

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

Калініченко Євгеній Володимирович



УДК 656.61.052

**ВДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ ІНФОРМАЦІЙНОГО
ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МАНЕВРУВАННЯ СУДЕН**

Спеціальність 05.22.13 – навігація та управління рухом

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Одеса – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному університеті "Одеська морська академія" Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: **Мальцев Анатолій Сидорович**, доктор технічних наук, професор НУ "ОМА", зав. кафедрою УС

Офіційні опоненти: **Кондратенко Юрій Пантелійович**, д.т.н., професор, спеціальність 05.13.05 – Елементи і пристрої обчислювальної техніки і систем управління, професора кафедри інтелектуальних інформаційних систем Чорноморського державного університету ім. Петра Могили;
Товстокорий Олег Миколайович, к.т.н., доцент, спеціальність 05.22.13 – Навігація та управління рухом, доцента кафедри управління судном та безпеки життєдіяльності на морі Херсонської державної морської академії.

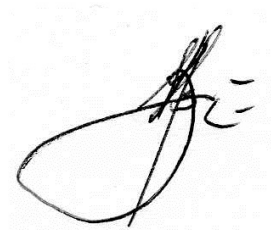
Запропоновані опоненти дали попередню згоду

Захист відбудеться 22 листопада 2017 р. о 10-й годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.106.01 в Національному університеті "Одеська морська академія" за адресою: 65029, м. Одеса, вул. Дідріхсона 8, корп. 1, зал засідань вченої ради.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного університету "Одеська морська академія" за адресою: м. Одеса, вул. Дідріхсона 8, корп. 2.

Автореферат розісланий 20 жовтня 2017 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
д. т. н., професор



Нікольський В.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Забезпечення безпеки судноводіння є однією з найважливіших проблем безаварійного мореплавання в стислих водах, що є складними за своїх умов районами плавання, до яких припадає понад 80 % всіх навігаційних аварій, що свідчить не тільки про велику складність умов плавання, але і про недосконалість методів судноводіння в таких районах. При виконанні маневру судна його інерційно-гальмівні характеристики і характеристики поворотності враховуються приблизно, що знижує точність реалізації програмної траєкторії руху судна і веде до збільшення вірогідності виникнення навігаційних аварій. Тому необхідна розробка процедури розрахунку параметрів маневру судна, які значною мірою залежать від вибраної моделі руху судна, що враховує його динаміку. Зараз на судах використовуються навігаційні інформаційні системи, в яких доцільна розробка функції розрахунку параметрів маневру судна для заданих початкових даних. Таким чином, 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 по держбюджетних темі "Забезпечення безпеки судноводіння в стислих районах плавання" (№ ГР 0115U003580, 2015 р.), в якій претендент 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 досягнуте 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 наступні методи:

- дедукції при аналізі основних підходів вирішення проблеми безпеки судноводіння;
- експертного оцінювання для вибору теми дисертаційної роботи;
- системного аналізу для декомпозиції головної задачі дисертації на допоміжні задачі та формування технології наукового дослідження;
- графо-аналітичні при вирішенні диференціальних рівнянь руху судна.

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

У дисертаційній роботі:

- вперше розроблені способи розрахунку параметрів маневрів судна залежно від його динаміки;
- вперше запропонований спосіб розрахунку інерційно-гальмівних характеристик судна з використанням альтернативного підходу;
- одержали 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 одержаних результатів полягає у 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.), крютінговою 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 претендента. Дисертаційна робота виконана дисертантом самостійно без співавторів: їм проведений інформаційний пошук і виконаний аналіз основних підходів рішення проблеми забезпечення безпеки судноводіння, обґрунтоване методологічне забезпечення дисертаційного дослідження, розроблений і використаний метод визначення параметрів маневрів судна з урахуванням його динаміки, а також розроблені необхідні алгоритми, що дозволяють формування комп'ютерної системи

інформаційного забезпечення маневрування судна, виконане імітаційне моделювання, упроваджені результати роботи у виробничий процес. З наукових робіт, опублікованих в співавторстві, в дисертації використані тільки ті положення, які належать автору особисто: формалізація альтернативного підходу для аналітичного опису процесу активного гальмування судна [1], процедура розрахунків безпечної швидкості судна [2], визначення характеристик розгону судна за допомогою альтернативного підходу [5], математична модель падіння швидкості судна на циркуляції [11], процедура розрахунку параметрів маневру безпечного розходження змінюю курсу [12], огляд динамічних моделей обертального руху судна без урахування часу перекладання керма [14].

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

науково-технічна конференція «Сучасні проблеми підвищення безпеки судноводіння» (Одеса, 7-8 листопада 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 листопада 2014 р.), VII Міжнародна науково - практична конференція «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2015)» (Херсон, 26-28 травня 2015 р.).

Публікації. За наслідками виконаних досліджень автором опубліковано 16 наукових робіт (з них 10 одноосібно), зокрема: у наукових профільних виданнях, що входять в перелік МОН України — 9 наукових статей [1-9]; у зарубіжних наукових профільних виданнях — 1 наукова стаття [14]; у збірках матеріалів наукових конференцій — 6 тез доповідей [10–13,15,16].

Структура роботи. Дисертація складається з введення, п'яти розділів, висновку, списку використаних літературних джерел (149 найменувань) і додатку. Загальний об'єм роботи складає 254 сторінок і містить 38 рисунків і 13 таблиць, зокрема: 167 сторінок основного тексту, 16 сторінок списку використаних джерел, 71 сторінок додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** роботи проведено обґрунтування актуальності теми дисертації, визначено мету та завдання дослідження, показано наукову

новизну і практичне значення роботи.

У **першому розділі** здійснено огляд основних напрямків дослідження проблеми забезпечення безпеки судноводіння і вибрано напрям дисертаційного дослідження.

Аналіз літератури по темі дисертаційної роботи показав, що основна увага була приділена проблемі забезпечення безпеки судноводіння шляхом комплексного вирішення питань попередження зіткнень суден в стислих умовах плавання, підвищення точності визначення місця судна та вдосконалення методів управління суднами.

В рішення цих проблем значний внесок зробили багато вітчизняних та іноземних вчених, таких як: Вагущенко Л.Л., Кондрашихін В.Т., Мальцев А.С., Цимбал М.М., Фрейдзон І.Р., Lisowski J., та інші, які показали, що актуальними та перспективними є теоретичні та практичні дослідження з проблеми інформаційного забезпечення безпечного маневрування суден. Аналіз підходів для рішення цієї проблеми показав, що перспективним є використання судових навігаційних інформаційних систем. Питання по даній тематиці потребують подальших наукових досліджень.

Такий висновок дав можливість обґрунтувати основні напрями дисертаційного дослідження.

У **другому розділі** з допомогою результатів першого розділу обґрунтовано вибір теми дисертаційного дослідження та його методологічного забезпечення.

Методами системного підходу розроблено технологічну карту дисертаційного дослідження, в якій визначені об'єкт та предмет дослідження, сформульовані робоча гіпотеза та головна задача дослідження.

Для вирішення головної наукової задачі були сформульовані три складові задачі.

У **третьому розділі** розглянута задача визначення залежності параметрів маневрів судна від його динаміки, яка пов'язана з першою складовою задачею дисертаційного дослідження.

В розділі розглянуто динамічні моделі поворотності судна, математичні моделі його лінійного руху із змінною швидкістю при активному і пасивному гальмуванні, а також застосування вказані моделей для розрахунку параметрів його маневру.

Для опису повороту судна в роботі приведені чотири моделі його обертального руху: 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 переключення керма. Перша модель служить початковим наближенням при ітераційному рішенні виразів, одержаних по складнішим моделям обертального руху судна.

Перша динамічна модель руху судна характеризує його поворот з постійною кутовою швидкістю і поточне значення курсу характеризується виразом:

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

де $a_{\omega} = k_{\omega} \beta_k$ - кутова швидкість повороту судна; k_{ω} - коефіцієнт ефективності керма; β_k - кут його кладки. Прирости координат судна за час повороту Δx_o і Δy_o визначаються наступними формулами:

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

Друга динамічна модель обертального руху судна описується неоднорідним лінійним диференціальним рівнянням з постійними коефіцієнтами:

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

де T_1 - постійна часу для урахування інерційних властивостей судна, а поточне значення курсу:

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

де ω_o і ω_r - початкове і стале значення кутової швидкості.

Диференціальне рівняння третьої динамічної моделі:

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

де T_1 і T_2 - постійні часу, які характеризують динаміку судна, дозволяє одержати залежність для поточного значення курсу:

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

У роботі також розглянуті дві динамічні моделі обертального руху судна з урахуванням часу перекидання керма, в яких динаміка судна враховується також, як в другій і третій моделях.

Для вибору адекватної моделі обертального руху судна, яка може бути застосована в рішенні задачі визначення параметрів повороту, були використані результати імітаційного моделювання траєкторій повороту за допомогою експериментального матеріалу, одержаного в реальних умовах експлуатації. Аналіз результатів показав, що найбільш прийнятною для вирішення задач, зв'язаних з поворотом судна, є математична модель поворотності судна третього типу, оскільки при достатній простоті вона має необхідну точність (максимальна розбіжність експериментальної і модельної траєкторій 25÷30 м). Тому надалі як модель обертального руху судна була застосована динамічна модель поворотності судна третього типу, за допомогою якої були одержані вирази для розрахунку параметрів повороту судна з однієї програмної ділянки траєкторії на іншу.

На рис. 1 показаний поворот судна з курсу K_1 на курс K_2 програмної траєкторії руху.

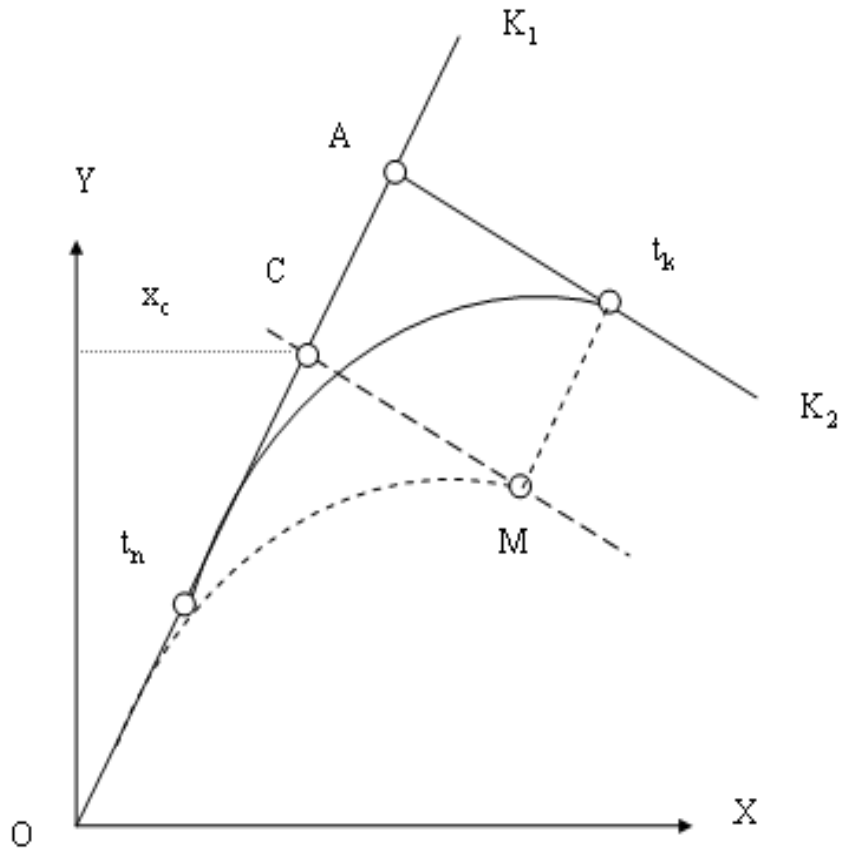


Рис. 1. Криволінійна траєкторія руху судна при повороті

У роботі показано, що момент часу початку повороту судна розраховується таким чином. Перш за все враховуємо, що поворот судна складається з двох фаз. Спочатку, на першій фазі, в початковий момент часу t_n , коли судно рухається курсом K_1 , проводиться перекладання керма на кут t_n і кермо утримується в такому положенні протягом інтервалу часу Δt_1 . Потім, на другій фазі повороту, проводиться одержування судна, тобто здійснюється перекладання керма на протилежний борт на ту ж величину і гаситься інерція повороту судна протягом інтервалу часу Δt_2 , по закінченню якого судно виходить на завданий курс K_2 , кутова швидкість повороту обертається в нуль, а кермо приводиться в діаметральну площину судна.

У роботі показано, що момент часу початку повороту судна знаходиться з виразу:

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

причому $x_c = \frac{y_m - x_m \operatorname{ctg} K_2}{\operatorname{ctg} K_1 - \operatorname{ctg} K_2}$. Для розрахунку значення x_c необхідно розрахувати прирости координат судна x_m і y_m за час маневру $\tau = \Delta t_1 + \Delta t_2$, які визначаються таким чином:

$$x_m = \int_0^{\Delta t_1} V_1 \sin[K_1 + K] dt + \int_0^{\Delta t_2} V_1 \sin[K_1 + K(\Delta t_1) + \tilde{K}] dt,$$

$$y_m = \int_0^{\Delta t_1} V_1 \cos[K_1 + K] dt + \int_0^{\Delta t_2} V_1 \cos[K_1 + K(\Delta t_1) + \tilde{K}] dt,$$

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

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

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

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

де a_ω - стале значення кутової швидкості повороту судна;

T_1 і T_2 - постійні часу, враховують інерційність судна.

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

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

у якій перше рівняння є очевидним співвідношенням, а друге - є умовою обернення в нуль кутової швидкості ω судна до кінця повороту. Підставляючи в цей вираз формули для курсу судна на першій і другій фазах повороту, одержимо залежності, з яких можна розрахувати значення Δt_1 і Δt_2 методом простих ітерацій. Після цього, використовуючи набуті значення Δt_1 і Δt_2 , методом Сімпсона обчислюються шукані прирости координат судна x_m і y_m .

При повороті судна його швидкість падає на значну величину, - у суден середнього тоннажу на сталій циркуляції з максимальним переключанням керма падіння швидкості в середньому складає 40% від швидкості судна перед циркуляцією. Тому з урахуванням вказаної обставини падіння швидкості судна при повороті в роботі запропоноване формалізувати наступною залежністю:

$$\begin{cases} V = V_0 - \Delta V[1 - \exp(-\frac{t}{\tau_p - t})], & t \leq \tau_p, \\ V = \bar{V}, & \tau \geq t > \tau_p. \end{cases}$$

де $\Delta V = V_0 - \bar{V}$.

Падіння швидкості судна при циркуляції не впливає на тривалість повороту, проте змінює приріст координат судна Δx_m і Δy_m за час повороту. В розділі також розглянуті особливості розрахунку моментів часу початку і закінчення повороту судна при розходженні з ціллю на заданій дистанції.

У третьому розділі розглянуті математичні моделі лінійного руху судна зі змінною швидкістю при активному і пасивному гальмуванні і одержані аналітичні залежності для поточної швидкості судна V_s , часу гальмування t_s і пройденої судном відстані S_s до зупинки. Розрахункові формули для активного і пасивного гальмування приведені в табл. 1.

Таблиця 1

Розрахункові формули V_s , t_s і S_s судна в різних режимах руху

	Активне гальмування	Пасивне гальмування
Поточна швидкість	$V_a = \frac{\sqrt{P}}{\sqrt{\mu}} \operatorname{tg}[\operatorname{arctg}(\frac{\sqrt{\mu}}{\sqrt{P}} V_0) - \frac{\sqrt{\mu P}}{(1+k)m} t]$	$V_p = \frac{V_0}{1 + \frac{V_0 \mu}{(1+k)m} t}$
Час гальмування	$t_a = \frac{(1+k)m}{\sqrt{\mu P}} \operatorname{arctg}(\frac{\sqrt{\mu}}{\sqrt{P}} V_0)$	$t_p = \frac{(1+k)m}{\mu V_0} (\frac{V_0}{V_k} - 1)$
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 $

Також в розділі розглянута задача зупинки судна в заданій позиції 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.

Таким чином, в розділі розглянута задача визначення залежності параметрів маневрів судна від його динаміки.

Матеріали розділу опубліковано в роботах [6, 7, 8, 14].

У **четвертому розділі** приведені результати розробки графічного способу комп'ютерного моделювання процедур розрахунку параметрів маневрів судна, чому присвячена друга складова задача дисертаційного дослідження.

В розділі приведено алгоритм розрахунку моментів часу початку t_n і закінчення t_k повороту судна, вважаючи в першому наближенні постійність його швидкості на циркуляції, який був реалізований в імітаційній моделі програвання повороту судна з однієї ділянки програмної траєкторії на

наступну. У імітаційному моделюванні використовувалася третя модель обертального руху судна. Результати імітаційного моделювання повороту судна представлені на рис.2.

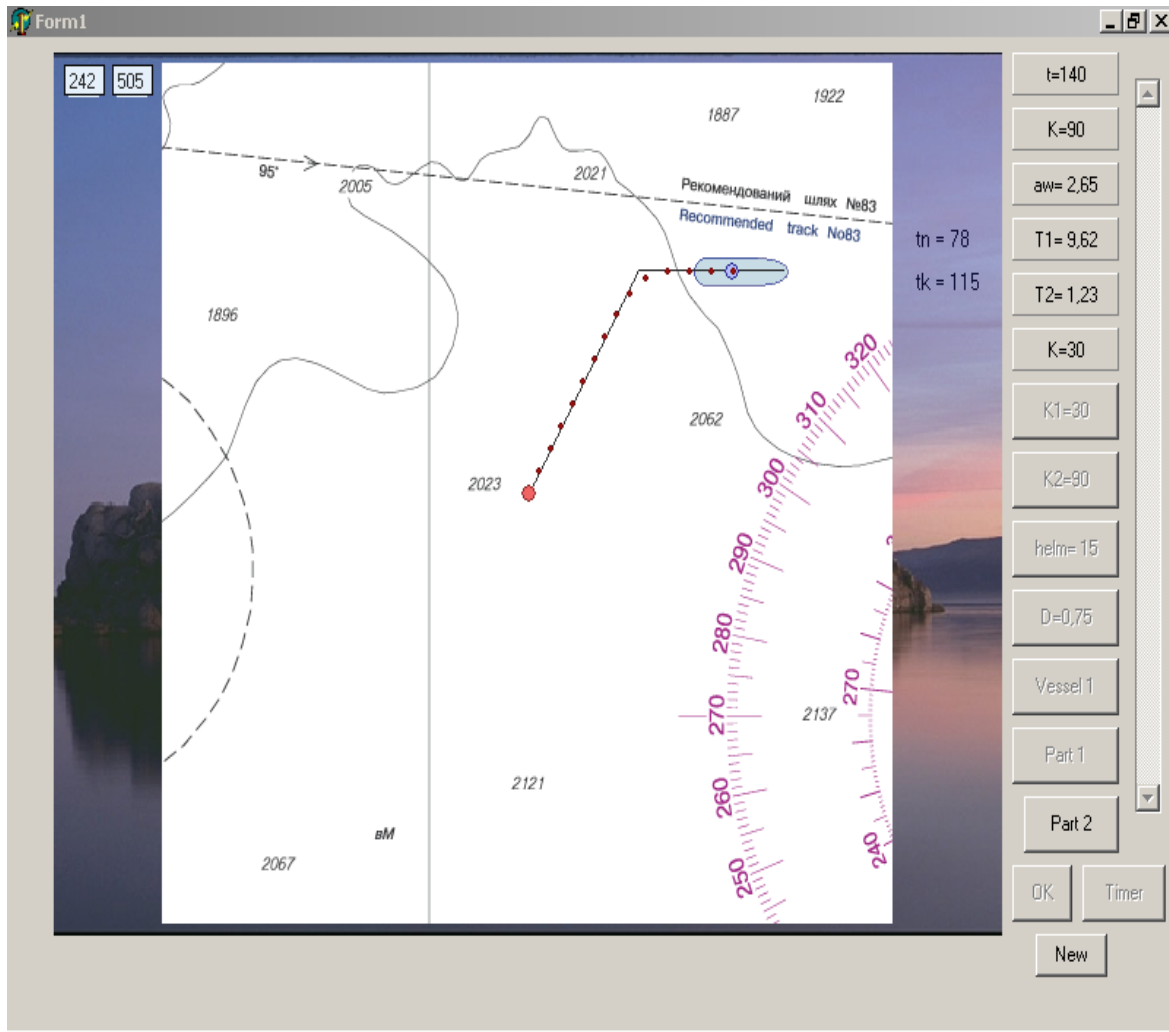


Рис. 2. Результати програвання повороту судна

З допомогою аналітичних виразів, одержаних в третьому розділі, був складений алгоритм визначення маневру ухилення судна від небезпечної цілі, який був реалізований в імітаційній моделі. Імітаційна модель є одним з модулів комп'ютерної програми, який дозволяє розрахувати моменти часу початку t_n і закінчення t_k повороту судна для безпечного розходження на заданій дистанції. Результати імітаційного моделювання процесу розходження ухиленням судна показані на рис. 3.

У четвертому розділі розглянуто задачу обліку падіння швидкості судна на циркуляції і показано, що зневага цією обставиною веде до виходу судна на чергову ділянку програмного руху з бічною похибкою, внаслідок чого судно виявляється на заданому курсі, не встигнувши досягти програмної траєкторії наступної ділянки руху, як показано на рис. 4.

Для суднової інформаційної комп'ютерної системи був розроблений програмний модуль, призначений для рішення задач маневрування судна

активним і пасивним гальмуванням, з допомогою якого проводилось імітаційне моделювання.

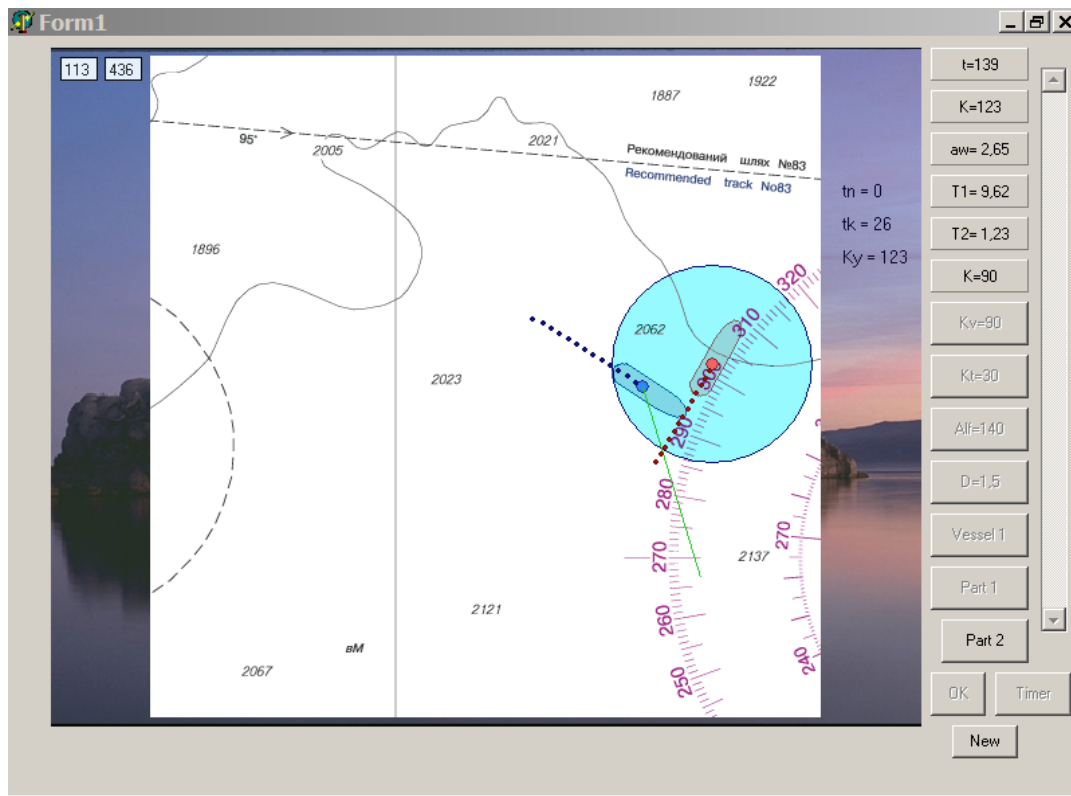


Рис. 3. Імітаційне моделювання процесу розходження

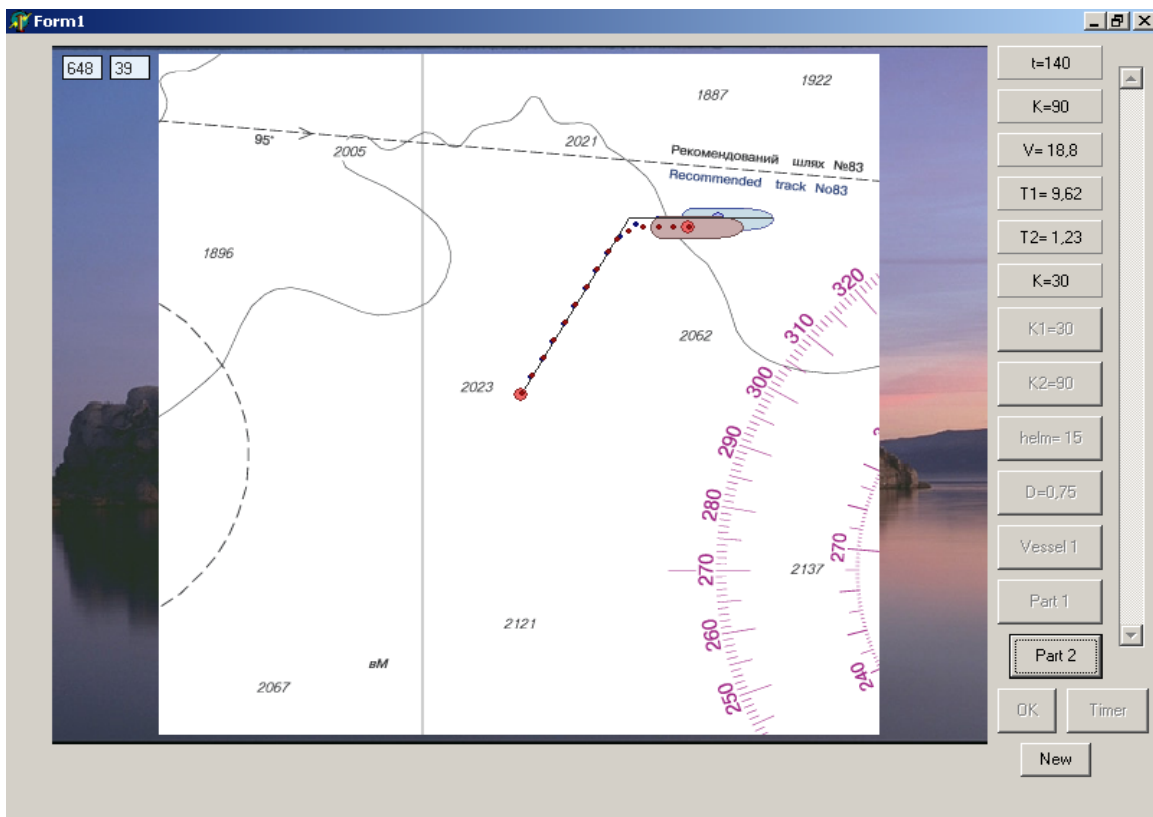


Рис. 4. Вплив падіння швидкості судна на точність повороту

На рис. 5 показаний результат програвання маневру пасивного гальмування з виходом судна в задану позицію. На першому етапі руху судна до початку гальмування, коли воно переміщається з постійною швидкістю, компенсація впливу течії проводиться утриманням судна під постійним кутом β_t , при цьому судно переміщається по програмній траєкторії. У лівому верхньому кутку екрану виводиться крива зміни швидкості судна при пасивному гальмуванні, коли кінцева швидкість судна рівна 4 вузлам. На другому етапі – власне самому гальмуванню, показані дві траєкторії руху судна: з постійним кутом течії, коли відбувається його зсув щодо програмної траєкторії руху, і з кутом течії, що росте, зате рух судна відбувається без зсуву по програмній траєкторії.

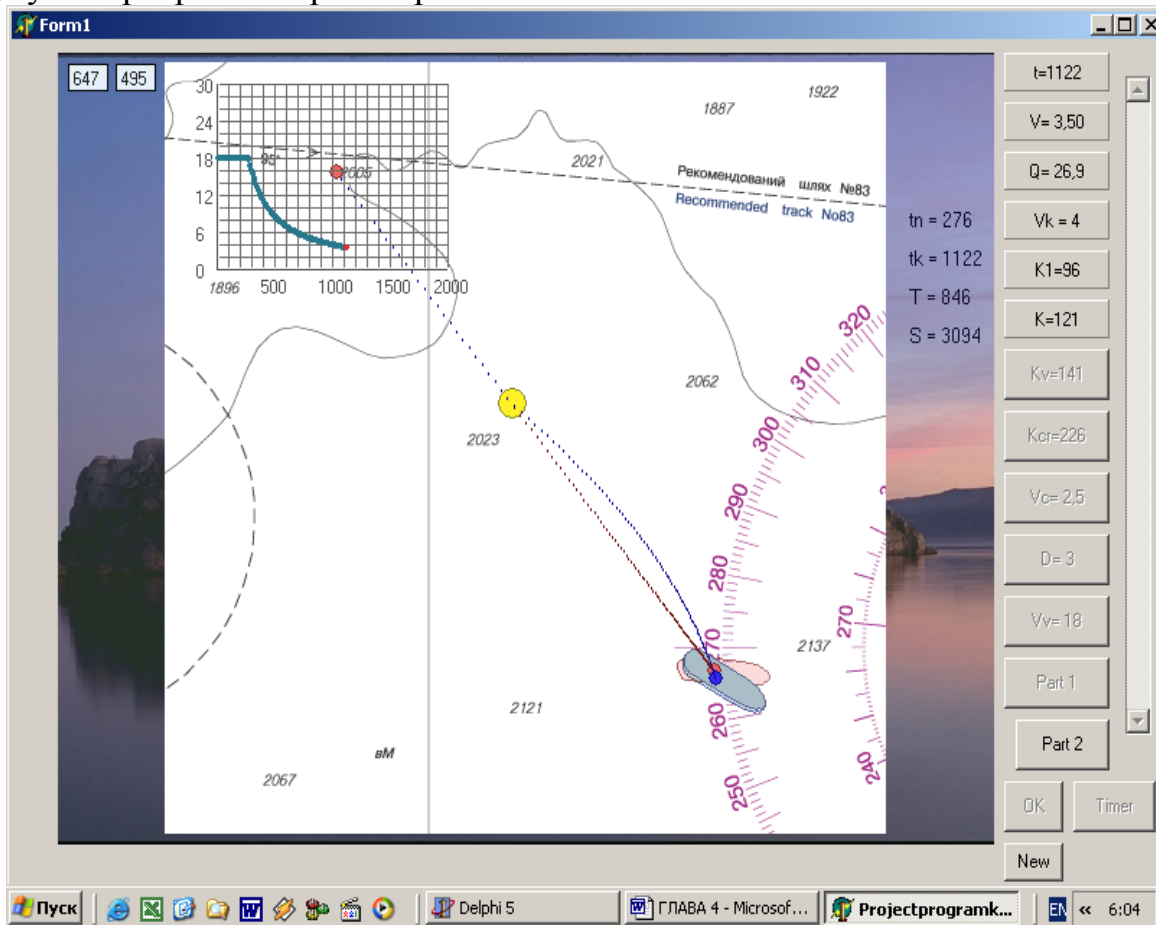


Рис. 5. Результати моделювання пасивного гальмування

Результати імітаційного моделювання активного гальмування судна показані на рис. 6. 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. 6.

Отже, 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.

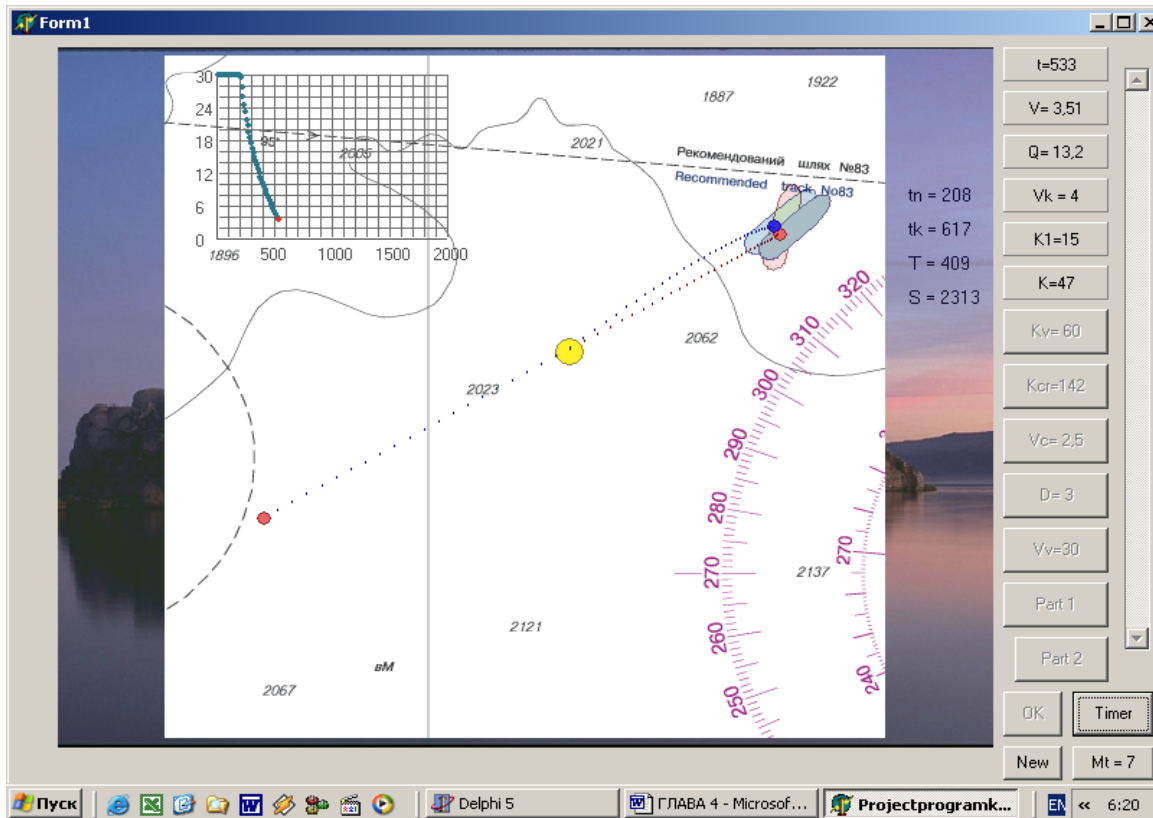


Рис. 6. Результати активного гальмування

Таким чином, в розділі розглянута задача розробки модулів програми суднової інформаційної комп'ютерної системи, яка вирішує основні розглянуті задачі. Матеріали розділу опубліковано у роботах [9, 11, 12, 13, 16].

У **п'ятому розділі** розглянуті процедури верифікації динамічних моделей маневрування судна експериментальними даними натурного експерименту, чому присвячена третя складова задача дисертаційного дослідження. Визначені постійні часу T_1 і T_2 поворотності судна з натурних спостережень в реальних умовах його експлуатації, для чого були одержані експериментальні дані повороту судна управо і вліво при кутах кладки керма 5, 10 і 15 градусів. Причому кожний з шести вказаних маневрів проводився по кілька разів в максимально схожих погодних умовах за відсутності течії. У табл. 2 приведені характеристики натурних спостережень.

Матеріали всіх серій по одному маневру усереднювали та одержували залежність приросту курсу від часу. Для динамічної моделі обертального руху судна третього порядку з експериментальних даних одержані значення параметрів T_1 , приймаючи відомими значення часу затримки t_z і сталої кутової швидкості повороту судна a_ω . Для апроксимації початкового експериментального матеріалу динамічною моделлю третього порядку і

Таблиця 2.

Дані натурних спостережень

Номер маневру	Поворот	Кладка керма	Швидкість судна	Число серій	Тривал. маневру	Стан завантажен.
1	управо	5	24	5	44	у баласті
2	вліво	5	24	5	44	у баласті
3	управо	10	21	5	40	з вантажем
4	вліво	10	21	5	40	з вантажем
5	управо	15	27	4	45	з вантажем
6	вліво	15	27	4	43	з вантажем

обчислення відповідних значень параметрів T_1 і T_2 використовувався метод найменших квадратів в припущенні нормального закону розподілу похибок вимірювань. В результаті була одержана система нелінійних рівнянь, для вирішення якої використовувався метод Ньютона. Результати розрахунків параметрів динамічної моделі обертального руху судна третього порядку приведені в табл. 3.

Таблиця 3.

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)
1	5	24	0	0,87	9,62	1,68
2	-5	24	0	0,88	9,63	1,67
3	10	21	0	1,27	8,87	1,53
4	- 10	21	0	1,29	8,88	1,54
5	15	27	13	2,64	9,63	1,24
6	- 15	27	12	2,51	7,44	0,81

В розділі 5 розглянуто альтернативний підхід для визначення інерційно-гальмівних характеристик судна. У дисертації показано, що весь процес гальмування розділяється по швидкості на декілька елементарних ділянок і допускається, що на кожній ділянці робота сил опору і упору гвинта рівна роботі їх середніх величин R_{cp} і R_{cp} . В результаті одержані вирази часу гальмування t і довжини вибігу S :

$$t = \frac{(1+k)mV_i}{R_{cpi,i+1} + P_{cpi,i+1}}, \quad S = \frac{(1+k)mV_n^2}{2(R_{cpi,i+1} + P_{cpi,i+1})}.$$

В розділі проведено розрахунок довжини і часу вибігу при активному гальмуванні теплохода «Уелен», при початкових даних $D_{груз} = 22100$ 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 виконаний з повного переднього ходу на повний хід назад. Коефіцієнт засмоктування при розгоні на задньому ходу $\tau = 0,40$. Результати розрахунку гальмівних характеристик представлені в табл. 4.

Таблиця 4.

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

При натурних випробуваннях були одержані наступні результати: $S_n = 1215$ м і $t_n = 4,9$ мін. Відхилення розрахункових від натурних величин знаходяться в межах точності, визначуваної в РІС-89 (10% СКП).

Нагадаємо, що розрахунок довжини і часу вибігу при активному гальмуванні даного судна по стандартній методиці дав наступні результати: $S = 1242$ м, $t = 5,3$ мін. З порівняння одержаних результатів видно, що обидві методики є, практично, рівноточними.

Розрахунок інерційно-гальмівних характеристик контейнеровозу “ELQUI” за допомогою альтернативного підходу представлений в завершенні п'ятого розділу.

Результати розрахунків інерційно-гальмівних характеристик представлені в табл. 5 для завантаженого судна і за її даними побудовані залежності вибігу $S=f(V)$ і часу $t=f(V)$ активного гальмування, які представлені на рис. 7 (для вибігу) і рис. 8 (для часу).

Таблиця 5.

Результати розрахунку для завантаженого судна

V_i , вузли	V_i , м/с	V_{i+1} , м/с	V_{cp} , м/с	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

З таблиці 7 на рис. 9 представлена залежність вибігу активного гальмування від швидкості для судна в баласті, а на рис. 10 показаний вплив швидкості судна на час вибігу.

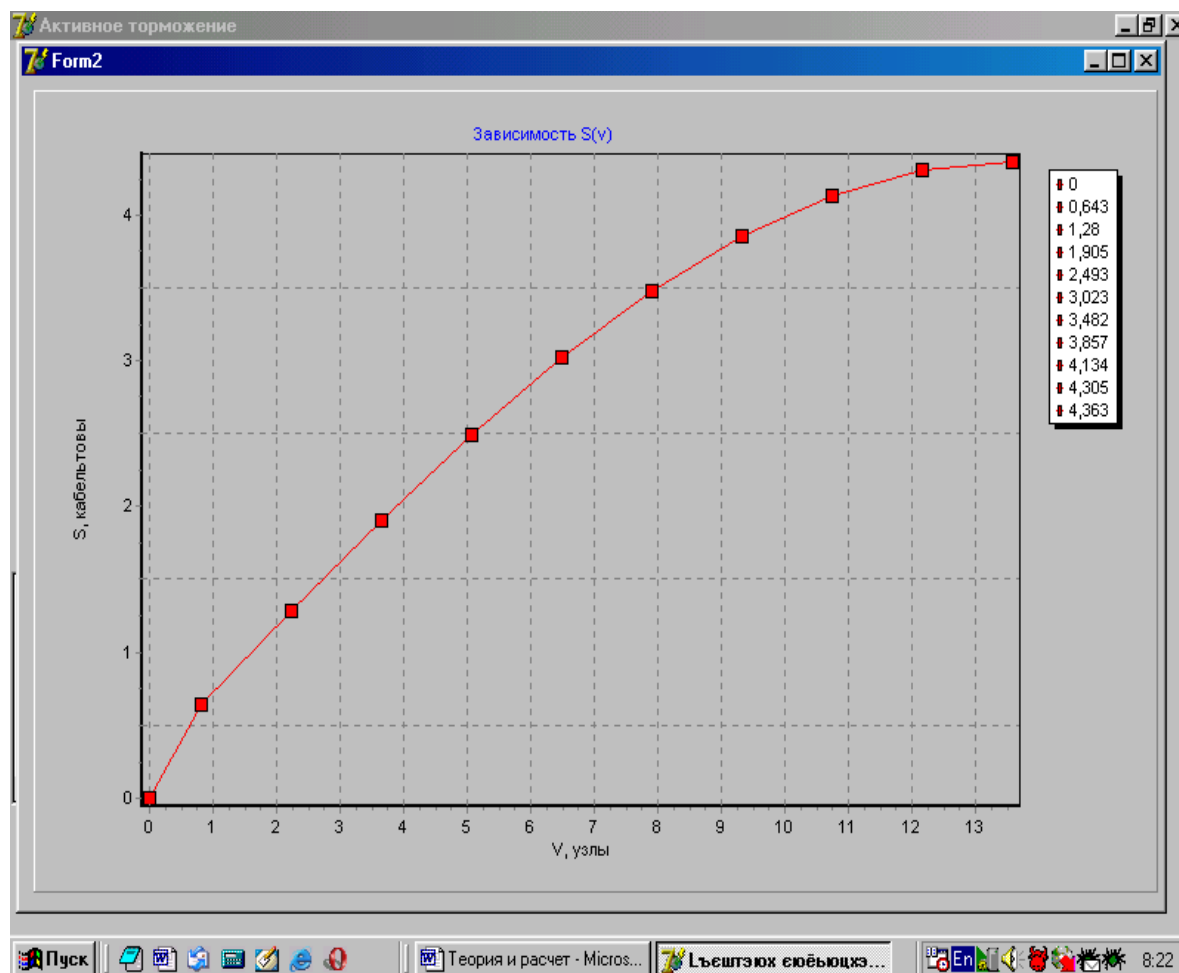


Рис. 7. Залежність $S(V)$ завантаженого судна при активному гальмуванні

Таблица 7.

Результаты розрахунку для судна в баласті

V_i уз	V_i м/с	V_{i+1} м/с	$V_{ср}$ м/с	Сум. S кбт	Сум. t кбт
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

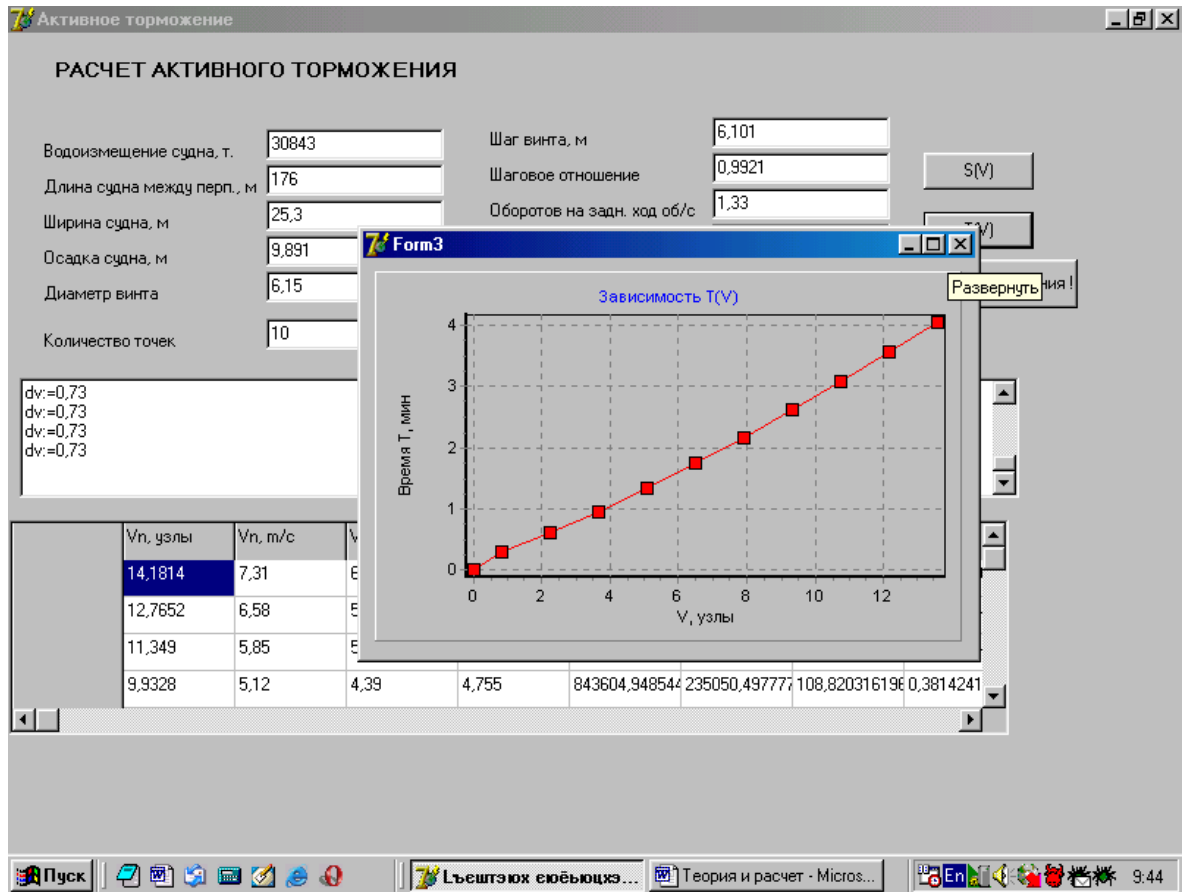


Рис. 8. Залежність часу активного гальмування завантаженого судна

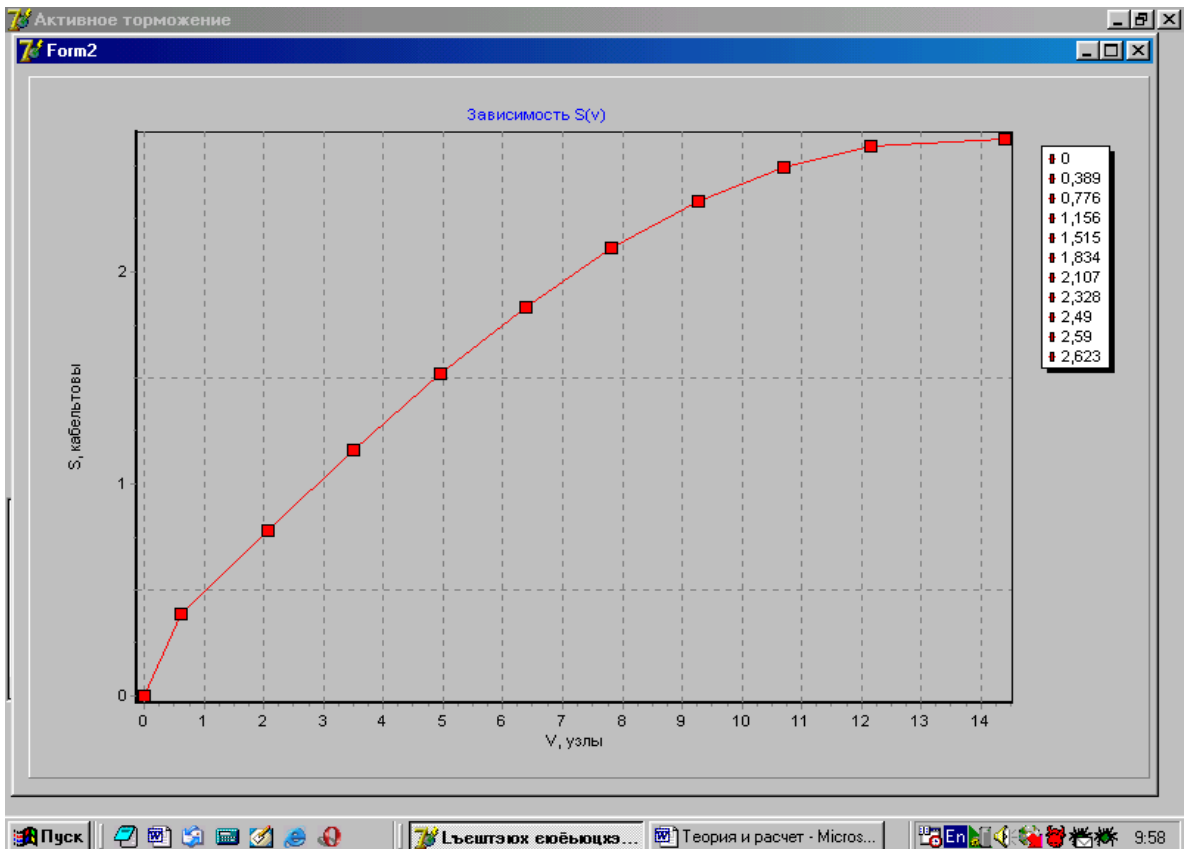


Рис. 9. Залежність шляху активного гальмування для судна в баласті

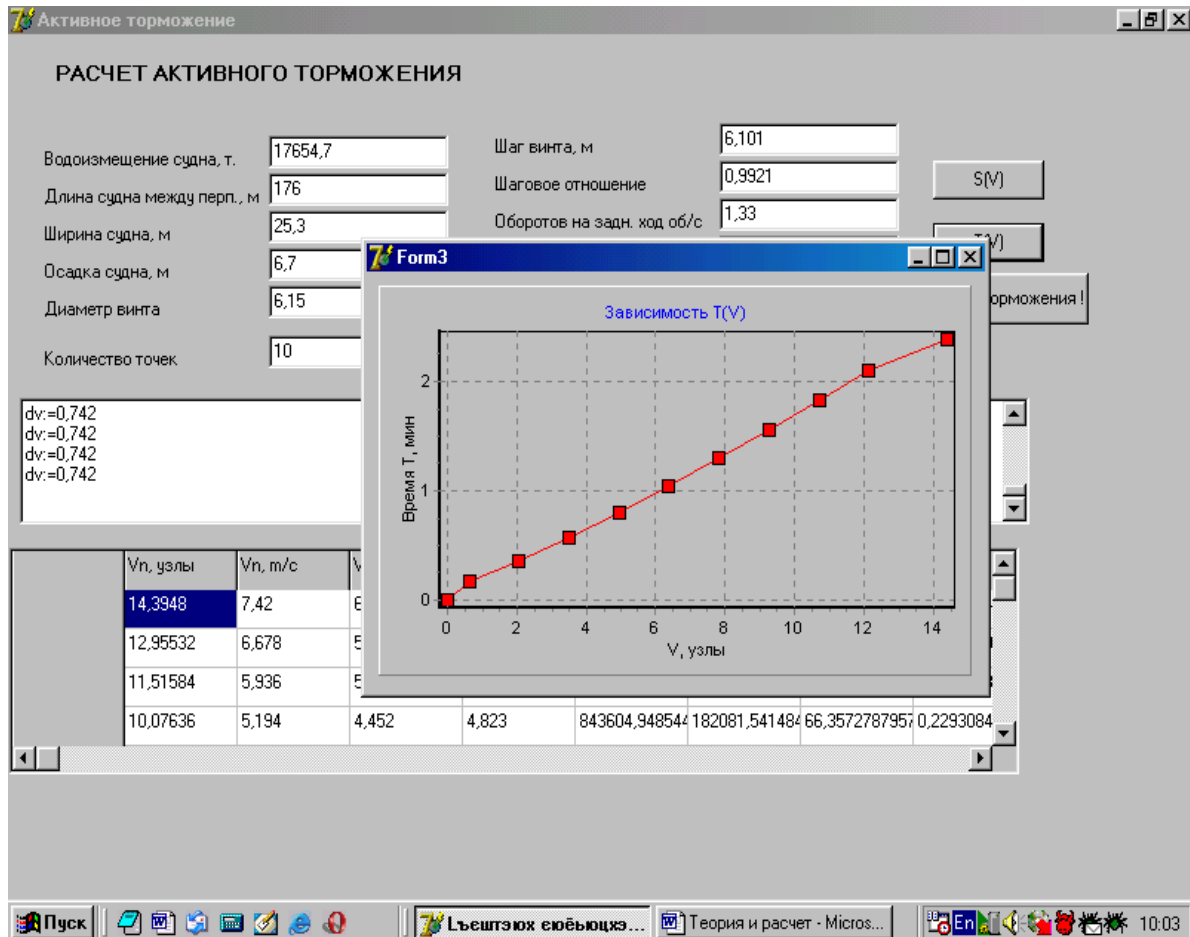


Рис. 10. Залежність часу активного гальмування для судна в баласті

Таким чином, в розділі розглянуті процедури верифікації динамічних моделей маневрування судна експериментальними даними натурного експерименту. Матеріали розділу опубліковано у роботах [1-5, 10, 15].

ВИСНОВКИ

Вирішення проблеми забезпечення безпеки судноводіння сприяє зменшенню кількості аварійних випадків і, як наслідок, зниженню шкоди людському життю, навколишньому середовищу, майну і виробничим процесам.

У дисертації одержано теоретичне узагальнення і нове вирішення задачі забезпечення безпеки судноводіння шляхом розробки нового методу вибору визначення параметрів маневру судна за допомогою процедур, реалізованих в комп'ютерному модулі, який відрізняється врахуванням динаміки судна і верифікацією динамічних моделей маневрування судна даними натурного експерименту. У результаті проведеного наукового дослідження:

– вперше розроблені способи розрахунку параметрів маневрів судна залежно від його динаміки;

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

Результати дисертаційного дослідження впроваджені приватним вищим навчальним закладом «Інститут післядипломної освіти» «Одеський морський тренажерний центр» для підготовки судноводіїв, кріюінговою компанією «ВіШіпс Україна» для навчання, підготовки і перепідготовки офіцерів морських суден, а також у навчальних програмах судноводіїв з дисциплін кафедри Управління судном НУ "ОМА", що підтверджується відповідними актами.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Яркін П.І. Определение характеристик активного торможения судна. Альтернативный подход/ Яркін П.І., Калиниченко Е.В. // Сб. научн. трудов: «Судовождение», ОНМА. –Одесса: ФЕНИКС, 2003. – Вып. 6. – С. 159-165.
2. Яркін П.І. Расчет безопасной скорости и минимально-допустимого расстояния сближения судов/ Яркін П.І., 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-
5. Яркін П.І. Определение характеристик разгона и подтормаживания судна. Альтернативный подход/ Яркін П.І., 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. Калиниченко Е.В. Определение времени и скорости разгона судна на задний ход // Материалы международной научн.-техн. конференции. Часть 1. ОНМА, 2004.

11. 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.

12. 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.

13. 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.

14. 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.

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.

АНОТАЦІЯ

Калініченко Є.В. Вдосконалення алгоритмів інформаційного забезпечення маневрування суден. – Рукопис. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. Спеціальність 05.22.13 – навігація та управління рухом. Національний Університет "Одеська морська академія", Одеса, 2017 р.

У роботі розглянуто теоретичні основи маневрування судна, одержано математичні моделі, що враховують динаміку судна при зміні його курсу і

швидкості. Особливості поворотності судна описані п'ятьма моделями його обертального руху.

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

Одержано коректні вирази, що характеризують рух судна при активному і пасивному гальмуванні. Розглянута задача зупинки судна в заданій позиції 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.

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

В завершені роботи приведені способи визначення параметрів маневру судна на базі експериментальних даних, одержаних в натурних спостереженнях. Моделювання повороту судна з одержаними параметрами показали хорошу збіжність результатів моделювання з експериментальним матеріалом.

Розглянуто альтернативний метод розрахунку параметрів активного і пасивного гальмування судна: дистанції і часу вибігу судна. За допомогою запропонованого альтернативного методу проведений розрахунок параметрів гальмування теплохода «Уелен», значення яких практично співпадають із значеннями, одержаними при швартових випробуваннях. Виконаний розрахунок інерційно-гальмівних характеристик контейнеровоза «ELQUI» для завантаженого стану і в баласті. Представлені в табличному вигляді залежності величини і часу вибігу судна при активному гальмуванні від швидкості судна перед гальмуванням. Крім табличних залежностей приведені графічні криві, що відображають залежність параметрів від швидкості судна, одержаних за допомогою комп'ютерної програми.

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

АННОТАЦІЯ

Калиниченко Е.В. Совершенствование алгоритмов информационного обеспечения маневрирования судов. – Рукопись. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Специальность 05.22.13 – навигация и управление движением. Национальный Университет "Одесская морская академия", Одесса, 2017 г.

В работе рассмотрены теоретические основы маневрирования судна, получены математические модели, учитывающие динамику судна при изменении его курса и скорости. Особенности поворотливости судна описаны пятью моделями его вращательного движения с разной степенью учета существенных факторов, вплоть до учета времени перекладки пера руля, которые с разным уровнем адекватности отображают движение судна в зависимости от угла перекладки пера руля.

Получены экспериментальные данные вращательного движения судна, и показано, что с приемлемой для практических нужд точностью движение судна при повороте может быть описано третьей динамической моделью, в которой изменение курса судна формализуется дифференциальным уравнением третьего порядка. Рассмотрены четыре задачи определения параметров поворота судна при программном изменении его курса и в случае отклонения от опасно сближающейся цели. При этом рассмотрена ситуация небольших изменений курса, когда можно полагать скорость судна при повороте неизменной, и ситуация значительного поворота судна с падением скорости на циркуляции.

Получены корректные выражения, характеризующие движение судна при активном и пассивном торможении. Рассмотрена задача остановки судна в заданной точке при активном и пассивном торможении с учетом течения в районе маневрирования. Аналитические выражения для расчета параметров маневров представлены в виде, удобном для применения численных методов расчета.

Рассмотрена программная реализация шести наиболее важных задач маневрирования судна с учетом характеристик поворотливости и инерционно-тормозных характеристик, которые могут быть использованы в судовой компьютерной системе обеспечения маневрирования судна. Для каждой из задач разработан алгоритм ее решения и на его базе разработан модуль компьютерной программы, позволяющий рассчитать параметры маневра и произвести его имитационное моделирование.

В заключение работы приведены способы определения параметров маневра судна из экспериментальных данных, полученных в натурных наблюдениях. В качестве маневров судна рассмотрены его повороты, активное и пассивное торможение и подтормаживание. Моделирование поворота судна с полученными параметрами показали хорошую сходимость результатов моделирования с экспериментальным материалом.

Рассмотрен альтернативный метод расчета параметров активного и пассивного торможения суда: дистанции и времени выбега судна. Получены аналитические выражения для расчета времени и дистанции выбега судна. С помощью предложенного альтернативного метода произведен расчет параметров торможения теплохода «Уэлен», значения которых практически совпадают со значениями, полученными при швартовых испытаниях. Рассмотрено влияние попутного и встречного течения на длину тормозного

пути судна, получены формульные выражения для расчета характеристик торможения. Произведена их оценка для конкретного судна. Выполнен расчет инерционно-тормозных характеристик контейнеровоза “ELQUI” для загруженного состояния и в балласте. Представлены в табличном виде зависимости величины и времени выбега судна при активном торможении от скорости судна перед торможением, а также представлены параметры подтормаживания судна. Помимо табличных зависимостей приведены графические кривые, отображающие зависимость параметров от скорости судна, полученных с помощью компьютерной программы.

Ключевые слова: безопасность судовождения, маневрирование судов, динамические модели поворотливости судна, математические модели торможения, информационное обеспечение маневрирования судна.

ANNOTATION

Kalinichenko Y.V. Perfection of algorithms of the informative providing of manoeuvring of vessels. The dissertation is the manuscript. The dissertation on competition of graduate degree of candidate of engineering sciences. Speciality 05.22.13 is navigation and traffic control. National University "Odessa marine academy", Odessa, 2017.

Theoretical bases of maneuvering of ship are considered in work, mathematical models taking into account the dynamics of ship at the change of his course and speed are got. The features of agility of ship are described by five models of his rotatory motion.

Experimental information of rotatory motion of ship is got, and it is shown that with exactness acceptable to the practical needs motion of ship at a turn can be described by the third dynamic model.

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

Programmatic realization of six most essential tasks of maneuvering of ship taking into account descriptions of agility and inertia-brake descriptions which can be used in the ship computer system of providing of maneuvering of ship is considered.

In conclusion of work the methods of determination of parameters of maneuver of ship from the experimental information got in the model supervisions are resulted.. With the got parameters showed the design of turn of ship good of results of design with experimental material.

The alternative method of calculation of parameters of the active and passive braking of vessel is considered: distance and time of sailing of ship. By the offered alternative method the calculation of parameters of braking of the motor ship «Uelen» is produced, the values of which practically coincide with the values got at the mooring tests. The calculation of inertia-brake descriptions of m/v «ELQUI» for the loaded state and in a ballast is executed. Dependences of size and time of sailing of ship at the active braking from speed of ship before braking are represented in a tabular kind. Besides tabular dependences graphic curves representing dependence of parameters on speed of ship are resulted, got by the computer program.

Keywords: safety of navigation, maneuvering of vessels, dynamic models of agility of ship, mathematical models of braking, informative providing of maneuvering of ship.

Підп. до друку 17.10.2017. Формат 60x84/16. Папір офсет.
Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 1,4.
Тираж 100 пр. Зам. № И17-10-39

Національний університет «Одеська морська академія»
65029, м. Одеса, Дідріхсона, 8.
Тел./факс (0482) 34-14-12
publish-r@onma.edu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 1292 від 20.03.2003