1 = \angle BCA.$$

Звертаємо увагу, що $\alpha_1 = \alpha$. Очевидно, що $\beta_1 = \arcsin\left(\frac{V_T}{V_C} \sin \alpha\right)$.

Також за теоремою косинусів з трикутника ABC отримаємо:

$$V_{\Sigma} = \sqrt{V_T^2 + V_C^2 - 2V_TV_C \cos(\pi - \alpha - \beta_1)}.$$

За формулою (3.49) розраховуємо момент часу початку гальмування t_n при наявності течії. Момент часу закінчення гальмування t_k розраховується за допомогою виразу:

$$t_k = t_n + t_s.$$

Відзначимо, що на першому етапі з нульового моменту часу t_0 до моменту часу початку гальмування t_n курс судна K_C дорівнює $K_C = K_V + \beta_1$, а на другому етапі з моменту часу t_n до моменту часу t_k судно має слідувати курсом $K_C = K_V + \beta$.

3.6. Висновки за третім розділом

У розділі розглянуто теоретичні основи маневрування судна, отримані математичні моделі, що враховують динаміку судна при зміні його курсу і швидкості.

Особливості поворотності судна описані п'ятьма моделями його обертального руху з різним ступенем урахування істотних чинників, аж до врахування часу перекладки пера керма, які з різним рівнем адекватності відображають рух судна в залежності від кута перекладки пера керма.

Отримано експериментальні дані обертального руху судна, і показано, що з прийнятною для практичних потреб точністю рух судна при повороті може бути описано третьою динамічною моделлю, в якій зміна курсу судна формалізується диференціальним рівнянням третього порядку.

Розглянуто чотири задачі визначення параметрів повороту судна при

програмній зміні його курсу і в разі ухилення від цілі, що небезпечно зближується. При цьому розглянуто ситуацію невеликих змін курсу, коли можна вважати швидкість судна при повороті незмінною, і ситуація значного повороту судна з падінням швидкості на циркуляції.

Отримано коректні вирази, що характеризують рух судна при активному і пасивному гальмуванні. Розглянуто задачу зупинки судна в заданій точці при активному і пасивному гальмуванні з урахуванням течії в районі маневрування. Аналітичні вирази для розрахунку параметрів маневрів представлені у вигляді, зручному для застосування чисельних методів розрахунку.

РОЗДІЛ 4.

СІНТЕЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ
В СУДНОВІЙ ІНФОРМАЦІЙНІЙ КОМП'ЮТЕРНІЙ СИСТЕМІ

В цьому розділі наведено розробку модулів програми суднової інформаційної комп'ютерної системи, що вирішує основні шість раніше розглянутих задач, причому вибір конкретної задачі здійснюється за допомогою відповідної клавіші, як показано на рис. 4.1.

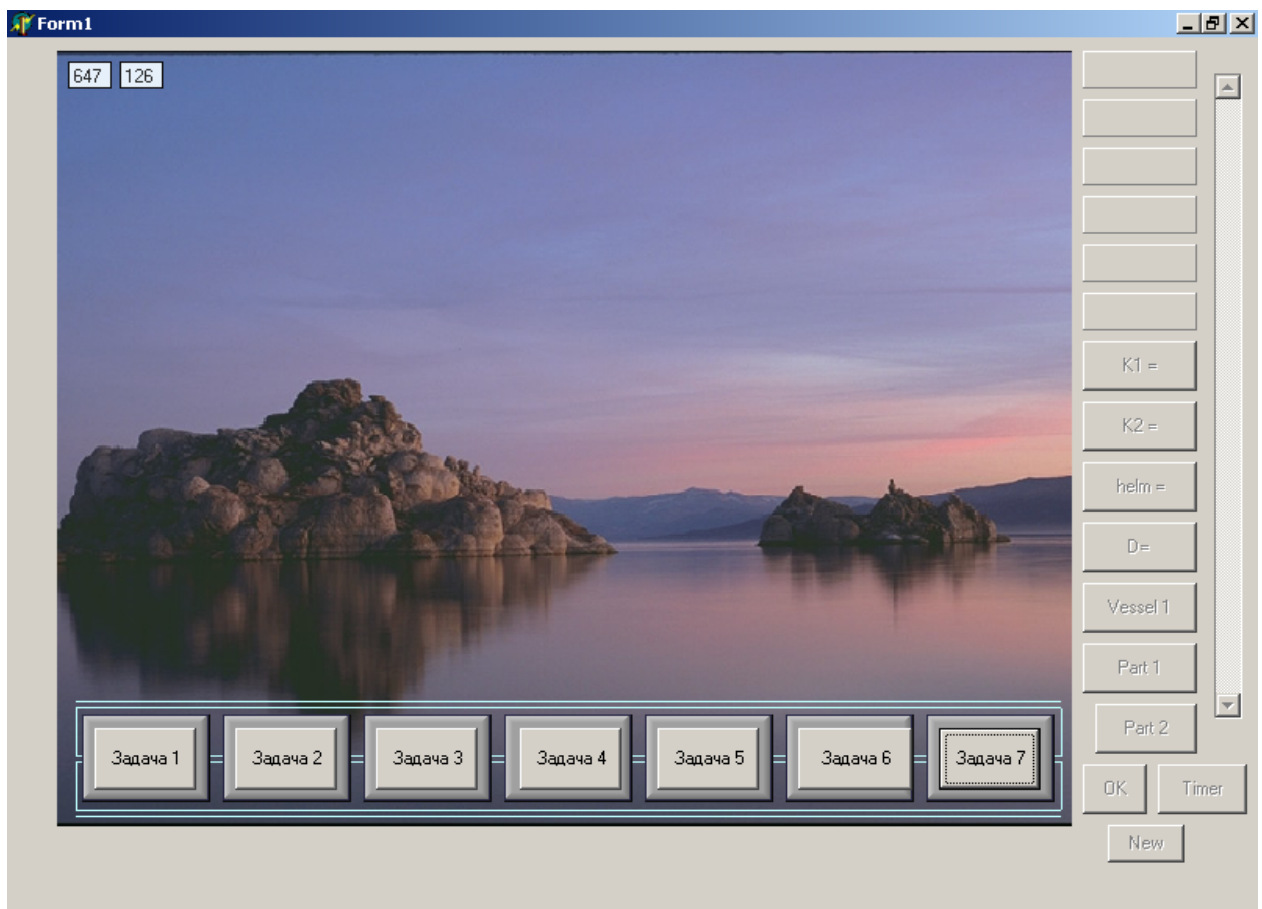


Рис. 4.1. Інтерфейс імітаційної програми при виборі задачі маневрування

4.1. Імітаційна модель розрахунку параметрів повороту судна з одного програмного курсу траєкторії на наступний курс

Для розробки імітаційної моделі повороту судна на суміжну ділянку програмної траєкторії необхідно привести алгоритм такого маневру, використовуючи матеріал підрозділу 3.1.

Основним параметром повороту судна є момент часу його початку t_n , коли судно знаходиться на попередній ділянці програмної траєкторії і слідує курсом K_1 , змінюючи його до курсу K_2 другої ділянки програмної траєкторії. Вираз для моменту часу t_n отримано в 3.1 і має такий вигляд:

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

де $x_c = \frac{y_m - x_m \operatorname{ctg} K_2}{\operatorname{ctg} K_1 - \operatorname{ctg} K_2}$, а припущення координат судна x_m та y_m за час ма-

невру τ визначаються в такий спосіб:

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

де K та $\tilde{K}$ – поточне значення курсу судна відповідно на першому і другому етапах повороту, які визначаються виразами:

$$K = K_1 + a_\omega \{ t - \{ T_1^2 [1 - \exp(-t/T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-t/T_2)] \} / (T_1 - T_2) \}.$$

$$\begin{aligned} \tilde{K} &= K(\Delta t_1) - a_\omega t + a_\omega \{ 2 - [T_1 \exp(-\Delta t_1/T_1) - T_2 \exp(-\Delta t_1/T_2)] / (T_1 - T_2) \} \times \\ &\quad \{ T_1^2 [1 - \exp(-t/T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-t/T_2)] \} / (T_1 - T_2), \end{aligned}$$

де a_ω – усталене значення кутової швидкості повороту судна;

T_1 та T_2 – постійні часу, що враховують інерційність судна.

Для обчислення інтервалів часу Δt_1 та Δt_2 , протягом яких курс судна

змінюється на величину $\Delta K = K_2 - K_1$, запропонована наступна система рівнянь:

$$\begin{aligned} \Delta t_1 = \Delta t_2 + \{T_1^2 [1 - \exp(-\Delta t_1 / T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-\Delta t_1 / T_2)]\} / (T_1 - T_2) - \\ - \{2 - [T_1 \exp(-\Delta t_1 / T_1) - T_2 \exp(-\Delta t_1 / T_2)] / (T_1 - T_2)\} \times \\ \times \{T_1^2 [1 - \exp(-\Delta t_1 / T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-\Delta t_1 / T_2)]\} / (T_1 - T_2) + \Delta K / a_{\omega}. \end{aligned}$$

$$\Delta t_2 = -T_1 \ln \{ (T_2 / T_1) \exp(-\Delta t_2 / T_2) + [(T_1 - T_2) / T_1] L^{-1} \},$$

де $L = 2 - [T_1 \exp(-\Delta t_1 / T_1) - T_2 \exp(-\Delta t_1 / T_2)] / (T_1 - T_2)$.

Розв'язуючи дану систему рівнянь методом простих ітерацій, знаходимо значення Δt_1 та Δt_2 [140].

Після чого шукані приращення координат судна x_m та y_m розраховуються наступним чином:

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

де $y_1(t) = \sin[K_1 + K(t)]$;

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

$y_3(t) = \cos[K_1 + K(t)]$;

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

Кожен з даних чотирьох інтегралів виразу доцільно обчислити методом Сімпсона. У загальному випадку 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 вибрати рівною $h = 1$ с. При цьому $n = 2 \text{Trunc}(\Delta t_i / 2)$.

Якщо позначити $y_{ij} = y_i(t_j)$, то шуканий певний інтеграл обчислюється за такою формулою:

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

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

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

Наведемо алгоритм розрахунку моментів часу початку t_n і закінчення t_k повороту судна, вважаючи в першому наближенні сталість його швидкості на циркуляції. Алгоритм визначення параметрів повороту судна показаний на рис. 4.2.

Наведений алгоритм був реалізований в імітаційній моделі відтворення повороту судна з однієї ділянки програмної траєкторії на наступну. У імітаційному моделюванні використовувалася третя модель обертального руху судна, яка служила для розрахунку параметрів повороту судна і використовувалася при відтворенні повороту з заданими вихідними даними.

Для перевірки коректності процедури розрахунку моментів часу початку t_n і закінчення t_k повороту судна була розроблена комп'ютерна програма, що дозволяє після розрахунку згаданих моментів часу програти поворот і оцінити точність виходу судна з попередньої прямолінійної ділянки програмної траєкторії руху на наступну, причому попередньо використовується процедура введення вихідних даних.

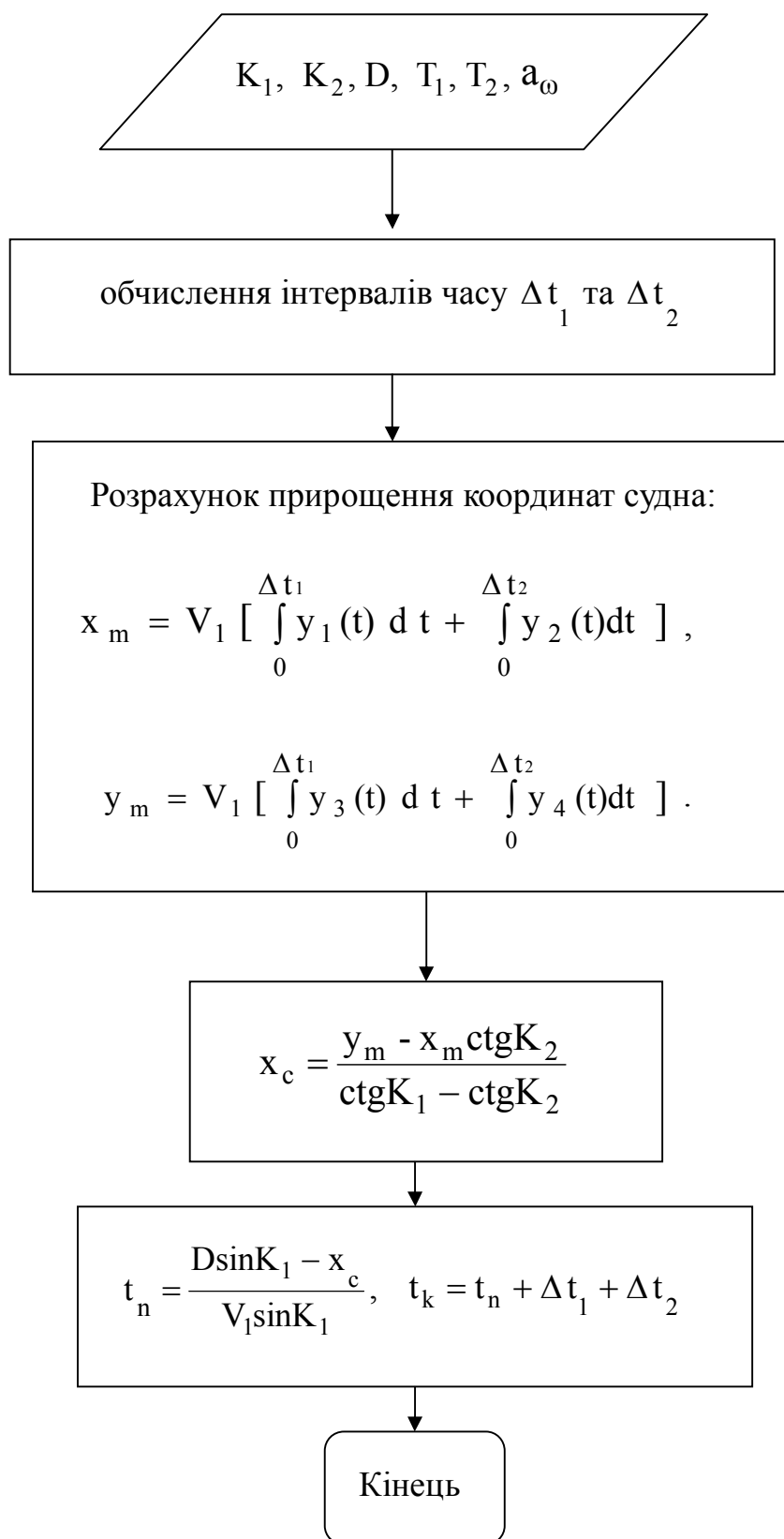


Рис. 4.2. Алгоритм розрахунку параметрів повороту судна

Як показано на рис. 4. 3, клавiшею «Vessel» вибираються параметри моделі повороткості судна, а клавiшею «helm» – кут кладки керма. Також відповідними клавiшами і лiнiйкою прокрутки вводяться курси першої і наступної дiлянок траєкторії і дистанція до точки повороту.

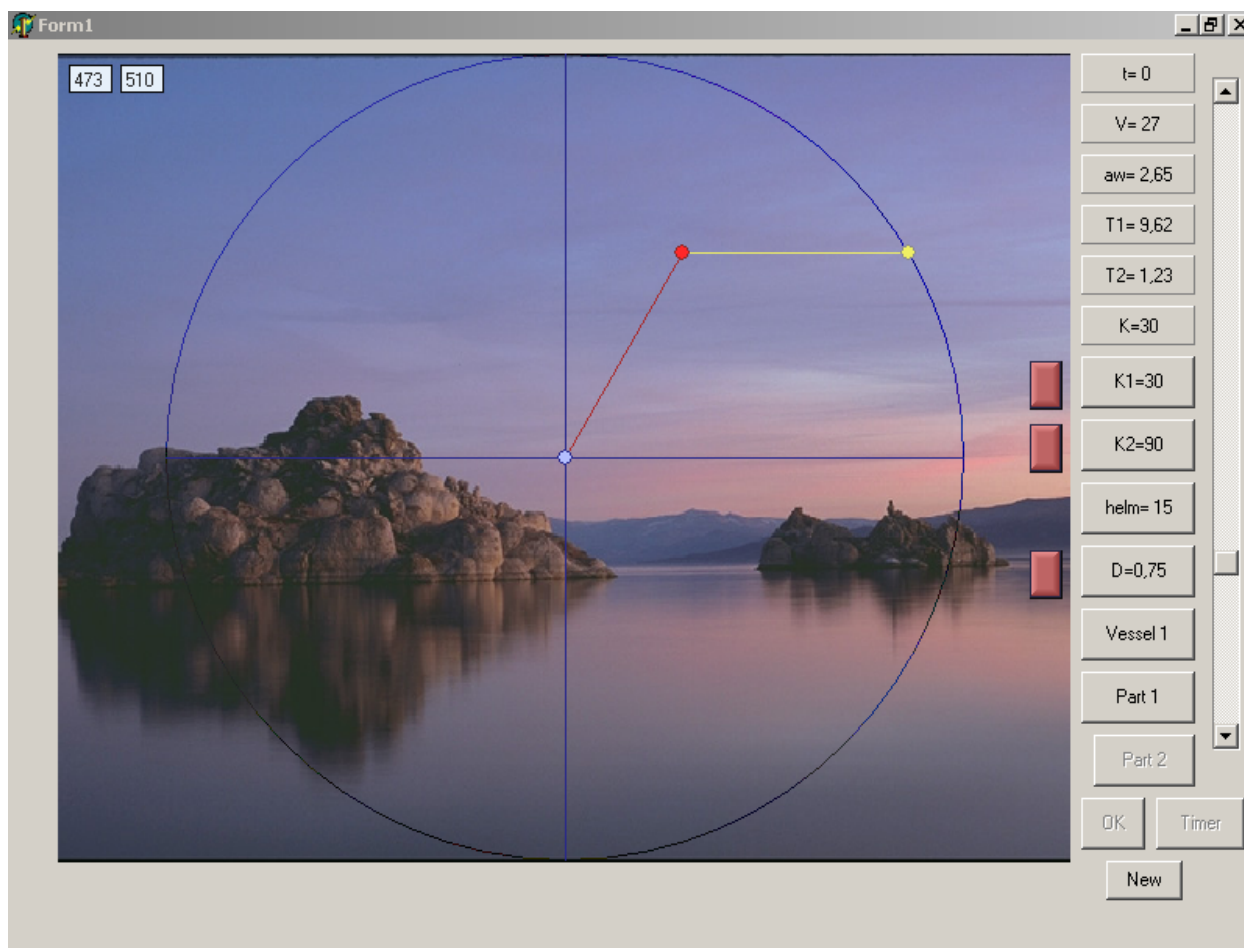


Рис. 4.3. Моделювання повороту судна з курсу $K_1=30^\circ$ на $K_2=90^\circ$

За допомогою клавiші «Part 1» виводиться схема обраного повороту і вказуються значення розрахованих моментів часу початку і кінця маневру, як показано на рис. 4. 4.



Рис. 4.4. Схема повороту судна

Використовуючи клавішу «Timer», в прискореному масштабі часу проводиться відтворення повороту, при якому фіксується траєкторія руху судна (рис. 4.5) і реалізується можливість контролю коректності виконання майбутнього маневру.

У процесі відтворення маневру архівується процес повороту, який може бути переглянутий за допомогою клавіші «Part 2», як показано на рис. 4. 6.

Зробити вибір параметрів іншого повороту або однієї з шести інших задач маневрування судна можна, повертаючись до основного меню імітаційної програми, для чого слід скористатися керуючою клавішею «New».

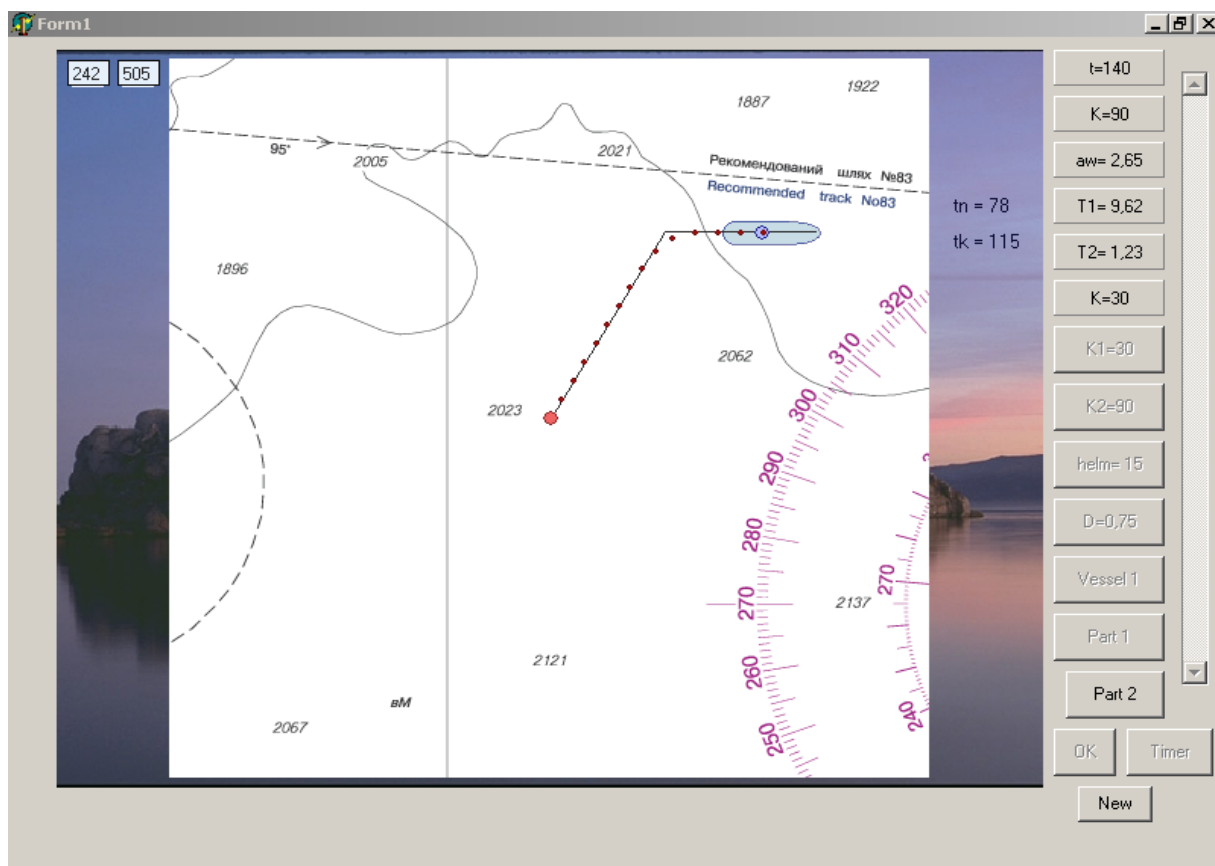


Рис. 4.5. Результати відтворення повороту судна

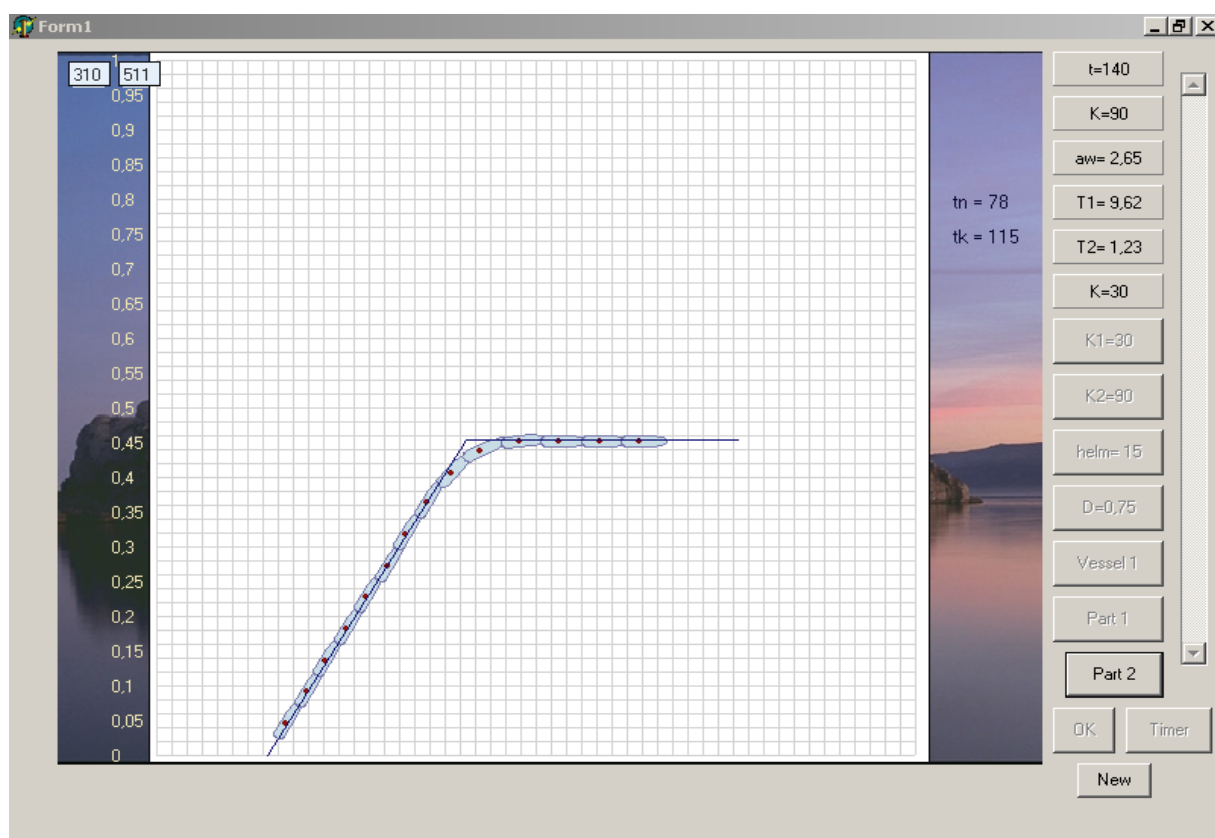


Рис. 4.6. Використання запису відтвореного повороту судна

4.2. Імітаційне моделювання ситуації повороту судна при розходженні з ціллю на заданій дистанції

При небезпечному зближенні судна з ціллю в ситуації, коли є достатній водний простір, судну доцільно зробити поворот на курс ухилення K_y , забезпечує розходження з ціллю на заданій гранично-допустимій дистанції D_d [141]. Для виконання такого маневру судну, виходячи з початкової відносної позиції і параметрів руху судна і цілі, необхідно визначити курс ухилення K_y , а також моменти початку t_{yn} і закінчення t_{yk} повороту.

Маневр ухилення судна, що забезпечує розходження з ціллю на заданій дистанції D_d , визначається наступною рівністю [136]:

$$D(t_{yk}) \sin[K_{oty} - \alpha(t_{yk})] = D_d,$$

де $D(t_{yk})$ і $\alpha(t_{yk})$ – відповідно дистанція і пеленг на ціль в момент часу t_{yk} закінчення повороту для розходження з ціллю, причому $t_{yk} = t_{yn} + \tau$, а τ – тривалість повороту судна при ухиленні.

Значення відносного курсу ухилення K_{oty} знаходиться з наведеного рівняння і визначається формулою:

$$K_{oty} = \alpha(t_{yk}) \pm \arcsin\left[\frac{D_d}{D(t_{yk})}\right].$$

За отриманим відносним курсом K_{oty} , користуючись результатами роботи [9], знаходимо значення справжнього курсу ухилення K_y , при цьому основною ознакою є співвідношення швидкостей судна V_v і цілі V_t , яке характеризується величиною $\rho = \frac{V_v}{V_t}$.

В разі $\rho > 1$ кожному відносному курсу відповідає один істинний курс, причому аналітична залежність має такий вигляд:

$$K_y = K_{oty} + \arcsin[\rho^{-1} \sin(K_t - K_{oty})].$$

Якщо справедлива нерівність $\rho < 1$, то кожному відносному курсу, крім екстремальних, відповідає два справжніх курси, тобто розходження судна з ціллю можливі, як на зустрічних, так і на попутних курсах.

$$K_{y1} = K_{oty} + \arcsin [\rho^{-1} \sin(K_t - K_{oty})], \quad \text{на зустрічних курсах};$$

$$K_{y2} = K_{oty} + \pi - \arcsin [\rho^{-1} \sin(K_t - K_{oty})], \quad \text{на попутних курсах.}$$

Як показано в третьому розділі, момент часу t_{yn} початку повороту судна розраховується за допомогою формули:

$$t_{yn} = \hat{t}_{yn} - \frac{\Delta x_o \cos K_{oty} - \Delta y_o \sin K_{oty} + V_t \tau \sin(K_{oty} - K_t)}{V_{otn} \sin(K_{otn} - K_{oty})},$$

де V_t, K_t – швидкість і курс цілі;

$\hat{t}_{yn}$ – момент часу початку маневру, розрахований без урахування динаміки судна, який визначається виразом:

$$\hat{t}_{yn} = \frac{D_d + D_n \sin(\alpha_n - K_{oty})}{V_{otn} \sin(K_{otn} - K_{oty})}.$$

Розрахунок величини t_{yn} вимагає обчислення інтервалів часу Δt_k та Δt , які в сумі дають величину часу повороту судна τ , а також приращення координат судна $\Delta x_o, \Delta y_o$ за цей час.

Для третьої моделі обертального руху судна інтервали часу першої Δt_k і другої Δt фази повороту судна, як показано в попередньому розділі, обчислюються за допомогою системи рівнянь:

$$\begin{cases} \Delta t_k = \Delta t + \{T_1^2 [1 - \exp(-\Delta t_k / T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-\Delta t_k / T_2)]\} / (T_1 - T_2) - \\ \{T_1^2 [1 - \exp(-\Delta t_k / T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-\Delta t_k / T_2)]\} / (T_1 - T_2) - \\ - \{2 - [T_1 \exp(-\Delta t_k / T_1) - T_2 \exp(-\Delta t_k / T_2)] / (T_1 - T_2) \times \\ \{T_1^2 [1 - \exp(-\Delta t_k / T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-\Delta t_k / T_2)]\} / (T_1 - T_2) + \Delta K / a_\omega, \\ \Delta t = -T_1 \ln \{(T_2 / T_1) \exp(-\Delta t / T_2) + [(T_1 - T_2) / T_1] L^{-1}, \end{cases}$$

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

За допомогою системи наведених рівнянь розрахунків величин Δt_k та Δt проводиться методом простих ітерацій, задаючись попереднім значенням Δt_k , за допомогою другого рівняння обчислюється значення Δt , яке потім підставляється в перший рівняння для розрахунку подальшого значення Δt_k .

Маючи значення інтервалів часу першої Δt_k і другої Δt фази повороту судна, проводиться розрахунок прирощень координат судна Δx_o , Δy_o за час повороту за допомогою формул, отриманих в попередньому розділі для третьої моделі обертального руху судна:

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

Аналогічно знаходимо вираз для Δy_o :

$$\Delta y_o = V_o \cos K_o \int_0^{\Delta t_k} \cos(K) dt - V_o \sin K_o \int_0^{\Delta t_k} \sin(K) dt +$$

$$V_o \cos[K_o + K(\Delta t_k)] \int_0^{\Delta t} \cos(\tilde{K}) dt - V_o \sin[K_o + K(\Delta t_k)] \int_0^{\Delta t} \sin(\tilde{K}) dt ,$$

або, підставляючи вирази для K та $\tilde{K}$, отримаємо:

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

Як і в попередній задачі, припущення координат судна Δx_o , Δy_o розраховуємо, обчислюючи визначені інтеграли методом Сімпсона.

Розрахунок моментів часу закінчення повороту судна t_{yk} проводиться за очевидною формулою: $t_{yk} = t_{yn} + \tau$.

Алгоритм розрахунку параметрів маневру ухилення судна, вважаючи сталість його швидкості на циркуляції, наведено на рис. 4. 7.

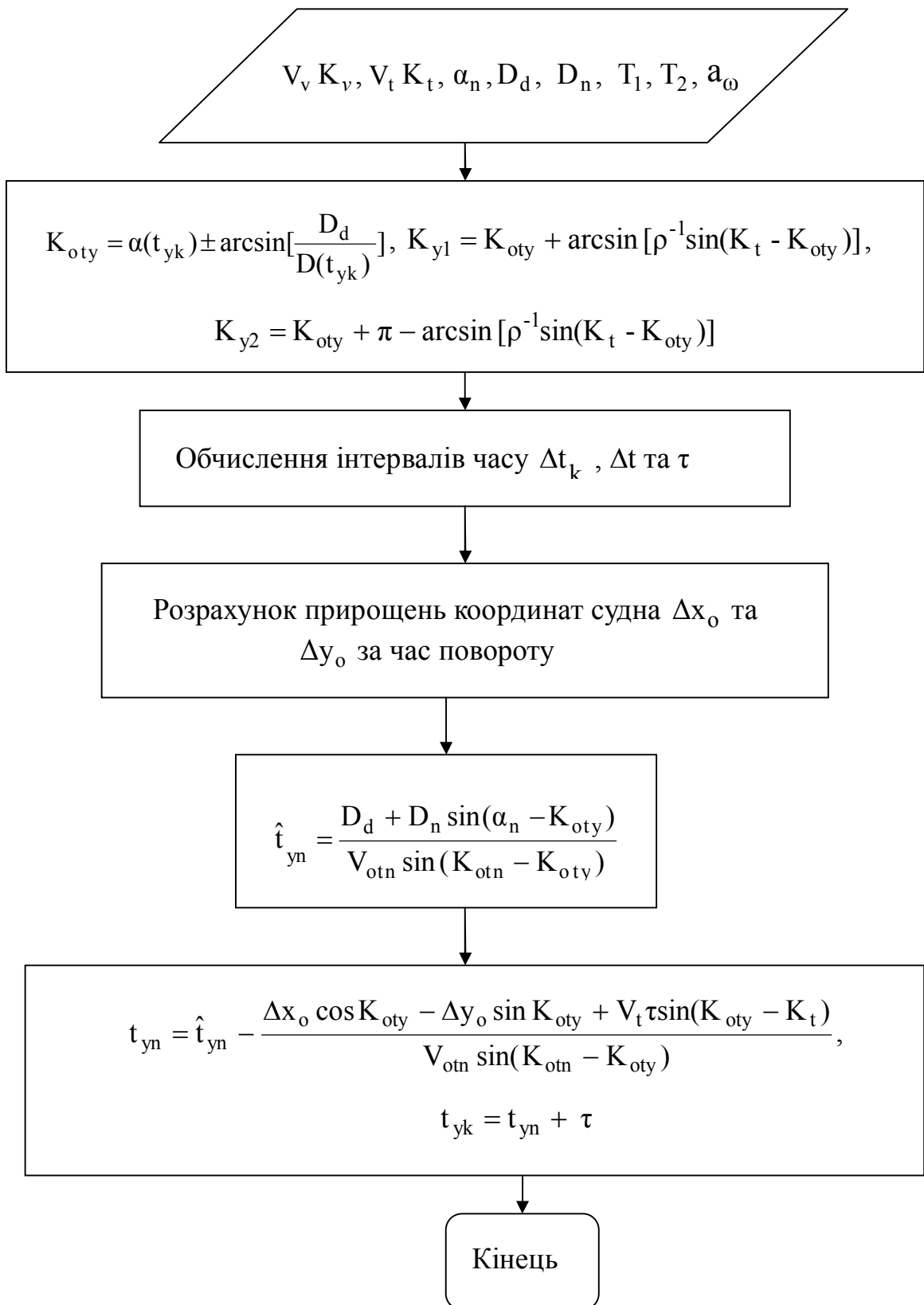


Рис. 4.7. Алгоритм розрахунку параметрів маневру ухилення судна

Даний алгоритм визначення маневру ухилення судна від небезпечної цілі був реалізований в імітаційній моделі, в якій використовувалася третя модель

обертального руху судна.

Імітаційна модель являє собою один з модулів комп'ютерної програми, що дозволяє розрахувати моменти часу початку t_n і закінчення t_k повороту судна для безпечного розходження на заданій дистанції.

Як показано на рис. 4.8, при імітаційному моделюванні даної задачі спочатку необхідно провести введення вихідних даних небезпечної ситуації зближення.

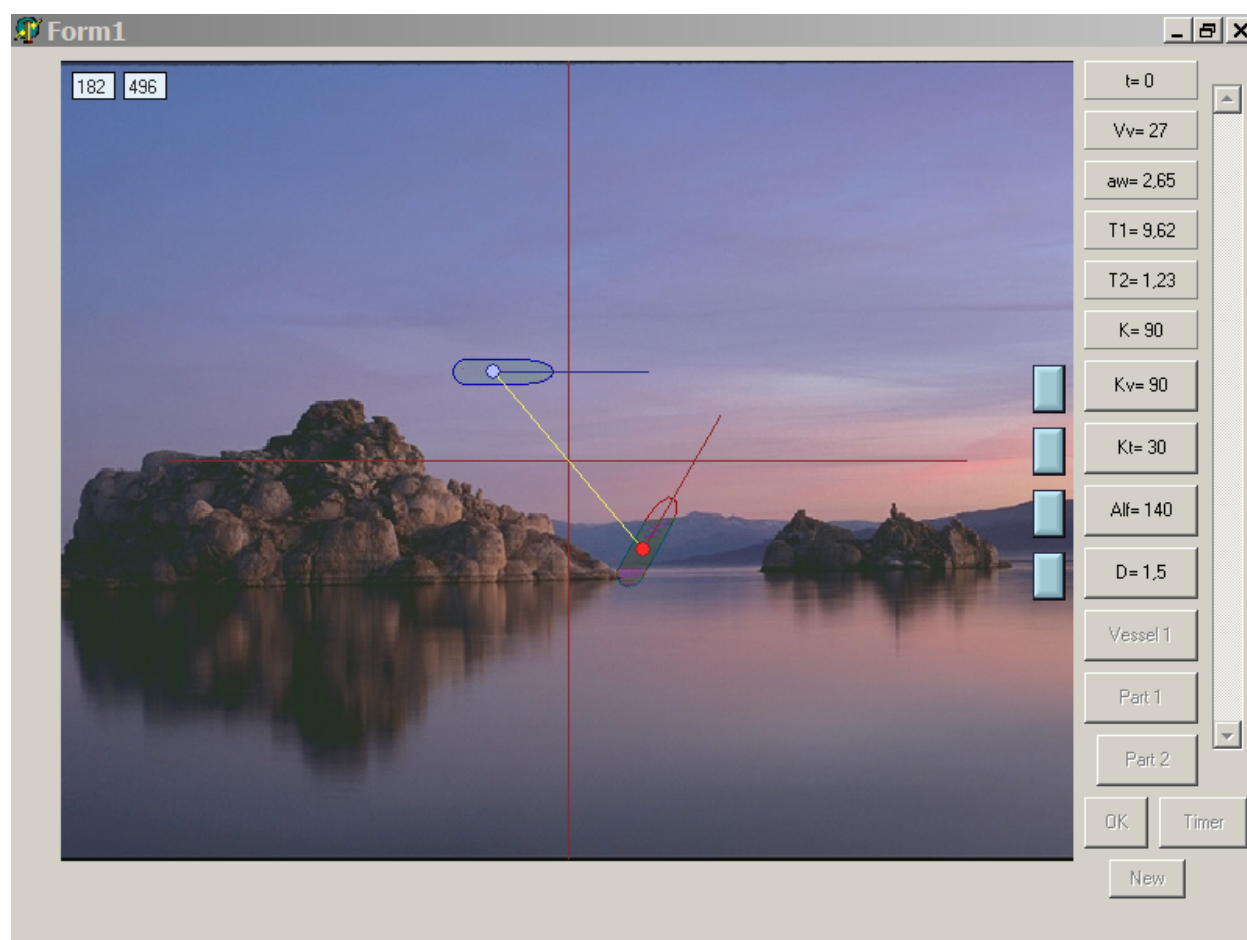


Рис. 4.8. Введення вихідних даних для задачі 2

При цьому передбачено введення курсів судна і цілі, а також пеленга і дистанції, причому вибір введенного параметра проводиться за допомогою клавіш, розташованих в правій частині монітора. Значення обраного параметра вибирається за допомогою лінійки прокрутки.

Якщо потрібно ввести установки ситуації небезпечного зближення про-

грамою оцінюється дистанція найкоротшого зближення і порівнюється гранично-допустимою дистанцією і для небезпечних ситуацій на екран виводиться повідомлення «DANGER» (рис. 4.9).

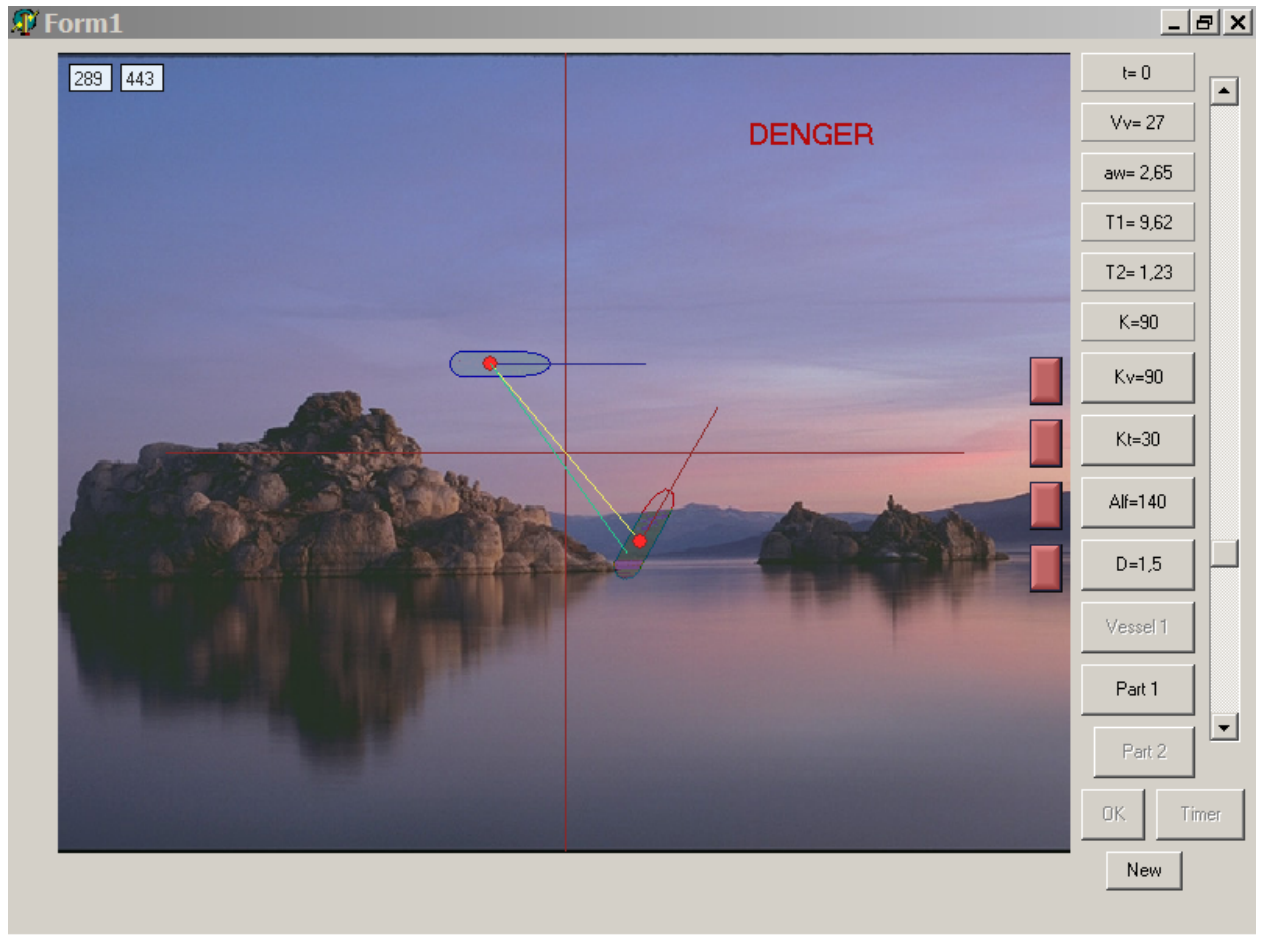


Рис. 4.9. Вибір небезпечної вихідної ситуації зближення

На екран також виводиться графічне відображення введеної ситуації, причому за допомогою ліній відображається пеленг і відносний курс.

Після введення необхідних параметрів активізується кнопка «Part 1», після «клікання» якої відбувається розрахунок моментів часу початку і закінчення повороту судна, а також курсу ухилення для безпечного розходження (рис. 4.10).

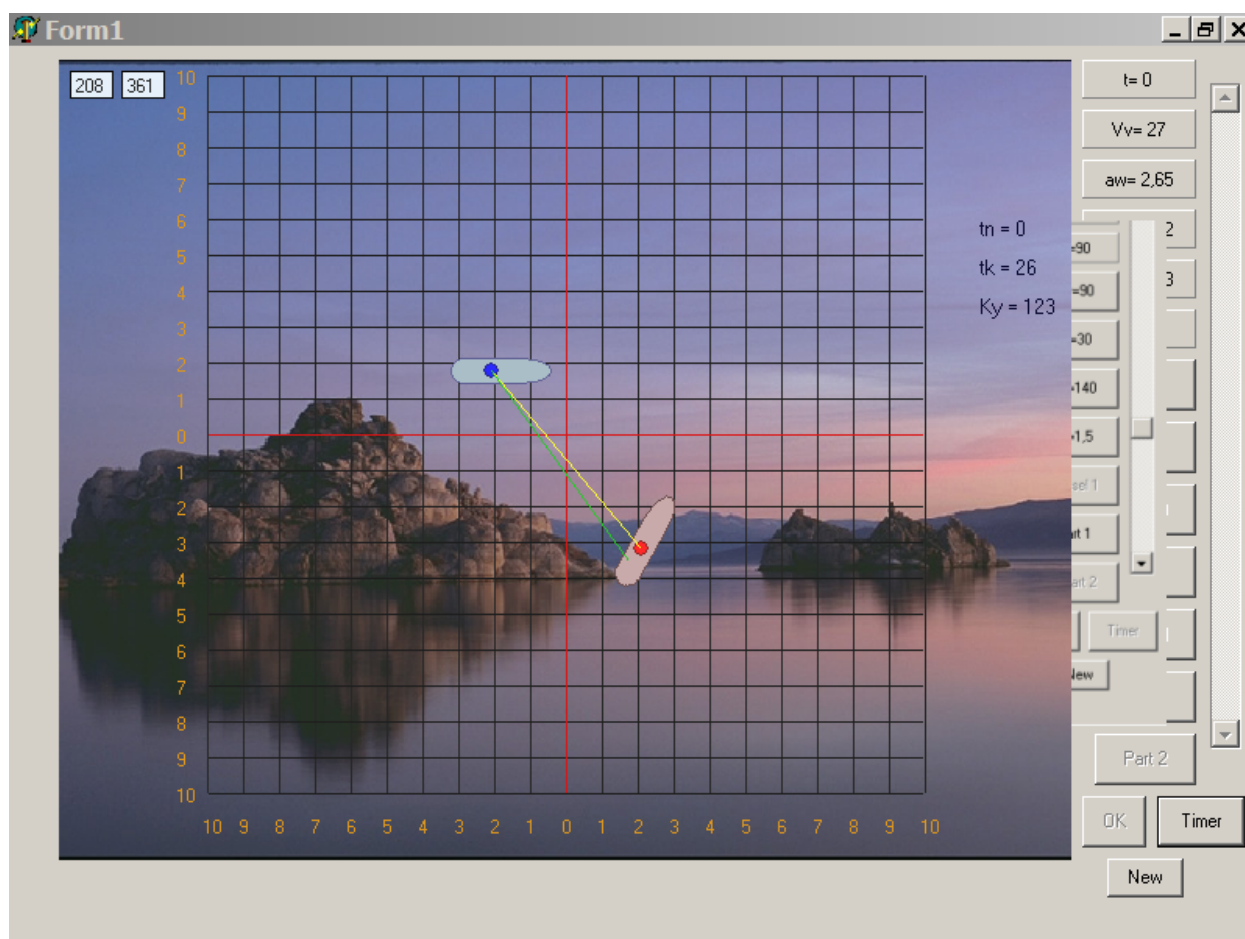


Рис. 4.10. Індикація параметрів маневру ухилення

При цьому відбувається активізація клавіші «Timer», використання якої дозволяє зробити відтворення маневру ухилення. Також активною є клавіша «New», що дозволяє перейти до розгляду інших завдань.

Після використання клавіші «Timer» проводиться імітаційне моделювання процесу розходження ухиленням судна, як показано на рис. 4.11.

Після завершення відтворення процесу розходження активізується кнопка «Part 2», використання якої дозволяє переглянути траєкторії руху судна і цілі в процесі розходження і оцінити коректність і ефективність маневру ухилення судна зміною курсу, що показано на рис. 4.12.

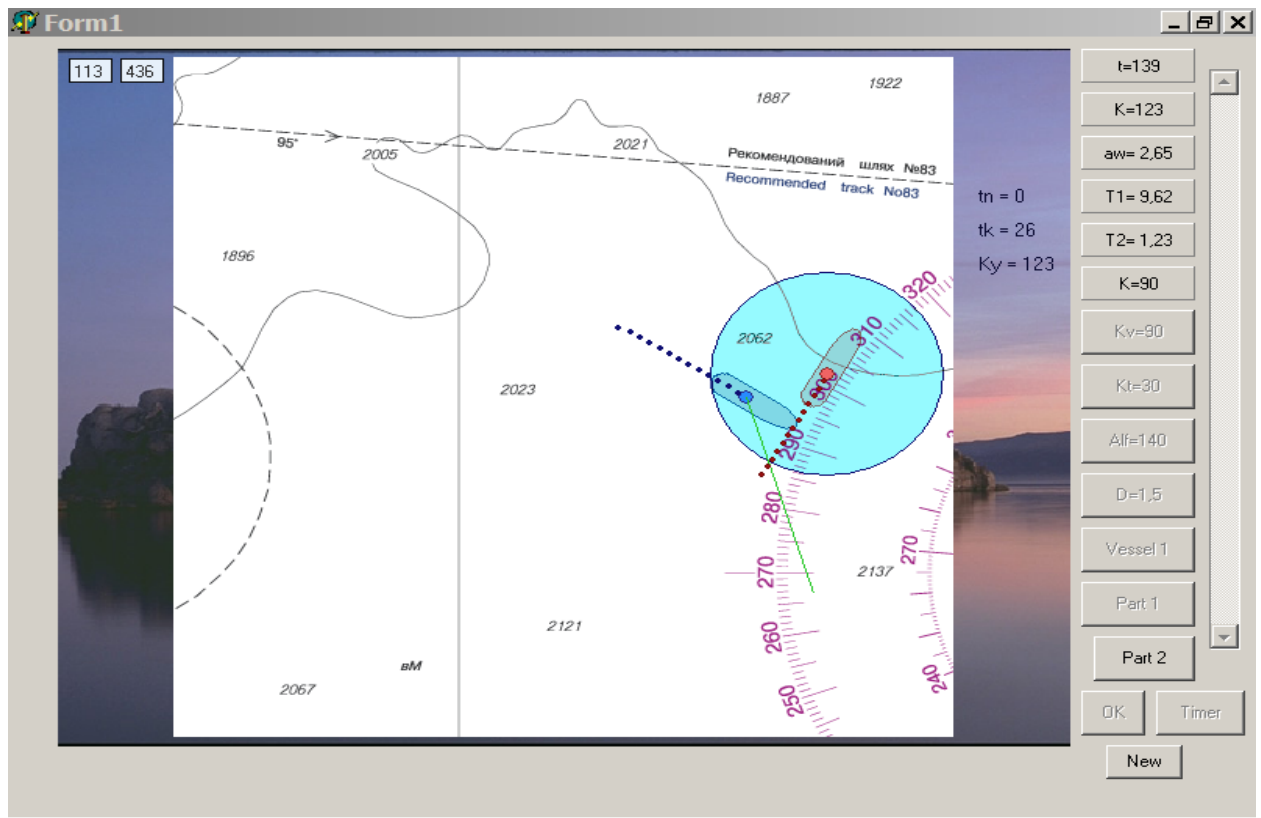


Рис. 4.11. Імітаційне моделювання процесу розходження

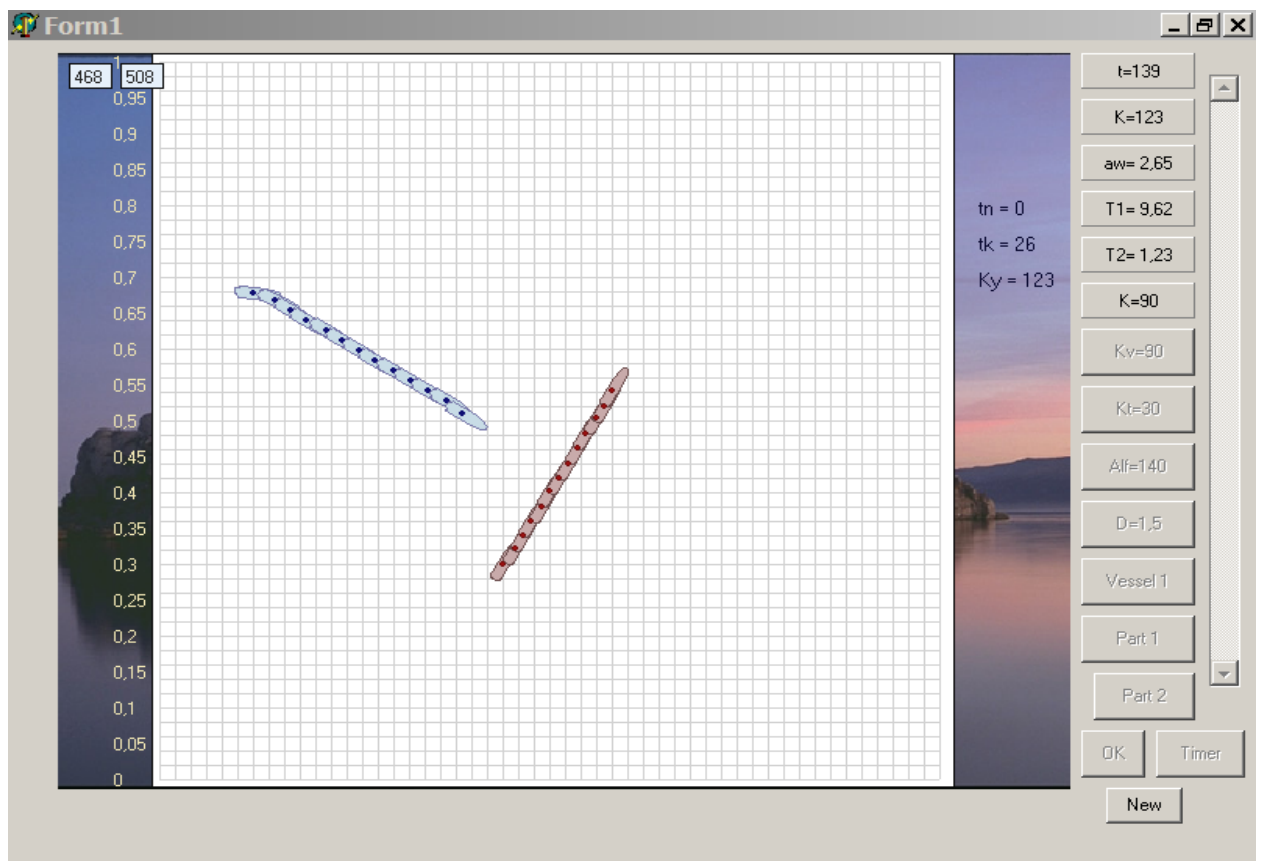


Рис. 4.12. Траєкторії руху судна і міни

4.3. Врахування в імітаційних моделях падіння швидкості судна при повороті

Для розрахунку моментів часу початку і закінчення повороту судна з урахуванням зменшення швидкості судна на циркуляції в залежності від розглянутого завдання використовуємо алгоритми, наведені в підрозділі 4.1 на рис. 4.2 або в підрозділі 4.2 на рис. 4.7, з тією лише різницею, що прирошення координат судна за час повороту Δx_0 та Δy_0 розраховуються з огляду на змінний характер швидкості судна [138]:

$$\begin{aligned} \Delta x_0 &= V_0 \int_0^{\tau_p} \sin[K_0 + K] dt - \Delta V \int_0^{\tau_p} [1 - \exp(-\frac{t}{\tau_p - t})] \sin[K_0 + K] dt + \\ &\quad + \bar{V} \int_{\tau_p}^{\Delta t_k} \sin[K_0 + K] dt + \bar{V} \int_0^{\Delta t} \sin[K_0 + K(\Delta t_k) + \tilde{K}] dt, \\ \Delta y_0 &= V_0 \int_0^{\tau_p} \cos[K_0 + K] dt - \Delta V \int_0^{\tau_p} [1 - \exp(-\frac{t}{\tau_p - t})] \cos[K_0 + K] dt + \\ &\quad + \bar{V} \int_{\tau_p}^{\Delta t_k} \cos[K_0 + K] dt + \bar{V} \int_0^{\Delta t} \cos[K_0 + K(\Delta t_k) + \tilde{K}] dt. \end{aligned}$$

В отриманих виразах прирошення координат Δx_0 та Δy_0 враховуємо зміну курсу судна на першій і другій фазах повороту (3.13) і (3.14):

$$\begin{aligned} K &= K_0 + a_\omega \{ t - \{ T_1^2 [1 - \exp(-t/T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-t/T_2)] \} / (T_1 - T_2) \} \\ \tilde{K} &= K - a_\omega t + a_\omega \{ 2 - [T_1 \exp(-\Delta t_k / T_1) - T_2 \exp(-\Delta t_k / T_2)] / (T_1 - T_2) \} \times \\ &\quad \{ T_1^2 [1 - \exp(-t/T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-t/T_2)] \} / (T_1 - T_2). \end{aligned}$$

Значення Δx_0 та Δy_0 обчислюємо, як і в попередніх випадках, чисельним інтегруванням, використовуючи спосіб Сімпсона.

У задачі 3 враховується падіння швидкості на циркуляції і показано, що нехтування цією обставиною веде до виходу судна на чергову ділянку програмного руху з бічної похибкою, в результаті чого судно опиняється на зада-

ному курсі, не встигнувши досягти програмної траєкторії наступної ділянки руху, що впливає з рис. 4.13.

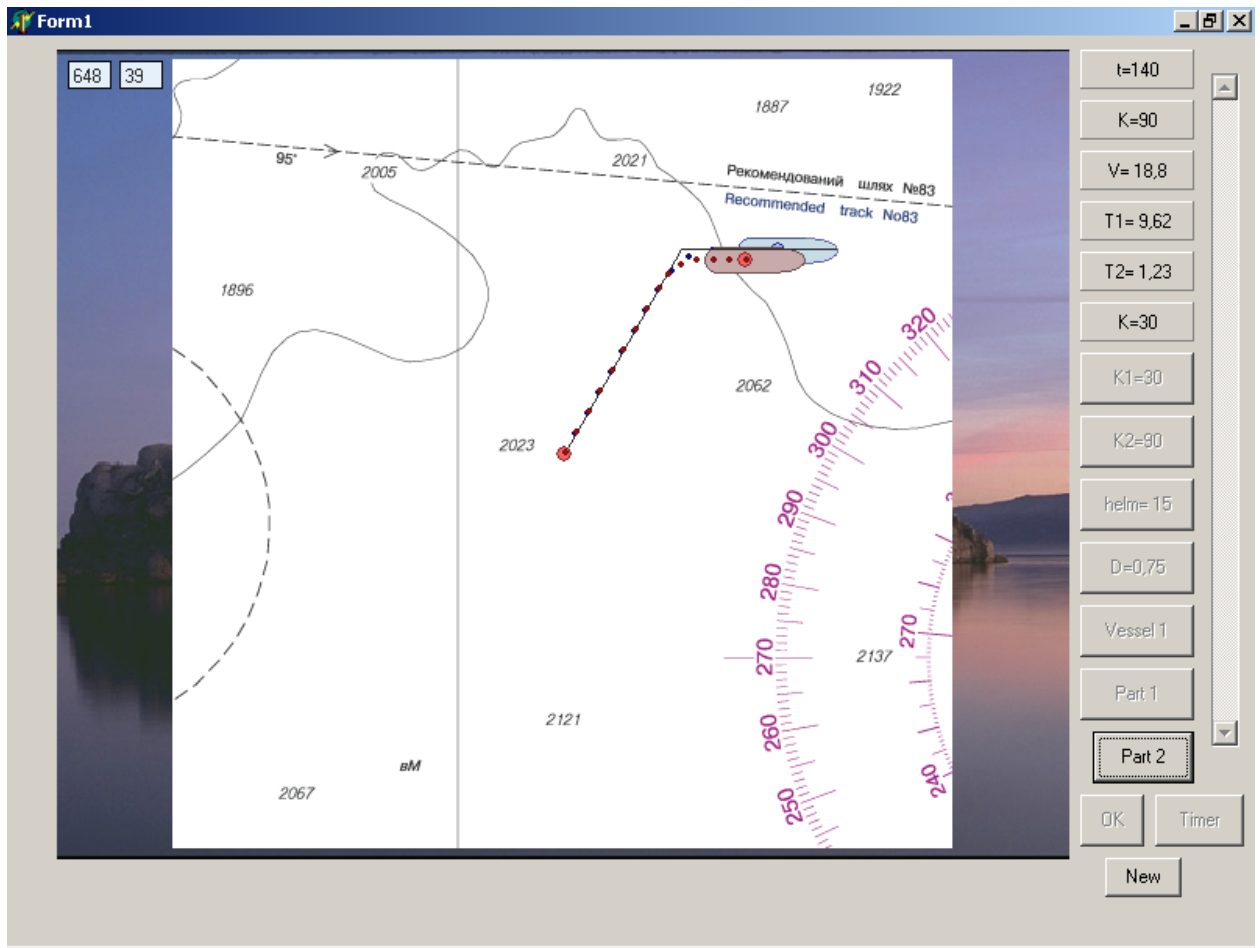


Рис. 4.13. Вплив падіння швидкості судна на точність повороту

При врахуванні падіння швидкості судна на циркуляції момент часу початку повороту збільшується, що забезпечує потрапляння судна на чергову ділянку програмної траєкторії руху без бокового зміщення (рис. 4.14).

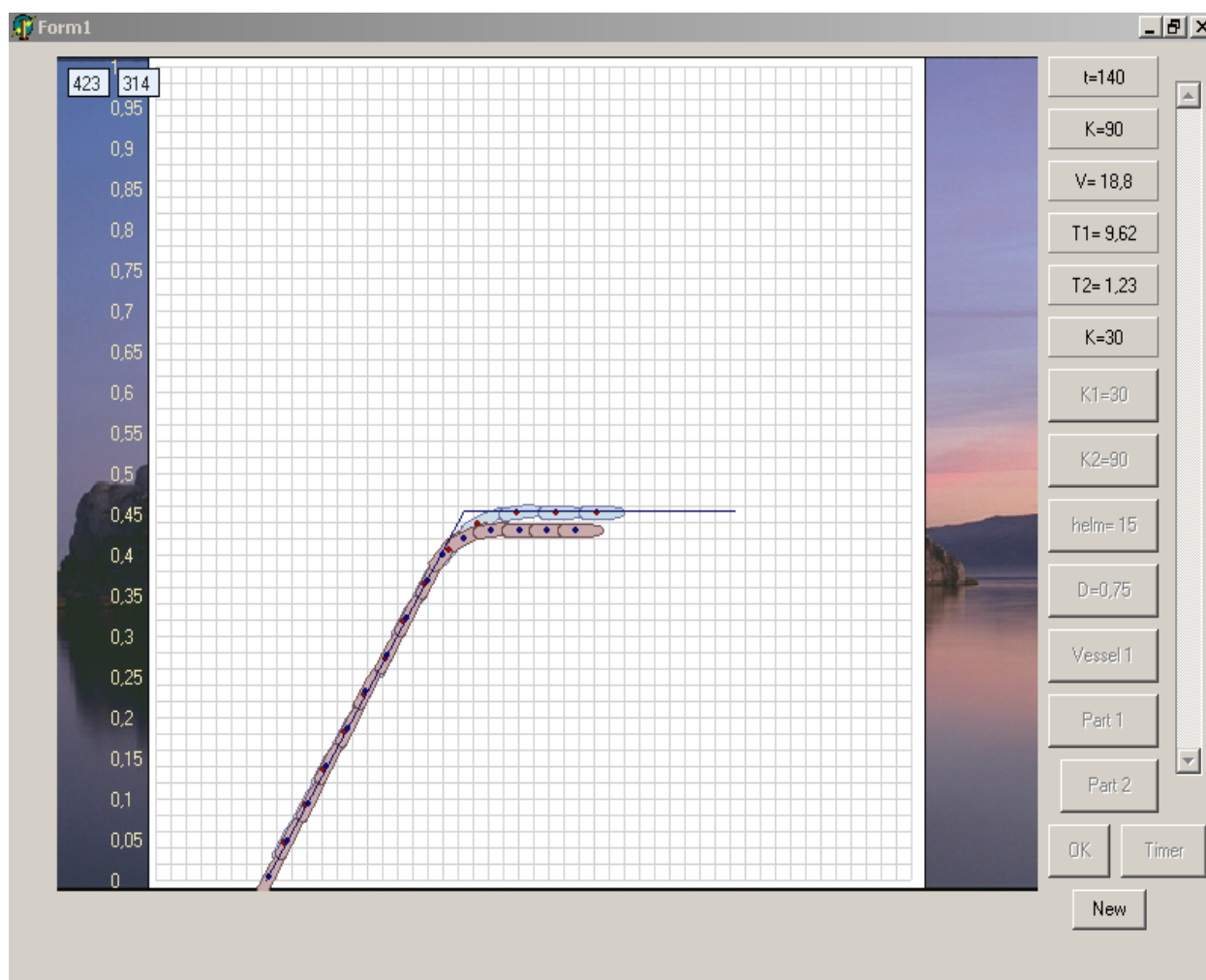


Рис. 4.14. Траєкторії руху судна з урахуванням падіння швидкості

У задачі 4 розглядається вплив падіння швидкості судна при циркуляції на точність виконання маневру ухилення і імітаційне моделювання маневру з урахуванням даної обставини.

Як показують результати імітаційного моделювання, падіння швидкості в остаточному результаті веде до того, що судно розходиться на дистанції найкоротшого зближення, що відрізняється від прийнятого значення гранично-допустимої дистанції, що впливає з рис. 4.15.

Це також видно з рис. 4.16, на якому наведені траєкторії руху судна і цілі при ухиленні судна від небезпечного зближення.

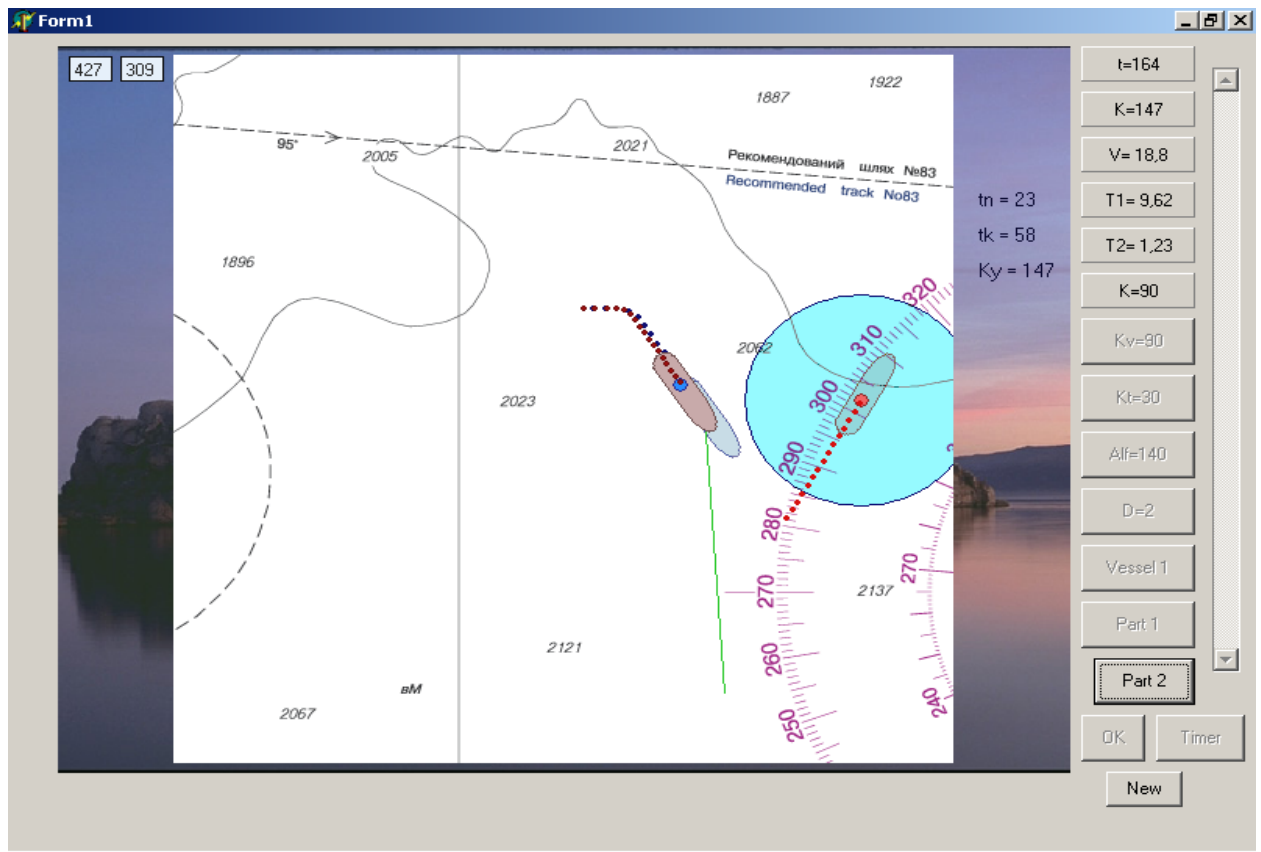


Рис. 4.15. Вплив падіння швидкості на маневр ухилення

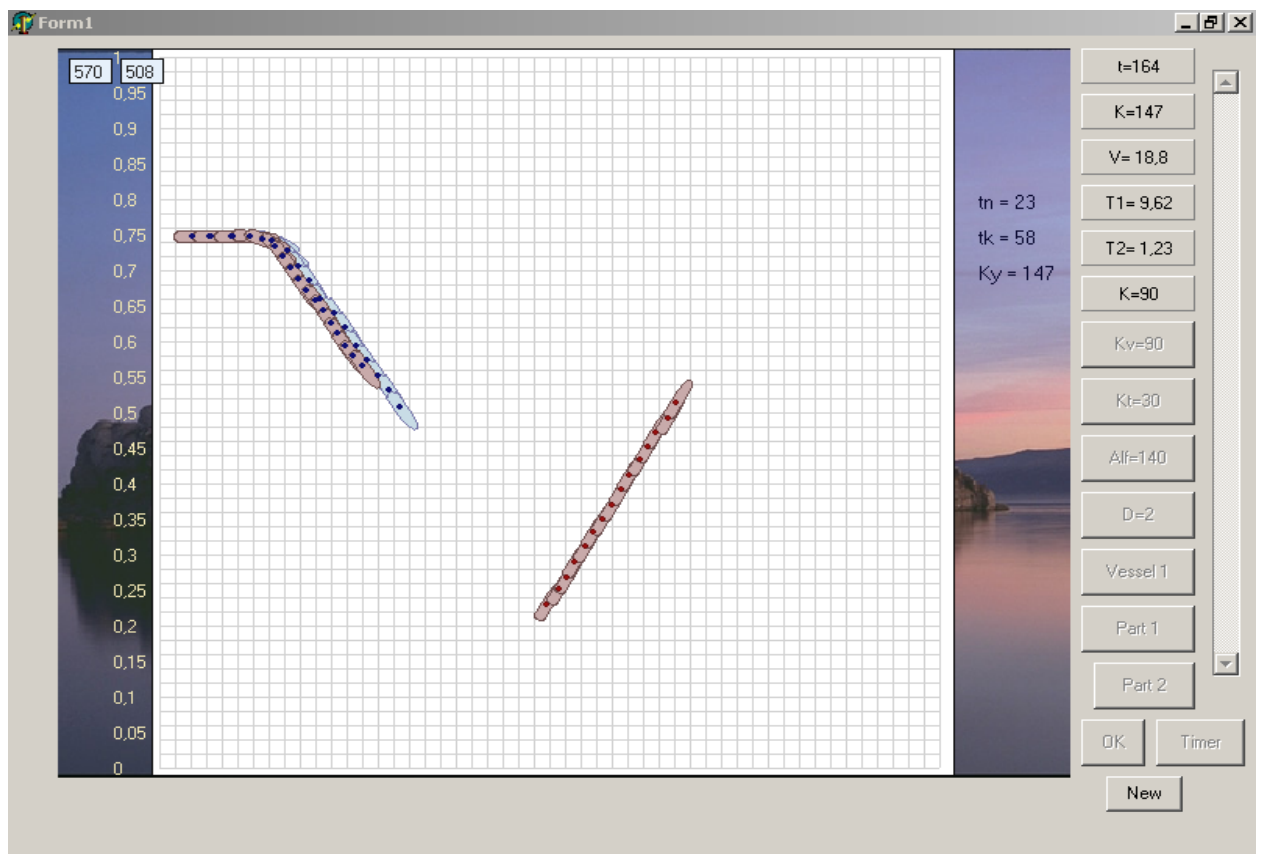


Рис. 4.16. Траєкторії руху судна і цілі при ухиленні

4.4. Імітаційна модель зупинки судна в заданій точці активним і пасивним гальмуванням

У разі пасивного гальмування, як показано в розділі 3, в загальному випадку інтервал часу необхідний для зниження швидкості судна з величини V_o до значення V_k , який позначений t_p , розраховується за допомогою формули:

$$t_p = \frac{(1+k)m}{\mu V_o} \left(\frac{V_o}{V_k} - 1 \right).$$

Відстань при пасивному гальмуванні S_p визначається з виразу:

$$S_p = \frac{(1+k)m}{2\mu} \ln \left| \frac{V_o^2}{V_k^2} \right|.$$

Зміна швидкості при пасивному гальмуванні описується залежністю:

$$V_p = \frac{V_o}{1 + \frac{V_o \mu}{(1+k)m} t}. \quad (4.1)$$

Дані вирази використані для визначення моментів часу початку і закінчення пасивного гальмування для виходу судна в задану точку.

У разі активного гальмування час t_a , швидкість V_a і дистанція S_a розраховуються за допомогою виразів:

$$\begin{aligned} t_a &= \frac{(1+k)m}{\sqrt{\mu P}} \operatorname{arctg} \left(\frac{\sqrt{\mu}}{\sqrt{P}} V_o \right), \\ V_a &= \frac{\sqrt{P}}{\sqrt{\mu}} \operatorname{tg} \left[\operatorname{arctg} \left(\frac{\sqrt{\mu}}{\sqrt{P}} V_o \right) - \frac{\sqrt{\mu P}}{(1+k)m} t \right], \\ S_a &= \frac{(1+k)m}{2\mu} \ln \left| 1 + \frac{\mu}{P} V_o^2 \right|. \end{aligned} \quad (4.2)$$

У разі відсутності течії моменти часу початку t_n і закінчення t_k гальму-

вання визначаються формулами:

$$t_n = \frac{D - S_C}{V_v}, \quad t_k = t_n + t_s.$$

При наявності течії розрахунок часу початку гальмування t_n виробляється в наступній послідовності [139].

Спочатку розраховується знос судна S_T течією за час гальмування, кути α і β за допомогою формул:

$$S_T = V_T t_s, \quad \sin \alpha = |\sin(K_T - K_V)|, \quad \alpha = \arcsin[|\sin(K_T - K_V)|],$$

$$\beta = \arcsin\left(\frac{S_T}{S_C} \sin \alpha\right),$$

де S_C – відстань гальмування.

Використовуючи отримані величини, розраховується значення відстані S_Σ за допомогою формули:

$$S_\Sigma = \sqrt{S_T^2 + S_C^2 - 2S_T S_C \cos(\pi - \alpha - \beta)}.$$

Потім розраховуємо значення швидкості переміщення судна за заданою траєкторією V_Σ за формулою:

$$V_\Sigma = \sqrt{V_T^2 + V_C^2 - 2V_T V_C \cos(\pi - \alpha - \beta_1)},$$

де кут β_1 обчислюється за допомогою виразу:

$$\beta_1 = \arcsin\left(\frac{V_T}{V_C} \sin \alpha\right). \quad (4.3)$$

Момент часу початку гальмування t_n визначається формулою:

$$t_n = \frac{D - S_\Sigma}{V_\Sigma},$$

а момент закінчення гальмування, очевидно, розраховується за допомогою виразу $t_k = t_n + t_s$.

У розглянутому випадку врахування течії при гальмуванні проводилося вибором значення кута β , при якому зміщення з програмної траєкторії судна за час гальмування дорівнює зносу від течії, але має зворотний знак. В ре-

зультаті цього до моменту зупинки судно опиняється в заданій точці.

Однак при гальмуванні судно переміщається не за програмною траєкторією, воно спочатку зміщується відносно програмної траєкторії в бік, протилежний напрямку течії, а потім при зменшенні швидкості судна зміщення скорочується і наближається до нуля до моменту завершення гальмування.

Для того щоб в процесі гальмування судно залишалось на програмній траєкторії руху, необхідно змінювати кут течії, збільшуючи його з падінням швидкості судна.

Поточне значення кута течії β_t можна знайти за допомогою формули (4.3):

$$\beta_t = \arcsin\left(\frac{V_T}{V_t} \sin \alpha\right),$$

де V_t – поточне значення швидкості судна.

У разі пасивного гальмування з урахуванням (4.1) отримаємо вираз:

$$\beta_t = \arcsin\left(\frac{V_T}{\left(\frac{V_o}{1 + \frac{V_o \mu}{(1+k)m} t}\right)} \sin \alpha\right),$$

а при активному гальмуванні для утримання судна на програмній траєкторії руху кут течії β_t з урахуванням виразу (4.2) необхідно змінювати за такою формулою:

$$\beta_t = \arcsin\left(\frac{V_T}{\left(\frac{\sqrt{P}}{\sqrt{\mu}} \operatorname{tg}\left[\arctg\left(\frac{\sqrt{\mu}}{\sqrt{P}} V_o\right) - \frac{\sqrt{\mu P}}{(1+k)m} t\right]\right)} \sin \alpha\right).$$

Таким чином, врахування течії при гальмуванні з виходом в задану точку можливий за допомогою двох способів: при незмінному куті течії з наявністю бокового зміщення відносно програмною траєкторії руху і зі змінним кутом течії при нульовому зміщенні.

Для суднової інформаційної комп'ютерної системи був розроблений програмний модуль, що вирішує задачі 5 і 6. З його допомогою вироблялося імі-

таційне моделювання. Як для активного, так і для пасивного гальмування передбачено введення курсу судна, його початкова швидкість і дистанція до точки зупинки, а також швидкість і напрямок течії, як показано на рис. 4.17.

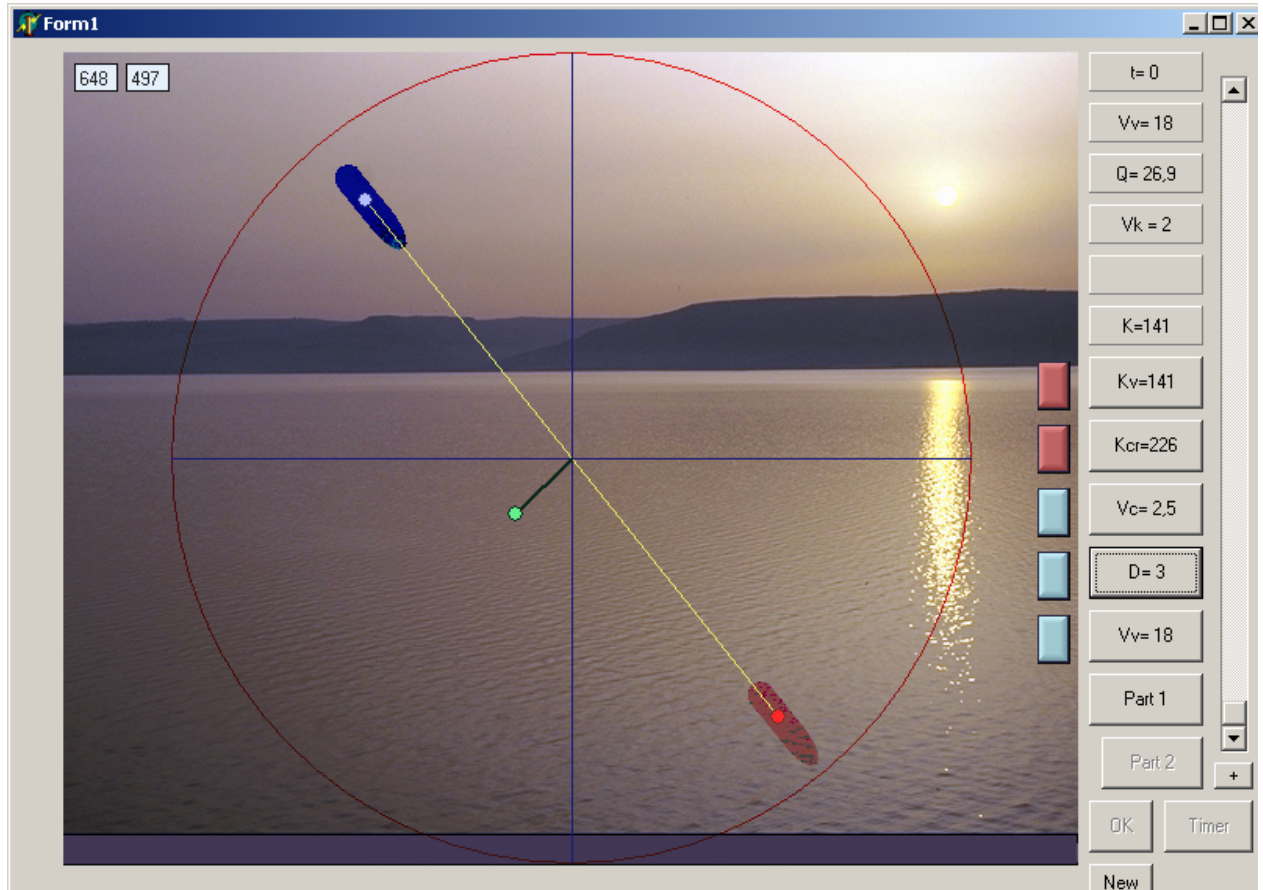


Рис. 4.17. Введення вихідних даних при гальмуванні

На завершення введення вихідних даних відбувається активізація кнопки «Part 1», після використання якої відбувається розрахунок моментів часу початку і закінчення гальмування судна, а також інтервалу часу і дистанції гальмування, що показано на рис. 4.18.

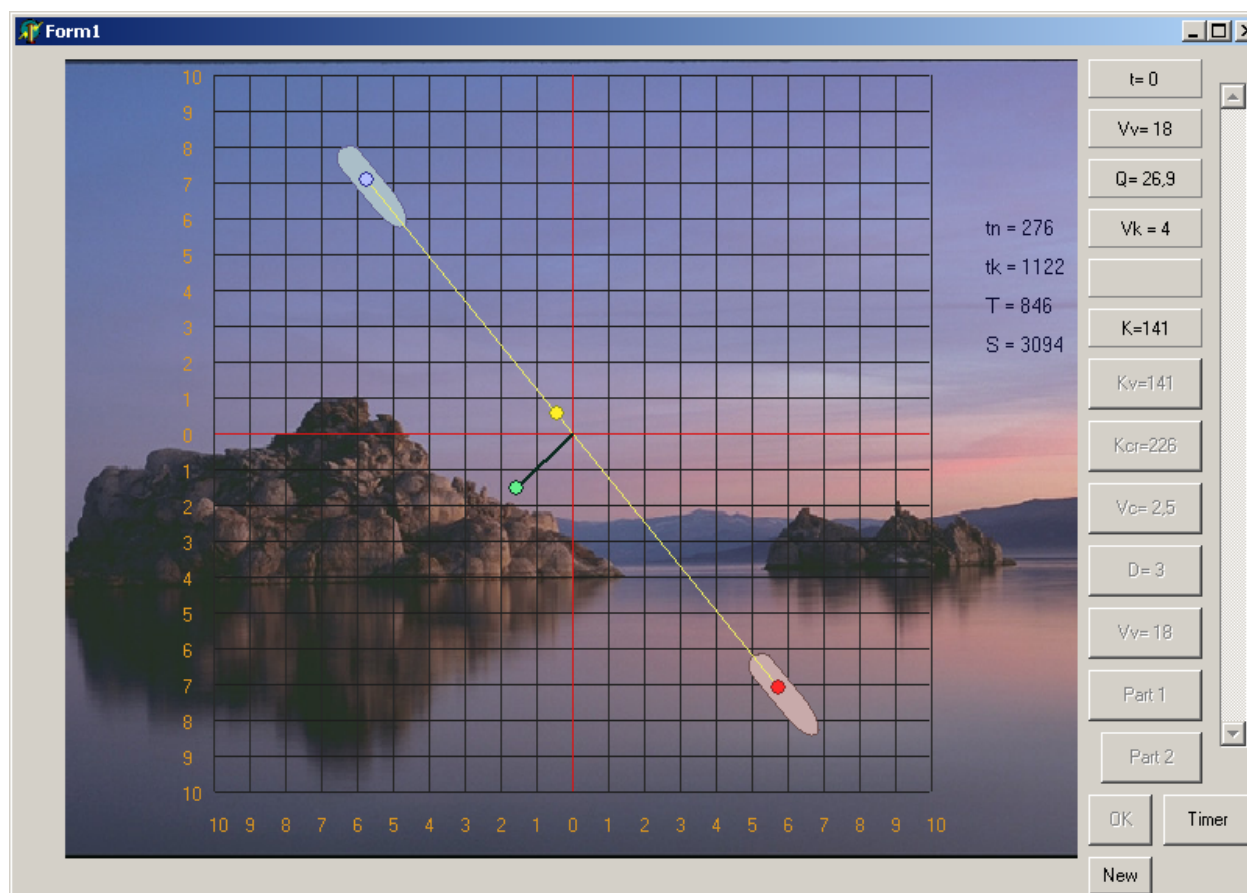


Рис. 4.18. Виведення параметрів процесу гальмування

За допомогою клавіші «Timer» відбувається відтворення маневру гальмування, причому повторним натисканням цієї кнопки відображення процесу гальмування можна зупинити.

На рис. 4.19 показаний результат відтворення маневру пасивного гальмування з виходом судна в задану точку. На першому етапі руху судна до початку гальмування, коли судно переміщається з постійною швидкістю, компенсація впливу течії проводиться утриманням судна під постійним кутом β_t , при цьому судно переміщається за програмною траєкторією. У лівому верхньому кутку екрану виводиться крива зміни швидкості судна при пасивному гальмуванні, коли кінцева швидкість судна дорівнює 4 вузли.

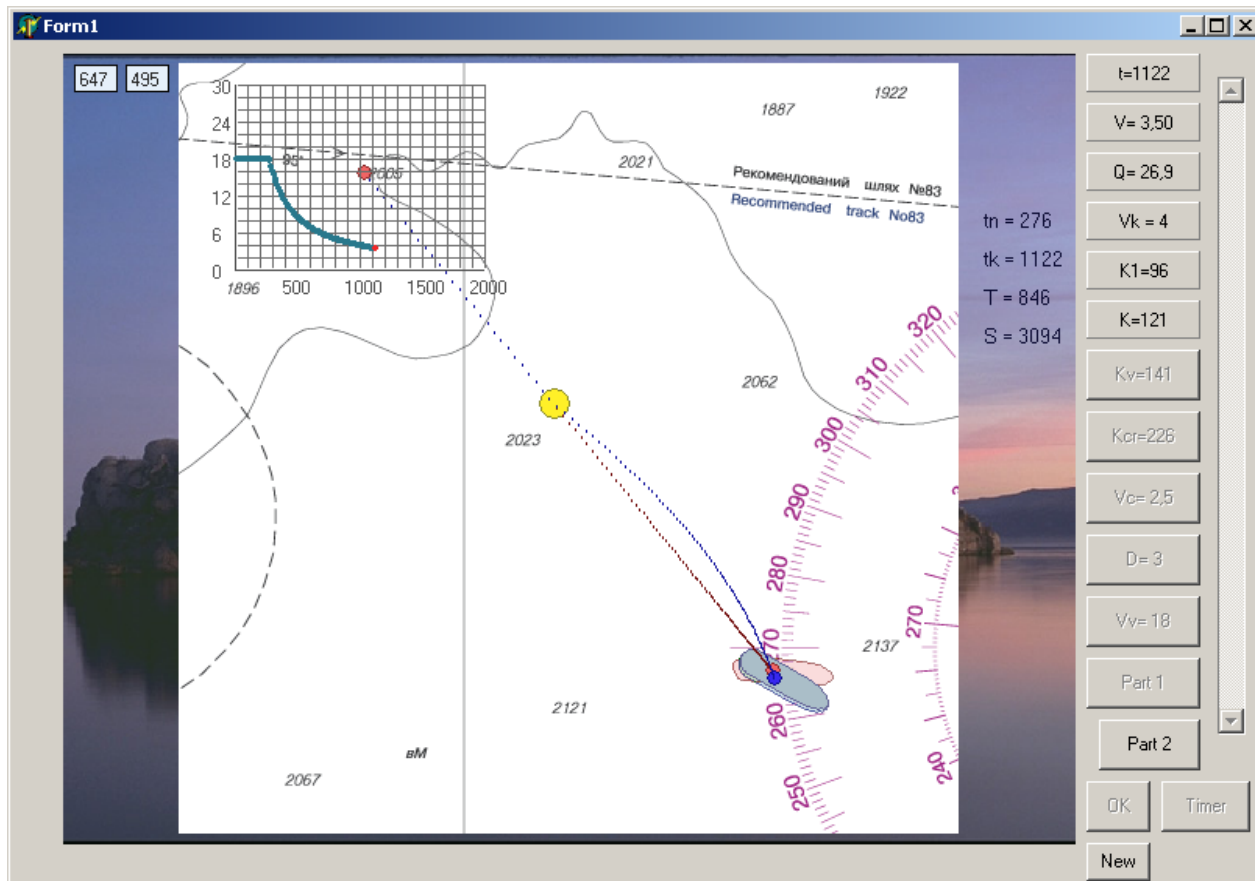


Рис. 4.19. Результати моделювання пасивного гальмування

На другому етапі – власне самому гальмуванню, показані дві траєкторії руху судна: з постійним кутом течії і зсувом щодо програмної траєкторії руху і з кутом течії, що росте, зате без зсуву з програмної траєкторії. У прикладі на рис. 4.19 діє течія швидкістю 2,5 вузли з напрямом 225 градусів, а судно рухається путнім кутом 140 градусів із швидкістю 18 вузлів. На ділянці гальмування постійний кут течії рівний -20 градусів для траєкторії із зсувом, а кут течії, що росте, забезпечує рух судна без зсуву до кінця маневру, як видно з рисунка, досягає величини -45 градусів.

На рис. 4.20 показана ситуація при активному гальмуванні, коли судно слідує путнім кутом 60 градусів із швидкістю 30 вузлів, а течія із швидкістю 2.5 вузли має напрям 142 градуси.

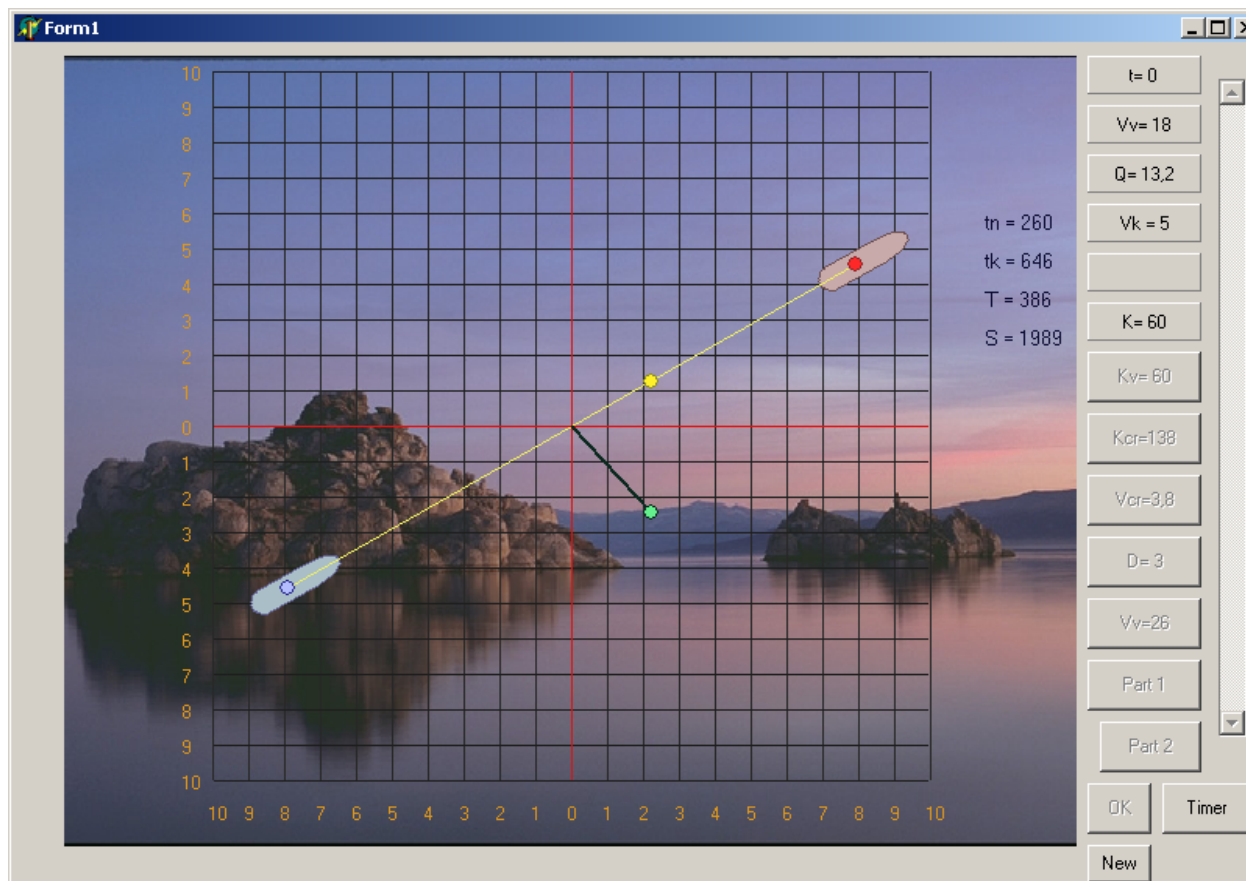


Рис. 4.20. Початкова ситуація при активному гальмуванні

Результати активного гальмування показані на рис. 4.21. Траєкторія із зсувом щодо програмної траєкторії реалізована при постійному куті течії -13 градусів, а утримання судна на програмній траєкторії без зсуву з кутом течії, що росте, до кінця маневру потребує забезпечити кут течії рівним -45 градусів, як впливає з рис. 4.21.

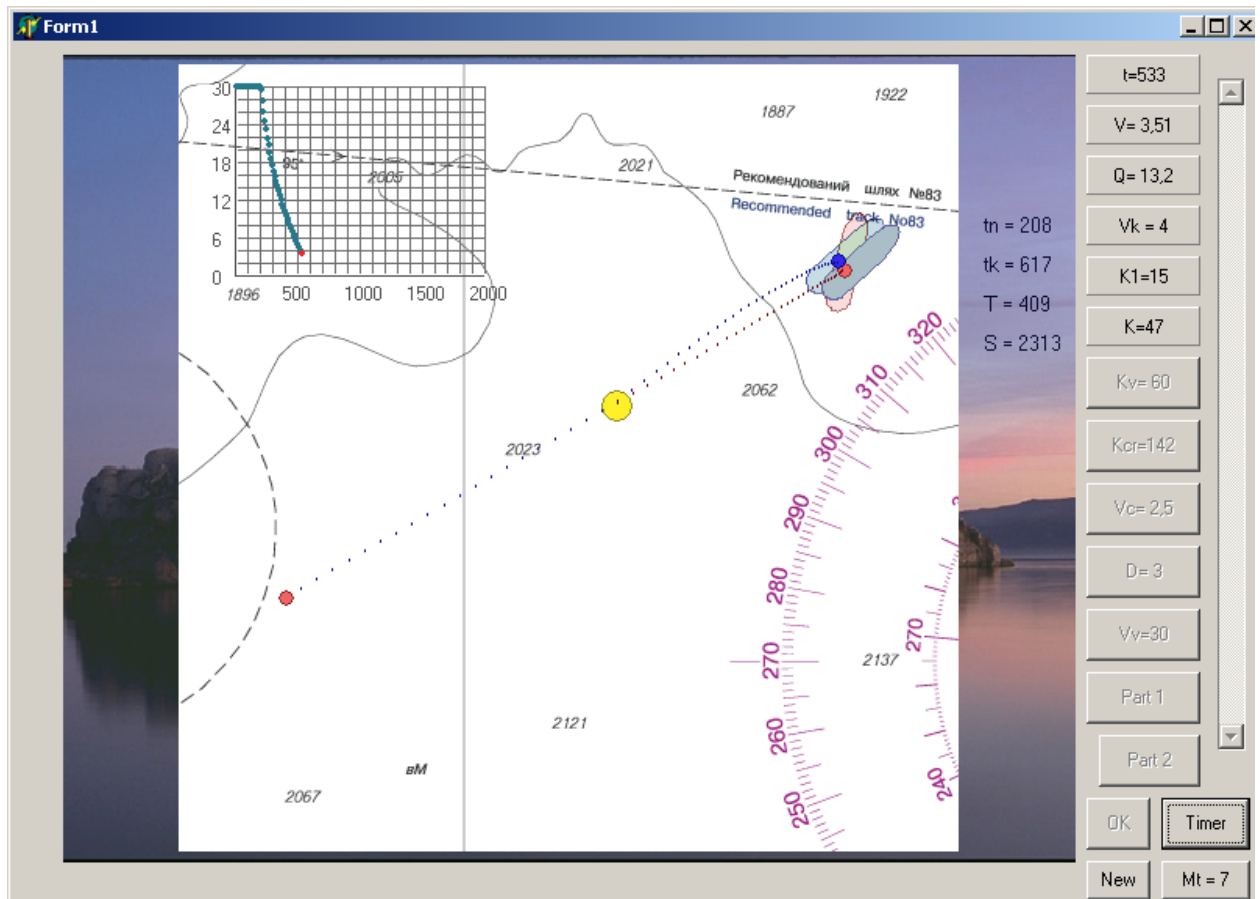


Рис. 4.21. Результати активного гальмування

Таким чином, при гальмуванні судна можна вийти в задану позицію, утримуючи постійний кут течії, але при цьому виникає бічний зсув, величина якого спочатку зростає, а потім зменшується до нуля. Якщо відхилення судна із заданої траєкторії небажане, то необхідно реалізувати управління судном із змінним кутом течії. Така ситуація може виникнути при плаванні судна в районі з обмеженими глибинами.

Як видно з рис. 4.21 (графік у верхньому лівому кутку) швидкість судна різко знижується, а час і дистанція активного гальмування в порівнянні з попереднім випадком істотно зменшуються.

4.5. Висновки за четвертим розділом

В розділі розглянута програмна реалізація шести найважливіших задач маневрування судна з урахуванням характеристик поворотності і інерційно-гальмівних характеристик, які можуть бути використані в судновій комп'ютерній системі забезпечення маневрування судна.

Для кожної із задач розроблений алгоритм її рішення і приведені необхідні аналітичні вирази, одержані в попередньому розділі. На базі складеного алгоритму рішення кожній із задач розроблений модуль комп'ютерної програми, який дозволяє розрахувати параметри маневру і провести його імітаційне моделювання.

Перші дві задачі, можуть бути застосованими при невеликих поворотах судна, коли падінням його швидкості на циркуляції можна нехтувати. Перша задача дозволяє розрахувати моменти часу початку і закінчення повороту судна з однієї ділянки програмної траєкторії руху на наступну ділянку з урахуванням характеристик поворотності судна.

Друга задача дозволяє розрахувати курс ухилення від цілі при небезпечному зближенні, а також моменти часу початку і закінчення маневру ухилення.

Чергові третя і четверта задачі аналогічні попереднім двом, з тією лише різницею, що вибір параметрів маневрів розраховується з урахуванням падіння швидкості судна при повороті. Причому при імітаційному моделюванні здійснюється відображення траєкторії судна, як при урахуванні падіння швидкості судна, так і без такого урахування.

П'ята задача передбачає використання пасивного гальмування для зупинки судна у вибраній позиції, причому виконується розрахунок моментів часу початку гальмування і його закінчення.

Зупинка судна активним гальмуванням складає зміст шостої задачі з розрахунком параметрів маневру гальмування. У задачах гальмування враховується течія в районі маневрування судна.

Для моделювання маневрів судна використовувалися параметри поворотності і інерційності реальних суден, одержані експериментально в реальних умовах експлуатації.

РОЗДІЛ 5.

РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК ПОВОРОТНОСТІ
І ІНЕРЦІЙНО-ГАЛЬМІВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СУДНА
ЗА ДАНИМИ НАТУРНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ5.1. Визначення характеристик T_1 та T_2 поворотності судна з натурних спостережень в реальних умовах експлуатації судна

Розглянемо застосування чисельних методів для апроксимації даних натурних спостережень. В процесі експлуатації контейнеровоза «Oxford» були отримані експериментальні матеріали в результаті натурних спостережень поворотності судна, які були використані для визначення типу динамічної моделі та обчислення чисельних значень її параметрів [77].

Судно водотоннажністю в баласті 17130 тонн, з повним вантажем 23660 тонн з середньою осадкою 9,40 метру. Максимальна швидкість в вантажу при роботі обох двигунів становить 27 вузлів.

Натурні спостереження були організовані в такий спосіб. При проходженні судна незмінними курсом і швидкістю проводилася перекладка пера керма на заданий кут обраного борту. З моменту початку кладки пера керма через інтервали часу рівні приблизно 5 секундам проводилася реєстрація моментів часу t_i і відповідних їм значень прирощення курсу судна ΔK_i . В умовах експлуатації вдалося отримати експериментальні дані для повороту судна вправо і вліво при кутах кладки керма 5, 10 і 15 градусів. Причому кожен з шести зазначених маневрів проводився по кілька разів за максимально схожих погодних умов при відсутності течії. У табл. 5.1 наведені характеристики натурних спостережень.

Матеріали всіх серій за одним маневром усереднювали, отримуючи залежність прирощення курсу від часу (табл. 5.2).

Таблиця 5.1.

Дані щодо натурних спостережень

Номер маневру	Бік повороту	Кладка керма β	Швидкість судна	Кількість серій	Трив-ть маневру	Стан завантаження
Маневр 1	вправо	5	24	5	44	в баласті
Маневр 2	влево	5	24	5	44	в баласті
Маневр 3	вправо	10	21	5	40	в вантажі
Маневр 4	влево	10	21	5	40	в вантажі
Маневр 5	вправо	15	27	4	45	в вантажі
Маневр 6	влево	15	27	4	43	в вантажі

Таблиця 5.2.

Усереднені дані щодо траєкторій маневрів

М а н е в р и											
1		2		3		4		5		6	
t_i	ΔK_i	t_i	ΔK_i	t_i	ΔK_i	t_i	ΔK_i	t_i	ΔK_i	t_i	ΔK_i
5	0,5	5	0,4	5	0,9	5	1,1	5	0	5	0
10	2,0	10	2,1	10	3,0	10	2,8	14	0	11	0
15	4,2	15	4,4	15	6,2	15	6,3	18	1,5	15	2,0
20	7,5	20	7,3	20	11,3	20	11,1	21	5,1	19	6,1
25	11,2	25	11,4	25	17,2	25	17,1	26	12,0	27	21,9
30	15,5	30	15,2	30	23,0	30	23,2	31	22,1	33	35,1
35	19,8	35	20,0	35	29,0	35	29,1	36	35,2	39	50,2
40	23,8	40	23,6	40	35,5	40	35,3	40	44,8	43	60,1
44	28,0	44	28,1					45	58,0		

Звертаємо увагу, що маневри 1 і 2 практично характеризуються однаковими даними, що справедливо і для маневрів 3 і 4, тобто поворотність судна

при повороті вправо і вліво однакова, якщо кути кладки пера керма рівні 5 і 10 градусам. При цьому швидкість судна більше 20 вузлів.

Другою особливістю є те, що при максимальній швидкості судна в вантажу при кладках керма 15 градусів як вправо, так і вліво кутова швидкість повороту залишається рівною нулю протягом досить тривалого періоду – 14 і 11 секунд після перекладки керма відповідно вправо і вліво. Тому для маневрів 5 і 6 до динамічної моделі судна необхідно ввести час затримки t_z .

З експериментальних даних можна також отримати значення сталої кутової швидкості повороту судна a_ω , використовуючи кілька останніх інтервалів залежності ΔK_i від t_i . Отримане таким чином значення a_ω дозволяє виключити його з переліку шуканих невідомих, скорочуючи розмірність системи рівнянь і полегшуючи складання обчислювальної процедури. Після визначення з експериментальних даних значення параметрів моделі можливе уточнення величини a_ω .

Для динамічної моделі обертального руху судна третього порядку потрібно з експериментальних даних знайти значення параметрів T_1 і T_2 , приймаючи відомими значення часу затримки t_z і сталої кутової швидкості повороту судна a_ω .

При оцінюванні параметрів T_1 і T_2 динамічної моделі судна третього порядку необхідно враховувати, що значення зазначених параметрів повинні підбиратися таким чином, щоб на початкових інтервалах часу після перекладки керма розраховується значення курсу судна не мало негативних стосовно боку кладки викидів. Наприклад, під час перекладки керма вправо розрахункова динамічна модель не повинна показувати зменшення курсу у найближчі моменти часу після перекладки. Тому необхідно накласти обмеження на величину параметра T_2 відносно T_1 , виходячи з того, що приращення курсу судна у початковий інтервал часу має бути невід'ємним.

Для цього слід використовувати вираз з третьої глави для розрахунку

курсу судна на першій фазі повороту і записати з нього приріст курсу:

$$\Delta K = a_{\omega} \{t - \{T_1^2 [1 - \exp(-t/T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-t/T_2)]\} / (T_1 - T_2)\}, \quad (5.1)$$

яке прирівнюється до нуля і, задаючись значеннями t і T_1 , обчислюється значення параметра T_2 . Попередні розрахунки показали, що доцільно вибирати значення T_1 в межах від 5 до 30 секунд, а момент часу t від 1 до 15 секунд після початку повороту.

Знайдемо граничні значення $\bar{T}_2$, для чого з (5.1) запишемо вираз:

$$a_{\omega} \{t - \{T_1^2 [1 - \exp(-t/T_1)] - \bar{T}_2^2 [1 - \exp(-t/\bar{T}_2)]\} / (T_1 - \bar{T}_2)\} = 0$$

або

$$t = \{T_1^2 [1 - \exp(-t/T_1)] - \bar{T}_2^2 [1 - \exp(-t/\bar{T}_2)]\} / (T_1 - \bar{T}_2).$$

З останнього виразу знаходимо:

$$\bar{T}_2 = T_1 - \frac{1}{t} \{T_1^2 [1 - \exp(-t/T_1)] - \bar{T}_2^2 [1 - \exp(-t/\bar{T}_2)]\}. \quad (5.2)$$

Використовуючи метод простих ітерацій за допомогою (5.2) розраховуємо граничні значення $\bar{T}_2$ в залежності від заданих T_1 і t . Результати розрахунків наведені в табл. 5.3.

При обчисленні параметрів T_1 і T_2 динамічної моделі судна слід врахувати, що значення T_2 не повинні перевищувати за величиною наведені в табл. 5.3 граничні значення $\bar{T}_2$.

Для апроксимації вихідного експериментального матеріалу динамічною моделлю третього порядку і обчислення відповідних значень параметрів T_1 і T_2 використовувався метод найменших квадратів в припущенні нормального закону розподілу похибок вимірювань.

Граничні значення параметра $\bar{T}_2$

T_1	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
t												
1	0,43	0,43	0,44	0,44	0,44	0,45	0,45	0,45	0,46	0,46	0,46	0,47
5	1,52	1,61	1,69	1,75	1,81	1,85	1,92	1,95	1,98	2,00	2,03	2,05
10	2,37	2,57	2,73	2,87	3,00	3,09	3,19	3,27	3,34	3,41	3,44	3,50
15	2,90	3,19	3,45	3,66	3,85	4,02	4,17	4,30	4,43	4,54	4,64	4,74
T_1	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
t												
1	0,47	0,47	0,47	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,49	0,49	0,49	0,49
5	2,07	2,08	2,10	2,11	2,13	2,14	2,15	2,16	2,17	2,18	2,19	2,20
10	3,56	3,61	3,66	3,70	3,74	3,78	3,82	3,85	3,89	3,92	3,94	3,97
15	4,82	4,90	4,98	5,05	5,12	5,18	5,24	5,30	5,35	5,40	5,45	5,50

Мірою розбіжності теоретичних і експериментальних точок в методі найменших квадратів є вираз:

$$\eta_i = \Delta K(t_i) - \Delta K_i =$$

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

де ΔK_i і t_i – і-е значення прирощення курсу і відповідний йому момент часу.

Сума квадратів S відхилень η_i , яку слід мінімізувати, має вигляд:

$$S = \sum_{i=1}^n \eta_i^2,$$

а система нормальних рівнянь для визначення параметрів T_1 і T_2 :

$$\frac{\partial S}{\partial T_1} = 2 \sum_{i=1}^n \left(\eta_i \frac{\partial \eta_i}{\partial T_1} \right) = 0; \quad \frac{\partial S}{\partial T_2} = 2 \sum_{i=1}^n \left(\eta_i \frac{\partial \eta_i}{\partial T_2} \right) = 0,$$

або

$$\sum_{i=1}^n (\eta_i \frac{\partial \eta_i}{\partial T_1}) = 0; \quad \sum_{i=1}^n (\eta_i \frac{\partial \eta_i}{\partial T_2}) = 0. \quad (5.3)$$

Проведений аналіз показав, що для вирішення системи нелінійних рівнянь (5.3) доцільно застосувати метод Ньютона [142]. З цією метою систему (5.3) записуємо в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} F_1(T_1, T_2) &= \sum_{i=1}^n \eta_i \frac{\partial \eta_i}{\partial T_1} = 0; \\ F_2(T_1, T_2) &= \sum_{i=1}^n (\eta_i \frac{\partial \eta_i}{\partial T_2}) = 0. \end{aligned} \quad (5.4)$$

Згідно з методом Ньютона ітераційний цикл організовується за допомогою системи лінійних рівнянь [142]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial F_1}{\partial T_1} \Delta T_1 + \frac{\partial F_1}{\partial T_2} \Delta T_2 &= -F_1(T_1, T_2); \\ \frac{\partial F_2}{\partial T_1} \Delta T_1 + \frac{\partial F_2}{\partial T_2} \Delta T_2 &= -F_2(T_1, T_2), \end{aligned} \quad (5.5)$$

з яких знаходяться поправки ΔT_1 і ΔT_2 до раніше одержаних значень параметрів T_1 і T_2 . Слід зазначити, що в якості початкового наближення вибирається значення T_1 , отримане з динамічної моделі судна другого порядку, а $T_2 = \bar{T}_2$.

Знайдемо часткові похідні, що містяться в (5.5), підставляючи вирази для F_1 та F_2 з (5.4). Спочатку знайдемо аналітичний вид $\frac{\partial F_1}{\partial T_1}$:

$$\frac{\partial F_1}{\partial T_1} = \frac{\partial}{\partial T_1} \left[\sum_{i=1}^n (\eta_i \frac{\partial \eta_i}{\partial T_1}) \right] = \sum_{i=1}^n \frac{\partial}{\partial T_1} (\eta_i \frac{\partial \eta_i}{\partial T_1}) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial}{\partial T_1} \eta_i \frac{\partial}{\partial T_1} \eta_i + \eta_i \frac{\partial^2 \eta_i}{\partial T_1^2} \right),$$

або

$$\frac{\partial F_1}{\partial T_1} = \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{\partial}{\partial T_1} \eta_i \right)^2 \frac{\partial}{\partial T_1} \eta_i + \eta_i \frac{\partial^2 \eta_i}{\partial T_1^2} \right]. \quad (5.6)$$

Вираз для часткової похідної $\frac{\partial F_1}{\partial T_2}$ набирає вигляду:

$$\frac{\partial F_1}{\partial T_2} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial}{\partial T_2} \left(\eta_i \frac{\partial \eta_i}{\partial T_1} \right) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial \eta_i}{\partial T_2} \frac{\partial \eta_i}{\partial T_1} + \eta_i \frac{\partial^2 \eta_i}{\partial T_1 \partial T_2} \right),$$

тобто

$$\frac{\partial F_1}{\partial T_2} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial \eta_i}{\partial T_2} \frac{\partial \eta_i}{\partial T_1} + \eta_i \frac{\partial^2 \eta_i}{\partial T_1 \partial T_2} \right). \quad (5.7)$$

Часткова похідна $\frac{\partial F_2}{\partial T_1}$ знаходиться наступним чином:

$$\frac{\partial F_2}{\partial T_1} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial}{\partial T_1} \left(\eta_i \frac{\partial \eta_i}{\partial T_2} \right) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial \eta_i}{\partial T_1} \frac{\partial \eta_i}{\partial T_2} + \eta_i \frac{\partial^2 \eta_i}{\partial T_2 \partial T_1} \right),$$

або

$$\frac{\partial F_2}{\partial T_1} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial \eta_i}{\partial T_1} \frac{\partial \eta_i}{\partial T_2} + \eta_i \frac{\partial^2 \eta_i}{\partial T_2 \partial T_1} \right). \quad (5.8)$$

І, нарешті, часткова похідна $\frac{\partial F_2}{\partial T_2}$ виражається в такий спосіб:

$$\frac{\partial F_2}{\partial T_2} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial}{\partial T_2} \left(\eta_i \frac{\partial \eta_i}{\partial T_2} \right) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial \eta_i}{\partial T_2} \frac{\partial \eta_i}{\partial T_2} + \eta_i \frac{\partial^2 \eta_i}{\partial T_2^2} \right) = \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{\partial \eta_i}{\partial T_2} \right)^2 + \eta_i \frac{\partial^2 \eta_i}{\partial T_2^2} \right],$$

тобто

$$\frac{\partial F_2}{\partial T_2} = \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{\partial \eta_i}{\partial T_2} \right)^2 + \eta_i \frac{\partial^2 \eta_i}{\partial T_2^2} \right]. \quad (5.9)$$

Звертаємо увагу, що часткові похідні $\frac{\partial F_2}{\partial T_1}$ і $\frac{\partial F_1}{\partial T_2}$, які представлені вира-

зами (5.7) і (5.8), дорівнюють один одному. Якщо ввести позначення:

$$A_{12} = \frac{\partial F_2}{\partial T_1} = \frac{\partial F_1}{\partial T_2}, \quad A_{11} = \frac{\partial F_1}{\partial T_1}, \quad A_{22} = \frac{\partial F_2}{\partial T_2},$$

то рівняння методу Ньютона (5.5) приймають такий вигляд:

$$A_{11} \Delta T_1 + A_{12} \Delta T_2 = -F_1(T_1, T_2);$$

$$A_{12}\Delta T_1 + A_{22}\Delta T_2 = -F_2(T_1, T_2). \quad (5.10)$$

Вирішуючи систему (5.10) стосовно змінних ΔT_1 і ΔT_2 , отримаємо:

$$\Delta T_1 = \frac{A_{12}F_2 - A_{22}F_1}{A_{11}A_{22} - A_{12}^2}, \quad \Delta T_2 = \frac{A_{12}F_1 - A_{11}F_2}{A_{11}A_{22} - A_{12}^2}.$$

Для реалізації методу Ньютона необхідно знайти аналітичний вигляд часткових похідних $\frac{\partial \eta_i}{\partial T_1}$, $\frac{\partial \eta_i}{\partial T_2}$, $\frac{\partial^2 \eta_i}{\partial T_1 \partial T_2}$, $\frac{\partial^2 \eta_i}{\partial T_1^2}$ і $\frac{\partial^2 \eta_i}{\partial T_2^2}$ для отримання в явному

вигляді виразів (5.6) ÷ (5.9). З цією метою введемо такі позначення:

$$R_{12} = \frac{T_1^2}{T_1 - T_2}; \quad R_{21} = \frac{T_2^2}{T_1 - T_2}; \quad E_1 = 1 - \exp(-t_i/T_1); \quad E_2 = 1 - \exp(-t_i/T_2).$$

З урахуванням введених позначень можна записати вираз для η_i :

$$\eta_i = (a_\omega t_i - \Delta K_i) - a_\omega (R_{12} E_1 + R_{21} E_2).$$

Знайдемо аналітичні вирази для часткових похідних $\frac{\partial \eta_i}{\partial T_1}$, $\frac{\partial \eta_i}{\partial T_2}$, $\frac{\partial^2 \eta_i}{\partial T_1 \partial T_2}$,

$\frac{\partial^2 \eta_i}{\partial T_1^2}$ і $\frac{\partial^2 \eta_i}{\partial T_2^2}$ з урахуванням отриманого виразу для η_i .

$$\frac{\partial^2 \eta_i}{\partial T_2 \partial T_1} = -a_\omega \left(\frac{\partial^2 R_{12}}{\partial T_1 \partial T_2} E_1 + \frac{\partial R_{12}}{\partial T_2} \frac{\partial E_1}{\partial T_1} + \frac{\partial E_2}{\partial T_2} \frac{\partial R_{21}}{\partial T_1} + E_2 \frac{\partial^2 R_{21}}{\partial T_1 \partial T_2} \right);$$

$$\frac{\partial^2 \eta_i}{\partial T_1^2} = -a_\omega \left(\frac{\partial^2 R_{12}}{\partial T_1^2} E_1 + 2 \frac{\partial R_{12}}{\partial T_1} \frac{\partial E_1}{\partial T_1} + R_{12} \frac{\partial^2 E_1}{\partial T_1^2} + E_2 \frac{\partial^2 R_{21}}{\partial T_1^2} \right);$$

$$\frac{\partial^2 \eta_i}{\partial T_2^2} = -a_\omega \left(\frac{\partial^2 R_{12}}{\partial T_2^2} E_1 + 2 \frac{\partial R_{21}}{\partial T_2} \frac{\partial E_2}{\partial T_2} + R_{21} \frac{\partial^2 E_2}{\partial T_2^2} + E_2 \frac{\partial^2 R_{21}}{\partial T_2^2} \right);$$

Наступним кроком є визначення в явному вигляді часткових похідних

$$\frac{\partial R_{12}}{\partial T_1}, \frac{\partial E_1}{\partial T_1}, \frac{\partial R_{21}}{\partial T_1}, \frac{\partial R_{12}}{\partial T_2}, \frac{\partial E_2}{\partial T_2}, \frac{\partial R_{21}}{\partial T_2}, \frac{\partial^2 R_{12}}{\partial T_1 \partial T_2}, \frac{\partial^2 R_{21}}{\partial T_1 \partial T_2}, \frac{\partial^2 R_{12}}{\partial T_1^2}, \frac{\partial^2 E_1}{\partial T_1^2},$$

$$\frac{\partial^2 R_{21}}{\partial T_1^2}, \frac{\partial^2 R_{12}}{\partial T_2^2}, \frac{\partial^2 E_2}{\partial T_2^2} \text{ і } \frac{\partial^2 R_{21}}{\partial T_2^2}.$$

Наведемо вирази для часткових похідних зазначеного переліку, враховуючи явні вирази для R_{12} , R_{21} , E_1 , E_2 , починаючи з R_{12} :

$$\begin{aligned} \frac{\partial R_{12}}{\partial T_1} &= \frac{T_1}{T_1 - T_2} \left[2 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} \right]; & \frac{\partial^2 R_{12}}{\partial T_1 \partial T_2} &= \frac{2T_1}{(T_1 - T_2)^2} \left[1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} \right]; \\ \frac{\partial^2 R_{12}}{\partial T_1^2} &= \frac{2T_1}{T_1 - T_2} \left(1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} \right)^2; & \frac{\partial R_{12}}{\partial T_2} &= \left(\frac{T_1}{T_1 - T_2} \right)^2; \\ \frac{\partial^2 R_{12}}{\partial T_2^2} &= \frac{2}{T_1 - T_2} \left(\frac{T_1}{T_1 - T_2} \right)^2. \end{aligned}$$

Часткові похідні для R_{21} мають наступний вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{\partial R_{21}}{\partial T_1} &= - \left(\frac{T_2}{T_1 - T_2} \right)^2; & \frac{\partial^2 R_{21}}{\partial T_1 \partial T_2} &= - \frac{2T_2}{(T_1 - T_2)^2} \left(1 + \frac{T_2}{T_1 - T_2} \right); \\ \frac{\partial^2 R_{21}}{\partial T_1^2} &= \frac{2}{T_1 - T_2} \left(\frac{T_2}{T_1 - T_2} \right)^2; & \frac{\partial R_{21}}{\partial T_2} &= \frac{T_2}{T_1 - T_2} \left(2 + \frac{T_2}{T_1 - T_2} \right); \\ \frac{\partial^2 R_{21}}{\partial T_2^2} &= \frac{2}{T_1 - T_2} \left[\left(1 + \frac{T_2}{T_1 - T_2} \right)^2 \right]. \end{aligned}$$

Наведемо вирази для часткових похідних величини E_1 :

$$\frac{\partial E_1}{\partial T_1} = - \frac{t_i}{T_1^2} \exp(-t_i/T_1); \quad \frac{\partial^2 E_1}{\partial T_1^2} = \left(2 - \frac{t_i}{T_1} \right) \frac{t_i}{T_1^3} \exp(-t_i/T_1).$$

Нарешті, часткові похідні для E_2 виражаються в такий спосіб:

$$\frac{\partial E_2}{\partial T_2} = - \frac{t_i}{T_2^2} \exp(-t_i/T_2); \quad \frac{\partial^2 E_2}{\partial T_2^2} = \left(2 - \frac{t_i}{T_2} \right) \frac{t_i}{T_2^3} \exp(-t_i/T_2).$$

Таким чином, отримані вирази для часткових похідних дозволяють знайти вирази для параметрів T_1 і T_2 динамічної моделі судна третього порядку.

Наведена процедура обчислення шуканих параметрів методом Ньютона з

нелінійних рівнянь, отриманих методом найменших квадратів, була використана для апроксимації експериментальних даних, отриманих з натурних спостережень [131].

Для розрахунку невідомих параметрів T_1 і T_2 використовувалися всі точки експериментальних кривих кожного з маневрів. Виняток склали маневри 5 і 6, в яких використовувалися експериментальні точки, починаючи з третьої. Результати розрахунків параметрів динамічної моделі обертального руху судна третього порядку наведені в табл. 5.5.

Розрахунок параметрів динамічної моделі обертального руху судна третього порядку проводився на персональному комп'ютері.

Таблиця 5.5.

Результати розрахунку параметрів моделі судна третього порядку

Номер маневру	Кут кладки керма	Швидкість судна	t_z (с)	a_{ω} (°/с)	T_1 (с)	T_2 (с)
Маневр 1	5	24	0	0,87	9,62	1,68
Маневр 2	– 5	24	0	0,88	9,63	1,67
Маневр 3	10	21	0	1,27	8,87	1,53
Маневр 4	– 10	21	0	1,29	8,88	1,54
Маневр 5	15	27	13	2,64	9,63	1,24
Маневр 6	– 15	27	12	2,51	7,44	0,81

5.2. Розрахунок інерційно-гальмівних характеристик з використанням альтернативного підходу

Розглянемо альтернативний підхід для визначення інерційно-гальмівних характеристик судна. Відзначимо, якщо судно в процесі гальмування не відхиляється від початкового курсу (довжина вибігання дорівнює довжині гальмівного шляху), то закон його руху описується диференціальним рівнянням:

$$(1 + k)m \frac{dV}{dt} = -\sum F, \quad (5.11)$$

в якому сума гальмуючих сил $\sum F$ складається з опору корпусу R і упору гребного гвинта на задній хід P , в Ньютонах; k – коефіцієнт приєднаної маси, V – швидкість судна, м/с, m – маса судна, кг.

Весь процес гальмування розділимо по швидкості на декілька елементарних ділянок і припустимо, що на кожній ділянці робота сил опору і упору гвинта дорівнює роботі їх середніх величин R_{cp} та P_{cp} . Тоді праву частину рівняння (5.11) перепишемо так:

$$(1 + k)m \frac{dV}{dt} = -(R_{срi,i+1} + P_{срi,i+1}) \quad (5.12)$$

У теорії корабля опір корпусу руху судна прийнятий апроксимувати степеневою залежністю вигляду:

$$R = \mu V^a,$$

де μ – коефіцієнт пропорційності;

a – показник ступеня.

Для визначення середнього опору на кожній ділянці швидкості, застосуємо теорему про середнє інтегрального числення, згідно з якою:

$$R_{ср} = \frac{1}{V_{i+1} - V_i} \int_{V_i}^{V_{i+1}} \mu V^a dV = \frac{\mu (V_{i+1}^{a+1} - V_i^{a+1})}{(a+1)(V_{i+1} - V_i)}, \quad (5.13)$$

де V_i – початкова швидкість перед гальмуванням;

V_{i+1} – швидкість в кінці елементарної ділянки гальмування.

Для найбільш поширеного випадку, коли $a = 2$, отримаємо:

$$R_{cp} = \frac{\mu}{3}(V_i^2 + V_i \cdot V_{i+1} + V_{i+1}^2) \quad (5.14)$$

Для визначення величини коефіцієнта пропорційності μ можна скористатися одним з відомих способів. Оскільки маса судна за час гальмування практично не змінюється, то рівняння (5.12) можна представити в наступному вигляді:

$$\frac{d[(1+k)mV]}{dt} = -(R_{cpi,i+1} + P_{cpi,i+1}).$$

Помножимо обидві частини цієї рівності на dt і візьмемо від них інтеграли. При цьому зліва, де інтегрування проводиться за швидкістю, межами інтеграла будуть V_i та V_{i+1} , а праворуч, де змінною є час, межами інтегралів будуть 0 і t . В результаті отримаємо, що зміна кількості руху судна на даній ділянці гальмування дорівнює сумі імпульсів діючих на нього сил, тобто:

$$(1+k)mV_i - (1+k)mV_{i+1} = R_{cpi,i+1} \cdot t + P_{cpi,i+1} \cdot t \quad (5.15)$$

Вирішуючи рівняння (5.15) стосовно t , отримаємо:

$$t = \frac{(1+k)m}{R_{cpi,i+1} + P_{cpi,i+1}} [V_i - V_{i+1}], \quad (5.16)$$

де t – час гальмування в секундах.

При $V_{i+1}=0$:

$$t = \frac{(1+k)mV_i}{R_{cpi,i+1} + P_{cpi,i+1}} \quad (5.17)$$

Для знаходження довжини вибігу представимо прискорення в рівнянні (5.12) у вигляді:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{dV}{dS} \frac{dS}{dt} = V \frac{dV}{dS} = \frac{1}{2} \frac{dV^2}{dS}.$$

В цьому випадку

$$\frac{(1+k)m dV^2}{2dS} = -(R_{\text{срi},i+1} + P_{\text{срi},i+1}) \quad (5.18)$$

Помножимо обидві частини рівності (5.18) на dS і внесемо $(1+k)m$ під знак диференціала. Отримаємо вираз теореми про зміну кінетичної енергії в диференційній формі:

$$d\left[\frac{(1+k)mV^2}{2}\right] = -(R_{\text{срi},i+1} + P_{\text{срi},i+1})dS, \quad (5.19)$$

звідки довжина вибігу на кожній ділянці швидкості при гальмуванні, дорівнює:

$$S = \frac{(1+k)m}{2(R_{\text{срi},i+1} + P_{\text{срi},i+1})} [V_i^2 - V_{i+1}^2], \quad (5.20)$$

де S – довжина вибігу в метрах.

При $V_{i+1} = 0$ формула (5.20) спрощується:

$$S = \frac{(1+k)mV_n^2}{2(R_{\text{срi},i+1} + P_{\text{срi},i+1})}. \quad (5.21)$$

Обчислення за формулами (5.16, 5.17) і (5.20, 5.21) буде тим точніше, чим менше різниця швидкостей.

Зробимо ще одне припущення про те, що сила упору гребного гвинта є лінійною функцією швидкості від початку гальмування до швидкості початку реверсу $V_{\text{рев.}}$, після якої вона стає постійною і дорівнює значенню в швартовному режимі. При сталій швидкості руху вперед, опір корпусу дорівнюватиме силі упору гребного гвинта, виправленого коефіцієнтом попутного потоку, тобто

$$R_o = (1 - \Psi)P_o, \quad (5.22)$$

де Ψ – коефіцієнт попутного потоку.

З урахуванням сказаного, отримаємо вирази для визначення середнього упору гребного гвинта на заданих ділянках швидкості:

$$P_{cp} = R_0 - (R_0 - P_1') \frac{V_{cp}}{V_{рев}}, \quad (5.23)$$

де $V_{cp} = \frac{V_i + V_{i+1}}{2}$.

Коли $V_{cp} = V_{рев}$, тоді $P_{cp} = P_1'$, тобто упору гребного гвинта на задній хід в швартовному режимі.

Сила упору гребного гвинта на задній хід в швартовному режимі визначається за відомою з теорії корабля формулою:

$$P_1' = \rho K_1' n_1^2 D_B^4, \quad (5.24)$$

де ρ – масова щільність морської води;

K_1' – коефіцієнт упору гребного гвинта на задній хід в швартовному режимі;

n_1 – частота обертання гребного гвинта на задній хід, об/с;

D_B – діаметр гребного гвинта, м.

При відсутності відомостей про коефіцієнт упору гребного гвинта на задній хід, його величину можна визначити за формулою [143]:

$$K_1' = 0,4 \frac{H}{D_B} - 0,07, \quad (5.25)$$

де $\frac{H}{D_B}$ – крокове відношення гребного гвинта.

Як приклад розглянемо розрахунок довжини і швидкодії при активному гальмуванні теплохода «Уелен», при вихідних даних $D_{вант} = 22100$ т, $(1+k) = 1,1$, $V_0 = 9,15$ м/с, $V_{рев} = 6,5$ м/с, $R_0 = 688\,000$ Н, $P_1 = 590\,700$ Н, $\mu = 8215$, $a=2$.

Реверс проведений з повного переднього ходу на «повний хід назад».

Коефіцієнт засмоктування при розгоні на задньому ходу $\tau = 0,40$ [144].

Результати розрахунку гальмівних характеристик представлені в таблиці

5.6.

При натурних випробуваннях були отримані наступні результати:

$S_H = 1215 \text{ м}$ і $t_H = 4,9 \text{ хв}$. Відхилення розрахункових від натурних вели-

чин знаходяться в межах точності, яка визначається в РІС-89 (10% СКП).

Таблиця 5.6

Розрахунок характеристик гальмування теплохода «Уелен»

V_i м/с	V_{i+1} м/с	V_{cp} м/с	P_{cp} Н	R_{cp} Н	S м	t хв.	ΣS	Σt
9,15	8,0	8,57	559638	604959	205,8	0,4	205,8	0,4
8,0	7,0	7,5	575730	462778	175,6	0,4	381,4	0,8
7,0	6,0	6,5	590700	347768	168,4	0,4	549,8	1,2
6,5	5,0	-	590700	273148	242,7	0,7	792,5	1,9
5,0	4,0	-	590700	167038	144,4	0,5	936,9	2,5
4,3	3,0	-	590700	101318	122,9	0,6	1060,0	3,0
3,0	2,0	-	590700	52028	94,6	0,7	1154,4	3,7
2,0	1,0	-	590700	19168	59,8	0,7	1214,2	4,4
1,0	0	-	590700	2738	20,5	0,6	1234,6	5,0

Нагадаємо, що розрахунок довжини і часу вибігу при активному гальмуванні даного судна за стандартною методикою дав наступні результати: $S = 1242 \text{ м}$, $t = 5,3 \text{ хв}$.

З порівняння отриманих результатів видно, що обидві методики є, практично, рівноточними.

5.3. Визначення впливу попутної і зустрічної течії на довжину гальмівного шляху судна

На довжину вибігу при гальмуванні може мати значний вплив попутна і зустрічна течія [145, 146].

Довжину вибігу на течії відносно ґрунту $S_{\text{гр}}$ будемо обчислювати поетапно і потім алгебраїчно підсумовувати.

При попутної течії на першому етапі обчислимо довжину вибігу S і час гальмування t_1 від початкової швидкості до повної зупинки судна відносно води, як показано в табл. 5.6. На другому етапі обчислимо шлях і час розгону судна на задній хід до швидкості течії, що дорівнює V_T , або до зупинки судна відносно ґрунту. Рівняння руху в цьому випадку прийме наступний вигляд:

$$(1+k)m \frac{dV_T}{dt} = (1-\tau)P'_1 - R_{\text{ср}}, \quad (5.26)$$

де $\tau = 0,40$ – коефіцієнт засмоктування.

Звідки

$$t = \frac{(1+k)mV_T}{(1-\tau)P'_1 - R_{\text{ср}}} \quad (5.27)$$

і

$$S = \frac{(1+k)mV_T^2}{2[(1-\tau)P'_1 - R_{\text{ср}}]}, \quad (5.28)$$

де

$$R_{\text{ср}} = \frac{\mu V_T^2}{3}. \quad (5.29)$$

На третьому етапі судно під впливом попутної течії пройде шлях відносно ґрунту, що дорівнює добутку швидкості течії (з позитивним знаком) на сумарний час двох попередніх етапів, тобто

$$S_{\text{гр}} = S - S_2 + V_T(t_1 + t_2) = S - \frac{(1+k)mV_T^2}{2[(1-\tau)P'_1 + R_{\text{ср}}]} + V_T + V_T t_2, \quad (5.30)$$

виключимо з формули (5.30) час гальмування, для чого добутки $V_T t_1$ і $V_T t_2$ представимо в такий спосіб. Використовуючи формули (5.27) і (5.28), знайдемо відношення довжини вибігу до його тривалості:

$$\frac{S_2}{t_2} = \frac{V_T}{2} \quad (5.31)$$

звідки $V_T t_2 = 2S_2$.

Помножимо і розділимо на V_o добуток $V_T t_1$. Аналогічно до попереднього отримаємо:

$$\frac{V_T}{V_o} V_o t_1 = 2S_1 \frac{V_T}{V_o}. \quad (5.32)$$

Підставимо вираз (5.31) і (5.32) у формулу (5.30). Після нескладного спрощення отримаємо формулу для визначення довжини вибігу при попутній течії:

$$S_{гр} = S \left(1 + \frac{2V_T}{V_o} \right) + \frac{(1+k)mV_T^2}{2[(1-\tau)P'_1 - R_{cp}]} \quad (5.33)$$

При зустрічній течії на першому етапі також обчислюємо довжину вибігу S і час гальмування t_1 від початкової швидкості відносно води V_o до зупинки судна відносно води. На другому етапі обчислюємо вибіг S_2 і час гальмування t_2 від швидкості течії V_T до зупинки судна відносно води. Різниця $S - S_2$ дасть довжину вибігу відносно ґрунту.

На третьому етапі судно під впливом зустрічної течії пройде шлях відносно ґрунту, рівний швидкості течії (з негативним знаком) помноженої на різницю часу двох попередніх етапів, тобто

$$S_{гр} = S - S_2 - V_T(t_1 - t_2) = S - \frac{(1+k)mV_T^2}{2(R_{cp} + P_{cp})} - V_T t_1 + V_T t_2. \quad (5.34)$$

При малих значеннях швидкості течії середній упор можна наближено вважати рівним упору гвинта при обертанні на задній хід у швартовному режимі, тобто $P_{cp} = P'_1$. З огляду на це, також замінюючи добутки $V_T t_1$ і $V_T t_2$

відповідними вибігами, отримаємо формулу для визначення довжини вибігу відносно ґрунту при зустрічній течії:

$$S_{\text{гр}} = S \left(1 - \frac{2V_{\text{т}}}{V_{\text{о}}} \right) + \frac{(1+k)mV_{\text{т}}^2}{2(R_{\text{ср}} + P_1')} \quad (5.35)$$

Як приклад для теплохода «Уелен» визначимо довжину вибігу з повного ходу вперед на «повний хід назад» при плаванні на попутній і зустрічній течіях. Швидкість течії $V_{\text{т}} = 3$ вузла = 1,54 м/хв.

Інші дані наведені у попередньому прикладі і табл. 5.6. При попутній течії $S_{\text{гр}} = 1733$ м, при зустрічній течії $S_{\text{гр}} = 868$ м.

Таким чином, на попутній течії довжина вибігу відносно ґрунту збільшилася на 498 метрів, а на зустрічній течії зменшилася на 367 метрів.

5.4. Розрахунок інерційно-гальмівних характеристик контейнеровоза “ELQUI”

Наведемо основні дані судна:

Довжина (повна): 184,1 м. Довжина між перпендикулярами: 176,0 м.

Водотоннажність у вантажу: 30843 т.

Осадка у вантажі, $T_{\text{ср}} = 9,891$ м.

Водотоннажність у баласті: 17655 т.

Осадка, $T_{\text{н}} = 4,7$ м; $T_{\text{к}} = 8,7$ м; $T_{\text{ср}} = 6,7$ м.

Потужність двигуна: 13320 кВт/ 17862,4 к.с.

Гребний гвинт: правого обертання.

Число лопатей: 5.

Діаметр гвинта: 6,150 м.

Крок гвинта: 6,101 м.

Крокове відношення: 0,9921.

Дискове відношення: 0,55.

Кермо: напівбалансирне.

Коефіцієнт попутного потоку – 0,29.

		у вантажі	у баласті
Повний хід (морський):	113 об/хв.	19,5 вузл;	19,75 вузл.
Повний хід (маневрений):	80 об/хв.	14,2 вузл;	14,4 вузл.
Середній хід:	69 об/хв.	12,1 вузл;	12,4 вузл.
Малий хід:	46 об/хв.	8,2 вузл;	8,4 вузл.
Найменший хід:	36 об/хв.	6,1 вузл;	6,4 вузл.
Найменший хід назад:	36 об/хв.		
Малий хід назад:	46 об/хв.		
Середній хід назад:	69 об/хв.		
Повний хід назад:	80 об/хв.		

Програми для розрахунку інерційно-гальмівних характеристик розроблені на мові програмування Delphi. Лістинг програм представлений у Додатку А.

Для розрахунку характеристик активного гальмування приймалися наведені вихідні дані.

Результати розрахунків інерційно-гальмівних характеристик представлені у таблиці 5.7 для судна у вантажу і за даними табл. 5.7 побудовані залежності вибігу $S = f(V)$ і часу $t = f(V)$ активного гальмування, які представлені на рис. 5.1 (для вибігу) і рис. 5.2. (для часу).

У табл. 5.8 наведені дані розрахунку вибігу активного гальмування і його часу. Графічна інтерпретація даних активного гальмування представлена на рис. 5.3 для залежності вибігу від швидкості судна і на рис. 5.4. – Для залежності часу активного гальмування від швидкості судна.

Графічне представлення параметрів активного гальмування на рис. 6.1... рис. 6.4 виконано комп'ютерною програмою.

За результатами розрахунків табл. 5.7 отримана залежність значення вибігу судна у вантажі при активному гальмуванні від величини швидкості судна.

Звертаємо увагу, що отримана залежність відображає пропорційне зростання величини вибігу зі зростанням швидкості судна, що видно з рис. 5.1.

Таблиця 5.7

Результати розрахунку для судна у вантажі

V_i , вузли	V_i , м/хв	V_{i+1} , м/хв	V_{cp} , м/хв	Сума S, кБТ	Сума t, хв
14,2	7,31	6,58	6,94	0,64	0,28
12,8	6,58	5,85	6,21	1,28	0,60
11,3	5,85	5,12	5,48	1,90	0,95
9,9	5,12	4,38	4,75	2,49	1,33
8,5	4,38	3,65	4,02	3,02	1,74
7,1	3,65	2,92	3,29	3,48	2,17
5,7	2,92	2,19	2,56	3,86	2,62
4,2	2,19	1,46	1,83	4,13	3,09
2,8	1,46	0,73	1,09	4,30	3,58
1,4	0,73	0	0,36	4,36	4,06

Таблиця 5.8.

Результати розрахунку для судна у баласті

V_i , вузли	V_i , м/хв	V_{i+1} , м/хв	V_{cp} , м/хв	Сума S, кБТ	Сума t, хв
14,4	7,42	6,68	7,05	0,39	0,17
12,9	6,68	5,94	6,31	0,78	0,36
11,5	5,94	5,19	5,56	1,16	0,57
10,1	5,19	4,52	4,82	1,51	0,80
8,6	4,52	3,71	4,08	1,83	1,04
7,2	3,71	2,97	3,34	2,11	1,29
5,8	2,97	2,23	2,60	2,33	1,56
4,3	2,23	1,48	1,85	2,49	1,83
2,9	1,48	0,74	1,11	2,59	2,10
1,4	0,74	0	0,37	2,62	2,38

Характер пропорційності залежності значення вибігу судна у вантажі

при активному гальмуванні від величини швидкості судна у першому наближенні має усічений експонентний вигляд зі змінною крутизною, яка падає з ростом швидкості судна [147, 148].

У табл. 5.7 представлені розрахунки, що характеризують залежність значення часу вибігу судна у вантажі від величини швидкості судна при активному гальмуванні, при цьому час вибігу також носить пропорційну залежність від швидкості судна перед початком процесу активного гальмування.

Причому дана залежність показує зростання величини часу вибігу зі збільшенням швидкості судна, як показано на рис.5.2. При цьому аналіз рисунку показує, що характер залежності часу вибігу від швидкості судна має майже лінійну залежність з незначним прогином вниз від лінійної залежності.

Більш того, на початковій ділянці, при малих швидкостях судна крива залежності часу вибігу від швидкості має позитивну кривизну, а при швидкостях понад 4 вузли кривизна кривої залежності стає негативною.

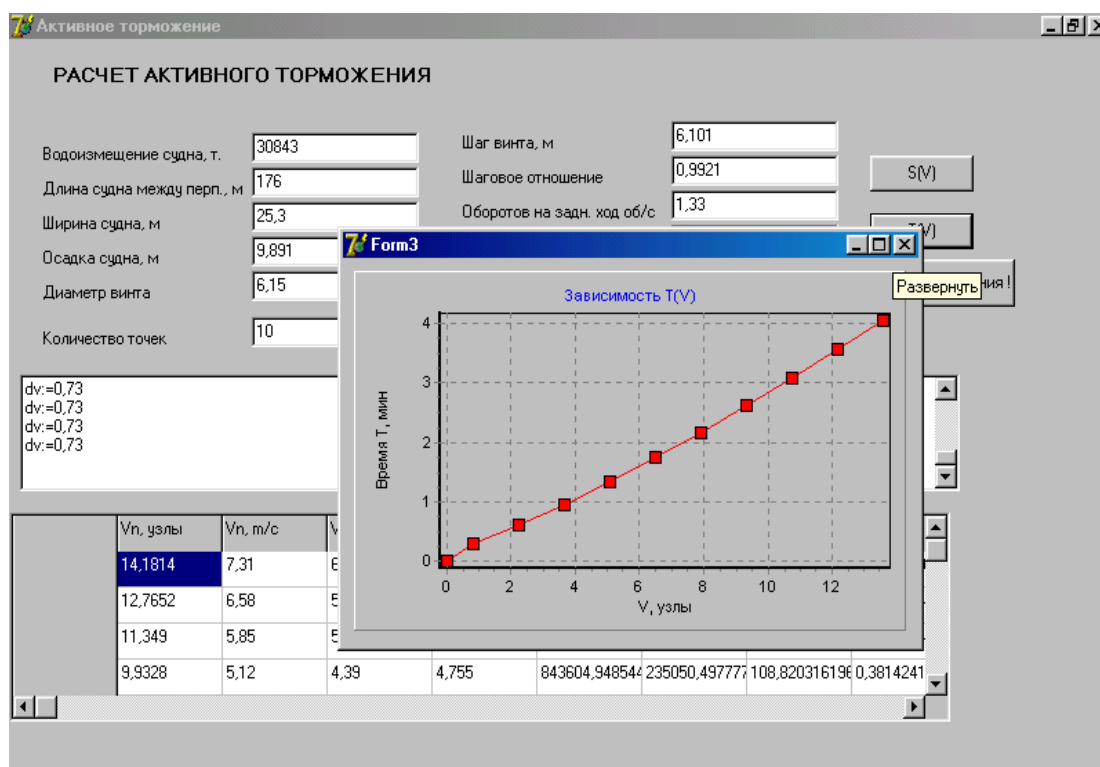


Рис. 5.1. Залежність часу активного гальмування від швидкості для судна у вантажі

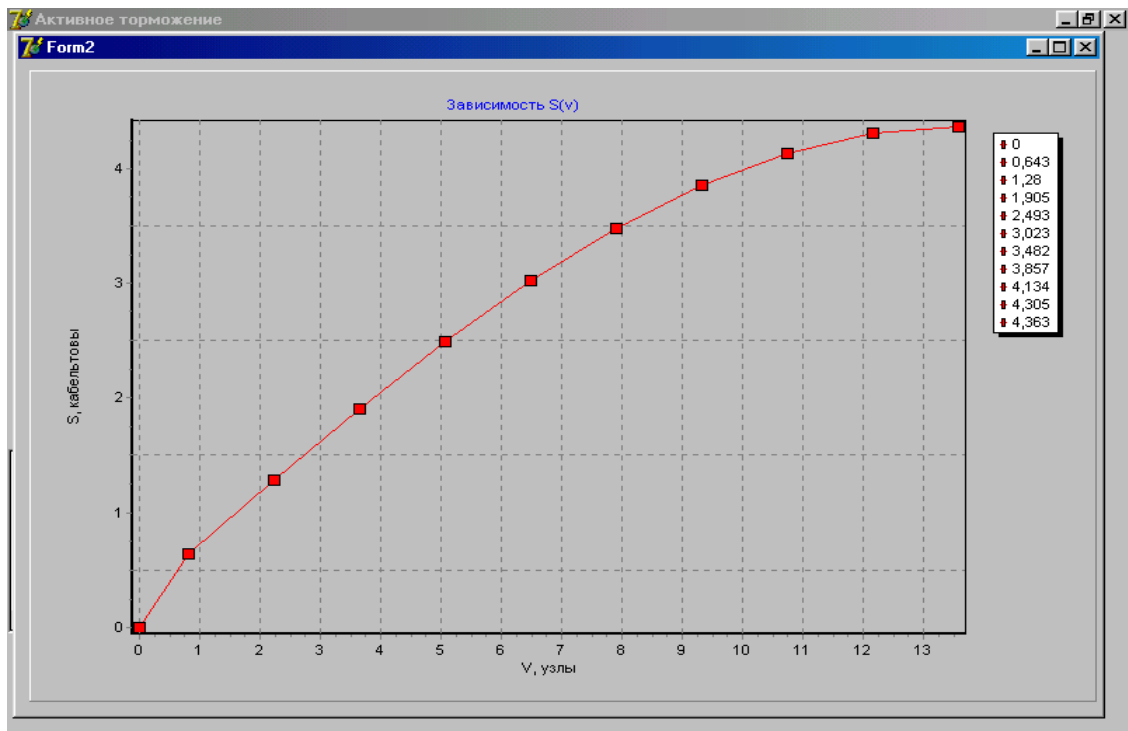


Рис. 5.2. Залежність $S(V)$ судна у вантажі при активному гальмуванні

З табл. 5.8 на рис. 5.3 представлена залежність вибігу активного гальмування від швидкості для судна у баласті, а на рис. 5.4 показано вплив швидкості судна на час вибігу судна у баласті при активному гальмуванні.

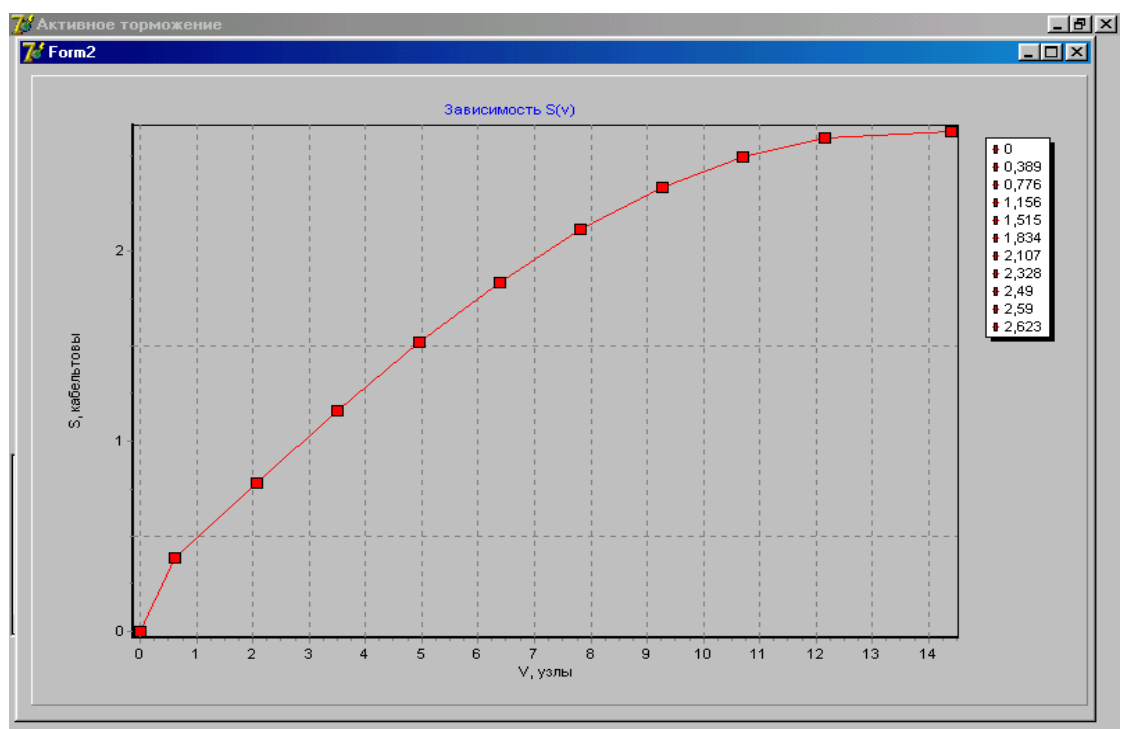


Рис. 5.3. Залежність шляху активного гальмування для судна у баласті

Черговим етапом досліджень є розрахунок характеристик розгону судна від нерухомого стану до швидкості повного маневреного ходу, причому результати розрахунку для судна у вантажі представлені у табл. 5.9 і показані на рис. 5.5.

Таблиця 5.9.

Результати розрахунку для судна у вантажі

V_i вузли	V_i м/с	V_{i+1} м/с	V_{cp} м/с	Сум. S каб	Сум. t хв.
0	0	1,3	0,65	0,15	0,71
2,5	1,3	2,6	1,95	0,67	1,53
5,0	2,6	3,9	3,25	1,72	2,53
7,6	3,9	5,2	4,5	3,74	3,90
10,0	5,2	6,5	5,85	8,34	6,33

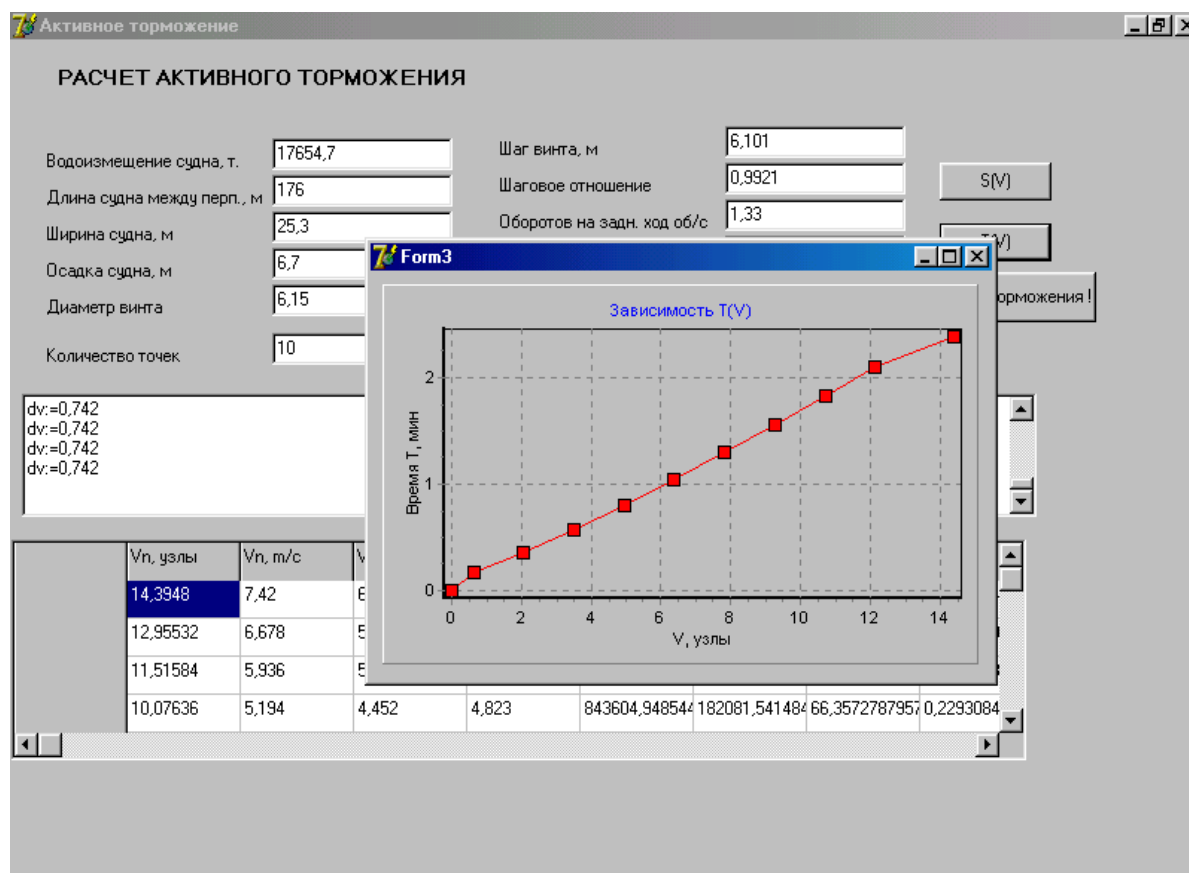


Рис. 5.4. Залежність часу активного гальмування для судна у баласті

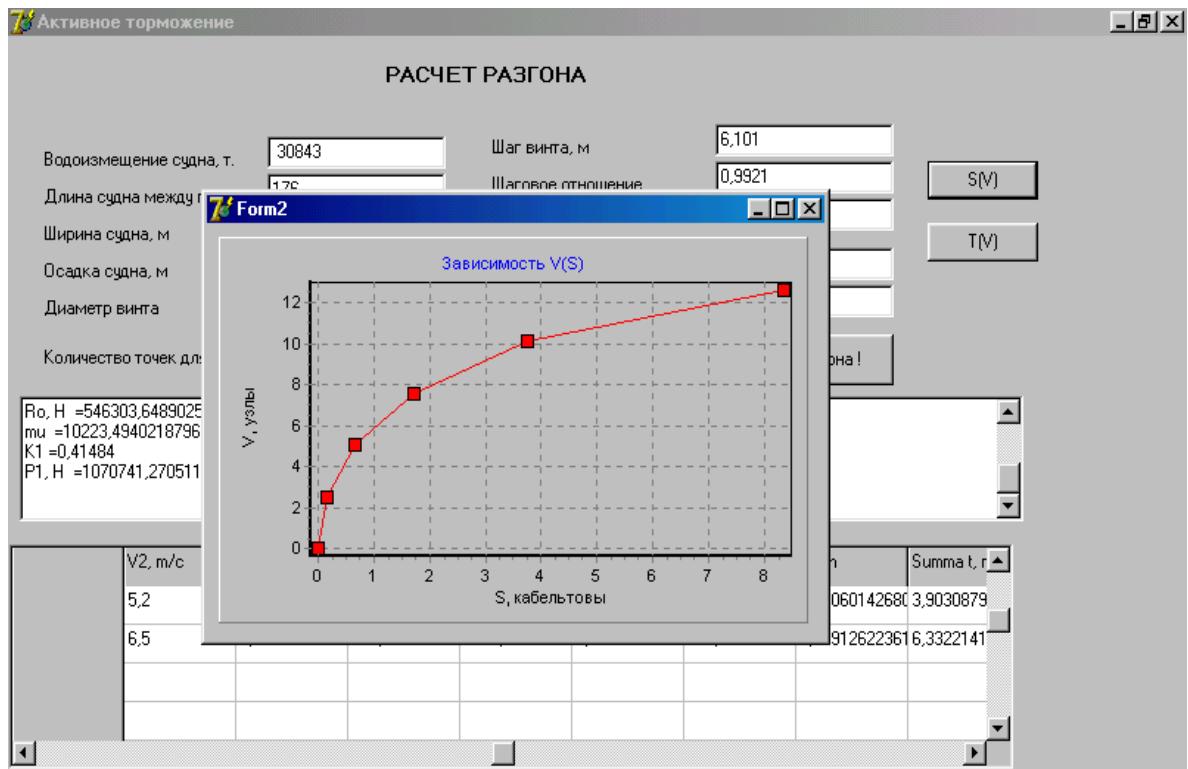


Рис. 5.5. Залежність швидкості розгону від шляху для судна у вантажі

На рис. 5.6. приведена залежність часу розгону від швидкості для судна у вантажі, яка представлена у табл. 5.9.

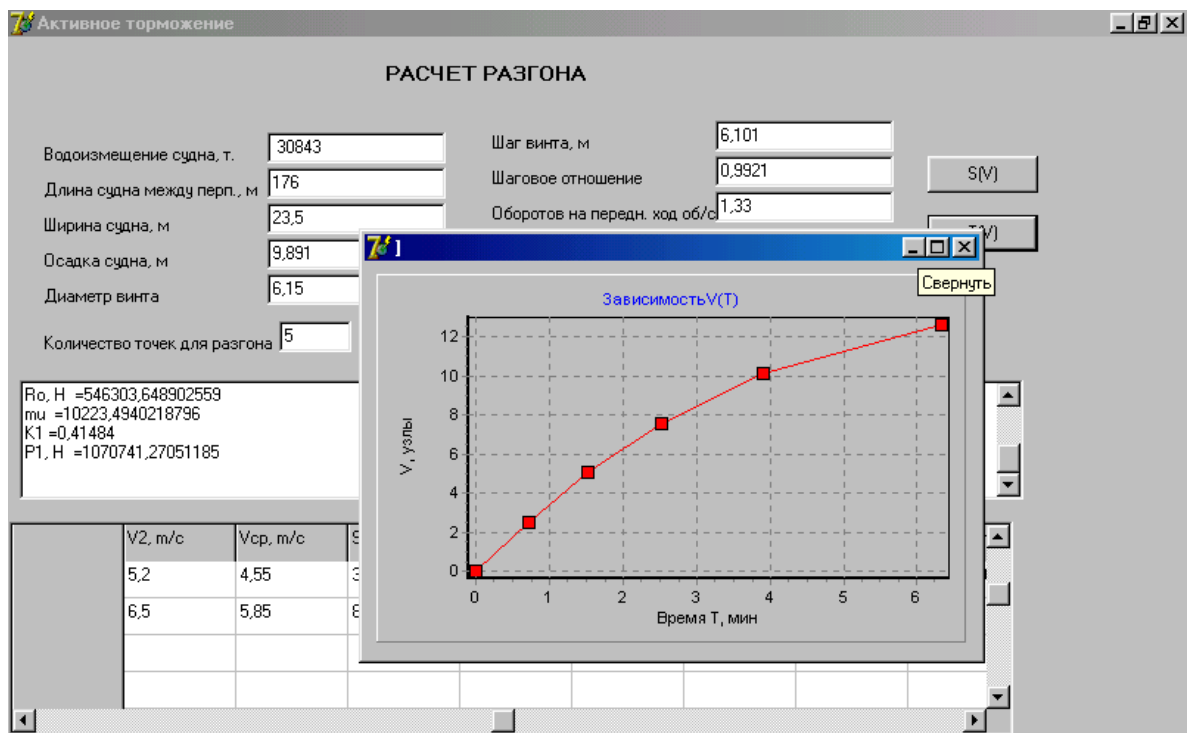


Рис. 5.6. Залежність швидкості розгону від часу для завантаженого судна

Оскільки залежності довжини шляху і часу розгону судна асимптотично наближаються до значення сталої швидкості руху вперед, то розрахунок слід вести, приблизно до $0,9 V_{уст}$ [149].

Також проведено розрахунок характеристик пригальмовування судна у вантажі від повного маневреного ходу до самого малого ходу вперед. Результати розрахунку (величина пригальмовування і відповідний йому час) наведені у табл. 5.10. Залежність часу пригальмовування від швидкості судна у вантажі у графічному вигляді представлена на рис. 5.7, а на рис. 5.8 представлена залежність шляху пригальмовування від швидкості судна.

Таблиця 5.10

Результати розрахунку для судна у вантажі

V , вуз	V_1 , м/с	V_2 , м/с	V_{cp} , м/с	Сума S , кбт	Сума t , хв.
14,2	7,31	6,92	7,12	0,67	0,29
13,4	6,93	6,55	6,74	1,39	0,62
12,7	6,55	6,17	6,36	2,18	1,00
11,9	6,17	5,79	5,98	3,06	1,46
11,2	5,79	5,40	5,60	4,04	2,00
10,5	5,40	5,02	5,21	5,18	2,66
9,7	5,02	4,64	4,83	6,50	3,52
9,0	4,64	4,26	4,45	8,15	4,66
8,3	4,26	3,88	4,07	10,38	6,35
7,5	3,88	3,5	3,69	13,96	9,34

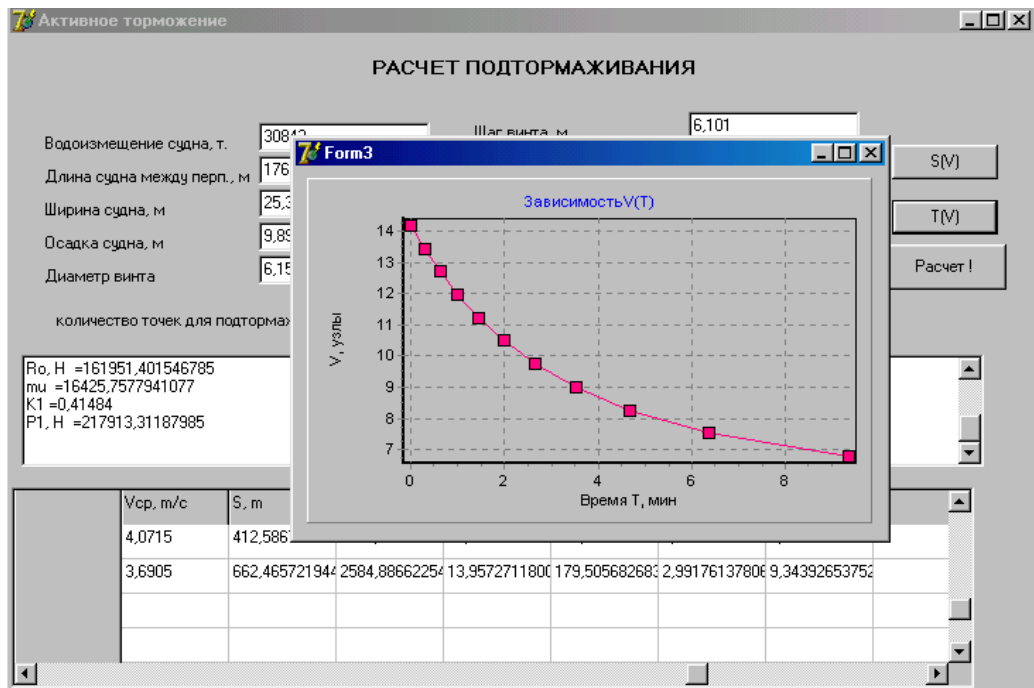


Рис. 5.7. Залежність швидкості пригальмовування від часу для судна у вантажі

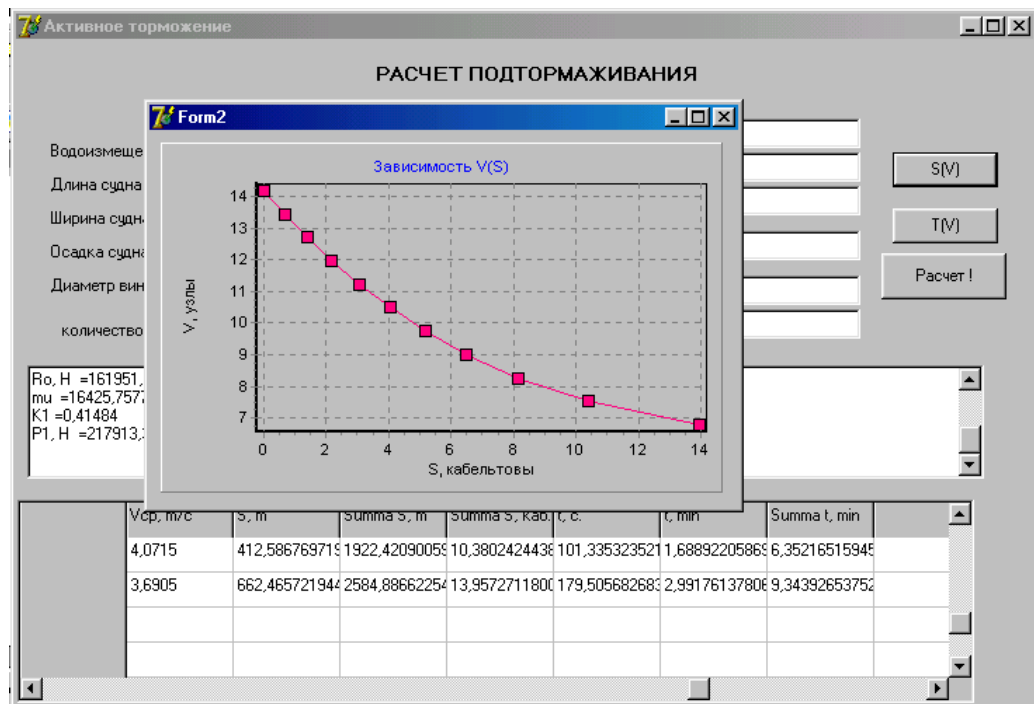


Рис. 5.8. Залежність швидкості пригальмовування від шляху судна у вантажі

Розрахунок характеристик пасивного гальмування з повного маневреного ходу на стоп для судна у вантажі і баласті наведено відповідно у табл. 5.11 і табл. 5.12.

Таблиця 5.11

Результати розрахунку для судна у вантажі

V_n вуз	V_n м/с	V_{n+1} м/с	Сума S м/с	Сума t хв.
14,2	7,31	6,88	0,91	0,40
13,3	6,88	6,45	1,88	0,85
12,5	6,45	6,02	2,92	1,36
11,7	6,02	5,59	4,03	1,95
10,8	5,59	5,16	5,24	2,64
10,0	5,16	4,72	6,54	3,46
9,2	4,72	4,29	7,98	4,45
8,3	4,29	3,86	9,56	5,65
7,5	3,86	3,43	11,34	7,16
6,6	3,43	3,0	13,35	9,09

Таблиця 5.12

Результати розрахунку для судна у баласті

V_n вуз	V_n м/с	V_{n+1} м/с	Сума S кбт	Сума t хв.
14,4	7,42	6,98	0,67	0,29
13,5	6,98	6,54	1,38	0,61
12,7	6,54	6,09	2,14	0,98
11,8	6,09	5,65	2,95	1,41
11,0	5,65	5,21	3,84	1,92
10,1	5,21	4,77	4,80	2,51
9,2	4,77	4,33	5,86	3,23
8,4	4,33	3,88	7,03	4,11
7,5	3,88	3,44	8,34	5/22
6,68	3,44	3,0	9,83	6,65

На рис. 5.9 показана залежність довжини гальмівного шляху від швидкості пасивного гальмування для судна у вантажі, а на рис. 5.10 – залежність часу пасивного гальмування від швидкості судна у вантажі.

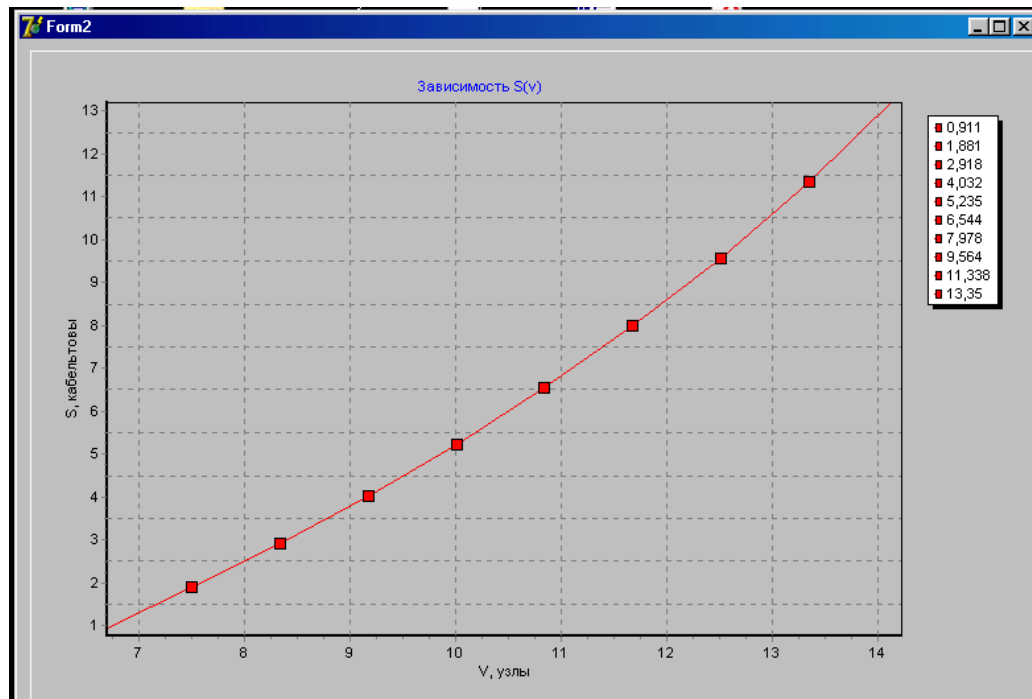


Рис. 5.9. Залежність шляху пасивного гальмування для судна у вантажі

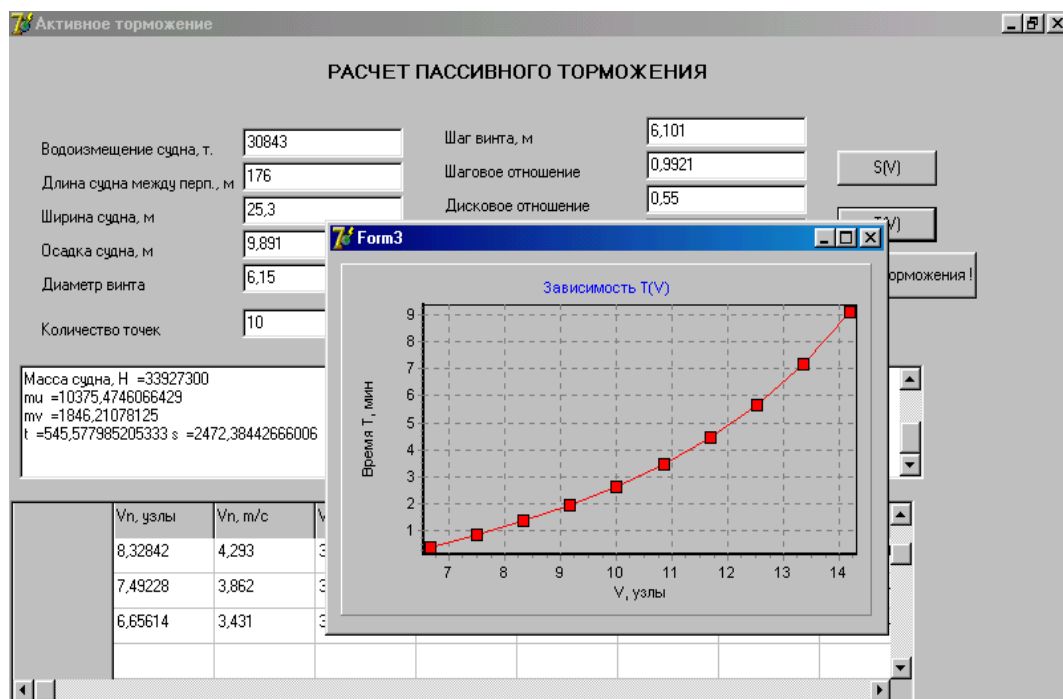


Рис. 5.10. Залежність часу пасивного гальмування для судна у вантажі

У табл. 5.12 представлено результати розрахунку пасивного гальмування для судна у баласті.

Причому на рис. 5.11 представлено графічну залежність довжини шляху

пасивного гальмування від швидкості судна у баласті.

У свою чергу, графічну залежність часу пасивного гальмування від швидкості судна у баласті показано на рис. 5.12.

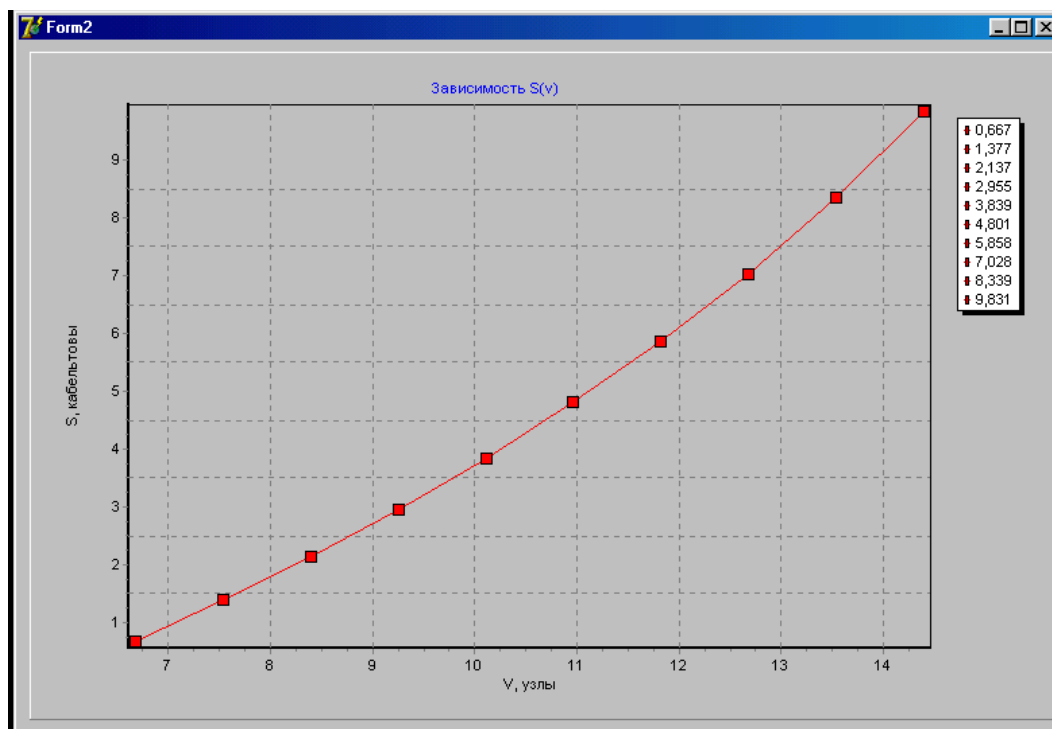


Рис. 5.11. Залежність шляху пасивного гальмування для судна у баласті

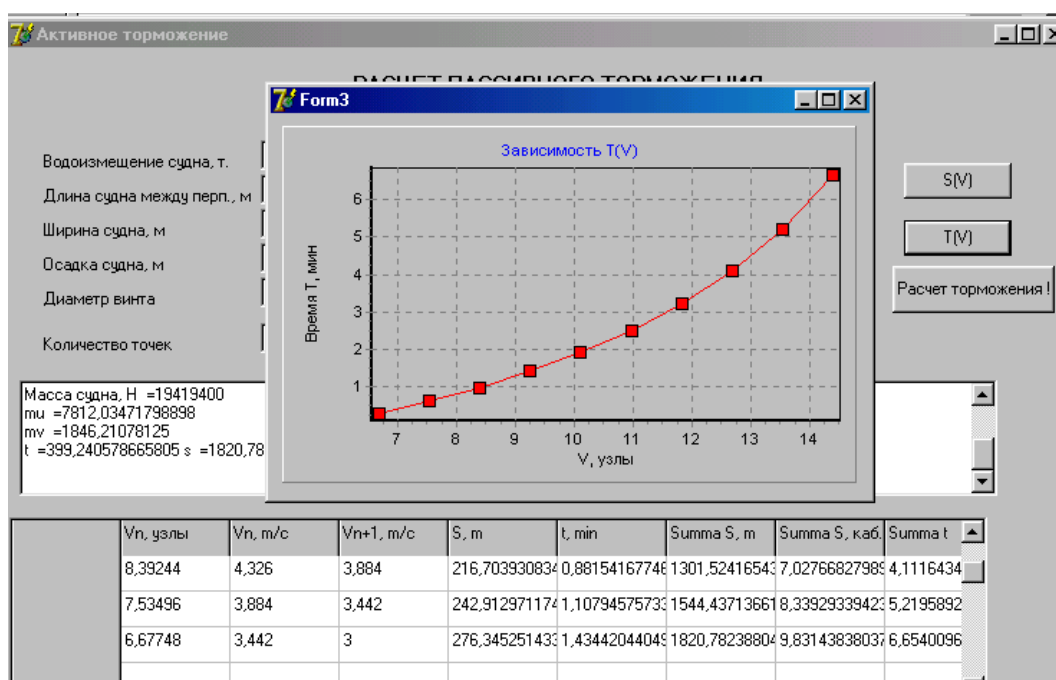


Рис. 5.12. Залежність часу пасивного гальмування для судна у баласті

5.5. Висновки за п'ятим розділом

У розділі наведено способи визначення параметрів маневру судна з експериментальних даних, отриманих у натурних спостереженнях. В якості маневрів судна розглянуті його повороти, активне і пасивне гальмування і пригальмовування.

Отримано значення постійних часу T_1 і T_2 поворотності судна, що описують його обертальний рух третьою динамічною моделлю, за вихідними даними декількох поворотів з різними кутами перекладки пера керма. Для розрахунку використовувався метод найменших квадратів, що дозволяє скласти нелінійні нормальні рівняння, розв'язання яких знаходиться методом Ньютона. Моделювання повороту судна з отриманими параметрами показали хорошу збіжність результатів моделювання з експериментальним матеріалом.

Розглянуто альтернативний метод розрахунку параметрів активного і пасивного гальмування судна: дистанції і часу вибігу судна. Отримано аналітичні вирази для розрахунку часу і дистанції вибігу судна. За допомогою запропонованого альтернативного методу проведено розрахунок параметрів теплохода «Уелен», значення яких практично збігаються зі значеннями, отриманими при швартовних випробуваннях. Розглянуто вплив попутної і зустрічної течій на довжину гальмівного шляху судна, отримані формульні вирази для розрахунку характеристик гальмування. Проведена їх оцінка для конкретного судна. Виконано розрахунок інерційно-гальмівних характеристик контейнеровоза "ELQUI" для завантаженого стану і у баласті. Представлені у табличному вигляді залежності величини і часу вибігу судна при активному гальмуванні від швидкості судна перед гальмуванням, а також представлено параметри пригальмовування судна.

Крім табличних залежностей наведені графічні криві, що відображають залежність параметрів від швидкості судна, отриманих за допомогою комп'ютерної програми.

ВИСНОВКИ

1. Оцінка стану питання. Проблема забезпечення безпеки судноводіння є однією з найважливіших проблем безпеки мореплавання, оскільки як від її успішного рішення залежить зниження шкоди людському життю, навколишньому середовищу, майну і виробничим процесам.

Інтенсивне судноплавство і навігаційні небезпеки ускладнюють плавання морських суден в умовах обмеженого простору і створюють передумови для виникнення аварійних ситуацій. Висока аварійність свідчить не тільки про високу складність умов плавання, але і про недосконалість методів судноводіння в таких районах.

При виконанні маневру судна його інерційно-гальмівні характеристики і характеристики повороткості враховуються приблизно, що знижує точність реалізації програмної траєкторії руху судна і веде до збільшення ймовірності виникнення навігаційних аварій.

Тому розробка процедури розрахунку параметрів маневру судна, чому присвячена дана робота, є актуальним і перспективним науковим напрямком.

2. Формулювання вирішеної наукової задачі, її значення для науки і практики. В результаті вирішення головної наукової задачі отримано новий метод визначення параметрів маневру судна за допомогою процедур, реалізованих в комп'ютерному модулі, який відрізняється урахуванням динаміки судна і верифікацією динамічних моделей маневрування судна даними натурного експерименту.

При вирішенні головного завдання, в роботі отримані рішення трьох складових задач у вигляді наукових результатів, що містять наукову новизну:

- вперше розроблено способи розрахунку параметрів маневрів судна в залежності від його динаміки;
- вперше запропонований спосіб розрахунку інерційно-гальмівних характеристик судна з використанням альтернативного підходу;

- отримали подальший розвиток методи визначення параметрів маневру судна за рахунок їх комп'ютерної реалізації;
- вдосконалені процедури верифікації динамічних моделей маневрування судна даними натурного експерименту.

Практична значимість роботи визначається тим, що її основні результати можуть бути використані розробниками суднових навігаційних інформаційних систем.

3. Висновки і рекомендації щодо наукового та практичного використання отриманих результатів. Основні теоретичні і практичні результати, отримані в дисертації, можуть бути використані при експлуатації суден, а також в процесі навчання і підвищення кваліфікації судноводіїв.

4. Якісні та кількісні показники отриманих результатів. Якісним показником результатів дисертаційної роботи є можливість оперативного і коректного вибору маневру судна за допомогою інформаційного забезпечення навігації суден. Як показало імітаційне моделювання, запропонований підхід має високу ефективність.

5. Обґрунтування достовірності отриманих результатів.

Коректна розробка і застосування математичних моделей, а також імітаційне моделювання, виконане за допомогою розроблених комп'ютерних програм, і підтверджують достовірність результатів роботи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Першиц Р. Я. Управляемость и управление судном / Першиц Р. Я. – Л.: Судостроение, 1983. – 272 с.
2. Демин С.И. Торможение судна / Демин С.И.– М.: Транспорт, 1975.– 81с.
3. Демин С.И. Аналитический метод определения элементов торможения судов / Демин С.И. // Экспресс-информация ЦБНТИ ММФ, серия «Судовождение и связь».– 1980. – № 3 (128). – С. 21-33.
4. Демин С.И. Приближенное аналитическое определение элементов циркуляции судов / Демин С.И. // Экспресс-информация ЦБНТИ ММФ, серия «Судовождение и связь».– 1983. – № 7 (628). – С. 14-19.
5. Демин С. И. Вопросы управления морскими судами / Демин С. И. – М.: Рекламинформбюро ММФ, 1975. – 75 с.
6. Кондрашихин В.Т. Справочник судоводителя по навигационной безопасности мореплавания / Кондрашихин В.Т., Бердинских Б.В., Мальцев А.С., Козырь Л.А. – Одесса: Маяк, 1990. – 168 с.
7. Мальцев А. С. Маневрирование судов при расхождении / Мальцев А.С. – Одесса: Морской тренажерный центр, 2002. – 208 с.
8. Мальцев А. С. Управление движением судна / Мальцев А. С. – Одесса: Весть, 1995. – 230 с.
9. Цымбал Н.Н. Гибкие стратегии расхождения судов / Цымбал Н.Н., Бурмака И.А., Тюпиков Е.Е. – Одесса: КП ОГТ, 2007. – 424 с.
10. Вагущенко Л.Л. Системы автоматического управления движением судна/ Вагущенко Л.Л., Цымбал Н.Н. – Одесса: Латстар, 2002. – 310 с.
11. Сизов В.Г. Теория корабля / Сизов В.Г. – Одесса: Феникс, 2003. – 282 с.
12. Воробьев Ю.Л. Экспериментальное определение безопасных расстояний при расхождении судов / Воробьев Ю.Л., Кириллов В.Н. // Теория корабля и гидромеханика: Сб. научн. тр./ НКИ Николаев. – 1973. – № 74. – С.

61-65.

13. Воробьев Ю.Л. Гидродинамика судна в стесненном фарватере/ Воробьев Ю.Л. – С.Петербург: Судостроение, 1992. – 224 с.

14. Чапчай Е.П. Экспериментальное исследование моделей поворотливости судна / Чапчай Е.П. // Судовождение. – 2006. – № 11. – С. 139 – 142.

15. Чапчай Е.П. Учет времени перекладки пера руля при повороте судна/ Чапчай Е.П. // Судовождение. – 2005. – № 9. – С. 110 – 113.

16. Козлов А. В. Интегрированные системы управления движением судна/ Козлов А. В., Туркин И. И.// Мор. биржа. 2006, № 3, с. 46-49.

17. Лукомский Ю. А. Общие закономерности и специфические особенности в математических моделях морских подвижных объектов/ Лукомский Ю. А., Стариченков А. Л. // Гироскопия и навигация. – 1997. – № 2. – С. 44-52.

18. Оськин Д. А. Система управления морским судном с использованием нейросетевой идентификационной модели / Оськин Д. А. // Вестн. Мор. гос. ун-та. 2008, № 27, с. 3-12.

19. Вагущенко Л.Л. Бортовые автоматизированные системы контроля мореходности / Вагущенко Л.Л., Вагущенко А.Л., Заичко С.И – Одесса: Феникс, 2005. – 274 с.

20. Дмитриев С.П. Обоснование возможности использования линейно-квадратичного подхода при стабилизации судна на траектории/Дмитриев С.П., Пелевин А.Е. // Гироскопия и навигация. – 1997. – № 4. – С. 65-82.

21. Laeki Toshio. Ninon kokai dakkar ronbunshu// Jap. Inst. Navig. 2005. 112, p. 301-306.

22. Лентарёв А. А. Статистическое моделирование движения судов по фарватеру /Лентарёв А. А., У Льюков А. Ю. //Вестн. Мор. гос. ун-та. 2005, № 9, с. 78-83.

23. Саленек В. В. К определению связи между углом дрейфа и безразмерной угловой скоростью на установившейся циркуляции/ Саленек В.

В.// Новосиб. гос. акад. вод. трансп. Судовожд.: управляемость, упр., навигация. обуч. – Новосибирск. – 1999, с. 17-18.

24. Inaishi Masaaki. Nihon kokai gakkai ronbunshu/ Inaishi Masaaki, Kawaguchi Akira //J. Jap. Inst. Navig. – 2003. – 109. – P. 89-96.

25. Шпекторов А. Г. Организация двухуровневой системы управления движением скоростного судна./ Шпекторов А. Г., 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.

26. Богданов В. П. Синергетика и нейросетевые системы управления курсом судна / Богданов В. П., Виткалов Я. Л., Глушков С. В., Потапов А. С. и др. – Питер. – 2006, 205 с.

27. Гуцма С.Ф. Моделирование движения судов в узкостях и при швартовках/ Гуцма С.Ф. // Сб. науч. тр. Балт. гос. акад. рыбопромысл. флота. – 1997. – № 16. – С. 85-91.

28. Грауэр Л. В. Синтез закона управления морским подвижным объектом для решения задачи динамического позиционирования / Грауэр Л. В., Лопарев А. В. Навигация и управление движением: Материалы 8-й Конференции молодых ученых: 1 этап, Санкт-Петербург, 11-16 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. 137-143.

29. Попов А. В. О повышении управляемости судна при ветре посредством ввода интеллектуальной составляющей в алгоритм авторулевого/ Попов А. В. // Вести. ВГАВТ. 2005, № 14, с. 27-35.

30. 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.

31. Вагущенко Л.Л. Судовые навигационно-информационные системы/ Вагущенко Л.Л. – Одесса: Феникс, 2004. – 302 с.
32. 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.
33. 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.
34. Юдин Ю. И Маневренные характеристики судна как функции параметров его математической модели / Юдин Ю. И., Позняков С. И.// Вестн. МГТУ (Мурманск). 2006. 9, № 2, с. 234-240.
35. 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.
36. Gerigk M. An Integrated Model of Motion, Steering, Positioning and Stabilization of an Unmanned Autonomous Maritime Vehicle/ Gerigk M., Wójtowicz S.// TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 9, No. 4, page 591-596, 2015.
37. 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.
38. 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.
39. 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.

40. J. Lisowski. Analysis of Methods of Determining the Safe Ship Trajectory/ J. Lisowski// TransNav, International magazine on marine navigation and safety of marine transport, Vol. 10, № 2, page 376-381, 2016.

41. Lisowski J. Game Strategies of Ship in the Collision Situations/ J. Lisowski//TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 8, № 1, page 69-77, 2014.

42. Xu X. Modeling of Ship Collision Risk Index Based on Complex Plane and Its Realization/ Xu X., Geng X., Wen Y.Q.//TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 10, No. 2, page 251-256, 2016.

43. Hornauer S. Trajectory Planning with Negotiation for Maritime Collision Avoidance / Hornauer S., Hahn A., Blaich M., Reuter J. TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 9, No. 3, page 335-341, 2015.

44. Kim D. Ship Collision Avoidance by Distributed Tabu Search/ Kim D., Hirayama K., Okimoto T. // TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 9, No. 1, page 23-29, 2015.

45. Куликов А. М. Оптимальное управление расхождением судов / Куликов А. М., Поддубный В. В. // Судостроение. – 1984. – № 12. – С. 22-24.

46. Поддубный В. В. Метод возможных направлений в задачах безопасного расхождения судов./Поддубный В. В., Куликов А. А. /ВИНИТИ. – М, 1987. – 21 с. – Рус. Деп. // Анот. в ж. «Водный транспорт», №2, 1987.

47. Цаллагов Х. – Б.Н. Аналитические методы определения безопасных курсов и скоростей судов / Цаллагов Х. – Б.Н. // Теоретические вопросы построения АСУ крупнотоннажными транспортными судами. – М.: Наука, 1978. – С. 83-93.

48. Георгизон Е. Б. Сравнительный анализ алгоритмов расхождения судов / Георгизон Е. Б., Цаллагов Х.-Б. Н.// Теоретические вопросы построения

АСУ крупнотоннажными транспортными судами. – М.: Наука, 1978. – С. 93-101.

49. Цаллагов Х.-Б.Н. Безопасное расхождение судов при централизованном автоматизированном управлении / Цаллагов Х.-Б.Н.// Задачи автоматизации управления движением судов в районах интенсивного судоходства. – М.: Ин-т Проблем Управления, 1983. – С. 29-39.

50. Вагущенко Л.Л. Расхождение с судами смещением на параллельную линию пути / Л.Л. Вагущенко. – Одесса: Фенікс, 2013. – 180 с.

51. Цымбал Н.Н. Основные направления обеспечения безаварийного плавания судов / Цымбал Н.Н. // Материалы международной научной конференции «Интеллектуальные системы принятия решений и прикладные аспекты информационных технологий (ISDMIT' 2006)». – Том 3. – Евпатория. – 2006. – С. 49-52.

52. Фрейдзон И. Р. Моделирование корабельных систем управления / Фрейдзон И. Р. – Л.: Судостроение, 1975. – 232 с.

53. Кудряшов В. Е. Математическая модель процесса расхождения нескольких управляемых объектов / Кудряшов В. Е. // Известия ЛЭТИ. – 1976. – № 206. – С. 15-19.

54. Кудряшов В. Е. Синтез алгоритмов безопасного управления судном при расхождении с несколькими объектами / Кудряшов В. Е. // Судостроение. – 1978. – №5. – С. 35-40.

55. Кудряшов В. Е. Разработка и исследование алгоритма управления движением судов для предотвращения столкновений в процессе расхождения с несколькими опасными объектами./ Кудряшов В. Е. Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.22.16 /Лен. гос. мор. акад. – Л., 1976. –23 с.

56. Lisovski I. A Differential Game Model of Ship Control Process/ Lisovski I. //Link. Sei. and Appl. Automat. Contr. – Helsinky. – 1978, – Vol.2. – P.1557-1603.

57. Павлов В.В. Начала теории эргатических систем/ Павлов В.В. – Киев: Наукова думка, 1975. – 240 с.

58. Павлов В.В. Инвариантность и автономность нелинейных систем управления/ Павлов В.В. – Киев: Наукова думка, 1971. – 272 с.

59. Павлов В.В. Проблемы построения многоцелевой эргатической системы предупреждения столкновений морских судов/ Павлов В.В., Баранов В.Л., Положенцев И.А. // Автоматика. – 1980. – № 2. – С. 73-76.

60. Павлов В.В. Некоторые вопросы алгоритмизации выбора маневра в ситуациях расхождения судов/ Павлов В.В., Сеньшин Н.И. // Кибернетика и вычислительная техника. – 1985. – № 68. – С. 43-45.

61. Мальцев А. С. Инверсный метод планирования траектории движения объектов управления /Мальцев А. С. //Судовождение: Сб. научн. трудов /ОНМА, вып. 13 – Одесса: «ИздатИнформ», 2007. – с. 124-130.

62. Мальцев А. С. Учет маневренных характеристик для обеспечения безопасности плавания / Мальцев А. С. // Судостроение и ремонт. – 1989. – №5. – С. 29-31.

63. Сафин И. В. Условия существования безопасных маневров расхождения / Сафин И. В. // Судовождение. – 2001. – № 3. – С. 158 – 163.

64. Сафин И.В. Выбор оптимального маневра расхождения / Сафин И.В. // Автоматизация судовых технических средств. – №7. – 2002. – С. 115-120.

65. Сафин И.В. Анализ результатов имитационного моделирования процесса расхождения судов / Сафин И.В. // Судовождение. – №6 – 2003. – С. 122-129.

66. Сафин И.В. Оптимизация маневров для безопасного расхождения судов: автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.22.16 «Судовождение»/ Сафин И.В. – Одесса, 2004.–23 с.

67. Сафин И.В. Расчет граничных значений параметров множества допустимых маневров расхождения / Сафин И.В. // Судовождение. – №4. – 2002. – С. 95 – 100.

68. Степаненко В. В. Формализация контроля текущей ситуации и принятия решений по управлению ею / Степаненко В. В.// Судовождение. – 2001. – № 3. – С. 177– 185.

69. Степаненко В. В. Эффективность оценки параметров ситуации опасного сближения судов / Степаненко В. В. // Судовождение. – 2000. – № 2. – С. 201 – 209.
70. Степаненко В.В. К вопросу отображения ситуации расхождения судов / Степаненко В.В. // Судовождение. – № 4. – 2002. – С. 101 – 106.
71. Степаненко В.В. Усовершенствование методов оценки ситуации расхождения судов: автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.22.16 «Судовождение»/ Степаненко В.В. – Одесса, 2004. – 24 с.
72. Мальцев А.С. Выбор оптимального курса для расхождения судов при криволинейном движении / Мальцев А.С., Май Ба Линь // Судовождение. – №7. – 2004. – С. 47-57.
73. Бурмака И.А. Учет динамики судна при выборе маневра расхождения / Бурмака И.А. // Судовождение. – 2002. – №4. – С. 32 – 36.
74. Бурмака И.А. Учет инерционности судна при расчете момента времени завершения маневра расхождения / Бурмака И.А. // Судовождение. – № 5. – 2002. – С. 13 – 21.
75. Бурмака И.А. Применение численных методов для расчета времени начала уклонения судна при расхождении / Бурмака И.А. // Судовождение. – 2003. – № 6. – С. 27-31.
76. Бурмака И.А. Расчет длительности поворота судна при расхождении / Бурмака И.А. // Автоматизация судовых технических средств. – 2002. – №7. – С. 3 – 6.
77. Бурмака И.А. Расчет характеристик поворотливости судна по экспериментальным данным / Бурмака И.А. // Судовождение. – 2005. – № 9. – С. 7-13.
78. Бурмака И.А. Результаты имитационного моделирования процесса расхождения судов с учетом их динамики / Бурмака И.А. // Судовождение. – 2005. – №10. – С. 21 – 25.
79. Бурмака И.А. Безопасное расхождение судов с учетом их инерционности: автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.22.16

«Судовождение» / Бурмака И.А. – Одесса, 2004. – 22 с.

80. Цымбал Н.Н. Учет ограничений МППСС-72 при выборе маневра расхождения судов / Цымбал Н.Н., Бужбецкий Р.Ю. // Судовождение. – 2006. – № 11. – С.134 – 138.

81. Цымбал Н.Н. Метод формирования множества безопасных маневров расхождения судов / Цымбал Н.Н. // Тезисы докладов на III международной научно-технической конференции «Живучесть корабля и безопасность на море». – Севастополь. – 2005. – С. 91-94.

82. Петриченко Е.А. Учет линейной навигационной опасности при расхождении судов / Петриченко Е.А. // Автоматизация судовых технических средств. – 2003. – №8. – С. 72-76.

83. Петриченко Е.А. Вывод условия существования множества допустимых маневров расхождения с учетом навигационных опасностей / Петриченко Е.А. // Судовождение. – 2003. – №.6. – С. 103-107.

84. Петриченко Е.А. Описание навигационных опасностей в задаче расхождения судов / Петриченко Е.А. // Судовождение. – 2002. – №5. – С. 89 – 95.

85. Сазонов А. Е. Автоматизация судовождения / Сазонов А. Е., Родионов А. А. – М.: Транспорт, 1977. 208 с.

86. Бинай Кумар Синх. Системная модель процесса судовождения / Бинай Кумар Синх // Судовождение. – 2000. – №1. – С. 105 – 118.

87. Бинай Кумар Синх. Выбор предельно-допустимой дистанции кратчайшего сближения / Бинай Кумар Синх // Судовождение. – 2001. – № 3. – С. 38 – 42.

88. Бинай Кумар Синх. Области взаимных обязанностей судов / Бинай Кумар Синх // Судовождение. – 2000. – № 2. – С. 121 – 125.

89. Lisowski J. Game and computational intelligence decision making algorithms for avoiding collision at sea/ Lisowski J. // Proc. of the IEEE Int. Conf. on Technologies for Homeland Security and Safety. – 2005. – Gdańsk. – P. 71-78.

90. Lisowski J. Dynamic games methods in navigator decision support system

for safety navigation/ Lisowski J. // *Advances in Safety and Reliability*. – 2005. – Vol. 2. – London-Singapore, Balkema Publishers. – P. 1285-1292.

91. Lisowski J. Game control methods in navigator decision support system/ Lisowski J. // *The Archives of Transport*. – 2005. – No 3-4, Vol. XVII. – P. 133-147.

92. Wang Dangli. Wuhan ligong daxue xuebao. Jiaotong kexue yu qongcheng ban/ Wang Dangli, Huang Liwen // *J. Wuhan Univ. Technol. Transp. Sci. and Eng.* 2006 30, № 1, p. 136-139.

93. Kimura Masafumi. Nihon kokai gakkai ronbunshu / Kimura Masafumi, Suzuki Saburo // *J. Jap. Inst. Navig.* 2005. 112, p. 43-48.

94. Букатый В. М. Определение ситуации сближения судов, подпадающей под правило 14 МППСС-72 / Букатый В. М., Морозова С. Ю. // *Управление безопасностью мореплавания и подготовка морских специалистов SSN/2007: Материалы 6 Международной конференции, Калининград, 9-11 окт., 2007. Калининград: БГАРФ. 2007, с. 43-52.*

95. Liu Yu-hong. Zhongguo hanghai/ Liu Yu-hong, Hu Shen-ping // *Navig. China*. 2005, №4, p. 40-45.

96. Lisowski J. Mathematical modeling of a safe ship optimal control process/ Lisowski J. // *Polish Journal of Environmental Studies*. – 2005. – Vol. 14. – P. 68-75.

97. Kao Sheng-Long. A fuzzy logic method for collision avoidance in vessel traffic service / Kao Sheng-Long, Lee Kuo-Tien, Chang Ki-Yin, Ko Min-Der// *J. Navig.* 2007. 60, № 1, p. 17-31.

98. Бурмака А.И. Разработка стратегии расхождения судов в ситуации чрезмерного сближения / Бурмака А.И. // *Судовождение: Сб. научн. трудов./ ОНМА, Вып. 20. – Одесса: «ИздатИнформ», 2012 – С.*

99. Бурмака А.И. Учет угловой скорости судна при расчете параметров маневра расхождения в ситуации чрезмерного сближения/ Бурмака А.И. // *Судовождение: Сб. научн. трудов./ ОНМА, Вып. 21. – Одесса: «ИздатИнформ», 2012 – С.*

100. Бурмака И.А. Определение параметров динамической модели поворотливости судна по натурным наблюдениям / Бурмака И.А., Бурмака А.И. // Судовождение: Сб. научн. трудов./ ОНМА, Вып. 19. – Одесса: Феникс, 2011 – С.

101. Букатый В. М. Минимальная дистанция начала маневра на расхождение при применении правила 14 МППСС/ Букатый В. М. // Управление безопасностью мореплавания и подготовка морских специалистов SSN/2007: Материалы 6 Международной конференции, Калининград, 9-11 окт., 2007. Калининград: БГАРФ. 2007, с. 27-32.

102. Hung Iran Viet. Nihon kokai gakkai ronbunshu / Hung Iran Viet, Hagiwara Hideki, Tamaru Hitoi. // J. Jap. Inst. Navig. 2007. 117, с 35—42.

103. Liu Yu-hong. Zhongguo hanghai/. Liu Yu-hong //Navig. China. – 2004, № 4, p. 32-37.

104. Цымбал Н.Н. Перспективы использования современных технических средств для управления судами в стесненных условиях плавания / Цымбал Н.Н.// V Международная научно-техническая конференция «Гиротехнологии, навигация и управление движением». – Сборник докладов. – Киев. – 2005. – С. 301-304.

105. Lisowski J. Safety of navigation based – mathematical models of game ship control/ Lisowski J. // Journal of Shanghai Maritime University. – 2004. – No 104, Vol. 25. – P. 65 – 74.

106. Zhao Yuan-jin. Dalian haishi daxue xuebao /Zhao Yuan-jin, Sun Wen-qiang //

J. Dalian Marit. Univ. 2006. 32, № 2, p. 27— 30.

107. Statheros Thomas. Autonomous ship collision avoidance navigation concepts, technologies and techniques / Statheros Thomas, Howells Gareth, McDonald-Maier Klaus. // J. Navig. 2008. 61, № 1, p. 129-142.

108. Цымбал Н.Н. Перспективные системы предупреждения столкновений судов и принципы их разработки /Цымбал Н.Н.// Материалы I международной научно-практической конференции «Науковий потенціал світу 2004».

– том 60. – Днепропетровск. – Наука і освіта, 2004. – С. 44-45.

109. Tsuji Keisuke. Nihon kokai gakkai ronbunshu / Tsuji Keisuke, Ito Takayuki. // J. Jap. Inst. Navig. 2007. 117, p. 67-73.

110. Букатый В. М. Критерии нетрадиционного подхода к выяснению ситуации сближения судов /Букатый В. М., Морозова С. Ю. // Управление безопасностью мореплавания и подготовка морских специалистов SSN/2007: Материалы 6 Международной конференции, Калининград, 9-11 окт., 2007. Калининград: БГАРФ 2007, с. 33-43.

111. Бурмака И.А. Экстренная стратегия расхождения при чрезмерном сближении судов / Бурмака И.А., Бурмака А. И., Бужбецкий Р.Ю. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 202 с.

112. Ma Li-xin. Dalian haishi daxue xuebao/ Ma Li-xin, Sun Wen-qiang //I. Dalian Marit. Univ. 2006. 32, № 3, p. 123-125.

113. L. Yongqing. Wuhan ligong daxue xuebao. Jiaotong kexue yu gongcheng ban/ L. Yongqing // J. Wuhan Univ. Technol. Transp. Sci. and Eng. 2004. 28, №5, p. 752-754.

114. Пятаков Э.Н. Взаимодействие судов при расхождении для предупреждения столкновения / Пятаков Э.Н., Бужбецкий Р.Ю., Бурмака И.А., Булгаков А.Ю. – Херсон: Гринь Д.С., 2015.-312 с.

115. Бурмака И.А. Совершенствование технологии управления движением судов в районах контроля СУДС / Бурмака И.А., Булгаков А.Ю. // Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд: Матеріали Всеукраїнської наук.-тех. конф., 21-23 травня 2014 р. – Миколаїв: МУК, 2014. – С. 40–42.

116. Булгаков А.Ю. Использование опасной области курсов двух судов для выбора допустимого маневра расхождения/ Булгаков А.Ю.// Водный транспорт. – 2014. №2 (20).– С. 12 – 17.

117. Булгаков А.Ю. Маневр расхождения трех судов с изменением их курсов / Булгаков А.Ю., Алексейчук Б.М.// Проблемы техники: Научно-виробничий журнал. – 2014. №1. – С. 75 – 81.

118. Булгаков А.Ю. Выбор маневра расхождения судов изменением курсов в системах управления движением судов/ Булгаков А.Ю., Пятаков Э.Н.// Проблемы техники: Научно-виробничий журнал. – 2014. №4. – С 153 – 164.

119. Бурмака И.А. Маневр расхождения трех судов изменением курсов/ Бурмака И.А, Булгаков А.Ю. // Автоматизация судовых технических средств. – 2014. – № 20. – С. 18 – 23.

120. Бурмака И.А. Маневр расхождения нескольких судов изменением курсов / Бурмака И.А, Булгаков А.Ю. // Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд: Матеріали Всеукраїнської наук.-тех. конф., 20-22 травня 2015 р. – Миколаїв: МУК, 2015. – С. 22–24.

121. Булгаков А.Ю. Выбор допустимого маневра расхождения двух судов с помощью использования опасной области их курсов/ Булгаков А.Ю.// Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2014): Матеріали VI Міжнародної наук.-практ. конф., 27-29 травня. 2014 – Херсон: ХДМА, 2014. – С. 103–106.

122. Алексишин А.В. Плавание в стесненных водах с учетом судовой безопасной зоны / Алексишин А.В. // Судовождение. – 2007. – № 13.– С. 3 – 8.

123. Алексишин В.Г. Формирование судовой безопасной зоны с учетом поворотливости судна / Алексишин В.Г., Алексишин А.В. // Судовождение. – 2007. – № 14. – С. 3 – 8.

124. Волков А.Н. Формирование безопасной области в судовых системах навигационной информации / Волков А.Н. // Проблемы техники: Научно-виробничий журнал. – 2013. № 4. – С 52 – 56.

125. Волков А.Н. Отображение зоны безопасности судна на электронной карте // Судовождение: Сб. научн. трудов./ ОНМА, Вып. 23. – Одесса: «Изд-тИнформ», 2013, – С 40 – 45.

126. Мальцев А.С. Методологические основы маневрирования судов при сближении /Мальцев А.С., Голиков В.В., Сафин И.В. и др. – Одесса: ОНМА, 2013. – 218 с.

127. Калиниченко Е.В. Учет в системах принятия решений динамических характеристик судна при расчете момента времени его поворота на программный курс/ Калиниченко Е.В. // Проблеми техніки: Науково-виробничий журнал. – 2014. № 1. – С. 118-122.

128. Вагущенко Л.Л. Судно как объект автоматического управления / Вагущенко Л.Л. – Одесса: ОГМА, 2000. – 140 с.

129. Калиниченко Е.В. Расчет моментов времени начала и окончания поворота судна с учетом характеристик его поворотливости/ Калиниченко Е.В.// Судовождение: Сб. научн. трудов, ОНМА, Вып. 24. – Одесса: «ИздатИнформ», 2014 – С. 68-74.

130. Пискунов Н. С. Дифференциальное и интегральное исчисление / Пискунов Н. С. –М.: Наука, 1985. – 560 с.

131. Y. Kalinichenko. 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.

132. Краскевич В.Е. Численные методы в инженерных исследованиях / Краскевич В.Е., Зелинский К.Х., Гречко В.И. – Киев: Выща школа, 1986. – 264 с.

133. Овчинников П.Ф. Математическое моделирование систем механики, электромеханики и автоматики / Овчинников П.Ф. – К.: ИСИО, 1993. – 280 с.

134. Калиниченко Е.В. Учет характеристик поворотливости при расчете параметров поворота судна/ Калиниченко Е.В. // Водный транспорт. – 2014. №2 (20).– С. 63 – 67.

135. Калиниченко Е.В. Расчет параметров поворота судна/ Калиниченко Е.В. // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2014): Матеріали VI Міжнародної наук.-практ. конф., 27-29 травня. 2014 – Херсон: ХДМА, 2014. – С. 123-126.

136. Калиниченко Е.В. Обеспечение безопасности расхождения маневром изменения курса/ Калиниченко Е.В., Пятаков Э.Н. // Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних

засобів і інженерних споруд: Матеріали Всеукраїнської наук.-тех. конф., 21-23 травня 2014 р. – Миколаїв: МУК, 2014. – С. 40–42.

137. Соболев Г.В. Управляемость корабля и автоматизация судовождения / Соболев Г.В. – Л.: Судостроение, 1976. – 476 с.

138. Калиниченко Е.В. Выбор момента времени начала поворота с учетом падения скорости судна на циркуляции/ Калиниченко Е.В., Пятаков Э.Н. // Морські перевезення та інформаційні технології в судноплаванні: Матеріали наук.-техн. конф., 18-19 листоп. 2014 – Одеса: ОНМА, 2014. – С. 176–179.

139. Калиниченко Е.В. Имитационное моделирование активного торможения судна с учетом течения/ Калиниченко Е.В. // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2015): Матеріали VI Міжнародної наук.-практ. конф., 26-28 травня. 2015 – Херсон: ХДМА, 2015. – С. 106-109.

140. Калиниченко Е.В. Обеспечение требуемой точности поворота судна способом перемещения его криволинейной траектории / Калиниченко Е.В. // Автоматизация судовых технических средств. – 2014. – № 20. – С. 52-58.

141. Яркин П.И. Расчет безопасной скорости и минимально-допустимого расстояния сближения судов/ Яркин П.И., Калиниченко Е.В. // Судовождение: Сб. научн. трудов, ОНМА. – Вып. 7. – Одесса: Фенікс, 2004. С. 87-92.

142. Турчак Л. И. Основы численных методов/ Турчак Л. И. – М.: Наука. Гл. ред. физ. – мат. лит., 1987. – 320 с.

143. Яркин П.И. Определение характеристик активного торможения судна. Альтернативный подход/ Яркин П.И., Калиниченко Е.В. // Сб. научн. трудов: «Судовождение», ОНМА. – Одесса: ФЕНИКС, 2003. – Вып. 6. – С. 159-165.

144. Ericke W. Beitrag zur Vorausberechnung Von Stoppmannovern grober X Schiffe/ Ericke W., Grossman G.// Hansa, Sondernim, STG, 108, 1971. – pp. 2176 – 2182.

145. Калиниченко Е.В. Методика расчета инерционно-тормозных харак-

теристик морского судна при реверсе/ Калиниченко Е.В.// Судовождение: Сб. научн. трудов, ОНМА. – Вып. 9. – Одесса: Фенікс, 2005. С. 36-44.

146. Калиниченко Е.В. Практический расчет инерционно-тормозных характеристик судна/ Калиниченко Е.В.// Судовождение: Сб. научн. трудов, ОНМА. – Вып. 10. – Одесса: Фенікс, 2005. С. 58-63.

147. Яркин П.И. Определение характеристик разгона и подтормаживания судна. Альтернативный подход/ Яркин П.И., Мальцев А.С., Калиниченко Е.В. // Вісник ОНМУ: Сб. научн. трудов, ОНМУ,– Вып. 13. – Одесса: Фенікс, 2007. С. 63-71.

148. Калиниченко Е.В. Определение времени и скорости разгона судна на задний ход // Материалы международной научн.-техн. конференции. Часть 1. ОНМА, 2004. С. 153–156.

149. Калиниченко Е.В. Совершенствование расчетных методов определения инерционно-тормозных характеристик судна / Калиниченко Е.В. // Стан та проблеми судноводіння: Матеріали наук.-техн. конф., 24-26 жовтня 2005 – Одеса: ОНМА, 2005. – С. 58–60.

ДОДАТОК А.

ЛІСТИНГ ПРОГРАМ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ІНЕРЦІЙНО-ГАЛЬМІВНИХ ХА-
РАКТЕРИСТИК СУДНА

ПАСИВНЕ ГАЛЬМУВАННЯ

```
unit Unit1;
```

```
interface
```

```
uses
```

```
Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms,  
Dialogs, StdCtrls, Grids;
```

```
type
```

```
TForm1 = class(TForm)
```

```
Label1: TLabel;
```

```
Label2: TLabel;
```

```
Dc1: TEdit;
```

```
Label3: TLabel;
```

```
L1: TEdit;
```

```
Label4: TLabel;
```

```
B1: TEdit;
```

```
Label5: TLabel;
```

```
T1: TEdit;
```

```
Label6: TLabel;
```

```
Dv1: TEdit;
```

```
Label7: TLabel;
```

```
H1: TEdit;
```

```
Label8: TLabel;
```

```
step1: TEdit;
```

```
Label9: TLabel;
```

```
n1: TEdit;
```

```
Label10: TLabel;
```

```
V01: TEdit;
Label11: TLabel;
Vrev1: TEdit;
Button1: TButton;
Memo1: TMemo;
Tab: TStringGrid;
Button2: TButton;
Button3: TButton;
Label12: TLabel;
Edit1: TEdit;
Label13: TLabel;
Edit2: TEdit;
procedure Button1Click(Sender: TObject);
procedure Button2Click(Sender: TObject);
procedure Button3Click(Sender: TObject);
private
    { Private declarations }
public
    { Public declarations }
end;

var
    Form1: TForm1;

implementation

uses Unit2, Unit3;

{$R *.dfm}
```

```

procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject);
var
Dc,m,L,B,T,Dv,H,step,mv, disk,V0,Fi,Dm, Vk : real;
x,y,k, m1, Fr, omega, Z, mu, R0, k1, p1,v1,Pcp,Rcp,s,t2,ss,tt,v, Vcp :real;
i , fl,r,rr: integer;
begin
Form2.Chart1.Series[0].Clear;
Form3.Chart1.Series[0].Clear;
//Form2.Chart1.Series[0].AddXY((strtofloat(edit2.Text))*1.94, 0, " ");
//Form3.Chart1.Series[0].AddXY((strtofloat(edit2.Text))*1.94, 0, " ");
fl:=0;
    for r:=0 to tab.ColCount do
    for rr:=0 to tab.RowCount do
    with tab do Cells[r,rr]:"";
    //for i:= 1 to 20 do
    //Form2.Chart1.Series[0].AddXY(i, i, " ");
    //form2.Show;
Dc:=strtofloat(Dc1.Text);
m:=Dc*1000;
L:=strtofloat(L1.Text);
B:=strtofloat(B1.Text);
T:=strtofloat(T1.Text);
Dv:=strtofloat(Dv1.Text);
H:=strtofloat(H1.Text);
step:=strtofloat(step1.Text);
disk:=strtofloat(n1.Text);
V0:=strtofloat(V01.Text);
Fi:=strtofloat(Vrev1.Text);
Vk:=strtofloat(edit2.Text);

```

```

// Розрахунок вихідних даних
// 1. Розрахунок приєднаної маси води
dm:=1.5*3.14*1020*T*T*B/4;
//2. Розрахунок маси судна
k:=dm/m;
m1:=1.1*m;/(1+k)*m;
memo1.Lines.Add('Приєднана маса води = '+floattostr(dm));
memo1.Lines.Add('K = '+floattostr(k));
memo1.Lines.Add('Маса судна, H =' +floattostr(m1));
//3. Розрахунок коеф. корпусу

Fr:=V0/sqrt(9.81*L);
Z:= 0.0085-0.051*Fr+0.1246*Fr*Fr;

omega:=exp((2/3)*ln(Dc)) * (4.854 + 0.492 * B / T);
mu:=Z*1020*omega/2;
//4. Розрахунок коеф. вільно оберт. гвинта
mv:=125*Dv*Dv*disk*(1-Fi);
//R0:=mu*V0*V0;
//memo1.Lines.Add('Ro, H =' +floattostr(R0));
//k/1:=0.4*step-0.07;
//P1:= 1020*k1*n*n*Dv*Dv*Dv*Dv;
memo1.Lines.Add('mu =' +floattostr(mu));
memo1.Lines.Add('mv =' +floattostr(mv));

//memo1.Lines.Add('K1 =' +floattostr(K1));
//memo1.Lines.Add('P1, H =' +floattostr(p1));
t:=m1*(V0/Vk-1)/((mv+mu)*V0);
S:=m1*ln(V0/Vk)/(mv+mu);
memo1.Lines.Add('t =' +floattostr(t)+' s =' +floattostr(s));

```

//4. Побудова таблиці

with tab do

begin

Cells[1,0]:='V_n, вузли';

Cells[2,0]:='V_n, м/с';

Cells[3,0]:='V_{n+1}, м/с';

//Cells[4,0]:='V_{ср}, м/с';

//Cells[5,0]:='P_{ср}, Н';

//Cells[6,0]:='R_{ср}, Н';

Cells[4,0]:='S, м';

Cells[5,0]:='t, min';

Cells[6,0]:='Summa S, м';

Cells[7,0]:='Summa S, каб.';

Cells[8,0]:='Summa t';

end;

f1:=0;

i:=1;

ss:=0;

tt:=0;

v:=v0;

while i<strtoint(edit1.Text)+1 do

//v>strtofloat(edit2.Text) do

begin

//memo1.Lines.Add('v =' + floattostr(v));

v1:=v-(v0-strtofloat(edit2.Text))/strtoint(edit1.Text);

if v1<strtofloat(edit2.Text) then v1:=strtofloat(edit2.Text);

```

//memo1.Lines.Add('dv:='+floattostr((v0-
strtofloat(edit2.Text))/strtoint(edit1.Text))) ;
if v1<>v then begin
//Rcp:=mu*(v*v+v*v1+v1*v1)/3;
//Vcp:=(v+v1)/2;
//Pcp:=R0-(R0-P1)*Vcp/Vrev;
//if Vcp<=Vrev then Pcp:=P1;
//t2:= (dm+m)*(v-v1)/(60*(Pcp+Rcp));
//s:= (dm+m)*(v*v-v1*v1)/(2*(Pcp+Rcp));
t2:=m1*(V/V1-1)/((mv+mu)*v*60);
S:=m1*ln(V/V1)/(mv+mu);
ss:=ss+s;
tt:=tt+t2;
if v1=strtofloat(edit2.Text) then Form2.Chart1.Series[0].AddXY((V0-
V1+strtofloat(edit2.Text))*1.94, Ss/185.2, " ");
if v1>strtofloat(edit2.Text) then Form2.Chart1.Series[0].AddXY(((V0)-
V1+strtofloat(edit2.Text))*1.94, Ss/185.2, " ");
if v1=strtofloat(edit2.Text) then Form3.Chart1.Series[0].AddXY((V0-
V1+strtofloat(edit2.Text))*1.94, tt, " ");
if v1>strtofloat(edit2.Text) then Form3.Chart1.Series[0].AddXY(((V0)-
V1+strtofloat(edit2.Text))*1.94, tt, " ");

with tab do
begin
Cells[1,i]:=floattostr(V*1.94);
Cells[2,i]:=floattostr(V);
Cells[3,i]:=floattostr(V1);
//Cells[4,i]:=floattostr(Vcp);
//Cells[5,i]:=floattostr(Pcp);
//Cells[6,i]:=floattostr(Rcp);

```

```

Cells[4,i]:=floattostr(S);
Cells[5,i]:=floattostr(t2);
Cells[6,i]:=floattostr(ss);
Cells[7,i]:=floattostr(ss/185.2);
Cells[8,i]:=floattostr(tt);
end;
end;
i:=i+1;
v:=v1;

//memo1.Lines.Add('1111'+floattostr(v));
end;
//for ii:=1 to i do
//Form2.Chart1.Series[0].AddXY(V, Ss, " ");

// form2.Show;
//

end;

procedure TForm1.Button2Click(Sender: TObject);
begin
form2.Show;
end;

procedure TForm1.Button3Click(Sender: TObject);

```

```
begin
form3.show;
end;
```

```
end.
```

```
object Form1: TForm1
```

```
Left = 55
```

```
Top = 102
```

```
Width = 747
```

```
Height = 512
```

```
Caption          =          #1040#1082#1090#1080#1074#1085#1086#1077'
```

```
'#1090#1086#1088#1084#1086#1078#1077#1085#1080#1077
```

```
Color = clBtnFace
```

```
Font.Charset = DEFAULT_CHARSET
```

```
Font.Color = clWindowText
```

```
Font.Height = -11
```

```
Font.Name = 'MS Sans Serif'
```

```
Font.Style = []
```

```
OldCreateOrder = False
```

```
PixelsPerInch = 96
```

```
TextHeight = 13
```

```
object Label1: TLabel
```

```
Left = 240
```

```
Top = 16
```

```
Width = 287
```

```
Height = 16
```

```
Alignment = taCenter
```

```

Caption          =          #1056#1040#1057#1063#1045#1058'
'#1055#1040#1057#1057#1048#1042#1053#1054#1043#1054'
'#1058#1054#1056#1052#1054#1046#1045#1053#1048#1071
    Font.Charset = DEFAULT_CHARSET
    Font.Color = clWindowText
    Font.Height = 16
    Font.Name = 'MS Sans Serif'
    Font.Style = [fsBold]
    ParentFont = False
    Layout = tlCenter
end
object Label2: TLabel
    Left = 24
    Top = 72
    Width = 130
    Height = 13
    Caption          =          =
#1042#1086#1076#1086#1080#1079#1084#1077#1097#1077#1085#1080#1077'
'#1089#1091#1076#1085#1072', '#1090'.'
end
object Label3: TLabel
    Left = 24
    Top = 96
    Width = 145
    Height = 13
    Caption  =  #1044#1083#1080#1085#1072'  '#1089#1091#1076#1085#1072'
'#1084#1077#1078#1076#1091' '#1087#1077#1088#1087'., '#1084
end
object Label4: TLabel
    Left = 24

```

```

Top = 120
Width = 85
Height = 13
Caption          =          #1064#1080#1088#1080#1085#1072'
'#1089#1091#1076#1085#1072', '#1084
end
object Label5: TLabel
    Left = 24
    Top = 144
    Width = 84
    Height = 13
    Caption          =          #1054#1089#1072#1076#1082#1072'
'#1089#1091#1076#1085#1072', '#1084
end
object Label6: TLabel
    Left = 24
    Top = 168
    Width = 78
    Height = 13
    Caption          =          #1044#1080#1072#1084#1077#1090#1088'
'#1074#1080#1085#1090#1072
end
object Label7: TLabel
    Left = 328
    Top = 64
    Width = 66
    Height = 13
    Caption = #1064#1072#1075' '#1074#1080#1085#1090#1072', '#1084
end
object Label8: TLabel

```

```

Left = 328
Top = 88
Width = 102
Height = 13
Caption          =          #1064#1072#1075#1086#1074#1086#1077'
'#1086#1090#1085#1086#1096#1077#1085#1080#1077
end
object Label9: TLabel
Left = 328
Top = 192
Width = 122
Height = 13
Caption          =          #1050#1086#1101#1092'.
'#1087#1086#1087#1091#1090#1085#1086#1075#1086'
'#1087#1086#1090#1086#1082#1072
end
object Label10: TLabel
Left = 328
Top = 136
Width = 130
Height = 13
Caption          =          #1053#1072#1095#1072#1083#1100#1085#1072#1103'
'#1089#1082#1086#1088#1086#1089#1090#1100', '#1084'/'#1089
end
object Label11: TLabel
Left = 328
Top = 112
Width = 109
Height = 13

```

Caption = #1044#1080#1089#1082#1086#1074#1086#1077'
 '#1086#1090#1085#1086#1096#1077#1085#1080#1077'

end

object Label12: TLabel

Left = 24

Top = 200

Width = 90

Height = 13

Caption = #1050#1086#1083#1080#1095#1077#1089#1090#1074#1086'
 '#1090#1086#1095#1077#1082'

end

object Label13: TLabel

Left = 328

Top = 160

Width = 126

Height = 13

Caption = #1050#1086#1085#1077#1095#1085#1072#1103'
 '#1089#1082#1086#1088#1086#1089#1090#1100' , '#1084'/'#1089'

end

object Dc1: TEdit

Left = 176

Top = 64

Width = 121

Height = 21

TabOrder = 0

Text = '22100'

end

object L1: TEdit

Left = 176

Top = 88

```
Width = 121
Height = 21
TabOrder = 1
Text = '156'
end
object B1: TEdit
Left = 176
Top = 112
Width = 121
Height = 21
TabOrder = 2
Text = '21,8'
end
object T1: TEdit
Left = 176
Top = 136
Width = 121
Height = 21
TabOrder = 3
Text = '9,7'
end
object Dv1: TEdit
Left = 176
Top = 160
Width = 121
Height = 21
TabOrder = 4
Text = '6,3'
end
object H1: TEdit
```

```
Left = 480
Top = 56
Width = 121
Height = 21
TabOrder = 5
Text = '6,3'
end
object step1: TEdit
Left = 480
Top = 80
Width = 121
Height = 21
TabOrder = 6
Text = '1'
end
object n1: TEdit
Left = 480
Top = 104
Width = 121
Height = 21
TabOrder = 7
Text = '0,6'
end
object V01: TEdit
Left = 480
Top = 128
Width = 121
Height = 21
TabOrder = 8
Text = '9,15'
```

```

end
object Vrev1: TEdit
  Left = 480
  Top = 184
  Width = 121
  Height = 21
  TabOrder = 9
  Text = '0,29'
end
object Button1: TButton
  Left = 616
  Top = 152
  Width = 113
  Height = 33
  Caption          =          #1056#1072#1089#1095#1077#1090'
'#1090#1086#1088#1084#1086#1078#1077#1085#1080#1103' !'
  TabOrder = 10
  OnClick = Button1Click
end
object Memo1: TMemo
  Left = 8
  Top = 232
  Width = 681
  Height = 81
  Lines.Strings = (
    "
    #1056#1077#1079#1091#1083#1100#1090#1072#1090#1099'
'#1088#1072#1089#1095#1077#1090#1072':'
    ")
  ScrollBars = ssVertical

```

```
    TabOrder = 11
end
object Tab: TStringGrid
    Left = 1
    Top = 328
    Width = 681
    Height = 145
    ColCount = 12
    DefaultColWidth = 75
    RowCount = 50
    Options = [goFixedVertLine, goVertLine, goHorzLine, goRangeSelect]
    TabOrder = 12
end
object Button2: TButton
    Left = 624
    Top = 80
    Width = 75
    Height = 25
    Caption = 'S(V)'
    TabOrder = 13
    OnClick = Button2Click
end
object Button3: TButton
    Left = 624
    Top = 120
    Width = 75
    Height = 25
    Caption = 'T(V)'
    TabOrder = 14
    OnClick = Button3Click
```

```
end
object Edit1: TEdit
    Left = 176
    Top = 192
    Width = 121
    Height = 21
    TabOrder = 15
    Text = '10'
end
object Edit2: TEdit
    Left = 480
    Top = 152
    Width = 121
    Height = 21
    TabOrder = 16
    Text = '3'
end
end
```

Пригальмовування

```
unit Unit1;

interface

uses
    Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms,
    Dialogs, StdCtrls, Grids;

type
```

```
TForm1 = class(TForm)
    Label1: TLabel;
    Label2: TLabel;
    Dc1: TEdit;
    Label3: TLabel;
    L1: TEdit;
    Label4: TLabel;
    B1: TEdit;
    Label5: TLabel;
    T1: TEdit;
    Label6: TLabel;
    Dv1: TEdit;
    Label7: TLabel;
    H1: TEdit;
    Label8: TLabel;
    step1: TEdit;
    Label9: TLabel;
    n1: TEdit;
    Label10: TLabel;
    V01: TEdit;
    Label11: TLabel;
    Vpp1: TEdit;
    Button1: TButton;
    Memo1: TMemo;
    Tab: TStringGrid;
    Button2: TButton;
    Button3: TButton;
    Label12: TLabel;
    Edit1: TEdit;
    Label13: TLabel;
```

```

Edit2: TEdit;
Label14: TLabel;
Edit3: TEdit;
procedure Button1Click(Sender: TObject);
procedure Button2Click(Sender: TObject);
procedure Button3Click(Sender: TObject);
procedure Button4Click(Sender: TObject);
private
    { Private declarations }
public
    { Public declarations }
end;

var
    Form1: TForm1;

implementation

uses Unit2, Unit3;

{$R *.dfm}

procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject);
var
    Dc,m,L,B,T,Dv,H,step,n,V0,Vrev,Dm : real;
    v2, Vpp,x,y,k, m1, Fr, omega, Z, mu, R0, k1, p1,v1,Pcp,Rcp,s,t2,ss,tt,v, Vcp :real;
    i,r,rr : integer;
begin
    for r:=0 to tab.ColCount do
        for rr:=0 to tab.RowCount do

```

```

with tab do Cells[r,rr]:="";
Form2.Chart1.Series[1].Clear;
Form3.Chart1.Series[1].Clear;
//for i:= 1 to 20 do
//Form2.Chart1.Series[0].AddXY(i, i, " ");
//form2.Show;
Dc:=strtofloat(Dc1.Text);
m:=Dc*1000;
L:=strtofloat(L1.Text);
B:=strtofloat(B1.Text);
T:=strtofloat(T1.Text);
Dv:=strtofloat(Dv1.Text);
H:=strtofloat(H1.Text);
step:=strtofloat(step1.Text);
n:=strtofloat(n1.Text);
V0:=strtofloat(V01.Text);
Vpp:=strtofloat(Vpp1.Text);
// Розрахунок вихідних даних
// 1. Розрахунок приєднаної маси води
dm:=1.5*3.14*1020*T*T*B/4;
//2. Розрахунок маси судна
k:=dm/m;
m1:=(1+k)*m;
memo1.Lines.Add('Приєднана маса води = '+floattostr(dm));
memo1.Lines.Add('K = '+floattostr(k));
memo1.Lines.Add('Маса судна, H ='+floattostr(m1));
//3. Розрахунок опору R0
Fr:=V0/sqrt(9.81*L);
Z:= 0.0085-0.051*Fr+0.1246*Fr*Fr;
omega:=exp((2/3)*ln(Dc)) * (4.854 + 0.492 * B / T);

```

```

mu:=Z*1020*omega/2;
R0:=mu*V0*V0;
memo1.Lines.Add('Ro, H =' + floattostr(R0));
k1:=0.4*step+0.018;
P1:= 1020*k1*n*n*Dv*Dv*Dv*Dv;
memo1.Lines.Add('mu =' + floattostr(mu));
memo1.Lines.Add('K1 =' + floattostr(K1));
memo1.Lines.Add('P1, H =' + floattostr(p1));

```

//4. Побудова таблиці

with tab do

begin

```

Cells[1,0]:='Vn, вузли';
Cells[2,0]:='V1, м/с';
Cells[3,0]:='V2, м/с';
Cells[4,0]:='Vcp, м/с';
Cells[5,0]:='S, м';
Cells[6,0]:='Summa S, м';
Cells[7,0]:='Summa S, каб.';
Cells[8,0]:='t, с.';
Cells[9,0]:='t, min';
Cells[10,0]:='Summa t, min';

```

end;

i:=1;

ss:=0;

tt:=0;

v1:=0;

```

// Form2.Chart1.Series[0].AddXY(0, 0, " ");
//Form3.Chart1.Series[0].AddXY(0, 0, " ");
//while v1<0.9*V0 do

//begin

//v2:=v1+V0/strtoint(edit1.Text);
//if (v0-v2)<1 then v2:=V0;
//Rcp:=mu*(v1*v1+v2*v1+v2*v2)/3;
//Vcp:=(v2+v1)/2;
//Pcp:=P1-((P1-R0)/v0)*Vcp;
//if Vcp<=Vrev then Pcp:=P1;

//t2:= m1*(v2-v1)/(Pcp-Rcp);
//s:= m1*(v2*v2-v1*v1)/(2*(Pcp-Rcp));
//ss:=ss+s;
//tt:=tt+t2;
////if v1=0 then Form2.Chart1.Series[0].AddXY((V0-V1)/1.94, Ss/185.2, " ");
////if v1>0 then Form2.Chart1.Series[0].AddXY((int(V0)-V1)/1.94, Ss/185.2, " ");
////if v1=0 then Form3.Chart1.Series[0].AddXY((V0-V1)/1.94, tt, " ");
////if v1>0 then Form3.Chart1.Series[0].AddXY((int(V0)-V1)/1.94, tt, " ");
//Form2.Chart1.Series[0].AddXY((SS)/185.2, V2*1.94, " ");
//Form3.Chart1.Series[0].AddXY(tt/60, V2*1.94, " ");
//with tab do
//begin
//Cells[1,i]:=floattostr(V1*1.94);
//Cells[2,i]:=floattostr(V1);
//Cells[3,i]:=floattostr(V2);
//Cells[4,i]:=floattostr(Vcp);
//Cells[5,i]:=floattostr(S);

```

```

//Cells[6,i]:=floattostr(ss);
//Cells[7,i]:=floattostr(ss/185.2);
//Cells[8,i]:=floattostr(t2);
//Cells[9,i]:=floattostr(t2/60);
//Cells[10,i]:=floattostr(tt/60);
//end;
//i:=i+1;
//v1:=v2;
////memo1.Lines.Add('1111'+floattostr(v));
//end;
//for ii:=1 to i do
//Form2.Chart1.Series[0].AddXY(V, Ss, " ");

// form2.Show;
//
// ПРИГАЛЬМОВУВАННЯ
ss:=0;
tt:=0;
v1:=strtofloat(edit3.Text);
Form2.Chart1.Series[1].AddXY(0, v1*1.94, " ");
Form3.Chart1.Series[1].AddXY(0, V1*1.94, " ");
while i<strtoint(edit2.Text)+1 do
//v1>=V0 do

begin
//memo1.lines.add(inttostr(i));
v2:=v1-(strtofloat(edit3.Text)-Vpp)/strtoint(edit2.Text);
//if (v0-v2)<1 then v2:=V0;
Rcp:=mu*(v1*v1+v2*v1+v2*v2)/3;
Vcp:=(v2+v1)/2;

```

```

Pcp:=P1-((P1-R0)/v0)*Vcp;
//if Vcp<=Vrev then Pcp:=P1;
t2:= m1*(v2-v1)/(Pcp-Rcp);
s:= m1*(v2*v2-v1*v1)/(2*(Pcp-Rcp));
ss:=ss+s;
tt:=tt+t2;
//if v1=0 then Form2.Chart1.Series[0].AddXY((V0-V1)/1.94, Ss/185.2, " ");
//if v1>0 then Form2.Chart1.Series[0].AddXY((int(V0)-V1)/1.94, Ss/185.2, " ");
//if v1=0 then Form3.Chart1.Series[0].AddXY((V0-V1)/1.94, tt, " ");
//if v1>0 then Form3.Chart1.Series[0].AddXY((int(V0)-V1)/1.94, tt, " ");
Form2.Chart1.Series[1].AddXY((SS)/185.2, V2*1.94, " ");
Form3.Chart1.Series[1].AddXY(tt/60, V2*1.94, " ");
with tab do
begin
Cells[1,i]:=floattostr(V1*1.94);
Cells[2,i]:=floattostr(V1);
Cells[3,i]:=floattostr(V2);
Cells[4,i]:=floattostr(Vcp);
Cells[5,i]:=floattostr(S);
Cells[6,i]:=floattostr(ss);
Cells[7,i]:=floattostr(ss/185.2);
Cells[8,i]:=floattostr(t2);
Cells[9,i]:=floattostr(t2/60);
Cells[10,i]:=floattostr(tt/60);
end;
i:=i+1;
v1:=v2;
//memo1.Lines.Add('1111'+floattostr(v));
end;

```

end;

procedure TForm1.Button2Click(Sender: TObject);

begin

form2.Show;

end;

procedure TForm1.Button3Click(Sender: TObject);

begin

form3.show;

end;

procedure TForm1.Button4Click(Sender: TObject);

begin

Form2.Chart1.Series[1].clear;

Form3.Chart1.Series[1].Clear;

end;

end.

object Form1: TForm1

Left = 198

Top = 52

Width = 602

Height = 514

```

Caption          =          #1040#1082#1090#1080#1074#1085#1086#1077'
'#1090#1086#1088#1084#1086#1078#1077#1085#1080#1077
Color = clBtnFace
Font.Charset = DEFAULT_CHARSET
Font.Color = clWindowText
Font.Height = -11
Font.Name = 'MS Sans Serif'
Font.Style = []
OldCreateOrder = False
PixelsPerInch = 96
TextHeight = 13
object Label1: TLabel
    Left = 256
    Top = 16
    Width = 230
    Height = 16
    Alignment = taCenter
    Caption          =          #1056#1040#1057#1063#1045#1058'
'#1055#1054#1044#1058#1054#1056#1052#1040#1046#1048#1042#1040#1053#
1048#1071
    Font.Charset = DEFAULT_CHARSET
    Font.Color = clWindowText
    Font.Height = 16
    Font.Name = 'MS Sans Serif'
    Font.Style = [fsBold]
    ParentFont = False
    Layout = tlCenter
end
object Label2: TLabel
    Left = 24

```

```

Top = 72
Width = 130
Height = 13
Caption =
#1042#1086#1076#1086#1080#1079#1084#1077#1097#1077#1085#1080#1077'
'#1089#1091#1076#1085#1072', '#1090'.'
end
object Label3: TLabel
Left = 24
Top = 96
Width = 145
Height = 13
Caption = #1044#1083#1080#1085#1072' '#1089#1091#1076#1085#1072'
'#1084#1077#1078#1076#1091' '#1087#1077#1088#1087'., '#1084
end
object Label4: TLabel
Left = 24
Top = 120
Width = 85
Height = 13
Caption = #1064#1080#1088#1080#1085#1072'
'#1089#1091#1076#1085#1072', '#1084
end
object Label5: TLabel
Left = 24
Top = 144
Width = 84
Height = 13
Caption = #1054#1089#1072#1076#1082#1072'
'#1089#1091#1076#1085#1072', '#1084

```

end

object Label6: TLabel

Left = 24

Top = 168

Width = 78

Height = 13

Caption = #1044#1080#1072#1084#1077#1090#1088'

'#1074#1080#1085#1090#1072

end

object Label7: TLabel

Left = 328

Top = 64

Width = 66

Height = 13

Caption = #1064#1072#1075' '#1074#1080#1085#1090#1072', '#1084

end

object Label8: TLabel

Left = 328

Top = 88

Width = 102

Height = 13

Caption = #1064#1072#1075#1086#1074#1086#1077'

'#1086#1090#1085#1086#1096#1077#1085#1080#1077

end

object Label9: TLabel

Left = 328

Top = 112

Width = 152

Height = 13

Caption = #1054#1073#1086#1088#1086#1090#1086#1074' '#1085#1072'
 '#1087#1077#1088#1077#1076#1085'. '#1093#1086#1076' '#1086#1073'/'#1089
 end

object Label10: TLabel

Left = 328

Top = 200

Width = 123

Height = 13

Caption = #1050#1086#1085#1077#1095#1085#1072#1103'
 '#1089#1082#1086#1088#1086#1089#1090#1100', '#1084'/'#1089

end

object Label11: TLabel

Left = 328

Top = 144

Width = 38

Height = 13

Caption = 'Vo, '#1084'/'#1089

end

object Label12: TLabel

Left = 24

Top = 200

Width = 155

Height = 13

Caption = #1050#1086#1083#1080#1095#1077#1089#1090#1074#1086'
 '#1090#1086#1095#1077#1082' '#1076#1083#1103'
 '#1088#1072#1079#1075#1086#1085#1072

Visible = False

end

object Label13: TLabel

Left = 32

```

Top = 200
Width = 206
Height = 13
Caption    =    #1082#1086#1083#1080#1095#1077#1089#1090#1074#1086'
'#1090#1086#1095#1077#1082'                                '#1076#1083#1103'
'#1087#1086#1076#1090#1086#1088#1084#1072#1078#1080#1074#1072#1085#
1080#1103
end
object Label14: TLabel
Left = 328
Top = 176
Width = 130
Height = 13
Caption      =      #1053#1072#1095#1072#1083#1100#1085#1072#1103'
'#1089#1082#1086#1088#1086#1089#1090#1100', '#1084'/'#1089
end
object Dc1: TEdit
Left = 176
Top = 64
Width = 121
Height = 21
TabOrder = 0
Text = '29100'
end
object L1: TEdit
Left = 176
Top = 88
Width = 121
Height = 21
TabOrder = 1

```

```
    Text = '174'
end
object B1: TEdit
    Left = 176
    Top = 112
    Width = 121
    Height = 21
    TabOrder = 2
    Text = '23'
end
object T1: TEdit
    Left = 176
    Top = 136
    Width = 121
    Height = 21
    TabOrder = 3
    Text = '9,5'
end
object Dv1: TEdit
    Left = 176
    Top = 160
    Width = 121
    Height = 21
    TabOrder = 4
    Text = '5,9'
end
object H1: TEdit
    Left = 480
    Top = 56
    Width = 121
```

```
Height = 21
TabOrder = 5
Text = '5,04'
end
object step1: TEdit
Left = 480
Top = 80
Width = 121
Height = 21
TabOrder = 6
Text = '0,85'
end
object n1: TEdit
Left = 480
Top = 104
Width = 121
Height = 21
TabOrder = 7
Text = '1,415'
end
object V01: TEdit
Left = 480
Top = 136
Width = 121
Height = 21
TabOrder = 8
Text = '6,69'
end
object Vpp1: TEdit
Left = 480
```

```

Top = 192
Width = 121
Height = 21
TabOrder = 9
Text = '7'
end
object Button1: TButton
  Left = 616
  Top = 152
  Width = 89
  Height = 33
  Caption = #1056#1072#1089#1095#1077#1090' !'
  TabOrder = 10
  OnClick = Button1Click
end
object Memo1: TMemo
  Left = 8
  Top = 232
  Width = 681
  Height = 81
  Lines.Strings = (
    "
    #1056#1077#1079#1091#1083#1100#1090#1072#1090#1099'
    '#1088#1072#1089#1095#1077#1090#1072':
    ")
  ScrollBars = ssVertical
  TabOrder = 11
end
object Tab: TStringGrid
  Left = 1

```

```
Top = 328
Width = 681
Height = 145
ColCount = 12
DefaultColWidth = 75
RowCount = 15
Options = [goFixedVertLine, goVertLine, goHorzLine, goRangeSelect]
TabOrder = 12
RowHeights = (
    24
    24
    24
    24
    24
    24
    24
    24
    24
    24
    24
    24
    24
    24
    24)
end
object Button2: TButton
    Left = 624
    Top = 80
    Width = 75
    Height = 25
```

```
Caption = 'S(V)'
TabOrder = 13
OnClick = Button2Click
end
object Button3: TButton
  Left = 624
  Top = 120
  Width = 75
  Height = 25
  Caption = 'T(V)'
  TabOrder = 14
  OnClick = Button3Click
end
object Edit1: TEdit
  Left = 184
  Top = 192
  Width = 49
  Height = 21
  TabOrder = 15
  Text = '5'
  Visible = False
end
object Edit2: TEdit
  Left = 248
  Top = 192
  Width = 49
  Height = 21
  TabOrder = 16
  Text = '3'
end
```

```

object Edit3: TEdit
    Left = 480
    Top = 168
    Width = 121
    Height = 21
    TabOrder = 17
    Text = '8,75'
end
end

```

ПОЗГІН

```
unit Unit1;
```

```
interface
```

```
uses
```

```
    Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms,
    Dialogs, StdCtrls, Grids;
```

```
type
```

```

TForm1 = class(TForm)
    Label1: TLabel;
    Label2: TLabel;
    Dc1: TEdit;
    Label3: TLabel;
    L1: TEdit;
    Label4: TLabel;
    B1: TEdit;
    Label5: TLabel;

```

```

T1: TEdit;
Label6: TLabel;
Dv1: TEdit;
Label7: TLabel;
H1: TEdit;
Label8: TLabel;
step1: TEdit;
Label9: TLabel;
n1: TEdit;
Label10: TLabel;
V01: TEdit;
Label11: TLabel;
Vpp1: TEdit;
Button1: TButton;
Memo1: TMemo;
Tab: TStringGrid;
Button2: TButton;
Button3: TButton;
Label12: TLabel;
Edit1: TEdit;
procedure Button1Click(Sender: TObject);
procedure Button2Click(Sender: TObject);
procedure Button3Click(Sender: TObject);
private
    { Private declarations }
public
    { Public declarations }
end;

```

```

var

```

```
Form1: TForm1;
```

```
implementation
```

```
uses Unit2, Unit3;
```

```
{ $R *.dfm }
```

```
procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject);
```

```
var
```

```
Dc,m,L,B,T,Dv,H,step,n,V0,Vrev,Dm : real;
```

```
v2, Vpp,x,y,k, m1, Fr, omega, Z, mu, R0, k1, p1,v1,Pcp,Rcp,s,t2,ss,tt,v, Vcp :real;
```

```
i,r,rr : integer;
```

```
begin
```

```
Form2.Chart1.Series[0].Clear;
```

```
Form3.Chart1.Series[0].Clear;
```

```
for r:=0 to tab.ColCount do
```

```
for rr:=0 to tab.RowCount do
```

```
with tab do Cells[r,rr]:="";
```

```
//for i:= 1 to 20 do
```

```
//Form2.Chart1.Series[0].AddXY(i, i, " ");
```

```
//form2.Show;
```

```
Dc:=strtofloat(Dc1.Text);
```

```
m:=Dc*1000;
```

```
L:=strtofloat(L1.Text);
```

```
B:=strtofloat(B1.Text);
```

```
T:=strtofloat(T1.Text);
```

```
Dv:=strtofloat(Dv1.Text);
```

```
H:=strtofloat(H1.Text);
```

```
step:=strtofloat(step1.Text);
```

```

n:=strtofloat(n1.Text);
V0:=strtofloat(V01.Text);
Vpp:=strtofloat(Vpp1.Text);
// Розрахунок вихідних даних
// 1. Розрахунок приєднаної маси води
dm:=1.5*3.14*1020*T*T*B/4;
//2. Розрахунок маси судна
k:=dm/m;
m1:=(1+k)*m;
memo1.Lines.Add('Приєднана маса води = '+floattostr(dm));
memo1.Lines.Add('K = '+floattostr(k));
memo1.Lines.Add('Маса судна, H ='+floattostr(m1));
//3. Розрахунок опору R0
Fr:=V0/sqrt(9.81*L);
Z:= 0.0085-0.051*Fr+0.1246*Fr*Fr;
omega:=exp((2/3)*ln(Dc)) * (4.854 + 0.492 * B / T);
mu:=Z*1020*omega/2;
R0:=mu*V0*V0;
memo1.Lines.Add('Ro, H ='+floattostr(R0));
k1:=0.4*step+0.018;
P1:= 1020*k1*n*n*Dv*Dv*Dv*Dv;
memo1.Lines.Add('mu ='+floattostr(mu));
memo1.Lines.Add('K1 ='+floattostr(K1));
memo1.Lines.Add('P1, H ='+floattostr(p1));

//4. Побудова таблиці
with tab do
begin
Cells[1,0]:='Vn, вузли';
Cells[2,0]:='V1, м/с';

```

```

Cells[3,0]:='V2, m/c';
Cells[4,0]:='Vcp, m/c';
Cells[5,0]:='S, m';
Cells[6,0]:='Summa S, m';
Cells[7,0]:='Summa S, каб.';
Cells[8,0]:='t, c.';
Cells[9,0]:='t, min';
Cells[10,0]:='Summa t, min';

```

```

end;

```

```

i:=1;
ss:=0;
tt:=0;
v1:=0;
Form2.Chart1.Series[0].AddXY(0, 0, " ");
Form3.Chart1.Series[0].AddXY(0, 0, " ");
while v1<Vpp do

```

```

begin

```

```

v2:=v1+Vpp/strtoint(edit1.Text);
//v2:=v1+6/strtoint(edit1.Text);

```

```

if (vpp-v2)<1 then v2:=Vpp;
Rcp:=mu*(v1*v1+v2*v1+v2*v2)/3;
Vcp:=(v2+v1)/2;
Pcp:=P1-((P1-R0)/v0)*Vcp;
//if Vcp<=Vrev then Pcp:=P1;

```

```

t2:= m1*(v2-v1)/(Pcp-Rcp);
s:= m1*(v2*v2-v1*v1)/(2*(Pcp-Rcp));
ss:=ss+s;
tt:=tt+t2;
//if v1=0 then Form2.Chart1.Series[0].AddXY((V0-V1)/1.94, Ss/185.2, " ");
//if v1>0 then Form2.Chart1.Series[0].AddXY((int(V0)-V1)/1.94, Ss/185.2, " ");
//if v1=0 then Form3.Chart1.Series[0].AddXY((V0-V1)/1.94, tt, " ");
//if v1>0 then Form3.Chart1.Series[0].AddXY((int(V0)-V1)/1.94, tt, " ");
Form2.Chart1.Series[0].AddXY((SS)/185.2, V2*1.94, " ");
Form3.Chart1.Series[0].AddXY(tt/60, V2*1.94, " ");
with tab do
begin
Cells[1,i]:=floattostr(V1*1.94);
Cells[2,i]:=floattostr(V1);
Cells[3,i]:=floattostr(V2);
Cells[4,i]:=floattostr(Vcp);
Cells[5,i]:=floattostr(S);
Cells[6,i]:=floattostr(ss);
Cells[7,i]:=floattostr(ss/185.2);
Cells[8,i]:=floattostr(t2);
Cells[9,i]:=floattostr(t2/60);
Cells[10,i]:=floattostr(tt/60);
end;
i:=i+1;
v1:=v2;
//memo1.Lines.Add('1111'+floattostr(v));
end;
//for ii:=1 to i do
//Form2.Chart1.Series[0].AddXY(V, Ss, " ");

```

```
// form2.Show;
//
```

```
end;
```

```
procedure TForm1.Button2Click(Sender: TObject);
begin
form2.Show;
end;
```

```
procedure TForm1.Button3Click(Sender: TObject);
begin
form3.show;
end;
```

```
end.
```

```
object Form1: TForm1
```

```
Left = 223
```

```
Top = -16
```

```
Width = 732
```

```
Height = 514
```

```
Caption          =          #1040#1082#1090#1080#1074#1085#1086#1077'
```

```
'#1090#1086#1088#1084#1086#1078#1077#1085#1080#1077
```

```
Color = clBtnFace
```

```

Font.Charset = DEFAULT_CHARSET
Font.Color = clWindowText
Font.Height = -11
Font.Name = 'MS Sans Serif'
Font.Style = []
OldCreateOrder = False
PixelsPerInch = 96
TextHeight = 13
object Label1: TLabel
    Left = 256
    Top = 16
    Width = 137
    Height = 16
    Alignment = taCenter
    Caption          =          '#1056#1040#1057#1063#1045#1058'
'#1056#1040#1047#1043#1054#1053#1040
    Font.Charset = DEFAULT_CHARSET
    Font.Color = clWindowText
    Font.Height = 16
    Font.Name = 'MS Sans Serif'
    Font.Style = [fsBold]
    ParentFont = False
    Layout = tlCenter
end
object Label2: TLabel
    Left = 24
    Top = 72
    Width = 130
    Height = 13

```

Caption

=

#1042#1086#1076#1086#1080#1079#1084#1077#1097#1077#1085#1080#1077'
 '#1089#1091#1076#1085#1072', '#1090'.

end

object Label3: TLabel

Left = 24

Top = 96

Width = 145

Height = 13

Caption = #1044#1083#1080#1085#1072' '#1089#1091#1076#1085#1072'
 '#1084#1077#1078#1076#1091' '#1087#1077#1088#1087'.', '#1084

end

object Label4: TLabel

Left = 24

Top = 120

Width = 85

Height = 13

Caption = #1064#1080#1088#1080#1085#1072'
 '#1089#1091#1076#1085#1072', '#1084

end

object Label5: TLabel

Left = 24

Top = 144

Width = 84

Height = 13

Caption = #1054#1089#1072#1076#1082#1072'
 '#1089#1091#1076#1085#1072', '#1084

end

object Label6: TLabel

Left = 24

```

Top = 168
Width = 78
Height = 13
Caption          =          #1044#1080#1072#1084#1077#1090#1088'
'#1074#1080#1085#1090#1072
end
object Label7: TLabel
Left = 328
Top = 64
Width = 66
Height = 13
Caption = #1064#1072#1075' '#1074#1080#1085#1090#1072', '#1084
end
object Label8: TLabel
Left = 328
Top = 88
Width = 102
Height = 13
Caption          =          #1064#1072#1075#1086#1074#1086#1077'
'#1086#1090#1085#1086#1096#1077#1085#1080#1077
end
object Label9: TLabel
Left = 328
Top = 112
Width = 152
Height = 13
Caption  =  #1054#1073#1086#1088#1086#1090#1086#1074'  '#1085#1072'
'#1087#1077#1088#1077#1076#1085'. '#1093#1086#1076' '#1086#1073'/'#1089
end
object Label10: TLabel

```

```

Left = 328
Top = 144
Width = 141
Height = 13
Caption      =      #1057#1082#1086#1088#1086#1089#1090#1100'
'#1089#1091#1076#1085#1072' '#1087#1088#1080' n0, '#1084'/'#1089
end
object Label11: TLabel
Left = 328
Top = 168
Width = 126
Height = 13
Caption      =      #1050#1086#1085#1077#1095#1085#1072#1103'
'#1089#1082#1086#1088#1086#1089#1090#1100' , '#1084'/'#1089
end
object Label12: TLabel
Left = 24
Top = 200
Width = 155
Height = 13
Caption      =      #1050#1086#1083#1080#1095#1077#1089#1090#1074#1086'
'#1090#1086#1095#1077#1082'                                '#1076#1083#1103'
'#1088#1072#1079#1075#1086#1085#1072
end
object Dc1: TEdit
Left = 176
Top = 64
Width = 121
Height = 21
TabOrder = 0

```

```
    Text = '29100'
end
object L1: TEdit
    Left = 176
    Top = 88
    Width = 121
    Height = 21
    TabOrder = 1
    Text = '174'
end
object B1: TEdit
    Left = 176
    Top = 112
    Width = 121
    Height = 21
    TabOrder = 2
    Text = '23'
end
object T1: TEdit
    Left = 176
    Top = 136
    Width = 121
    Height = 21
    TabOrder = 3
    Text = '9,5'
end
object Dv1: TEdit
    Left = 176
    Top = 160
    Width = 121
```

```
Height = 21
TabOrder = 4
Text = '5,9'
end
object H1: TEdit
Left = 480
Top = 56
Width = 121
Height = 21
TabOrder = 5
Text = '5,04'
end
object step1: TEdit
Left = 480
Top = 80
Width = 121
Height = 21
TabOrder = 6
Text = '0,85'
end
object n1: TEdit
Left = 480
Top = 104
Width = 121
Height = 21
TabOrder = 7
Text = '1,415'
end
object V01: TEdit
Left = 480
```

```

    Top = 136
    Width = 121
    Height = 21
    TabOrder = 8
    Text = '6,69'
end
object Vpp1: TEdit
    Left = 480
    Top = 160
    Width = 121
    Height = 21
    TabOrder = 9
    Text = '6'
end
object Button1: TButton
    Left = 472
    Top = 192
    Width = 129
    Height = 33
    Caption          =          '#1056#1072#1089#1095#1077#1090'
    '1088#1072#1079#1075#1086#1085#1072' !'
    TabOrder = 10
    OnClick = Button1Click
end
object Memo1: TMemo
    Left = 8
    Top = 232
    Width = 681
    Height = 81
    Lines.Strings = (

```



```
    24
    24
    24)
end
object Button2: TButton
    Left = 624
    Top = 80
    Width = 75
    Height = 25
    Caption = 'S(V)'
    TabOrder = 13
    OnClick = Button2Click
end
object Button3: TButton
    Left = 624
    Top = 120
    Width = 75
    Height = 25
    Caption = 'T(V)'
    TabOrder = 14
    OnClick = Button3Click
end
object Edit1: TEdit
    Left = 184
    Top = 192
    Width = 49
    Height = 21
    TabOrder = 15
    Text = '5'
end
```

end

АКТИВНЕ ГАЛЬМУВАННЯ

```
Cells[1,0]:='Vn, вузли';
Cells[2,0]:='Vn, м/с';
Cells[3,0]:='Vn+1, м/с';
Cells[4,0]:='Vср, м/с';
Cells[5,0]:='Pср, Н';
Cells[6,0]:='Rср, Н';
Cells[7,0]:='S, м';
Cells[8,0]:='t, min';
Cells[9,0]:='Summa S, м';
Cells[10,0]:='Summa S, каб.';
Cells[11,0]:='Summa t';
end;
```

```
f1:=0;
i:=1;
ss:=0;
tt:=0;
v:=v0;
while i<strtoint(edit1.Text)+1 do
//v>strtofloat(edit2.Text) do

begin
//memo1.Lines.Add('v =' + floattostr(v));
```

```

v1:=v-(v0-strtfloat(edit2.Text))/strtoint(edit1.Text);
if v1<strtfloat(edit2.Text) then v1:=strtfloat(edit2.Text);
memo1.Lines.Add('dv:='+floattostr((v0-strtfloat(edit2.Text))/strtoint(edit1.Text)))
;
if v1<>v then begin
Rcp:=mu*(v*v+v*v1+v1*v1)/3;
Vcp:=(v+v1)/2;
Pcp:=R0-(R0-P1)*Vcp/Vrev;
if Vcp<=Vrev then Pcp:=P1;
t2:=(dm+m)*(v-v1)/(60*(Pcp+Rcp));
s:=(dm+m)*(v*v-v1*v1)/(2*(Pcp+Rcp));
ss:=ss+s;
tt:=tt+t2;
if v1=strtfloat(edit2.Text) then Form2.Chart1.Series[0].AddXY((V0-
V1+strtfloat(edit2.Text))*1.94, Ss/185.2, " ");
if v1>strtfloat(edit2.Text) then Form2.Chart1.Series[0].AddXY((int(V0)-
V1+strtfloat(edit2.Text))*1.94, Ss/185.2, " ");
if v1=strtfloat(edit2.Text) then Form3.Chart1.Series[0].AddXY((V0-
V1+strtfloat(edit2.Text))*1.94, tt, " ");
if v1>strtfloat(edit2.Text) then Form3.Chart1.Series[0].AddXY((int(V0)-
V1+strtfloat(edit2.Text))*1.94, tt, " ");

with tab do
begin
Cells[1,i]:=floattostr(V*1.94);
Cells[2,i]:=floattostr(V);
Cells[3,i]:=floattostr(V1);
Cells[4,i]:=floattostr(Vcp);
Cells[5,i]:=floattostr(Pcp);
Cells[6,i]:=floattostr(Rcp);

```

```

Cells[7,i]:=floattostr(S);
Cells[8,i]:=floattostr(t2);
Cells[9,i]:=floattostr(ss);
Cells[10,i]:=floattostr(ss/185.2);
Cells[11,i]:=floattostr(tt);
end;
end;
i:=i+1;
v:=v1;

//memo1.Lines.Add('1111'+floattostr(v));
end;
//for ii:=1 to i do
//Form2.Chart1.Series[0].AddXY(V, Ss, " ");

// form2.Show;
//

end;

procedure TForm1.Button2Click(Sender: TObject);
begin
form2.Show;
end;

procedure TForm1.Button3Click(Sender: TObject);

```

```
begin
form3.show;
end;

end.
```

```
object Form1: TForm1
  Left = 217
  Top = 40
  Width = 747
  Height = 514
  Caption          =          #1040#1082#1090#1080#1074#1085#1086#1077'
'#1090#1086#1088#1084#1086#1078#1077#1085#1080#1077
  Color = clBtnFace
  Font.Charset = DEFAULT_CHARSET
  Font.Color = clWindowText
  Font.Height = -11
  Font.Name = 'MS Sans Serif'
  Font.Style = []
  OldCreateOrder = False
  PixelsPerInch = 96
  TextHeight = 13
  object Label1: TLabel
    Left = 32
    Top = 16
    Width = 275
    Height = 16
    Alignment = taCenter
```

```

Caption          =          #1056#1040#1057#1063#1045#1058'
'#1040#1050#1058#1048#1042#1053#1054#1043#1054'
'#1058#1054#1056#1052#1054#1046#1045#1053#1048#1071
    Font.Charset = DEFAULT_CHARSET
    Font.Color = clWindowText
    Font.Height = 16
    Font.Name = 'MS Sans Serif'
    Font.Style = [fsBold]
    ParentFont = False
    Layout = tlCenter
end
object Label2: TLabel
    Left = 24
    Top = 72
    Width = 130
    Height = 13
    Caption          =          =
#1042#1086#1076#1086#1080#1079#1084#1077#1097#1077#1085#1080#1077'
'#1089#1091#1076#1085#1072', '#1090'.'
end
object Label3: TLabel
    Left = 24
    Top = 96
    Width = 145
    Height = 13
    Caption  =  #1044#1083#1080#1085#1072'  '#1089#1091#1076#1085#1072'
'#1084#1077#1078#1076#1091' '#1087#1077#1088#1087'., '#1084
end
object Label4: TLabel
    Left = 24

```

```

Top = 120
Width = 85
Height = 13
Caption          =          #1064#1080#1088#1080#1085#1072'
'#1089#1091#1076#1085#1072', '#1084
end
object Label5: TLabel
Left = 24
Top = 144
Width = 84
Height = 13
Caption          =          #1054#1089#1072#1076#1082#1072'
'#1089#1091#1076#1085#1072', '#1084
end
object Label6: TLabel
Left = 24
Top = 168
Width = 78
Height = 13
Caption          =          #1044#1080#1072#1084#1077#1090#1088'
'#1074#1080#1085#1090#1072
end
object Label7: TLabel
Left = 328
Top = 64
Width = 66
Height = 13
Caption = #1064#1072#1075' '#1074#1080#1085#1090#1072', '#1084
end
object Label8: TLabel

```

```

Left = 328
Top = 88
Width = 102
Height = 13
Caption          =          #1064#1072#1075#1086#1074#1086#1077'
'#1086#1090#1085#1086#1096#1077#1085#1080#1077
end
object Label9: TLabel
Left = 328
Top = 112
Width = 140
Height = 13
Caption  =  #1054#1073#1086#1088#1086#1090#1086#1074'  '#1085#1072'
'#1079#1072#1076#1085'. '#1093#1086#1076' '#1086#1073'/'#1089
end
object Label10: TLabel
Left = 328
Top = 136
Width = 130
Height = 13
Caption      =      #1053#1072#1095#1072#1083#1100#1085#1072#1103'
'#1089#1082#1086#1088#1086#1089#1090#1100', '#1084'/'#1089
end
object Label11: TLabel
Left = 328
Top = 168
Width = 118
Height = 13
Caption      =      #1057#1082#1086#1088#1086#1089#1090#1100'
'#1088#1077#1074#1077#1088#1089#1072', '#1084'/'#1089

```

```

end
object Label12: TLabel
    Left = 24
    Top = 200
    Width = 90
    Height = 13
    Caption    =    #1050#1086#1083#1080#1095#1077#1089#1090#1074#1086'
'#1090#1086#1095#1077#1082
end
object Label13: TLabel
    Left = 328
    Top = 200
    Width = 126
    Height = 13
    Caption    =    #1050#1086#1085#1077#1095#1085#1072#1103'
'#1089#1082#1086#1088#1086#1089#1090#1100' , '#1084'/'#1089
end
object Dc1: TEdit
    Left = 176
    Top = 64
    Width = 121
    Height = 21
    TabOrder = 0
    Text = '22100'
end
object L1: TEdit
    Left = 176
    Top = 88
    Width = 121
    Height = 21

```

```
    TabOrder = 1
    Text = '156'
end
object B1: TEdit
    Left = 176
    Top = 112
    Width = 121
    Height = 21
    TabOrder = 2
    Text = '21,8'
end
object T1: TEdit
    Left = 176
    Top = 136
    Width = 121
    Height = 21
    TabOrder = 3
    Text = '9,7'
end
object Dv1: TEdit
    Left = 176
    Top = 160
    Width = 121
    Height = 21
    TabOrder = 4
    Text = '6,3'
end
object H1: TEdit
    Left = 480
    Top = 56
```

```
Width = 121
Height = 21
TabOrder = 5
Text = '6,3'
end
object step1: TEdit
Left = 480
Top = 80
Width = 121
Height = 21
TabOrder = 6
Text = '1'
end
object n1: TEdit
Left = 480
Top = 104
Width = 121
Height = 21
TabOrder = 7
Text = '1,17'
end
object V01: TEdit
Left = 480
Top = 128
Width = 121
Height = 21
TabOrder = 8
Text = '9,15'
end
object Vrev1: TEdit
```

```

Left = 480
Top = 160
Width = 121
Height = 21
TabOrder = 9
Text = '6,5'
end
object Button1: TButton
Left = 616
Top = 152
Width = 113
Height = 33
Caption          =          '#1056#1072#1089#1095#1077#1090'
'#1090#1086#1088#1084#1086#1078#1077#1085#1080#1103' !'
TabOrder = 10
OnClick = Button1Click
end
object Memo1: TMemo
Left = 8
Top = 232
Width = 681
Height = 81
Lines.Strings = (
  "
  '#1056#1077#1079#1091#1083#1100#1090#1072#1090#1099'
  '#1088#1072#1089#1095#1077#1090#1072':
  ")
ScrollBars = ssVertical
TabOrder = 11
end

```

object Tab: TStringGrid

Left = 1

Top = 328

Width = 681

Height = 145

ColCount = 12

DefaultColWidth = 75

RowCount = 15

Options = [goFixedVertLine, goVertLine, goHorzLine, goRangeSelect]

TabOrder = 12

end

object Button2: TButton

Left = 624

Top = 80

Width = 75

Height = 25

Caption = 'S(V)'

TabOrder = 13

OnClick = Button2Click

end

object Button3: TButton

Left = 624

Top = 120

Width = 75

Height = 25

Caption = 'T(V)'

TabOrder = 14

OnClick = Button3Click

end

object Edit1: TEdit

```
Left = 176
Top = 192
Width = 121
Height = 21
TabOrder = 15
Text = '10'
end
object Edit2: TEdit
Left = 480
Top = 192
Width = 121
Height = 21
TabOrder = 16
Text = '0'
end
end.
```

ДОДАТОК В.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ТА ВІДОМОСТІ
ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Яркин П.И. Определение характеристик активного торможения судна. Альтернативный подход/ Яркин П.И., Калиниченко Е.В. // Сб. научн. трудов: «Судовождение», ОНМА. –Одесса: ФЕНИКС, 2003. – Вып. 6. – С. 159-165.
2. Яркин П.И. Расчет безопасной скорости и минимально-допустимого расстояния сближения судов/ Яркин П.И., Калиниченко Е.В. // Судовождение: Сб. научн. трудов, ОНМА. – Вып. 7. – Одесса: Фенікс, 2004. С. 87-92.
3. Калиниченко Е.В. Методика расчета инерционно-тормозных характеристик морского судна при реверсе/ Калиниченко Е.В.// Судовождение: Сб. научн. трудов, ОНМА. – Вып. 9. – Одесса: Фенікс, 2005. С. 36-44.
4. Калиниченко Е.В. Практический расчет инерционно-тормозных характеристик судна/ Калиниченко Е.В.// Судовождение: Сб. научн. трудов, ОНМА. – Вып. 10. – Одесса: Фенікс, 2005. С. 58-63.
5. Яркин П.И. Определение характеристик разгона и подтормаживания судна. Альтернативный подход/ Яркин П.И., Мальцев А.С., Калиниченко Е.В. // Вісник ОНМУ: Сб. научн. трудов, ОНМУ,– Вып. 13. – Одесса: Фенікс, 2007. С. 63-71.
6. Калиниченко Е.В. Расчет моментов времени начала и окончания поворота судна с учетом характеристик его поворотливости/ Калиниченко Е.В.// Судовождение: Сб. научн. трудов, ОНМА, Вып. 24. – Одесса: «ИздатИнформ», 2014 - С. 68-74.
7. Калиниченко Е.В. Учет в системах принятия решений динамических характеристик судна при расчете момента времени его поворота на программный курс/ Калиниченко Е.В. // Проблеми техніки: Науково-виробничий журнал. - 2014. № 1 . - С. 118-122.
8. Калиниченко Е.В. Учет характеристик поворотливости при расчете параметров поворота судна/ Калиниченко Е.В. // Водный транспорт. – 2014. №2 (20).– С. 63 – 67.

9. Калиниченко Е.В. Обеспечение требуемой точности поворота судна способом перемещения его криволинейной траектории / Калиниченко Е.В. // Автоматизация судовых технических средств. – 2014. – № 20. – С. 52-58.

10. Y. Kalinichenko. 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.

11. Калиниченко Е.В. Определение времени и скорости разгона судна на задний ход // Материалы международной научн.-техн. конференции. Часть 1. ОНМА, 2004.

12. Калиниченко Е.В. Выбор момента времени начала поворота с учетом падения скорости судна на циркуляции/ Калиниченко Е.В., Пятаков Э.Н. // Морські перевезення та інформаційні технології в судноплаванні: Матеріали наук.-техн. конф., 18-19 листоп. 2014 – Одеса : ОНМА, 2014. – С. 176–179.

13. Калиниченко Е.В. Обеспечение безопасности расхождения маневром изменения курса/ Калиниченко Е.В., Пятаков Э.Н. // Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд: Матеріали Всеукраїнської наук.-тех. конф., 21-23 травня 2014 р. – Миколаїв : МУК, 2014. – С. 40–42.

14. Калиниченко Е.В. Расчет параметров поворота судна/ Калиниченко Е.В. // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2014): Матеріали VI Міжнародної наук.-практ. конф., 27-29 травня. 2014 – Херсон: ХДМА, 2014. – С. 123-126.

15. Калиниченко Е.В. Совершенствование расчетных методов определения инерционно-тормозных характеристик судна / Калиниченко Е.В. // Стан та проблеми судноводіння: Матеріали наук.-техн. конф., 24-26 жовтня 2005 – Одеса : ОНМА, 2005. – С. 58–60.

16. Калиниченко Е.В. Имитационное моделирование активного торможения судна с учетом течения/ Калиниченко Е.В. // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2015): Матеріали VI Міжнарод-

ної наук.-практ. конф., 26-28 травня. 2015 – Херсон: ХДМА, 2015. – С. 106-109.

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-технічна конференція «Сучасні проблеми підвищення безпеки судноводіння»(Одеса, 7-8 листопаду 2004 р.), науково-технічна конференція «Стан та проблеми судноводіння» (Одеса, 24-26 жовтня 2005р.), Всеукраїнська науково-технічна конференція «Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд» (Миколаїв, 21-23 травня 2014 р.), VI Міжнародна науково - практична конференція «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2014)» (Херсон, 27-29 травня 2014 р.), науково-технічна конференція «Морські перевезення та інформаційні технології в судноплавстві» (Одеса, 18-19 листопаду 2014 р.), VII Міжнародна науково - практична конференція «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2015)» (Херсон, 26-28 травня 2015 р.).

ДОДАТОК С.

АКТИ УПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Настоящим актом удостоверяется, что в компании V. Ships получили внедрение методы расчета параметров маневра судна изменением курса и скорости, которые разработаны в диссертационной работе Калиниченко Евгения Владимировича на тему „Совершенствование алгоритмов информационного обеспечения маневрирования судов”.

Метод используется при переподготовке судоводителей компании.

Директор представительства
компании V.Ships в Украине, к.т.н., к.д.п.



A handwritten signature in blue ink, consisting of a series of loops and strokes, positioned over the stamp.

Сафин И.В.

27.02.2017 г.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Проректор з науково-педагогічної роботи
Херсонської державної морської академії
доцент Бень А.П.



02 2017 р.

А К Т

про використання результатів дисертаційної роботи здобувача
Калініченко Євгенія Володимировича на тему „Вдосконалення алгоритмів
інформаційного забезпечення маневрування суден”
у навчальному процесі академії

Ми, що нижче підписалися, декан факультету судноводіння к.п.н.,
доц.. Чернявський В.В. і завідуючий кафедрою управління судном к.т.н.,
Товстокорий О.М. склали цей акт в тому, що результати кандидатської
дисертації здобувача Калініченко Євгенія Володимировича на тему
„Вдосконалення алгоритмів інформаційного забезпечення маневрування
суден” впроваджені у навчальний процес на кафедрі управління судном в
розділах забезпечення маневрування судна.

Декан факультету судноводіння
к.п.н., доц.

Чернявський В.В.

Завідуючий кафедрою управління судном,
к.т.н.

Товстокорий О.М.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Настоящим актом удостоверяется, что в частном высшем учебном заведении «Институт последипломного образования» «Одесский морской тренажерный центр» получили внедрение в учебный процесс следующие результаты диссертационной работы Калиниченко Евгения Владимировича „Совершенствование алгоритмов информационного обеспечения маневрирования судов”:

- расчет параметров маневрирования судна изменением курса и скорости;
- принципы создания системы информационного обеспечения маневрирования судов.

Директор

Института последипломного образования

«Одесский морской тренажерный центр»,

к.т.н., профессор

28.02.2017 г.



Пащенко Ю.В.



Перший проректор ЧУ «ОМА»

професор Ілляшенко О.М.

«09» 03 2017 р.

А К Т

про використання результатів дисертаційної роботи здобувача
Калініченко Євгенія Володимировича на тему „Вдосконалення алгоритмів
інформаційного забезпечення маневрування суден”
у навчальному процесі університету

Ми, що нижче підписалися, начальник навчального відділу Пархоменко М. М., декан факультету морських перевезень і технологій к.т.н., к.д.п. Ворохобін І. І. і завідуючий кафедрою Управління судном д.т.н., професор Мальцев А.С. склали цей акт в тому, що результати кандидатської дисертації здобувача Калініченко Євгенія Володимировича на тему „ Вдосконалення алгоритмів інформаційного забезпечення маневрування суден” впроваджені у навчальний процес на кафедрі Управління судном в розділах забезпечення маневрування судна.

Начальник навчального
відділу

Пархоменко М. М.

Декан факультету морських перевезень
і технологій, к.т.н., к.д.п.

Ворохобін І. І.

Завідуючий кафедрою Управління судном,
д.т.н., професор

Мальцев А.С.

ЗАТВЕРДЖУЮ



Проректор по науковій роботі
Національного університету
"Одеська морська академія"
д.т.н., професор

В.А. Голіков

05

20 17 р.

АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи
Калініченко Є.В. на тему "Вдосконалення алгоритмів інформаційного
забезпечення маневрування суден"
в наукових дослідженнях, які виконуються в університеті

Ми, що нижче підписались, начальник науково-дослідної частини університету Савчук В.Д., провідний фахівець НДЧ Сопліна В.М., склали цей акт у тому, що результати дисертаційної роботи Калініченко Є. В. увійшли складовою частиною до звіту по науково-дослідній роботі "Забезпечення безпеки судноводіння в стислих районах плавання", (№ ДР 0115U003580, 2015–2018 рр., п. 4.4, науковий керівник – професор Чапчай П.О.).

Начальник науково-дослідної
частини НУ «ОМА»,
к.т.н., с.н.с., професор

В.Д. Савчук

Провідний фахівець

В.М. Сопліна