

Национальный университет «Одесская морская академия»

На правах рукописи

Бужбецкий Ростислав Юрьевич



УДК 656.61.052.484

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ
СТОЛКНОВЕНИЯ СУДОВ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ ИХ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ**

Специальность 05.22.13 – навигация и управление движением

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
д. т. н., профессор Цымбал Н.Н.

Одесса – 2016

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПО ПРОБЛЕМЕ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЙ СУДОВ И ВЫБОР ОСНОВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ИССЛЕДОВАНИЯ	10
1.1. Анализ основных концепций формализации процесса расхождения опасно сближающихся судов.....	10
1.2. Основные направления диссертационного исследования.....	38
1.3. Выводы по первой главе	40
ГЛАВА 2. МЕТОДОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОН- НОГО ИССЛЕДОВАНИЯ.....	42
2.1. Обоснование темы научного исследования	42
2.2. Методы исследования, применяемые в диссертационной работе.....	44
2.3. Методика проведения научного исследования.....	50
2.4. Выводы по второй главе	52
ГЛАВА 3. ТИПЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СУДОВ ПРИ ОПАСНОМ СБЛИЖЕНИИ И ИХ ФОРМАЛИЗАЦИЯ.....	54
3.1. Формальное описание взаимодействия судов при возникновении угрозы столкновения.....	54
3.2. Типы взаимодействия, возникающие при координации процесса расхождения с помощью МППСС-72.....	62
3.3. Формализация типов взаимодействия.....	70
3.4. Выводы по третьей главе	94
ГЛАВА 4. ОЦЕНКА КООРДИНАЦИИ БИНАРНЫХ ВЗАИМО- ДЕЙСТВИЙ СУДОВ.....	95
4.1. Координируемость бинарных взаимодействий.....	95

4.2. Изменение дистанции кратчайшего сближения при одновременном повороте судна и цели	102
4.3. Анализ координируемости бинарных взаимодействий, которые регламентируются МППСС-72.....	110
4.4. Другие типы взаимодействий судов при расхождении.....	124
4.5. Выводы по четвертой главе	127
ГЛАВА 5. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ.....	129
5.1. Алгоритм идентификации текущей ситуации согласно требованиям МППСС-72 и определение реализовавшегося типа взаимодействия.....	129
5.2. Имитационное моделирование идентификации ситуаций опасного сближения и реализовавшегося бинарного взаимодействия	134
5.3. Применение имитационного моделирования для исследования зависимости изменения дистанции кратчайшего сближения от изменения курса судна.....	147
5.4. Имитационное моделирование зависимости дистанции кратчайшего сближения от одновременного изменения курса судна и курса цели.....	151
5.5. Выводы по пятой главе	158
ВЫВОДЫ.....	159
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	162
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	172
А1. Результаты имитационного моделирования изменения дистанции кратчайшего сближения при изменении только курса судна.....	172
А2. Сравнительная характеристика результатов имитационного моделирования и аналитического расчета изменения дистанции кратчайшего сближения при изменении курса судна.....	196
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	210

Б.1. Программный код процедуры идентификации начальной ситуации.....	210
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Акты внедрения результатов диссертации.....	229

В В Е Д Е Н И Е

Актуальность темы. В настоящее время все большее внимание уделяется обеспечению безопасности судоходства, повышая его надежность и снижая вероятность возникновения аварийных случаев, что особенно актуально в стесненных водах. Наличие навигационных опасностей и интенсивные судопотоки в значительной мере осложняют судовождение в стесненных водах и создают повышенные риски возникновения аварийных ситуаций.

В случае опасного сближения судов возникает ситуационное возмущение и взаимодействие, которое предполагает совместные согласованные действия судов по предупреждению возможного столкновения.

При возникновении угрозы столкновения судов характер маневра их расхождения определяют Международные правила предупреждения столкновений судов (МППСС-72), которые содержат систему бинарной координации, регламентирующую поведение судов для безопасного расхождения.

Однако, вопросы формализации взаимодействия судов и особенно координируемости взаимодействий мало исследованы, хотя проблема очень актуальна, так как ее решение позволяет обеспечить более высокий уровень безопасности расхождения судов, что обуславливает актуальность и перспективность данного диссертационного исследования.

Связь работы с научными программами, планами, темами.

Работа выполнялась в соответствии с положениями Транспортной стратегии Украины на период до 2020 г. (распоряжение Кабинета Министров Украины от 20.10.2010 г., №2174-р), Стратегии развития морских портов Украины на период до 2015 г. (распоряжение Кабинета

Министров Украины от 16.07.2008 г. №1051-р с изменениями, внесенными согласно с распоряжением Кабинета Министров Украины № 1561-р от 07.10.2009 г.), решение Совета национальной безопасности и обороны Украины от 16.05.2008 г. "О мероприятиях по обеспечению развития Украины как морского государства" и Указу Президента Украины от 20.05.2008 г. №463/2008, а также тесно связанная с научно-исследовательской работой Одесской национальной морской академии, а именно с госбюджетной научно-исследовательской работой "Разработка методов обеспечения безаварийного плавания судов" (№ ГР 0111U001610), в которых соискатель выполнил отдельный раздел.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационного исследования является обеспечение безопасности расхождения судов в ситуации опасного сближения путем разработки метода, учитывающего особенности их взаимодействия.

Для этого принята гипотеза о том, что безопасный маневр уклонения судна от опасно сближающейся цели можно обеспечить, учитывая особенности их взаимодействия.

Главной задачей исследования является разработка алгоритма выбора безопасного маневра расхождения судов с учетом особенности их взаимодействия.

Для решения главной задачи были рассмотрены следующие составные задачи:

- формализация бинарных взаимодействий судов в ситуациях опасного сближения;
- разработка способа идентификации начальной ситуации опасного сближения и определения возникающего бинарного взаимодействия;
- создание метода определения координируемости бинарных взаимодействий судов в ситуациях опасного сближения.

Объектом исследования является предупреждение столкновений судов.

Предметом исследования являются методы выбора безопасного маневра расхождения судна.

Методы исследования:

- дедукции – при анализе основных подходов решения проблемы безопасности судовождения;
- исследование операций – для методологического обеспечения диссертационного исследования и для декомпозиции главной задачи диссертации на независимые составные задачи;
- математического анализа – для определения зависимостей изменения дистанции кратчайшего сближения от курсов взаимодействующих судов;
- теории координации - для определения координируемости взаимодействия судов в ситуациях опасного сближения.

Научная новизна полученных результатов заключается в том, что разработан новый метод идентификации начальной ситуации опасного сближения судов, определения ее координируемости и регламентируемых уклонений, который отличается учетом особенностей взаимодействия судов в реализовавшейся ситуации и позволяет произвести выбор безопасного маневра.

Впервые:

- предложен метод формального описания взаимодействий судов при опасном сближении и возникновении угрозы столкновения;
- разработан способ идентификации ситуаций опасного сближения МППСС-72 и реализовавшегося бинарного взаимодействия;
- предложен метод оценки координации бинарных взаимодействий судов при опасном сближении;

- получены зависимости изменения дистанции кратчайшего сближения только от изменения курса судна, а также при одновременном повороте судна и цели;
- разработана формальная модель МППСС-72 и определена координируемость взаимодействий, регламентируемых МППСС-72.

Практическое значение полученных результатов Практическое значение диссертационной работы определяется тем, что ее основные результаты могут быть применены судоводителями при расхождении, использованы разработчиками при разработке новых поколений САРП, а также при создании современных морских тренажеров.

Результаты диссертационного исследования внедрены: в компании ООО «Морское Агентство «Украина» при подготовке грузовых помощников капитана (акт от 29.05.2014 г.), центре подготовки моряков – «Авант» – для предрейсовой подготовки судоводителей (акт от 27.05.2014 г.), а также в учебных программах дисциплин ОНМА: специальности судовождения (акт от 16.09.2015 г.).

Личный вклад соискателя. Все результаты диссертационной работы выполнены соискателем самостоятельно без соавторов.

Используя системный подход, соискатель сформулировал цель и главную задачу диссертационного исследования, выполнил обзор и анализ литературных источников по проблеме обеспечения безопасности маневров расхождения, обосновал методологическое обеспечение диссертации, разработал имитационную модель проверки корректности основных результатов проведенного исследования и выполнил имитационное моделирование, произвел интерпретацию полученных результатов исследований и получил новые научные результаты. Самостоятельно написал диссертацию и автореферат, а также выполнил

отдельный раздел в госбюджетной научно-исследовательской работе с государственной регистрацией.

Из 11 опубликованных работ в соавторстве написаны три статьи, в которых соискателю принадлежат такие результаты: аналитическое описание требований МППСС-72 [54], описание координации взаимодействия судов при расхождении [55] и характеристика стратегий расхождения судов, учитывающих требования МППСС-72 [84].

В монографии [100] соискателю принадлежат введение и глава 1, а в книге [101] оценка системы бинарной координации взаимодействия судов.

Апробация результатов диссертации. Результаты диссертационной работы докладывались на трех научно-технических конференциях:

- «Судовождение: перевозки, технические средства, безопасность», 14-15 ноября 2012 г., г.Одесса;
- «Эффективная и безопасная эксплуатация морских судов и сооружений», 2-4 октября 2013 г., г.Севастополь;
- «Судовождение: перевозки, технические средства, безопасность», 19-20 ноября 2013 г., г.Одесса;

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в шести статьях в изданиях, входящих в перечень изданий, разрешенных ДАК Украины для публикации результатов диссертационных исследований, а также в монографии и в сборниках материалов трех конференций.

Структура работы. Работа состоит из введения, пяти глав, приложений, списка использованных литературных источников 97 наименований. Общий объем работы – 232 стр., в том числе: 161 стр. основного текста, 61 стр. приложений, 10 стр. списка литературы, содержит 53 рис. и 37 табл.

ГЛАВА 1

АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПО ПРОБЛЕМЕ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЙ СУДОВ И ВЫБОР ОСНОВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Анализ основных концепций формализации процесса расхождения опасно сближающихся судов

Проблемой высокого уровня сложности является разработка и внедрение перспективных систем предупреждения столкновений, предназначенных для анализа текущей навигационной ситуации и в случае опасного сближения выбирать безопасный маневр расхождения с учетом всех имеющихся существенных факторов.

Решение данной проблемы требует комплексного рассмотрения многих задач, каждая из которых носит характер самостоятельного исследования и создает предпосылки для решения общей проблемы.

Математическое описание процесса судовождения, степень адекватности которого должна удовлетворять практическим требованиям, является одним из существенных аспектов данной проблемы.

Специалисты моряки и специалисты по теории управления предпринимали попытки построить корректную математическую модель процесса расхождения судов.

В настоящее время сложились различные подходы к аналитическому описанию процесса расхождения, поэтому рассмотрим некоторые аспекты указанной проблемы, изложенные в ряде публикаций отечественных и зарубежных ученых.

В работах [1,2] рассмотрены вопросы предупреждения столкновений судов при их опасном сближении.

Подход к решению задачи выбора оптимального маневра судна при расхождении методами теории оптимальных дискретных процессов предложен учеными Томского университета в работах [3, 4]. Предлагаемую в этом случае математическую модель процесса расхождения будем именовать первой моделью.

При постановке задачи делается допущение об отсутствии внешних возмущений и неизменности скоростей и курсов встречных судов. Учитываются ограничения по безопасному расхождению со встречными судами, максимальному изменению начального курса, максимальной величине угловой скорости и боковому отклонению.

Решением задачи является локально оптимальная безопасная траектория расхождения судна с использованием компьютерной техники.

Постановка задачи производится с помощью следующей математической формулировкой. В районе плавания имеется n судов A_j , движение которых характеризуется заданными скоростями V_j . Расхождение оперирующего судна A с остальными судами A_j считается безопасным в интервале времени $[0 - T]$, если минимальная дистанция $\min d^{(j)}(t)$ между оперирующим судном и каждым из судов A_j превосходит допустимую дистанцию сближения между судами d_0 , т.е.

$$\min d^{(j)}(t) \geq d_0.$$

В задаче рассматриваются три критерия оптимальности:

- критерий минимального среднеквадратического отклонения судна от заданной траектории (МОТ);
- критерий минимума переключений руля (МПР);
- критерий минимального среднеквадратического отклонения судна от заданного курса (МОК).

В качестве уравнений движения судна используются кинематические уравнения. Также накладываются ограничения на величину угловой скорости судна и имеется возможность ограничивать текущие значения курса и координат оперирующего судна A .

Скорость судна считается постоянной, а управление судна производится путем изменения его угловой скорости $u(t)$, которая рассматривается в качестве управляющего воздействия судна. Значения $u(t)$, удовлетворяющие принятым допустимым ограничениям, называются допустимыми управлениями.

Оптимизационная задача предусматривает среди допустимых управляющих воздействий $u(t)$ найти оптимальное значение $u^*(t)$ и оптимальную фазовую траекторию $x^*(t)$, которая обеспечивает минимум функционала:

$$\frac{1}{T} \int_0^T \varphi^2(x, u, t) dt \Rightarrow \min,$$

где подынтегральная функция φ принимает разные значения для различных критериев оптимальности, причем:

для критерия оптимальности МПР $\varphi = u(t)$;

для критерия оптимальности МОТ $\varphi = x_1(t)$;

для критерия оптимальности МОК $\varphi = \gamma(t)$.

Для сформулированной постановки задачи справедлива теорема о достаточных условиях существования оптимального управляющего воздействия, т. е. оно существует, если для данного начального состояния $x(0)$ существует хотя бы одно допустимое управление.

Из-за вида критерия оптимальности и принятых ограничений аналитическое решение задачи невозможно и приводится алгоритм

численного решения задачи, использующий аппарат теории оптимальных дискретных процессов.

Алгоритмы поиска оптимального управляющего воздействия $u^*(t)$ по каждому из критериев (МПР, МОТ, МОК) идентичны и построены с помощью метода возможных направлений, реализованного на вычислительной технике. С помощью алгоритмов вначале находится хотя бы одно допустимое управляющее воздействие $u(t)$, удовлетворяющее принятым ограничениям, относительно которого методом итераций затем производится поиск оптимального управляющего воздействия без нарушения принятых ограничений. Характерно, что при обновлении информации задача решается заново, т. е. алгоритм работает циклически.

Вопросы расхождения оперирующего судна с одиночной целью исследовались сотрудниками Института проблем управления в работах [5-7], причем в работах не учитывались инерционные характеристики маневрирующего судна и ограничения на навигационные опасности. При этом предполагалась неизменность параметров движения встречной цели.

В работе [5] показано, что аналитический метод определения безопасных курсов и скоростей более эффективный по сравнению с существующими методами перебора и комбинированным методом при расчете на ЭВМ маневра расхождения.

Соотношения между истинными и относительными параметрами движения оперирующего судна для различных случаев соотношения скоростей судна и цели подробно исследованы в работе [6]. В работе получены аналитические выражения, описывающие допустимые области безопасных курсов и скоростей маневрирующих судов в функции их начального относительного положения и параметров движения.

В работе [7] рассмотрена ситуация обгона цели оперирующим судном и получены аналитические выражения для расчета оптимальной траектории обгоняющего судна по критерию минимума времени обгона и

выхода судна в заданную точку. Задача решена с помощью методов оптимального управления.

Проблеме расхождения судов и разработки системы предупреждения столкновений судов посвящены работы [10-21].

Рассматриваемый подход базируется на методе нелинейной интегральной инвариантности [8, 9], который позволяет в общем случае синтезировать управление некоторой динамической системой, обеспечивающее инвариантность части ее фазовых координат относительно имеющегося внешнего возмущения F . Используемую математическую модель будем называть второй моделью.

Формализация процесса расхождения судов с помощью метода нелинейной интегральной инвариантности предлагалась следующим образом. Внешним возмущением принимался $2n$ -мерный вектор скоростей V и курсов K n встречных судов, а в качестве инвариантных координат выбирались расстояния от оперирующего судна до встречных судов. Для наихудших с точки зрения процесса расхождения значений курсов и скоростей каждого из встречных судов производится формирование допустимой области одношаговых стратегий (уклонений или изменения скорости) оперирующего судна.

Предлагаемая система предупреждения столкновений судов рассматривается как эргатическая система, причем ЭВМ представляет судоводителю область допустимых одношаговых маневров, а судоводитель производит выбор, как лицо принимающее решение, сообразуясь со своим отношением предпочтения.

Используя результаты анализа работ [10-21], изложим рассматриваемый подход к описанию процесса расхождения, в основном базируясь на работах [10, 11].

Учет МППСС-72 в предлагаемом подходе производится в форме задачи выбора, которая задается парой $\langle X, S \rangle$, где $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}$ –

множество допустимых альтернатив, задаваемых функциями от параметров движения сближающихся судов, причем x_1 - отворот судна вправо; x_2 - уменьшение скорости; x_3 - отворот судна влево; x_4 - увеличение скорости. Второй параметр пары S – множество функций выбора альтернатив в различных ситуациях сближения, которые необходимо построить, считая их функциями формального аргумента:

$$S = \{S(B_i)\}, \quad (i = 1, \dots, n)$$

где B_i - подмножества судов, для которых выполняется маневр.

С учетом того, что МППСС-72 применяется при расхождении только двух судов, необходимо рассмотреть систему бинарных отношений на множестве всех наблюдаемых судов и композиции, порождаемых ими функций.

Если $V = \{B_i\}$, ($i = 1, \dots, n$) – множество всех наблюдаемых судов то предлагается определить бинарные отношения, которые выделяют подмножества всех попарно сближающихся судов:

$$R^D \subseteq V \times V : b_i R^D b_j \Leftrightarrow D_{кр}(b_i, b_j) < D_{дор}.$$

Фиксируется судно, относительно которого необходимо решать задачу выбора, например b_1 , и выделяется множество сближающихся с ним судов, которое обозначается V_1^D :

$$V_1^D \subseteq V : b_i \in V_1^D \Leftrightarrow b_1 R^D b_i \quad \forall b_i \in V. \quad (1.1)$$

На подмножестве V_1^D задается система бинарных отношений:

$$R^1 = \{R_i^1\} : R_i^1 \subseteq b_i \times V_1^D, \quad (i = 1, \dots, 4)$$

где R_i^1 - множество судов $b_j \in V_1^D$, которым b_i должно уступить дорогу

отворотом вправо;

R_i^2 - множество судов $B_2^1 \subseteq B_1^D$, которым b_1 должно уступить дорогу уменьшением скорости или отворотом вправо;

R_i^3 - множество судов $B_3^1 \subseteq B_1^D$, которым b_1 должно уступить дорогу уменьшением скорости или отворотом влево;

R_i^4 - множество судов $B_4^1 \subseteq B_1^D$, по отношению к которым b_1 должно сохранить курс и скорость.

Так, как справедливо соотношение:

$$B_1^D = \bigcup_{i=1}^4 B_i^1 \quad \text{и} \quad B_i^1 \cap B_j^1 = \emptyset, \quad (i \neq j)$$

то выражение (1.1) задает разбиение на классы эквивалентности:

$$b_i \sim b_j \Leftrightarrow b_i \in B_k^1 \wedge b_j \in B_k^1.$$

Затем определяются стратегии уклонения на каждом классе ситуаций, т. е.:

$$\begin{aligned} S(b_i) &= \min x_1(b_1, b_i) && \forall b_i \in B_1^1, \\ S(b_i) &= \min x_1(b_1, b_i) \vee \min x_2(b_1, b_i) && \forall b_i \in B_2^1, \\ S(b_i) &= \min x_2(b_1, b_i) \vee \min x_3(b_1, b_i) && \forall b_i \in B_3^1, \\ S(b_i) &= \emptyset && \forall b_i \in B_4^1. \end{aligned}$$

Здесь $\min x_i$ означает выбор минимального из всех возможных значений маневра данного типа, обеспечивающего расхождение на заданном безопасном расстоянии между судами b_1 и b_i .

Для расхождения с множеством судов одного класса можно определить следующие функции:

$$\begin{aligned} S(B_1^1) &= \max(B_1^1) \min x_1, \\ S(B_2^1) &= \max(B_2^1) \min x_1 \vee \max(B_2^1) \min x_2, \\ S(B_3^1) &= \max(B_3^1) \min x_2 \vee \max(B_3^1) \min x_3, \end{aligned}$$

где $\max(B_1^1)\min x_j$ - означает выбор максимального значения маневра среди минимального для отдельных судов данного класса, обеспечивающих расхождение со всеми судами данного класса.

При анализе полученных соотношений возможно противоречие по отворотам вправо и влево. Для этого задаются функции выбора на объединениях различных классов в следующем виде:

$$S(B_1^1 \cup B_2^1) = \max(B_1^1 \cup B_2^1)\min x_1,$$

$$S(B_1^1 \cup B_3^1) = \max(B_3^1)\min x_1 + \max(B_1^1)\min x_2,$$

$$S(B_2^1 \cup B_3^1) = \max(B_2^1 \cup B_3^1)\min x_2,$$

где знак «+» означает последовательность выполнения маневров x_1 и x_2 .

В работах [13, 14] обсуждается вопрос применения двухэлементных маневров для случая, если множество безопасных одношаговых маневров окажется пустым. Двухэлементным маневром является маневр одновременного изменения курса и скорости или последовательного двукратного изменения курса через некоторый интервал времени.

Процедура поиска маневра расхождения с несколькими целями приводится в работе [13], причем маневр предусматривает одновременное изменение скорости и курса судна. В работе рассматривается множество U всех скоростей и курсов оперирующего судна, подмножествами которого являются множества его безопасных курсов и скоростей для каждой i -й цели, которые определяются по следующей формуле:

$$S^i = [(S_1^i \cup S_2^i) \cap S_3^i] \cup [(\bar{S}_1^i \cup \bar{S}_2^i) \cap \bar{S}_3^i] \cup S_4^i,$$

где S^i - множества безопасных курсов и скоростей оперирующего судна;
 $S_1^i, S_2^i, S_3^i, S_4^i$ - подмножества U , которые можно представить, как проекции на плоскость $V \times K$ фигур, образующихся при пересечении

поверхностей, описываемых некоторыми функциями в зависимости от параметров навигационного конфликта;

$\bar{S}_1^i, \bar{S}_2^i, \bar{S}_3^i$ - дополнения к подмножествам S_1^i, S_2^i, S_3^i .

Маневр, как выбор некоторой точки плоскости $V \times K$, удовлетворяющий требованиям безопасного расхождения со всеми целями, находится как пересечение всех множеств S^i , т. е. $S_\Sigma = \bigcap_{i=1}^n S^i$.

Анализ показывает, что схема применения метода нелинейной интегральной инвариантности, разработанная для одноэлементных маневров, не может быть применима для случая двухэлементных маневров.

Вопросы иерархии целевых установок эргатической системы управления судном обсуждается в работе [18], а в работе [11] рассматривается один из возможных подходов к формализации МППСС-72.

Работы [12, 15–17] посвящены применению метода нелинейной интегральной инвариантности для поиска допустимой области маневра расхождения судна, которая обеспечивает расхождение с n судами при самых неблагоприятных курсах и скоростях их движения.

Как отмечается в работе [10], эргатическая система предупреждения столкновений является многоцелевой системой, обладающей свойствами функциональной активности и функционального гомеостаза по отношению ко всему множеству функциональных вариантов поведения, направленных на достижение своих целей. Поэтому функции усиления свойства функциональной активности человека предлагается возложить на автоматические устройства.

Движение по маршруту для достижения некоторой области пространства (порта назначения) является конечной целью S_0 движения собственного судна. Формально это представляется следующим образом:

$$S_o = [\Phi(t, x_M) = 0],$$

где x_M - маршрутные координаты;

Φ - некоторый оператор.

Предупреждение столкновений со встречными судами с учетом различных ситуаций формализуется в виде других целей S_1, \dots, S_n движения собственного судна. Все ограничения на движение собственного судна предлагается записать в виде неравенства:

$$S_r = [\psi(t, x_M) \leq 0],$$

а подцели, гарантирующие безопасность расхождения с судами:

$$S_1 = [x_1, y_1 \in R_1],$$

.....

$$S_n = [x_n, y_n \in R_n],$$

где R_i - область безопасная для нашего судна по отношению к i - му судну.

Задача является корректной, если имеет место соотношение:

$$S_i \cap Q_x^{yb} \neq \emptyset \quad (i = 1, \dots, n),$$

где Q_x^{yb} - возможные поведения целей.

Возможные возмущения V (скорости целей) предлагается разделить на две составляющие: первая - вектор состояния среды V_o и скорость нашего судна V_1 ; вторая - параметры движения других судов V_n .

Изменение параметров движения нашего судна приводит к следующим уравнениям относительного движения:

$$\frac{dz_1}{dt} = F_{1q}(z_1, q, V_1)$$

.....

$$\frac{dz_n}{dt} = F_{nq}(z_n, q, V_n).$$

Функциональные уравнения обеспечивают инвариантность для относительного движения и записываются в следующем виде:

$$f_{xq}(x, q) = p_0$$

$$F_{1q}(z_1, q, V_1) = p_1$$

.....

$$F_{nq}(z_n, q, V_n) = p_n,$$

где левые части описывают требуемые движения, а правые – новые управляющие воздействия.

С помощью этих уравнений требуется построить гарантированные области управлений $p_0, p_1 \dots p_n$ при любом максимальном противодействии среды V_0 и встречных судов V_n .

В 1985 году группа авторов Института Кибернетики получила авторское свидетельство на изобретение системы предупреждения столкновения судов "Антикон" [12], принцип работы, которой основан на вышерассмотренном методе определения области допустимых маневров. Результаты математического моделирования работы эргатической системы приведены в публикации [13].

Результаты формализации процесса расхождения совместным использованием методов оптимального управления и дифференциальных игр излагаются в работах [22-27]. Математическую модель, полученную при данном подходе будем называть третьей моделью.

Работа [22] отражает начальный этап исследований, на котором рассматривался процесс расхождения с n судами, формализовавшийся методами теории оптимального управления с учетом МППСС-72.

Решение задачи расхождения предлагалось с помощью двухшкальной системы управления, в которой с помощью модели-датчика динамического состояния управляемого судна и алгоритма поиска безопасного маневра прогнозировать движение судна и опасных объектов

при заданных возмущениях и различных управляющих воздействиях, что позволяет определить по принятому критерию необходимые оптимальные управляющие воздействия.

Быстродействующая часть системы выполняет функцию определения закона управления. Эта часть системы включает алгоритм поиска безопасного маневра, модель управляющего судна и модели управляющих устройств, которые работают в режиме периодического решения задачи и используются в ускоренном масштабе времени.

Модель формализации МППСС учитывает начальную относительную позицию судна и цели, а также их параметры движения. Выходом модели МППСС являются логические переменные, определяющие возможность изменения курса вправо и влево, уступить дорогу или сохранить параметры движения. В модели принимаются неизменные параметры движения целей и заданные допустимые дистанции кратчайшего сближения с каждым судном.

Для каждого из встречных судов по исходным данным определяется допустимая область w курсов K и скоростей V оперирующего судна, которая разбивается на две области $w1$ и $w2$ по признаку стороны изменения курса судна (вправо или влево).

Логическая функция пяти двоичных переменных, характеризующих относительное положение судна и цели, а также их параметры движения вводится для формализации МППСС-72. Для отворота вправо логическая функция принимает значение 1 и выбор значений K и V производится из допустимой области $w1$. Для каждого из судов вводится характеристика опасности:

$$\eta = \sqrt{d_{kp}^2 + t_{kp}^2},$$

где $d_{kp} = D_{kp} / R_{доп}$ и $t_{kp} = T_{kp} / T_*$, причем:

D_{kp} и T_{kp} - соответственно дистанция и время кратчайшего сближения;

R_{dop} и T_* - соответственно предельно-допустимая дистанция кратчайшего сближения и время торможения или циркуляции.

При наличии нескольких опасных встречных судов в первую очередь определяется допустимая область $Wg1$ с учетом требований МППСС-72 для наиболее опасного судна, затем производится поиск допустимой области $Wg12 = Wg1 \cup Wg2$, являющейся пересечением уже найденной области $Wg1$ с допустимой областью $Wg2$ следующего по опасности судна. В дальнейшем процедура пересечения допустимых областей с учетом МППСС-72 продолжается вплоть до последнего судна.

В результате формируется безопасная область курсов K и скоростей V судна, решающего задачу расхождения с учетом начального положения судов и ограничений, накладываемых требованиями МППСС-72 и допустимыми дистанциями кратчайшего сближения.

По завершению определения логических переменных производится выбор оптимального маневра с критерием оптимальности - проекцией скорости движения оперирующего судна на направление программного движения судна. Ограничениями в оптимизационной задаче являются линейные неравенства, формализующие безопасное расхождение судна с каждой из целей.

В качестве решения находится пара ортогональных проекций скорости судна, удовлетворяющая требованию оптимальности и линейным ограничениям. Оптимальное решение находится методом линейного программирования.

После выбора оптимального безопасного маневра, т. е. пары V и K с помощью модели управляемого судна, описывающей зависимость V и K от значений управляющих воздействий u , которыми являются угол кладки руля и обороты двигателя, следует найти u , которое обеспечивает найденные безопасные значения V и K с учетом динамики оперирующего судна.

Наряду с очевидными достоинствами предлагаемого подхода, он обладает значительной ограниченностью, которая заключается в статичности задачи, одним общим маневром судна для расхождения со всеми n целями, отсутствием учета навигационных опасностей. Поэтому первоначальная модель в дальнейшем была значительно дополнена, сохранив при этом свои положительные качества, а именно двухэтапность задачи, учет МППСС-72 и оптимизационный характер.

Дальнейшее развитие модели расхождения связано с появлением теории позиционных дифференциально-разностных игр [29-34] и возникшему новому подходу к пониманию и формализации процесса расхождения, основанного на методах теории игр. Поэтому развитие анализируемой модели производилось в направлении использования методов позиционных дифференциально-разностных игр и нашло свое отражение в работах [23-25].

Автор модифицированной модели относит управление судном при расхождении с несколькими целями к типу процессов, протекающих в условиях неопределенности и конфликта, теоретической основой для описания которого является теория игр. Основой для математической формализации решаемой задачи расхождения судов предлагается применение методов позиционных дифференциально-разностных многошаговых игр.

В предлагаемой модели совокупность оперирующего судна и всех целей представляется в виде динамической системы Σ , текущее состояние которой, определенное с помощью РЛС, лага и гирокомпаса оперирующего судна, описывается фазовым вектором:

$$\mathbf{X} = \mathbf{x}(t) = \{x_1(t), \dots, x_i(t), \dots, x_n(t), x_c(t)\},$$

где $x_i(t)$ – составляющие фазового вектора целей;

$x_c(t)$ – координаты фазового вектора оперирующего судна.

Изменение фазового вектора во времени происходит в соответствии с дифференциальным уравнением движения:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_n \\ \dot{x}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(t, x_1, u_1) \\ f_2(t, x_2, u_2) \\ \vdots \\ f_n(t, x_n, u_n) \\ f_c(t, x_c, u_c) \end{bmatrix},$$

где u_j - векторы управления;

$x_j = x_j(t) = \{\eta_j, \xi_j, \dot{\eta}_j, \dot{\xi}_j\}$, причем η_j и ξ_j - координаты в неподвижной опорной системе координат $\eta O \xi$.

Из-за особенностей района плавания, безопасное плавание судов в котором ограничено областью Q , фазовые координаты оперирующего судна $x_c(t) = \{\eta_c, \xi_c, \dot{\eta}_c, \dot{\xi}_c\}$ имеют ограничения $x_c(t) \in Q$. Также накладываются ограничения на управляющий вектор оперирующего судна u_c , учитывающие его возможности, требования МППСС и условия безопасности расхождения, т. е. $D_j(t) \geq D_{\text{доп}}$.

Стратегии оперирующего судна, в соответствии с общей концепцией позиционных игр, отождествляются с векторными функциями $u_c(p)$, где вектор $p = \{x_j, x_c\}$ размерностью $4(n+1)$ представляет собой позицию $p(t) = \{t, x(t)\}$ динамической системы Σ .

Выбор стратегии $u_c(p)$ означает, что траектория расхождения оперирующего судна формируется согласно уравнениям:

$$\dot{\eta}_c = \tilde{u}_{c1}; \quad \dot{\xi}_c = \tilde{u}_{c2},$$

где $\tilde{u}_{c1} = V_o \sin K_o$, $\tilde{u}_{c2} = V_o \cos K_o$.

Достижение порта назначения или локального промежуточного пункта, которое формализуется некоторым множеством L_c , является

целью оперирующего судна. Предполагается, что расстояние от оперирующего судна до множества L_c характеризуется функцией p_c .

Допускается, что на оперирующем судне неизвестно о целях и стратегиях других судов, однако имеется наличие полной информации о текущей позиции, относительном положении судов, их скоростей и курсов. Постановка задачи сводится к следующему.

При текущей позиции $p(t)$ судну необходимо выбрать стратегию, обеспечивающую превосходство дистанции кратчайшего сближения над предельно-допустимой по отношению к каждому из встречных судов ($D_j(t) \geq D_{\text{доп}}$), ограничению фазового вектора по навигационным опасностям $x_c(t) \in Q$, учитывающую МППСС-72 и удовлетворяющую минимуму расстояния p_c до порта назначения.

Для облегчения решения задачи дифференциальная игра заменяется многошаговой, при этом предполагается постоянство стратегии и параметров движения встречных судов в течение одного шага, т. е. в течение заданного интервала времени.

Решение задачи поиска оптимальной стратегии расхождения производится с помощью следующего алгоритма.

Вначале по реализовавшейся позиции $p(t)$ определяются множества возможных стратегий каждого из встречных судов по отношению к оперирующему судну $[u_j^c]$ и допустимые множества стратегий оперирующего судна относительно каждого из них $[u_c^j(u_j)]$.

Следующим шагом является определение наиболее неблагоприятных стратегий встречных судов, максимально увеличивающие критерий оптимальности $\max \min p_c$ (расстояние до порта назначения) оперирующего судна. С учетом сочетания таких наиболее неблагоприятных стратегий встречных судов необходимо определить

область допустимых безопасных маневров расхождения оперирующего судна $U_c = \bigcap_{j=1}^n u_c^j$, с которой выбирается конкретная стратегия, являющаяся функцией позиции и минимизирующая критерий оптимальности $\min p_c$.

Задача поиска оптимальных значений позиционной стратегии u , как и в работе [22], редуцируется к задаче линейного программирования, для чего линеаризуются нелинейные ограничения по безопасности расхождения и учета навигационных опасностей.

Учитывая, что позиционная стратегия u представлена проекциями скорости оперирующего судна, то необходимо найти значения управляющих воздействий (угла кладки руля и оборотов винта), обеспечивающие необходимые значения упомянутых проекций скоростей. Поиск управляющих воздействий, значения которых наиболее соответствуют оптимальной стратегии расхождения, предлагается производить с помощью модели управляемого судна аналогично алгоритму, изложенному в работе [22].

В работе [28] подробно рассмотрено применение дифференциальных игр к формализации процесса расхождения.

В ряде работ [35-42] по предупреждению столкновений судов процесс расхождения судов предложено формализовать в рамках теории игр.

Так, в работе [35] рассматриваются игровые подходы в навигационных математических моделях безопасного управления судами, а также обсуждается приложение методов теории игр для автоматизации регулирования процессов перемещения судов. Приведено определение понятия контрольной цели, описание базовой модели и аппроксимированной модели многоступенчатой позиционной многошаговой матричной игры безопасного управления судна в ситуациях опасного сближения.

Подсистемы полной системы, как показано в работах [35, 36], производят управление одного из подпроцессов движения судна, который может быть описан подходящими дифференциальными уравнениями кинематики или динамики судна. Причем управление возможно следующими подпроцессами: корректировка скорости судна, стабилизация судна на курсе или траектории, точное управление судном на маленьких скоростях в порту, динамическая стабилизация судна при бурении или положение танкера при грузовых операциях в море, управление группы буксиров.

Функциональный аспект системы соответствует определенному фактическому состоянию оборудования. Увеличивающиеся требования к безопасности судовождения вынуждают устанавливать объединенные системы навигации и управления судами. Улучшая управление судном, эти системы увеличивают безопасность судовождения, снижая риск потери судна, груза и повышая эффективность перевозок.

Контроль и управление движением судна, как показано в публикации [41], предлагается рассматривать, как многоуровневую систему, которая управляет системами судна при его переходе между портами. Судовые подсистемы описаны многослойной иерархией и им четко предписаны соответствующие слои системы контроля.

Процесс управления движением судна является многомерным с нелинейными и нестационарными характеристиками, поэтому задача выбора оптимального маневра расхождения является очень сложной, о чем отмечается в работах [38-40]. Указывается, что по своей природе данной задаче присущ игровой характер.

На практике методы выбора оптимального маневра реализуются в виде соответствующих алгоритмов, предлагающих судоводителю решение в ситуации опасного сближения. Такие алгоритмы программируются в

программируемом логическом диспетчере, который используется в системе расхождения САРП или в учебном тренажере.

Статья [42] посвящается проблеме, которая заключается в том, что осуществление глобального контроля систем управления на практике стало слишком дорогостоящим и неэффективным, так как глобальный контроль требует большого числа измерений вектора управления, определения статуса процесса (как случайного, неопределенного). Причем управляющие воздействия зависят от течения, ветра и волнения моря с одной стороны, а динамика судна описывается нелинейными и нестационарными характеристиками, с другой.

В работах [43-46] рассмотрена актуальная проблема разработки метода формирования системы бинарной координации взаимодействия судов при расхождении. В дальнейшем эту модель будем называть четвертой моделью.

Вначале, с помощью методов много управляемых динамических систем, с учетом закономерностей относительного движения была сформирована процедура определения ситуации опасного сближения нескольких судов, в основу которой положен принцип минимизации неопределенности анализируемой ситуации, для получения которого были использованы методы теории информации, чему посвящена работа [43].

Как показано в работе [45], следующим этапом исследования явился анализ возможностей синтеза системы формирования стратегий расхождения группы судов. При этом был использован перспективный подход, основанный на разработке структуры двухуровневой иерархической системы, один из уровней которой содержит множество элементарных стратегий расхождения судов, составляющих группу взаимодействия. Второй уровень иерархической системы содержит процедуры формирования общей стратегии расхождения из элементарных.

Так как применение элементарных стратегий регламентируется системой бинарной координации, которая в настоящее время реализована в МППСС-72, то в работе произведен анализ эффективности этой системы, выявлены общие принципы, положенные в ее основу, оценены существующие достоинства и недостатки, в результате чего были созданы предпосылки для разработки обобщенной системы бинарной координации, что обсуждается в статье [46].

Очевидно, при возникновении ситуации опасного сближения суда должны предпринимать совместные действия для увеличения дистанции кратчайшего сближения. Поэтому совместные действия судов, т.е. их парные стратегии расхождения, включающие как изменение параметров движения одного из судов, так и обоих, тем эффективнее, чем значительнее изменение дистанции кратчайшего сближения при их использовании, чему посвящена работа.

В работе [44] показано, что изменение дистанции кратчайшего сближения пропорционально приращению относительного курса при той же начальной ситуации. Поэтому, в работе получены зависимости приращения относительного курса от каждой из возможных парных стратегий расхождения судов, т.е. от изменения курса каждого из судов при неизменных параметрах движения второго, изменения скорости каждого из судов при неизменных параметрах движения второго, одновременного изменения курсов обоих судов, одновременного изменения скоростей обоих судов, одновременного изменения курса одного из судов и скорости второго.

Выявление таких закономерностей потребовало вначале в виде базовых найти зависимости приращения относительного курса от изменения курса одного из судов при неизменных параметрах движения другого и изменения скорости одного из судов при неизменных параметрах движения другого. Затем были выявлены соотношения между

парными стратегиями расхождения судов и соответствующими им ситуациями максимального приращения дистанции кратчайшего сближения, которые в совокупности образуют структуру эффективных систем бинарной координации.

Дальнейшее развитие методы предупреждения столкновения судов получили в многочисленных работах профессора, д.т.н. Цымбала Н.Н. и его учеников [47-59]. Основным результатом проведенных исследований явилась разработка метода выбора оптимальной гибкой стратегии расхождения судна с несколькими опасными и мешающими судами, который учитывает неопределенность в поведении судов, нормативные требования МППСС-72, динамику оперирующего судна и имеющиеся навигационные опасности в районе маневрирования.

В программных работах [47-50] изложены теория взаимодействия нескольких судов в условиях опасного сближения; метод синтеза гибких стратегий расхождения, построенных на минимаксном подходе и не противоречащих требованиям МППСС-72 в части маневрирования; теоретическое описание динамических n -управляемых систем взаимодействующих судов с позиций существования трех системных состояний, реализующихся в зависимости от типа их взаимодействия; математическая модель системы взаимодействующих судов, как иерархической многоуровневой системы принятий решений; процедура определения векторного и матричного ситуационных возмущений для формализации возможных типов взаимодействия судов; способ формирования координационного и реального каркасов, описывающих сложное взаимодействие судна с окружающими целями; способ исследования минимальных динамических систем, состоящих из двух взаимодействующих судов; способ экстренного расхождения судов в условиях непосредственной близости; развитие сложной оптимизационной задачи поиска безопасного маневра расхождения;

усовершенствование способа выбора параметров маневра расхождения судна с учетом мешающих судов во втором системном состоянии динамической системы взаимодействующих судов, для чего была разработана рекуррентная процедура объединения ряда множеств недопустимых курсов уклонения. Математические соотношения, описывающие метод гибких стратегий расхождения, будем называть пятой моделью.

В рамках предложенной концепции формирования гибких стратегий расхождения освещались разные аспекты проблемы предупреждения столкновений судов, что позволило расширить и детализировать проблематику исследований. Рассмотрим некоторые аспекты решения формализации процесса расхождения судов.

Детальное исследование взаимодействия минимальной динамической системы, представляющую собой пару судов, рассмотрено в работах [51, 60-64].

В работе [51] рассмотрены различные методы прогноза, которые могут быть использованы в задачах выбора безопасного маневра расхождения. Вопросы определения множества допустимых стратегий расхождения и расчет их граничных значений с учетом ограничений по безопасному расхождению рассмотрены в работах [60-61], а в работах [62-64] изложены вопросы оптимизации маневров расхождения, причем в зависимости от реализовавшейся области взаимных обязанностей в качестве критерия оптимальности выбираются различные величины. Результаты имитационного моделирования процесса расхождения судов с помощью компьютера представлены в работе [63].

Вопросы учета инерционности судна при выборе маневра расхождения изложены в работах [65-71], предложены различные модели поворотливости судна.

В работе [65] сформулирована задача учета динамики судна при выборе маневра расхождения изменением курса, а в работе [66] приведена методика учета инерционности судна при расчете момента времени завершения маневра расхождения.

Процедура расчета временных характеристик маневра расхождения представлена в работах [67, 68], а результаты экспериментальных данных и имитационного моделирования приведены в работах [70, 71].

Математические модели учета времени перекладки пера руля на поворотливость судна рассмотрены в работах [72, 73], предложены два типа моделей, которые с высокой точностью прогнозируют движение судна на криволинейных траекториях поворота.

В работах [53, 74-76] изложены вопросы аналитического описания навигационных опасностей для их учета при выборе маневра расхождения судна с опасной целью в районе, изобилующем навигационными опасностями.

Процедура оценки риска аварии при расхождении судов в стесненных водах рассмотрена в работе [53]. Показано, что для такой оценки необходимо знать двумерную плотность распределения траекторной погрешности и характеристику стесненности района.

Формализация различных типов навигационных опасностей и их учет при выборе стратегии расхождения рассмотрены в работах [74, 76], навигационные опасности классифицируются на точечные, линейные распределенные и сложные распределенные. В работе [75] приведено условие существования множества допустимых маневров расхождения с учетом навигационных опасностей. При этом условие меняется в зависимости от формы относительной траектории расхождения.

Поиску допустимого маневра расхождения при опасном сближении судна с несколькими целями посвящены работы [52,77,78], причем

описание управляемого движения множества целей относительно оперирующего судна рассмотрено в работе [52].

В работе [77] приводится постановка задачи расхождения судна с несколькими опасными целями, а в работе [78] исследуется выбор маневра расхождения с двумя целями, сближение с которыми несет угрозу столкновения.

Безопасное расхождение в стесненных условиях маневром изменения скорости и расчета его параметров рассмотрены в работах [59, 79-81].

Влияние инерционных характеристик судна на выбор момента начала маневра расхождения изменением скорости исследовано в работе [59].

В работе [79] указывается, что при возможности более предпочтительным является маневр расхождения изменением курса, однако в стесненных условиях может оказаться эффективным маневр изменения скоростью.

Особенности изменения относительных параметров движения судов при изменении скорости оперирующего судна рассмотрены в работе [80], а в работе [81] приведено условие, когда возможен маневр изменением скорости.

Взаимодействию судов на малых начальных расстояниях при высоком риске возможного столкновения посвящены публикации [56, 57, 82]. При этом рассматривается ситуация в стесненных водах, при наличии навигационных опасностей в районе плавания. Особенностью ситуации в упомянутых публикациях является взаимодействие судов на участке их возвращения на программные траектории движения.

В работе [56] рассмотрен подход к взаимодействию группы судов при расхождении с позиций n – управляемой динамической системы, в работе [57] рассматривается оптимизация параметров маневра выхода судна на программную траекторию движения.

Ряд публикаций [54, 55, 83-86] посвящен вопросам формализации взаимодействия судов при опасном сближении и предупреждении столкновения.

Поиску процедуры, минимизирующей несоответствие структуры реальной стратегии расхождения судна требованиям МППСС-72 в нестандартных ситуациях опасного сближения судов, посвящена публикация [54], в которой текущая ситуация характеризуется числом окружающих судов и степенью опасности каждого из них. Для характеристики степени опасности каждого из судов предложено восемь стандартных подмножеств, упорядоченных по уровню создаваемой опасности, три из которых требуют применения Правил для ликвидации угрозы столкновения.

Решение поставленной в публикации задачи достигается рассмотрением четырех подмножеств целей по степени опасности: к первому подмножеству целей относятся цели, которые не представляют угрозы столкновения; ко второму, третьему и четвертому соответственно относятся цели находящиеся в первой, второй и третьей областях взаимных обязанностей.

Области взаимных обязанностей определяются правилом 17 МППСС-72, предписывающим при опасном сближении двух судов судно, которому должны уступать дорогу, в зависимости от степени угрозы столкновения различные варианты поведения. Так, при нахождении судов в первой области взаимных обязанностей судно, которому должны уступать дорогу, обязано сохранять неизменные параметры движения. Если суда находятся в более опасной второй области взаимных обязанностей, то упомянутое судно может предпринять маневр расхождения, а в третьей области экстренного маневрирования оно обязано предпринять меры для предупреждения столкновения.

Координация бинарного взаимодействия двух опасно сближающихся судов, реализованного в МППСС-72 описывается в статье [98]. Формализация, предлагаемого в работе способа декомпозиции сложной ситуации опасного сближения судна с одной или несколькими целями на стандартные ситуации, предусмотренные МППСС-72, требует формализации функционирования МППСС-72, как координатора, который предписывает бинарное взаимодействие судов при расхождении.

В статье показано, что требования МППСС-72 в части взаимных обязанностей судов при маневрировании в случае опасного сближения могут быть представлены моделью обобщенного координатора, как системы типа «вход-выход», который при наличии ситуационного возмущения однозначно определяет поведение оперирующего судна с помощью выходного сигнала координации и прогнозирует требуемое поведение цели с помощью сигнала связи.

Статья [83] содержит описание алгоритма, позволяющего производить идентификацию начальной ситуации опасного сближения судов в терминах МППСС-72.

Большое количество судов, которые находятся в прибрежном плавании, обуславливают необходимость регулярной идентификации ситуации сближения оперирующего судна с другими судами и оценки ее в терминах координатора МППСС-72 с последующими действиями, предписанными координатором. Как ранее указывалось, начальные ситуации опасного сближения судов характеризуются большим разнообразием, и зачастую не корреспондируются с множеством ситуаций сближения, которыми оперирует МППСС-72. Поэтому в таких условиях плавания судоводителю неоценимую помощь может оказать система идентификации начальной ситуации опасного сближения судов с позиций МППСС-72 с указанием их взаимных обязанностей.

В статьях [84, 85] отмечается, что алгоритм идентификации начальной позиции опасно сближающихся судов обеспечивает более высокий уровень безопасного плавания за счет увеличения времени принятия решения при расхождении и снижения возможных ошибок при выявлении реализовавшейся начальной позиции.

В работе [86] изложены вопросы взаимодействия судов при расхождении. Рассмотрены частичные и полные взаимодействия и их типы.

Взаимодействие судов при опасном сближении регламентируется МППСС-72. Поэтому многочисленные вопросы посвящены проблеме формального описания МППСС-72, которые нашли свое отражение в ряде работ [87-95]. К ним относятся анализ МППСС-72 с предложениями по их совершенствованию, формализация основных понятий МППСС-72 в части выявления опасности столкновения, факта чрезмерного сближения судов и позиции, когда следует начинать маневр расхождения.

Неопределенность в оценке одной и той же ситуации судоводителями сближающихся судов, как отмечается в работе [87], ставит в затруднительное положение судоводителя, который должен, согласно правилу 17 МППСС-72, сохранять неизменными параметры движения своего судна.

В работе [88] указывается, что одной из существенных причин столкновений судов является неопределенность МППСС-72 в ряде очевидных ситуаций.

В работе [89] приводятся логические противоречия МППСС-72, что, по мнению автора, объясняется субъективным опытом судовождения составителей Правил и упрощенным геометрическим подходом к решению задач расхождения. Автор предлагает для рациональной разработки ППСС использовать математический аппарат теории координационных игр, который позволяет выбрать корректные действия

для предупреждения столкновений в различных ситуациях. При этом считаются необходимыми маневры одновременного изменения курсов обоих судов, а также остановка одного или обоих судов.

В публикации [90] предлагается возвратиться к применению правила «левого борта», предусматривающего в ситуации опасного сближения на пересекающихся курсах маневрирование обоих судов изменением курса вправо.

Порядок действий привилегированных судов в случае угрозы столкновения рассмотрен в работах [93-95], предложен способ расчета граничной дистанции кратчайшего сближения в условиях пониженной видимости и приведено математическое обоснование оптимального управления судном при угрозе столкновения.

Как указывается в работе [91], в лаборатории Генуэзского университета автоматизации судовождения разработан метод автоматизированного определения оптимального маневра расхождения, в основу которого положены требования МППСС-72 в части маневрирования судов.

С другой стороны, невозможность автоматизации процесса расхождения судов с учетом МППСС-72, как указано в работе [92], обоснована анализом сопоставления действий судоводителя при расхождении с нормативными положениями МППСС-72.

В работе [96] отмечается, что повышение эффективности предотвращения столкновений в настоящее время может достигаться созданием, как новых алгоритмов, так и интеллектуальных систем. В работе для расхождения применяется одна стратегия – смещение на параллельную линию пути под тем или иным углом к линии исходного курса. Из множества возможных вариантов такой стратегии находится оптимальная по критерию, отражающему требования к безопасности,

заблаговременности, заметности и экономичности маневра для предотвращения столкновения.

1.2. Основные направления диссертационного исследования

В данном параграфе в результате анализа рассмотренных теоретических работ определим основные направления диссертационной работы.

Наиболее существенным признаком, по которому следует дифференцировать анализируемые подходы к формализации процесса расхождения судов, является их взаимодействие в ситуации опасного сближения. Прежде всего, необходимо отметить неоднозначный подход в учете взаимодействия судов при опасном сближении, как существенного и неотъемлемого фактора процесса расхождения.

В третьей модели и модели Lisowski [27], в процессе расхождения суда взаимодействуют как конфликтующие стороны, причем конфликт возникает на почве пересечения интересов экономичности движения (в обоих случаях в качестве критерия оптимальности выбрано расстояние до пункта назначения).

Во второй модели неявно предполагается наличие конфликта тем обстоятельством, что предполагается выбор целями наилучших для оперирующего судна параметров движения, однако не указан принцип выбора таких угрожающих параметров, что указывает на отсутствие взаимодействия между судами.

В концепциях описания процесса расхождения судов и выбора оптимальных стратегий, предложенных Институтом Проблем Управления [15-17] и авторами первой модели [28, 29] вообще отсутствует взаимодействие судов при расхождении.

Поэтому в первом случае применяются модели дифференциальной позиционной игры, которые в постановке задачи формулируются как игры с противоположными интересами, однако при решении реализуются как антагонистические, так как выбор стратегии расхождения оперирующего судна производится в предположении самых неблагоприятных стратегий целей.

Во втором случае отсутствие взаимодействия судов позволяет задачу расхождения редуцировать к задаче оптимального управления (игры одного игрока), включив параметры движения цели в множество известных переменных.

В пятой модели взаимодействие судов при опасном сближении является определяющим фактором, регламентирующим судам определенный тип поведения в зависимости от степени опасности ситуации сближения. Причем степень опасности количественно характеризуется интенсивностью ситуационного возмущения. В работе показано, что принцип взаимодействия устанавливается МППСС-72, причем реализуется нормативная бинарная координация, которая является принципом согласования действий координируемых систем по достижению определенной цели путем разрешения неопределенности и предписания типа поведения третьим лицом, не участвующим в конфликте, т. е. координатором [96].

В свою очередь недостатки МППСС-72 в случае опасного сближения нескольких судов вызвали необходимость разработки метода гибких стратегий, который позволяет формирование стратегий расхождения оперирующего судна с несколькими опасными целями в соответствии с иногда противоречивыми требованиями МППСС-72

Таким образом, одним из важнейших факторов, который необходимо учитывать при описании процесса расхождения судов, является характер их взаимодействия, с учетом существенных факторов, влияющих на

характер и тип взаимодействий. Поэтому проблема исследования взаимодействия судов в ситуации опасного сближения является актуальной и перспективной и составляет основное направление диссертационного исследования.

1.3. Выводы по первой главе

В главе выполнен анализ существующих подходов к аналитическому описанию процесса расхождения судов. Один из которых предусматривает решение задачи формирования оптимального маневра расхождения судна с опасной целью методами теории оптимальных дискретных процессов, принимая неизменность параметров движения встречных судов и отсутствие динамических внешних возмущений. Ограничениями выбраны требования, обеспечивающие безопасное расхождение судна со встречными целями, заданные приращение начального курса, величина угловой скорости поворота и боковое отклонение судна от программной траектории движения.

Предложено решение проблемы предупреждения столкновений судов в рамках теории оптимального управления, причем формализация процесса расхождения с несколькими судами производилась в рамках требований МППСС-72.

Для описания процесса расхождения судов и разработки системы предупреждения их столкновений использовался метод нелинейной интегральной инвариантности, который позволяет синтезировать стратегию управления динамической системой и обеспечивает инвариантность некоторых фазовых координат.

Выбор методов позиционных дифференциальных игр использовался для описания процесса расхождения во многих работах, состояние совокупности судов – участников описывается уравнениями состояния

фазового вектора. Учитывается ряд ограничений, так же, как дополнительные ограничения, учитываются требования МППСС. Для упрощения вычислительных процедур дифференциальная игра сводится к многошаговой.

Современные подходы к решению проблемы описания взаимодействия судов и синтеза стратегии расхождения базируются на методах теории динамических n -управляемых систем.

В результате проведенного анализа литературных источников по упомянутой проблеме было определено основное направление диссертационного исследования, заключающееся в исследовании взаимодействия судов в ситуации опасного сближения, выявлении их характера и типов взаимодействия.

ГЛАВА 2

МЕТОДОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Обоснование темы научного исследования

В предыдущей главе показано, что наиболее существенным признаком, по которому определяется подход к формализации процесса расхождения судов, является их взаимодействие в ситуации опасного сближения, причем подход в учете взаимодействия судов неоднозначный.

В настоящее время принцип взаимодействия судов при опасном сближении устанавливается МППСС-72, причем реализуется нормативная бинарная координация, которая согласует действия двух судов путем разрешения неопределенности и предписания типа поведения координатором.

В свою очередь недостатки МППСС-72 в случае опасного сближения нескольких судов вызвали необходимость разработки метода гибких стратегий, который позволяет формирование стратегий расхождения оперирующего судна с несколькими опасными целями в соответствии с иногда противоречивыми требованиями МППСС-72

Поэтому одним из важнейших факторов, который следует учитывать при описании процесса расхождения судов, является характер их взаимодействия, с учетом существенных факторов, влияющих на характер и тип взаимодействий. Следовательно, проблема исследования взаимодействия судов в ситуации опасного сближения является актуальной и перспективной, и это позволяет произвести выбор темы диссертации, которая формулируется следующим образом:

«Совершенствование методов предупреждения столкновения судов с учетом особенностей их взаимодействия».

Для решения задачи по указанной проблематике следует рассмотреть следующие основные вопросы:

- С помощью методов системного подхода произвести декомпозицию главной задачи диссертационного исследования на несколько составных независимых задач.

- Произвести формализацию типов взаимодействия судов в ситуации опасного сближения.

- Разработать аналитический аппарат оценки координируемости ситуации опасного сближения судов для уклонения одного судна или обоих судов.

- Исследовать зависимость изменения дистанции кратчайшего сближения от характера маневра уклонения судов.

- Произвести имитационное моделирование основных результатов диссертационного исследования.

Актуальность тематики диссертационного исследования определяют необходимость повышения уровня безопасности судовождения и совершенствование методов расхождения судов.

Научную новизну исследования может составить разработка метода идентификации начальной ситуации опасного сближения и определения возникающего бинарного взаимодействия и способ определения координируемости бинарных взаимодействий судов в ситуациях опасного сближения.

Предполагаемая эффективность диссертационного исследования возможна от обеспечения безопасности судовождения, ведущая к уменьшению вероятности человеческих жертв и экологических катастроф, возникающих при авариях.

Возможная экономическая эффективность также может быть

достигнута за счет сокращения убытков от снижения уровня аварийности по причине предотвращения столкновений судов.

Реализуемость предлагаемого научного исследования заключается в разработке теоретической части работы, которую требуется проверить с помощью имитационного моделирования и экспериментальных исследований.

Объектом исследования диссертации является предупреждение столкновений судов.

Предметом исследования являются методы выбора безопасного маневра расхождения судна.

Тематика выбранного диссертационного исследования соответствует направлению научных исследований коллектива, в котором работает соискатель.

2.2. Методы исследования, применяемые в диссертационной работе

На рис. 2.1 приведена технологическая карта методологического обеспечения диссертационного исследования, на которой представлен план решения главной задачи диссертационной работы с помощью методов системного подхода.

Необходимость повышения уровня безопасности судовождения и совершенствование методов расхождения судов представляют собой современные запросы практики.

Целью диссертационного исследования является обеспечение безопасности расхождения судов в ситуации опасного сближения путем разработки метода, учитывающего особенности их взаимодействия.

Принята гипотеза о том, что безопасный маневр уклонения судна от опасно сближающейся цели можно обеспечить, учитывая особенности их взаимодействия.

Главная задача исследования заключается в разработке алгоритма выбора безопасного маневра расхождения судов с учетом особенности их взаимодействия.

Для ее решения в соответствии с методами теории исследования операций была произведена ее декомпозиция на несколько частных составных задач.

Целесообразным оказалось разделение главной задачи диссертационного исследования на следующие три частные составные задачи:

1. Формализация бинарных взаимодействий судов в ситуациях опасного сближения.
2. Разработка способа идентификации начальной ситуации опасного сближения и определения возникающего бинарного взаимодействия.
3. Метод определения координируемости бинарных взаимодействий судов в ситуациях опасного сближения.

Рассмотрение первой составной задачи требует разработки математической модели, позволяющей формализовать аналитическую связь между понятиями ситуации опасного сближения и взаимодействия между судами, как характеристики их поведения по предупреждению возможного столкновения.

С этой целью следует формализовать понятие ситуации опасного сближения и множество таких ситуаций классифицировать по типам (подмножествам) в зависимости от степени опасности. Для определения типа реализовавшейся ситуации опасного сближения необходимо разработать процедуру идентификации и получить условия, позволяющие определить каждый из типов ситуации опасного сближения.

Взаимодействие должно содержать тип поведения каждого из взаимодействующих судов, который определяет нормативное требование, определяющее характер маневра расхождения.

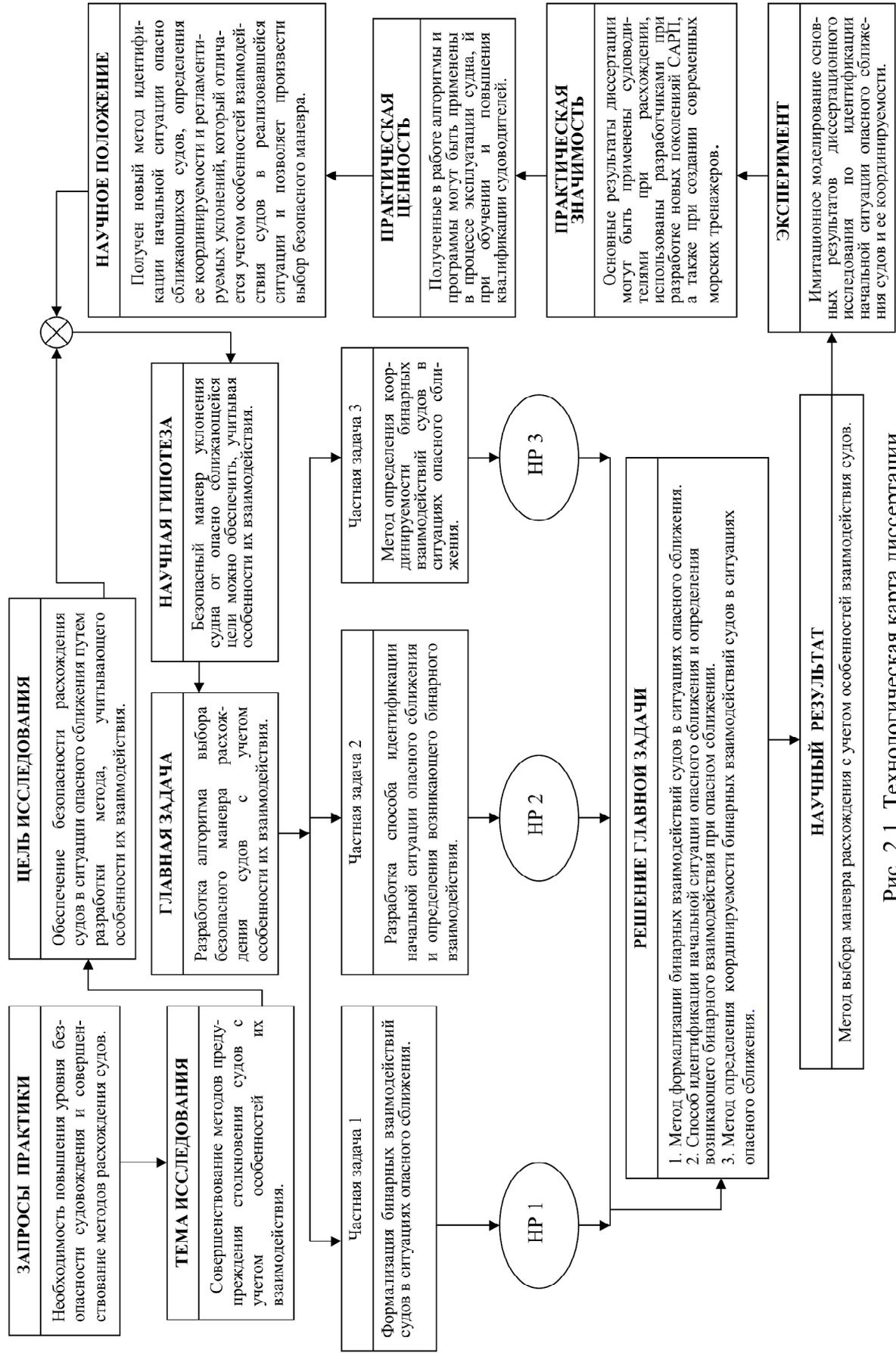


Рис. 2.1. Технологическая карта диссертации

Центральной задачей диссертационного исследования является разработка способа идентификации начальной ситуации опасного сближения и определения возникающего бинарного взаимодействия, чему посвящена вторая частная составная задача.

Для выявления ситуации опасного сближения с дальнейшим определением типа взаимодействия должна быть задана система координации, содержащая процедуры определения типов возможных ситуаций опасного сближения и соответствующего данному типу ситуаций взаимодействия, регламентирующего поведения каждого из судов, задействованного во взаимодействии.

В настоящее время система координации взаимодействия судов, предусматривающая опасное сближение только двух судов, реализована в МППСС-72 в части маневрирования судов. Поэтому полученный метод идентификации и определения взаимодействия необходимо применить для МППСС-72 и убедиться в его эффективности.

Следует обратить внимание на то, что МППСС-72 представлены в неформализованной вербальной форме, что требует разработки аналитических процедур для формирования математической модели МППСС-72. При этом общая модель должна представлять собой две частных модели.

Первая частная модель должна содержать совокупность процедур позволяющих произвести идентификацию произвольной начальной ситуации в зависимости от выявленных существенных параметров (относительной позиции, параметров движения и т. п.).

Во второй частной модели следует привести характеристики поведения взаимодействующих судов в реализовавшейся ситуации.

Решение третьей частной составной задачи предусматривает разработку метода определения координируемости бинарных взаимодействий судов в ситуациях опасного сближения.

Под координируемостью взаимодействия понимается возможность компенсации ситуационного возмущения предписанными маневрами обоих судов. Поэтому координируемость взаимодействия целесообразно оценивать с помощью изменения дистанции кратчайшего сближения, вызванного предписанным взаимодействием маневром расхождения.

Если в результате маневра дистанция кратчайшего сближения увеличивается, то ситуация и соответствующее ей взаимодействие координируемы, а в противном случае координация взаимодействия отсутствует.

Следовательно, для определения координируемости взаимодействия необходимо исследовать изменение дистанции кратчайшего сближения при изменении курса одного из судов при условии неизменных параметров движения второго.

Учитывая, что возможно одновременное изменение курсов обоих сближающихся судов, следует найти зависимость изменения дистанции кратчайшего сближения от курсов обоих судов.

Полученные зависимости изменения дистанции кратчайшего сближения для одиночного поворота и одновременного поворота обоих судов необходимо использовать для оценки координируемости регламентируемых взаимодействий, предусмотренных МППСС-72.

Учитывая особую значимость полученных зависимостей и определения координируемости, регламентируемых МППСС-72 взаимодействий, необходимо смоделировать все анализируемые ситуации на компьютере и получить подтверждение аналитически полученным результатам.

Решением каждой из составных независимых задач является соответствующий научный результат (НР1..НР3):

- научным результатом первой составной задачи НР1 является метод формализации бинарных взаимодействий судов в ситуациях опасного сближения.;

- способ идентификации начальной ситуации опасного сближения и определения возникающего бинарного взаимодействия при опасном сближении представляет собой научный результат НР2 второй составной задачи;

- метод определения координируемости бинарных взаимодействий судов в ситуациях опасного сближения является научным результатом НР3 третьей составной задачи.

В процессе научного исследования по теме диссертационной работы необходимо произвести имитационное моделирование основных результатов диссертационного исследования в части разработки способа идентификации начальной ситуации опасного сближения и определения возникающего бинарного взаимодействия при опасном сближении.

Также с помощью имитационного моделирования надлежит произвести проверку корректности полученного метода определения координируемости бинарных взаимодействий судов в ситуациях опасного сближения, регламентированных МППСС-72.

Полученные в диссертационной работе теоретические результаты и имитационное моделирование подтвердили принятую научную гипотезу, которая заключается в том, что безопасный маневр уклонения судна от опасно сближающейся цели можно обеспечить, учитывая особенности их взаимодействия.

Практическая значимость проведенного диссертационного исследования заключается в том, что ее основные результаты могут быть применены судоводителями при расхождении, использованы разработчиками при разработке новых поколениях САРП, а также при создании современных морских тренажеров.

Разработанные в диссертации алгоритмы и программы могут быть использованы при эксплуатации судна, а также в процессе обучения и повышения квалификации судоводителей, что является практической ценностью диссертационной работы.

Научное положение диссертационной работы определяется полученными в диссертационном исследовании научными результатами и результатами проведенного имитационного моделирования и формулируется следующим образом:

Разработан новый метод идентификации начальной ситуации опасного сближения судов, определения ее координируемости и регламентируемых уклонений, который отличается учетом особенностей взаимодействия судов в реализовавшейся ситуации и позволяет произвести выбор безопасного маневра.

2.3. Методика проведения научного исследования

Рассмотрим методику проведения исследования по теме диссертационной работы с применением требуемых методов теоретического и экспериментального анализа.

С помощью метода дедукции произведен анализ основных подходов решения проблемы обеспечения безопасного расхождения судов, чем осуществляется возможность выбора основного направления и темы диссертационного исследования.

Следующим шагом диссертационного исследования является декомпозиция главной задачи на независимые составные задачи с помощью методов исследование операций, при этом производится обоснование методологического обеспечения диссертации.

В дальнейшем требуется разработать математическую модель для формализации ситуации опасного сближения судов, позволяющей

дифференцировать ситуации на различные типы в зависимости от степени опасности возможного столкновения.

Для этого следует разработать процедуры, позволяющие определять принадлежность начальной ситуации к определенному типу ситуации опасного сближения. Совокупность таких процедур определяет метод идентификации ситуаций опасного сближения.

Дальнейшее исследование требует разработки метода определения взаимодействия в зависимости от реализовавшейся начальной ситуации опасного сближения, что позволит определить характер маневра для предупреждения возможного столкновения.

Полученный метод идентификации ситуации опасного сближения и определения взаимодействия следует применить к МППСС-72, причем необходимо сформировать компьютерную программу, реализующую данный метод, и произвести проверку его корректности.

Принципиально важным является понятие координируемости бинарного воздействия и его формализация. Поэтому надлежит связать координируемость с изменением дистанции кратчайшего сближения, возникающим в связи с выполнением маневра судами, предписанного реализовавшимся взаимодействием.

Для формализации координируемости необходимо найти аналитическое выражение зависимости изменения дистанции кратчайшего сближения от курса одного судна выполняющего уклонение для взаимодействий, в которых компенсация ситуационного возмущения производится одним из судов при неизменных параметрах движения второго судна.

Так как взаимодействие может предусматривать изменение курсов обоих судов, то необходимо найти аналитическое выражение, характеризующее зависимость изменения дистанции кратчайшего сближения от курсов обоих судов при их повороте в одну сторону или в

разные стороны.

Исходя из полученных выражений изменения дистанции кратчайшего сближения, необходимо определить координируемость каждого из взаимодействий, предписанных МППСС-72, для чего вначале следует получить аналитический результат, а затем проверить его с помощью имитационного моделирования. Для этого, по найденным аналитическим выражениям необходимо разработать алгоритмы расчета требуемых результатов, а затем их использовать для разработки компьютерной программы.

2.4. Выводы по второй главе

В данной главе диссертации рассмотрены выбор темы и основные направления диссертационного исследования.

Методологическое обеспечение диссертационной работы представлено в технологической карте, которая представляет собой план методологически корректного проведения исследования по теме диссертации.

Цель диссертационного исследования и его главная задача, представленная тремя независимыми составными задачами, которые отражены в технологической карте.

Подтверждена рабочая гипотеза научного исследования и показано, что решения независимых составных задач являются основными научными результатами диссертационной работы.

Основное научное положение исследования сформулировано в данной главе, показаны практическая ценность и значимость исследования, и приведено содержание имитационного моделирования.

В главе приведена методика решения поставленных в работе задач, которая содержит основные этапы научного исследования по теме

диссертации. Она представляет собой обобщенный алгоритм реализации исследования по теме диссертации, включающий теоретические модели и имитационное моделирование.

ГЛАВА 3. ТИПЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СУДОВ ПРИ ОПАСНОМ СБЛИЖЕНИИ И ИХ ФОРМАЛИЗАЦИЯ

3.1. Формальное описание взаимодействия судов при возникновении угрозы столкновения

Каждое из судов предназначено для определенной производственной функции, которую оно реализует в процессе эксплуатации, поэтому производственная цель судна C_p заключается в получении максимальной экономической эффективности при условии обеспечения безопасности судовождения. Так как с позиций судовождения программная траектория движения планируется таким образом, чтобы обеспечить навигационную безопасность и максимальную экономическую эффективность, то безопасность судовождения будет определяться в основном безопасностью предупреждения столкновений.

Следовательно, производственную цель судна можно записать следующим образом:

$$C_p = C \{ (E \rightarrow \max E) / (P_b \geq P_d) \},$$

где E - экономическая эффективность;

P_b и P_d - вероятность плавания без столкновения и ее предельно-допустимое значение, величина которого близка к единице.

Если в районе плавания имеются другие суда, то может появиться ситуация опасного сближения с угрозой столкновения. В этом случае при следовании оперирующего судна и судна - цели неизменными параметрами не обеспечивается необходимый уровень безопасности плавания, т.е. не выполняется неравенство $P_b \geq P_d$, что вызывает изменение цели судна. Целью судна C_b является увеличение величины P_b до предельного значения P_d независимо от возможной потери в экономической эффективности,

однако если имеются альтернативы, то следует минимизировать возможные потери. Поэтому $C_b = C\{(P_b \rightarrow P_d)/(E \rightarrow \max E)\}$.

Очевидно, что цель судна C_b может возникнуть только при появлении других судов. Поэтому в этом случае возникает такая категория, как ситуация s , которая характеризуется относительной позицией судов и их параметрами движения. Поэтому $s = s\{D_{ij}, \alpha_{ij}, V_i, V_j, K_i, K_j\}$, ситуации s составляют множество или пространство ситуаций S , т.е. $s \in S$, причем как ситуации, так их множества обладают существенными признаками, по которым они отличаются друг от друга.

Во-первых, ситуации можно дифференцировать по числу участников. Если рассматривать ситуацию с позиций оперирующего судна, то множество ситуаций S является объединением подмножеств S_i по числу n участников ситуации, т.е. целей, находящихся в одном с оперирующим судном локальном районе, причем $S = \bigcup_{i=1}^n S_i$.

Вторым существенным признаком является декомпозиция множества ситуаций S на подмножества недопустимых ситуаций S_d , попадание в которое с высокой вероятностью ведет к столкновению, и подмножество безопасных позиций S_s , находясь в которых судно при неизменных параметрах своего движения и партнеров ни с кем из целей опасно не сближается. Однако помимо этих двух полярных подмножеств существуют подмножества, пребывание судна в которых при неизменных параметрах движения в дальнейшем ведут к опасному сближению с одним или несколькими партнерами по ситуации. Подмножество таких ситуаций обозначим S_ω . Именно попадание судна в такое подмножество ведет к приоритету цели обеспечения безопасности C_b . Поэтому:

$$C = \begin{cases} C_p & \text{при } s(t) \in S_s \\ C_b & \text{при } s(t) \in S_d \end{cases}.$$

При корректной оценке ситуации цель C_b становится общей целью группы судов, причем траектория общей ситуации в пространстве ситуаций управляется параметрами движения каждого судна. Теперь поведение каждого из судов по достижению возникшей цели определяется взаимодействием Vz , которое является способом поведения судов в ситуации подмножества S_ω . Если взаимодействие не носит организационного характера по согласованию совместных параметров для безопасного достижения подмножества безопасных ситуаций, то траектория в пространстве ситуаций будет изменяться хаотическим образом, и не исключен вариант, что она достигнет непредсказуемым образом подмножества недопустимых ситуаций S_d с последующим столкновением. Поэтому взаимодействие Vz , как механизм согласования по достижению общей цели предупреждения опасного сближения, учитывающего поведение каждого из партнеров в процессе расхождения, и прогнозирующее изменение ситуации, является крайне важным атрибутом, влияющим на безопасность расхождения. Таким образом, процесс расхождения является процессом перевода из ситуации подмножества S_ω в подмножество безопасных позиций S_s , согласно механизму взаимодействия. В свою очередь стратегией расхождения D является алгоритм реализации процесса расхождения.

Рассмотрим вначале характеристики ситуации для пары судов, включающей оперирующее судно и судно-цель, а затем распространим полученные результаты на группу взаимодействующих судов. Другими словами, рассматривает подмножество ситуаций S_1 .

Вероятность столкновения P_c при попадании судов в подмножество недопустимых ситуаций S_d равна 1 независимо от предпринимаемых действий по предупреждению столкновения. В свою очередь, пребывание судов в подмножестве безопасных ситуаций S_s обращает вероятность столкновения P_c в ноль. Следует отметить, что эта вероятность условная, так

как предполагается неизменность параметров движения обеих судов. Реализация ситуаций подмножества S_{ω} несет угрозу столкновения с некоторой, отличной от нуля, вероятностью P_c . Поэтому при обнаружении пребывания судна в ситуации подмножества S_{ω} им принимается решение о выборе и реализации стратегии расхождения в соответствии с возникшим типом взаимодействия. Для текущей ситуации $s_i(t)$, в которой находится судно ($s_i(t) \in S_{\omega}$), важно определить возможность перевода судна в подмножество безопасных ситуаций S_s , а если это невозможно, то в ситуацию с минимальной вероятностью столкновения с учетом возможностей управления ситуацией судном. Поэтому текущую ситуацию целесообразно характеризовать с позиций указанного обстоятельства.

Так как вероятность столкновения P_c характеризуется прогнозируемой минимальной дистанцией сближения судов, то именно дистанция кратчайшего сближения является мерой безопасности расхождения судов. Маневр расхождения выбирается таким образом, чтобы дистанция кратчайшего сближения превосходила предельно-допустимую дистанцию, а если это невозможно, то принимала вследствие маневра максимально возможное значение.

С учетом вышеизложенного следуя подходу, предложенному в работе [47], и руководствуясь [33, 34], формализуем взаимодействие судов при опасном сближении с позиций динамической управляемой системы Σ . Для такой системы Σ должно быть однозначно определено понятие состояния и задан закон, который описывает изменение начального состояния с течением времени и позволяет по начальному состоянию прогнозировать будущее состояние динамической системы.

Рассмотрим процесс расхождения судов в терминах динамической управляемой системы. Допустим, в некоторой области контроля S_c находится n судов, образующих динамическую систему, которая управляется всеми n судами.

Фазовыми координатами системы, которые описывают ее состояние X , являются координаты $\xi_i(t)$ и $\eta_i(t)$ каждого из судов и их параметры движения $V_i(t)$ и $K_i(t)$ в двумерной прямоугольной системе координат, связанной с областью контроля S_c и ориентированной в направлении N-S.

Динамическая система Σ характеризуется множеством мгновенных значений входных управляющих воздействий W , к которым в рассматриваемом случае относятся угол кладки пера руля и обороты двигателя каждого i -го судна.

Динамической системе Σ присуще множество стратегий поведения Ω , характеризующих правила выбора значений входных управляющих воздействий во времени в зависимости от текущих обстоятельств, причем входное воздействие «разделено» между участниками совместного управления ($i=1, \dots, n$).

Переходная функция состояния $\chi: [t] \times [t] \times X \times \Omega \rightarrow X$, (закон изменения состояния системы) завершает описание управляемой динамической системы стандартного типа. В нашем случае изменение динамической системы Σ описывается дифференциальными уравнениями.

Динамическая система взаимодействующих судов Σ_{ns} имеет вид:

$$\Sigma_{ns} = (t, X, D_1, \dots, D_n, \chi, Vz, M(Tr_i)),$$

где D_i - стратегии судов, Vz - взаимодействие судов, отражающее зависимость стратегий друг от друга и от текущей позиции, а $M(Tr_i)$ - совокупность программных траекторий движения судов.

При описании динамической системы Σ_{ns} возникает необходимость рассмотрения всех ее пар судов с описанием их бинарных характеристик, отражающих относительное положение.

Позицией динамической системы Σ_{ns} является относительное положение судов, которое характеризуется позиционной матрицей P_n .

Характеристикой пары судов c_{ij} , как минимальной управляемой динамической системы, является расстояние между судами l_{ij} и пеленг α_{ij} с i -го на j -е судно. Поэтому матрица P_n представляет собой квадратную матрицу размерности n , элемент которой p_{ij} характеризует пару судов c_{ij} :

$$p_{ij} = \{l_{ij}, \alpha_{ij}, K_{otij}, V_{otij}\},$$

причем K_{otij} и V_{otij} - курс и скорость относительного движения, характеризующие пространство относительного движения. Это пространство реализует движения одного судна относительно принятого неподвижным второго. Позиция первого судна задана в системе координат, связанной со вторым судном полярными координатами l_{ij} и α_{ij} , а его движение характеризуется вектором (V_{otij}, K_{otij}) .

Позиционная матрица P_n , развернутая во времени представляет собой сложный управляемый процесс P_t , содержащий подпроцессы P_{ij} для каждой пары c_{ij} судов и P_i для i -го судна, включая все остальные суда. Процесс P_t изменения позиций во времени с учетом дифференциального уравнения $\dot{P}_t = \{\dot{p}_{ij}\}$ представляет собой траекторию в пространстве (множестве) позиций.

Так, как каждое судно контролирует свое положение, как и положение окружающих подвижных объектов, с помощью судовой системы навигационной информации, то динамической системе Σ_{ns} присущ стохастический аспект, который обусловлен как элементами неопределенности поведения судов, так и наличием погрешностей измерения навигационных параметров.

Поэтому множество позиций $M(P_n)$ состоит из нескольких подмножеств $M(P_{nk})$, каждое из которых характеризуется определенной степенью опасности возникновения аварии столкновения.

Дальнейшее описание динамической системы Σ_{ns} связано с подмножествами $M(P_{nk})$ (характеризующимися от нулевой вероятности столкновения до единичной) и понятием ситуационного возмущения, для характеристики которых введем в рассмотрение минимальную динамическую управляемую систему Σ_{2s} . В ее состав входит пара судов c_{12} , которой соответствует элемент позиционной матрицы p_{12} . Исходя из наличия стохастического аспекта и аспекта неопределенности, а также в силу инерционности движущихся судов, с каждым из них связывается двумерная область, называемая областью недопустимых позиций, в которой нежелательно пребывание каких-либо посторонних объектов. При рассмотрении относительного перемещения судов таким объектом является только другое судно. Область недопустимых позиций S_{nd} должна быть сформирована таким образом, чтобы ее граница соответствовала нулевой вероятности столкновения. А каждой точке внутри области S_{nd} соответствует некоторая отличная от нуля вероятность возникновения столкновения, причем рост вероятности столкновения судов внутри области S_{nd} происходит с сокращением дистанции между судами.

Следовательно, некоторые пороговые значения вероятности столкновения внутри области S_{nd} разбивают множество позиций $M(P_n)$ на подмножества $M(P_{nk})$. Ситуационное возмущение ω_{ij} возникает при прогнозируемом попадании судов в область недопустимых позиций (первого судна в область S_{nd2} второго судна и наоборот – второго судна в область S_{nd1} первого).

С позиций характеристики взаимодействия судов целесообразно ввести матрицу ситуационного возмущения D_{bn} , которая по своей структуре аналогична позиционной матрице P_n . Элементом матрицы D_{bn} является характеристика ситуационного возмущения ω_{ij} , которая определяет уровень

опасности сближения и равна 0 при отсутствии ситуационного возмущения между парой судов c_{ij} .

Появление ситуационного возмущения ω_{12} (ω_{21}) предполагает появление взаимодействия между судами, и возникает задача компенсации ситуационного возмущения выбором соответствующей стратегии расхождения.

Таким образом, при появлении ситуационных возмущений возникает взаимодействие Vz , которое определяет формирование стратегий расхождения взаимодействующих судов. При этом взаимодействие Vz должно согласовывать маневры сближающихся судов, следовательно, оно предполагает выработку адресных согласованных стратегий для всех его участников. Поэтому Vz формально может быть записано следующим образом:

$$\mathbf{D} = Vz(\mathbf{F}), \quad (3.1)$$

где \mathbf{D} – вектор стратегий расхождения судов, составляющими которого являются N_D стратегий судов участников взаимодействия;

\mathbf{F} – существенные параметры, необходимые для определения взаимодействием Vz адресных согласованных стратегий расхождения.

Взаимодействия отличаются по числу взаимодействующих судов, что определяет размерность вектора \mathbf{D} . Вторым признаком, различающим типы взаимодействия, является матрица ситуационного возмущения D_{bn} .

Следующим обстоятельством, порождающим разные типы взаимодействия, является то, что в силу несимметричности ситуационного парного возмущения (из истинности ω_{12} не следует истинность ω_{21} и наоборот), взаимодействие может быть полным и частичным. При полном взаимодействии появляется полная система Σ_{2s} ($\omega_{12} \neq 0$ и $\omega_{21} \neq 0$). А в случае, когда одно из ситуационных возмущений отсутствует, то взаимодействие является частичным.

В настоящее время взаимодействие судов при их опасном сближении определяется МППСС-72. Рассмотрим взаимодействия, возникающие при руководстве судов требованиями МППСС-72.

3.2. Типы взаимодействия, возникающие при координации процесса расхождения с помощью МППСС-72

Взаимодействия, порождаемые МППСС-72, обозначим Vz_M , вектор стратегий расхождения судов D содержит только пару стратегий оперирующего судна и одного судна-цели, т.е. МППСС-72 оперирует только бинарными взаимодействиями, и значение $N_D=2$. Анализ МППСС-72 показывает, что в их основу положен принцип координации, согласно которому каждому из опасно сближающихся судов предписываются множества элементарных стратегий расхождения, применение которых должно обеспечить безопасное расхождение судна с целью.

Таким образом, МППСС-72 является бинарным координатором, регламентирующим взаимодействие судов при опасном сближении. Причем выходом координатора являются не конкретные стратегии, а их некоторые множества. Более того, в качестве стратегий расхождения используются курсы уклонения от программного курса. Поэтому для взаимодействия Vz_M выходными стратегиями являются множества курсов уклонения Mn_{y1} для оперирующего судна и Mn_{y2} для цели, т.е. $D=(Mn_{y1}, Mn_{y2})$.

Существенными параметрами F при формировании взаимодействия Vz_M являются ситуация $s\{D_{ij}, \alpha_{ij}, V_i, V_j, K_i, K_j\}$, статус взаимодействующих судов r_i , который определяет возможность маневрирования судна при расхождении, параметр B , характеризующий видимость, и интенсивности ситуационных возмущений ω_{12} и ω_{21} . Поэтому выражение (3.1) для бинарной координации Vz_M приобретает следующий вид:

$$(Mn_{y1}, Mn_{y2}) = Vz_M \{(D_{12}, \alpha_{12}, V_1, V_2, K_1, K_2), r_1, r_2, \omega_{12}, \omega_{21}, B\}.$$

Анализ МППСС-72 показал, что Правила содержат две независимые системы координации: для хорошей и пониженной видимости.

Рассмотрим бинарную координацию при хорошей видимости. В этом случае параметр видимости $B=1$, и подмножество ситуаций S_ω разбивается для каждого из взаимодействующих судов на три области $S_{\omega1} \dots S_{\omega3}$, что отражено в Правиле 17, в зависимости от реализовавшихся значений интенсивностей ситуационных возмущений ω_{12} и ω_{21} . Причем ситуационные возмущения характеризуют принадлежность ситуации в начальный момент обнаружения опасного сближения к одной из областей $S_{\omega i}$, которые целесообразно назвать областями взаимных обязанностей.

Интенсивность ситуационного возмущения ω_{ij} связана с областями взаимных обязанностей следующим образом:

$$\omega_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{при } S_i \in S_s \\ 1, & \text{при } S_i \in S_{\omega1} \\ 2, & \text{при } S_i \in S_{\omega2} \\ 3, & \text{при } S_i \in S_{\omega3} \end{cases},$$

С каждой из указанных областей $S_{\omega i}$ связаны разные типы взаимодействия, регламентируемые МППСС-72 в части маневрирования при возникновении угрозы столкновения:

1. Первая область $S_{\omega1}$, для которой предписывается стандартное взаимодействие, когда привилегированное судно обязано сохранять параметры движения, а партнер выполняет маневр расхождения;

2. Вторая область $S_{\omega2}$ характеризуется активизированным взаимодействием, когда привилегированное судно получает право изменять параметры движения по своему усмотрению;

3. Третья область $S_{\omega 3}$ соответствует случаю экстремального взаимодействия, когда оба судна обязаны маневрировать для предупреждения столкновения.

Основным принципом координации, который положен в основу МППСС-72, является установление отношения приоритета на паре взаимодействующих судов. При этом отношение приоритета может быть жестким, как в первом типе взаимодействия (первая область взаимных обязанностей судов), когда жестко регламентируется однозначное поведение каждого из взаимодействующих судов, или полужесткое, - во втором типе координации, когда однозначно регламентируется поведение только судна, лишенного приоритета. С учетом этого для координации в случае экстренного взаимодействия характерно отсутствие приоритета, однако в отличие от первого типа взаимодействия имеется жесткое требование однозначного активного поведения обоих судов, причем отсутствует согласованность их действия.

Для установления отношения приоритета в МППСС-72 введены две системы, одна из которых назначает приоритет судам, взаимодействующим в ситуации обгона (правило 13 МППСС-72), а вторая во всех остальных ситуациях, причем она содержит семь уровней, упорядоченных отношением приоритета: малые суда, суда с механическим двигателем, парусные суда, рыболовные суда, суда стесненные осадкой, суда ограниченные в возможности маневрировать и, наконец, суда не могущие управляться (правила 9, 10 и 18).

В случае если суда принадлежат одному уровню, то назначение приоритетов предусмотрено только для уровней: судов с механическим двигателем и парусных судов (правила 12, 14 и 15), причем только в этом случае имеются требования и рекомендации по выбору стороны уклонения при расхождении.

Следовательно, в зависимости от принадлежности начальной ситуаций судов одной из областей взаимных обязанностей, правилами предписывается

тип взаимодействия и координации, которые в случае необходимости определяют отношение приоритета и степень его жесткости, учитывая при этом принадлежность каждого из взаимодействующих судов одному из ранее перечисленных семи уровней.

Таким образом, для условий хорошей видимости формирование взаимодействия выражается следующим образом:

$$(Mn_{y1}, Mn_{y2}) = Vz_M \{(D_{12}, \alpha_{12}, V_1, V_2, K_1, K_2), r_1, r_2, \omega_{12}, \omega_{21}, 1\},$$

причем $\omega_{ij} = 0..3$, $r_i = 1..7$.

Выходные множества разрешенных уклонений судна Mn_{y1} и цели Mn_{y2} в соответствии с МППСС-72 могут содержать подмножество курсов уклонения вправо Mn_{yis} и влево Mn_{yip} от заданного курса программной траектории, причем $Mn_{yi} = Mn_{yis} \cup Mn_{yip}$. Подмножества Mn_{yis} и Mn_{yip} могут быть полными \tilde{Mn}_{yis} и \tilde{Mn}_{yip} или пустыми \check{Mn}_{yis} и \check{Mn}_{yip} . Если судно имеет приоритет, то должно сохранять свои параметры движения, и для него множества Mn_{yis} и Mn_{yip} являются пустыми, а для судна, уступающего дорогу, в зависимости от Правил указанные подмножества могут быть либо оба полными, либо одно из них полное, а второе – пустое.

Поэтому множество Mn_{yi} может характеризоваться следующими типами:

- $Mn^{(1)}_{yi}$, когда оба подмножества пустые, т.е. $Mn^{(1)}_{yi} = \check{Mn}_{yis} \cup \check{Mn}_{yip} = \emptyset$;

- $Mn^{(2)}_{yi}$, когда оба подмножества полные и $Mn^{(2)}_{yi} = \tilde{Mn}_{yis} \cup \tilde{Mn}_{yip} = \tilde{Mn}_{yi}$;

- $Mn^{(3)}_{yi}$, в этом случае подмножество Mn_{yis} является полным, а

подмножество Mn_{yip} - пустым, т.е. $Mn^{(3)}_{yi} = \tilde{Mn}_{yis} \cup \check{Mn}_{yip}$;

- $Mn^{(4)}_{yi}$, в этом случае подмножество Mn_{yis} является пустым, а подмножество Mn_{yip} - полным, т.е. $Mn^{(4)}_{yi} = \tilde{Mn}_{yis} \cup \tilde{Mn}_{yip}$.

Так как в МППСС-72 предписывается только сторона разрешенного уклонения, то полученные четыре типа множества Mn_{yi} удобней характеризовать с помощью сигналов предписанного взаимодействия (координирующих сигналов). Очевидно, для описания полученных четырех типов множества предписываемых курсов уклонения достаточно трех двоичных переменных q_1 , q_2 и q_3 , которые содержат информацию о предписываемых множествах курсов уклонения. Поэтому:

$$F = (Mn_{y1}, Mn_{y2}) = \{q_1, q_2, q_3\},$$

причем сигнал q_1 содержит информацию для каждого из судов о наличии приоритета, предписываемого координатором, а сигналы q_2 и q_3 регламентируют взаимодействующим судам возможность уклонения соответственно вправо и влево.

Приведенные сигналы имеют следующие значения:

$$q_{1i(j)} = 1, \text{ при требовании изменения параметров движения;}$$

$$q_{1i(j)} = -1, \text{ в случае требования их сохранения;}$$

$$q_{2i(j)} = 1, \text{ если правилами поворот вправо разрешен;}$$

$$q_{2i(j)} = -1, \text{ если правила запрещают поворот вправо;}$$

$$q_{3i(j)} = 1, \text{ если правилами поворот влево разрешен;}$$

$$q_{3i(j)} = -1, \text{ если правила запрещают поворот влево.}$$

В случае, когда правила позволяют судну самому решать вопрос о сохранении или изменении параметров движения, величине $q_{1i(j)}$ следует присваивать значение 0. Отметим, что каждое из судов получает от координатора одинаковую информацию, - свой координирующий сигнал

$Y_i = (q_{1i}, q_{2i}, q_{3i})$ и координирующий сигнал взаимодействующего судна $Y_j = (q_{1j}, q_{2j}, q_{3j})$, который является, так называемым, сигналом связи ω_i , так как прогнозирует поведение партнера по взаимодействию.

Следовательно, для взаимодействующих судов выход координатора имеет вид:

$$Y_i = (q_{1i}, q_{2i}, q_{3i}), \quad \omega_i = (q_{1j}, q_{2j}, q_{3j});$$

$$Y_j = (q_{1j}, q_{2j}, q_{3j}), \quad \omega_j = (q_{1i}, q_{2i}, q_{3i}).$$

При этом справедливы равенства $Y_i = \omega_j$ и $Y_j = \omega_i$.

В условиях хорошей видимости, как ранее указывалось, каждой из областей взаимных обязанностей $S_{\omega i}$ предписывается свой тип взаимодействия.

Так, в первой области $S_{\omega 1}$ реализуется первый тип взаимодействия судна и цели $Bz^{(1)}$, при котором устанавливается жесткое отношение приоритета, а множество стратегий уклонения характеризуется сигналом координации $Y_i = (-1, -1, -1)$ и сигналом связи $\omega_i = (1, q_{2j}, q_{3j})$ для судна, обладающего приоритетом, а также $Y_j = (1, q_{2j}, q_{3j})$ и $\omega_j = (-1, -1, -1)$ для судна лишенного приоритета.

Значения сигналов q_{2j} и q_{3j} , как правило, равны 1, за исключением случая взаимодействия судов с механическим двигателем, когда их значения определяются в зависимости от начальной позиции судов.

Второй тип взаимодействия и координации судов, который реализуется во второй области взаимных обязанностей судов $S_{\omega 2}$, характеризуется полужестким отношением приоритета, причем выход координатора в этом случае принимает вид $Y_i = (0, 1, 1)$, $\omega_i = (1, q_{2j}, q_{3j})$ для судна,

обладающего приоритетом, и $Y_j = (1, q_{2j}, q_{3j})$, $\omega_j = (0, 1, 1)$ для партнера.

Случай третьего типа взаимодействия связан с экстренным маневрированием, которое независимо от входа координатора определяет следующие выходные сигналы: $Y_{i(j)} = (1, 1, 1)$, $\omega_{i(j)} = (1, 1, 1)$ для обоих судов и не устанавливает отношения приоритета.

Бинарная координация в случае пониженной видимости характерна отсутствием отношения приоритета, в любом случае при расхождении судов в условиях пониженной видимости для каждого из них выход координатора $q_{1i(j)} = 1$, а значения сигналов q_{2i} и q_{3i} зависят от начальной относительной позиции.

Для условий пониженной видимости $B=0$ взаимодействие формализуется с помощью выражения:

$$(Mn_{y1}, Mn_{y2}) = Vz_m \{(D_{12}, \alpha_{12}, V_1, V_2, K_1, K_2), \omega_{12}, \omega_{21}, 0\},$$

причем отсутствует разница судов по статусу и не дифференцируется ситуационное возмущение по уровням опасности. Имеется два подмножества ситуаций, при которых ограничиваются подмножества курсов уклонения Mn_{yi} . Причем для подмножества ситуаций $S_{\omega 01} \subseteq S_{\omega}$, когда цель находится впереди траверза судна и не является обгоняемой, множество курсов уклонения судна влево Mn_{yip} должно быть пустым $\check{M}n_{yip}$. Для ситуаций $S_{\omega 02} \subseteq S_{\omega}$, когда цель находится на траверзе или позади траверза судна, нельзя изменять курс судна в сторону цели, что означает требование пустого множества курсов уклонения вправо $Mn_{yis} = \check{M}n_{yis}$, если курсовой угол равен 90° или больше и положительный. Если же курсовой угол отрицательный и равен 90° или больше, то требуется, чтобы множество курсов уклонения влево было пустым, т.е. $Mn_{yip} = \check{M}n_{yip}$. Для остальных ситуаций $S_{\omega 03} \subseteq S_{\omega}$ не

имеется ограничений на сторону уклонения судна, т.е. $Mn_{yis} = \tilde{Mn}_{yis}$ и $Mn_{yip} = \tilde{Mn}_{yip}$.

Таким образом, в условиях пониженной видимости $B=0$ подмножество ситуаций опасного сближения S_{ω} разбивается на три области $S_{\omega 01}$, $S_{\omega 02}$ и $S_{\omega 03}$. В отличие от взаимодействия судов при хорошей видимости, в случае пониженной видимости отсутствует отношение приоритета между взаимодействующими судами, т.е. оба судна должны предпринять маневр расхождения. Поэтому координатор МППСС-72 формирует для каждого судна взаимодействующей пары сигнал взаимодействия Y_j , однако сигнал связи ω_i отсутствует. Для всех трех подмножеств сигналы $q_{1i(j)} = 1$, следовательно, в разных областях ситуаций S_{ω} будут различные сигналы взаимодействия q_{2i} и q_{3i} . При реализации подмножества ситуаций $S_{\omega 01} \subseteq S_{\omega}$ для оперирующего судна $q_{2i} = 1$ и $q_{3i} = -1$.

Если судно окажется в подмножестве ситуаций $S_{\omega 02}$, то $q_{2i} = -1$ и $q_{3i} = 1$ при $\sin KY > 0$ и $\cos KY < 0$, где KY - курсовой угол цели. Если в той же ситуации $\sin KY < 0$ и $\cos KY < 0$, то $q_{2i} = 1$ и $q_{3i} = -1$.

При попадании судна в ситуацию $S_{\omega 03}$ сигналы принимают следующие значения $q_{2i} = 1$ и $q_{3i} = 1$. В ситуациях пониженной видимости для обоих судов сигналом связи является $\omega_{i(j)} = (1, 0, 0)$.

С учетом координации при пониженной видимости на вход координатора следует подавать сигнал, характеризующий состояние видимости.

Таким образом, требования МППСС-72 в части взаимных обязанностей судов при маневрировании в случае опасного сближения могут быть представлены моделью обобщенного координатора, как системы типа «вход-выход», который при наличии ситуационного возмущения однозначно

определяет поведение оперирующего судна с помощью выходного сигнала координации Y_i и прогнозирует требуемое поведение цели с помощью сигнала связи ω_i .

В практическом аспекте по входному сигналу координатора \mathbf{F} надлежит выявить реализовавшееся подмножество ситуаций и тип взаимодействия Vz_{mi} и соответствующее ему частное отображение, по которому надлежит получить искомые значения сигналов взаимодействия Y_i и связи ω_i .

3.3 Формализация типов взаимодействия

Рассмотрим множество взаимодействий, регламентируемых МППСС-72 и возникающих при опасном сближении оперирующего судна с целью, и найдем их аналитическое описание. Для решения поставленной задачи необходимо по входному вектору \mathbf{F} определить, относится ли текущая ситуация S_i к подмножеству ситуаций опасного сближения S_ω и если принадлежит, идентифицировать текущую ситуацию с областями ситуационного возмущения $S_{\omega i}$. После этого определяется тип взаимодействия, соответствующий полученной области ситуационного возмущения $S_{\omega i}$.

Для проверки текущей ситуации S_i на принадлежность к подмножеству ситуаций опасного сближения S_ω необходимо определить скорость изменения дистанции между судном и целью \dot{D} . Очевидно, что $S_i \in S_\omega$ лишь при сближении судов, т.е. при $\dot{D} < 0$.

Найдем выражение для скорости изменения дистанции \dot{D} , для чего обратимся к рис. 3.1. Положение судна 1 определяется координатами X_1, Y_1 , а его параметры движения V_1 и K_1 . Цель 2 расположена в точке с координатами X_2, Y_2 а ее параметры движения V_2 и K_2 .

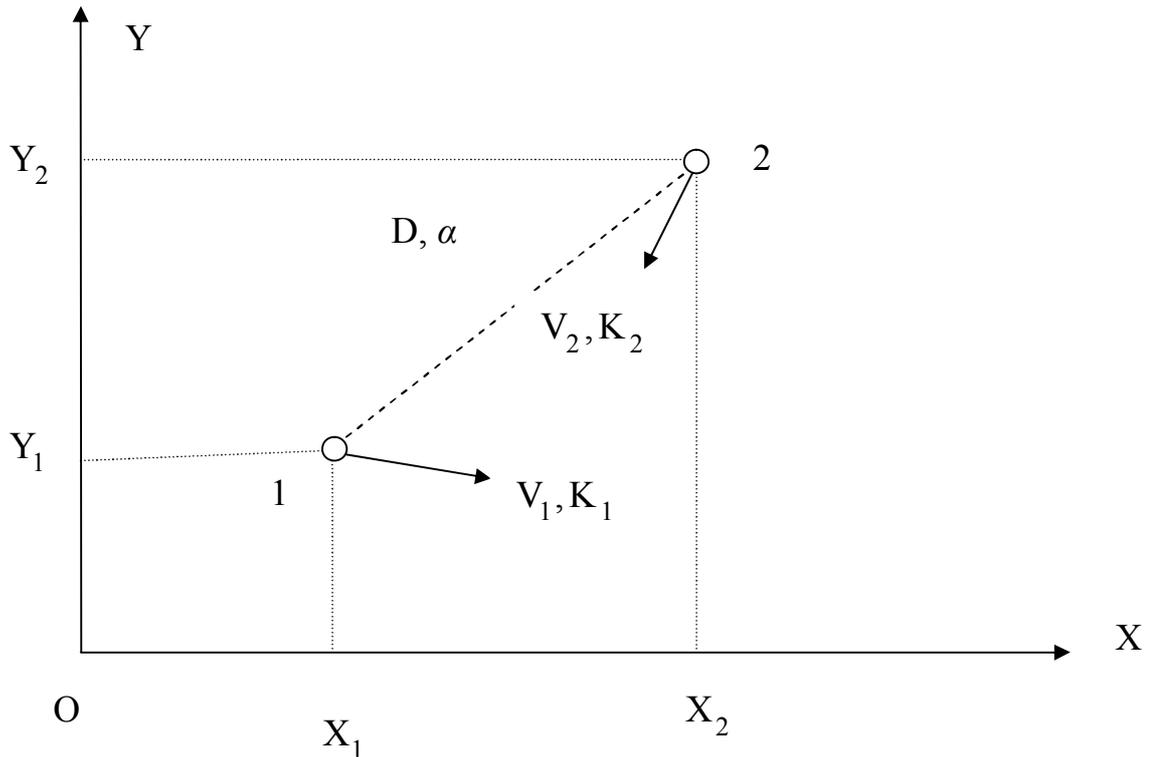


Рис. 3.1. Сближение судна 1 с целью 2

Расстояние D между судном и целью выражается формулой:

$$D = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2}.$$

Найдем первую производную расстояния D :

$$\begin{aligned} \dot{D} &= \frac{1}{2} \frac{2(X_2 - X_1)(\dot{X}_2 - \dot{X}_1) + 2(Y_2 - Y_1)(\dot{Y}_2 - \dot{Y}_1)}{D} \quad \text{или} \\ \dot{D} &= \frac{(X_2 - X_1)(\dot{X}_2 - \dot{X}_1) + (Y_2 - Y_1)(\dot{Y}_2 - \dot{Y}_1)}{D}. \end{aligned} \quad (3.2)$$

Обращаем внимание на то, что $X_2 = X_1 + D \sin \alpha$ и $Y_2 = Y_1 + D \cos \alpha$.

Также справедливы соотношения $\dot{X}_1 = V_1 \sin K_1$, $\dot{Y}_1 = V_1 \cos K_1$,

$\dot{X}_2 = V_2 \sin K_2$ и $\dot{Y}_2 = V_2 \cos K_2$.

Поэтому выражение (3.2) принимает вид:

$$\dot{D} = \frac{D \sin \alpha (V_2 \sin K_2 - V_1 \sin K_1) + D \cos \alpha (V_2 \cos K_2 - V_1 \cos K_1)}{D}, \quad \text{или}$$

$$\begin{aligned}\dot{D} &= V_2 \sin K_2 \sin \alpha - V_1 \sin K_1 \sin \alpha + V_2 \cos K_2 \cos \alpha - V_1 \cos K_1 \cos \alpha = \\ &= V_2 (\sin K_2 \sin \alpha + \cos K_2 \cos \alpha) - V_1 (\sin K_1 \sin \alpha + \cos K_1 \cos \alpha).\end{aligned}$$

Окончательно получим выражение для изменения дистанции \dot{D} :

$$\dot{D} = V_2 \cos(K_2 - \alpha) - V_1 \cos(K_1 - \alpha).$$

Для определения \dot{D} из входного вектора \mathbf{F} надлежит использовать значения пеленга с судна на цель α , параметры движения судна и цели K_1 , V_1 , K_2 , V_2 и рассчитать значение \dot{D} по полученной формуле, в которой параметры движения цели K_2 и V_2 могут быть получены с помощью АИС.

Условие $\dot{D} < 0$ является необходимым, но не достаточным условием принадлежности ситуации S_i к подмножеству S_ω . В работе [47] для определения областей взаимных обязанностей судов различаются две предельно-допустимые дистанции кратчайшего сближения D_{dop} и $\min D_{\text{dop}}$, причем величина минимальной предельно-допустимой дистанции кратчайшего сближения $\min D_{\text{dop}}$ определяется габаритами сближающихся судов и запасом дистанции, предупреждающей явление присасывания. Величина предельно-допустимой дистанции кратчайшего сближения D_{dop} дополнительно учитывает возможные погрешности в определении относительной позиции цели и запас дистанции на форс-мажорные обстоятельства.

Поэтому достаточным условием возникновения ситуационного возмущения и попадания ситуации S_i в подмножество S_ω является событие, которое заключается в том, что прогнозируемое значение дистанции кратчайшего сближения $\min D$ меньше предельно-допустимой дистанции кратчайшего сближения D_{dop} , т.е. $\min D < D_{\text{dop}}$. Если это условие не соблюдается то ситуационное возмущение отсутствует и $S_i \in S_s$.

Дальнейшее определение областей подмножества S_ω зависит от состояния видимости V .

В случае хорошей видимости подмножество ситуаций S_ω состоит из областей ситуаций $S_{\omega 1}$, $S_{\omega 2}$ и $S_{\omega 3}$, причем $S_\omega = \bigcup_{i=1}^3 S_{\omega i}$. Реализация данных ситуаций происходит в зависимости от величины дистанции кратчайшего сближения $\min D$.

В случае если $\min D > D_{\text{доп}}$, то ситуация S_i принадлежит подмножеству безопасных ситуаций S_s . Если данное условие не выполняется, а дистанция кратчайшего сближения $\min D$ больше минимальной предельно-допустимой дистанции кратчайшего сближения $\min D_{\text{доп}}$, т.е. $\min D_{\text{доп}} < \min D < D_{\text{доп}}$, то текущая ситуация S_i принадлежит к первой области взаимных обязанностей $S_{\omega 1}$.

При условии, что $\min D$ окажется меньше значения $\min D_{\text{доп}}$, но окажется больше величины максимально – возможной дистанции кратчайшего сближения $\max(\min D)$, которая определяется возможностями управления оперирующего судна ситуацией сближения, т. е. выполняется условие $\max(\min D) < \min D < \min D_{\text{доп}}$, то ситуация S_i принадлежит ко второй области взаимных обязанностей $S_{\omega 2}$.

Текущая ситуация S_i будет принадлежать к третьей области взаимных обязанностей $S_{\omega 3}$, если дистанция кратчайшего сближения $\min D$ окажется меньше максимально – возможной дистанции кратчайшего сближения $\max(\min D)$, которая не превосходит $\min D_{\text{доп}}$, т. е. при условии $\min D < \max(\min D) < \min D_{\text{доп}}$.

Дистанции кратчайшего сближения $\min D$ зависит от относительной позиции (D_{12}, α_{12}) и параметров движения судна и цели K_1, V_1, K_2, V_2 и ее можно рассчитать с помощью выражения [47]:

$$\min D = \frac{D}{V_0} \text{Abs}[(V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2) \cos \alpha - (V_1 \cos K_1 - V_2 \cos K_2) \sin \alpha], \quad (3.2)$$

где $V_o = \sqrt{V_1^2 + V_2^2 - 2V_1V_2\cos(K_1 - K_2)}$.

Более удобная форма записи $\min D$ имеет следующий вид:

$$\min D = \text{Abs}[D\sin(K_{ot} - \alpha)],$$

где K_{ot} - относительный курс, который определяется формулой

$$K_{ot} = \arctg \frac{(V_1\sin K_1 - V_2\sin K_2)}{(V_1\cos K_1 - V_2\cos K_2)}.$$

Реализация одной из областей $S_{\omega i}$ подмножества ситуаций S_{ω} формализуется следующим соотношением:

$$S_{\omega i} = \begin{cases} S_{\omega 1}, & \text{если } \min D_{dop} < D\sin(K_{ot} - \alpha) < D_{dop} \\ S_{\omega 2}, & \text{если } \max(\min D) < D\sin(K_{ot} - \alpha) < \min D_{dop} \\ S_{\omega 3}, & \text{если } D\sin(K_{ot} - \alpha) < \max(\min D) < \min D_{dop} \end{cases} \quad (3.3)$$

Таким образом по значению входного вектора \mathbf{F} производится определение области взаимных обязанностей и принадлежность текущей ситуации S_i соответствующей области ситуаций опасного сближения.

В отличие от области $S_{\omega 3}$ ситуаций опасного сближения, область ситуаций $S_{\omega 1}$ согласно требованиям МППСС-72 состоит из нескольких подмножеств ситуаций, прежде всего по признаку наличия обгона область $S_{\omega 1}$ делится на два подмножества: при наличии обгона $S_{\omega 1}^{p1}$ и при его отсутствии $S_{\omega 1}^{p0}$.

В свою очередь подмножество $S_{\omega 1}^{p0}$, содержащее ситуации опасного сближения на встречных курсах, состоит из подмножеств, характеризующих статусы судна r_1 и цели r_2 . Причем существенны два подмножества по признаку статуса судна и цели: подмножество ситуаций с одинаковыми статусами судна и цели $S_{\omega 1}^{r=}$ и с разными статусами $S_{\omega 1}^{r\neq}$. Причем ситуации подмножества $S_{\omega 1}^{r\neq}$ рассматриваются в Правиле 18 МППСС-72, а подмножество ситуаций с одинаковым статусом судна и цели $S_{\omega 1}^{r=}$ является

объединением трех подмножеств: ситуации сближения судов с механическим двигателем ($r_1=r_2=1$) $S_{\omega_1}^{r1}$, ситуации сближения парусных судов ($r_1=r_2=2$) $S_{\omega_1}^{r2}$ и подмножество ситуаций со статусами больше второго $S_{\omega_1}^{r>2}$.

Подмножество ситуаций $S_{\omega_1}^{r1}$ состоит из подмножества ситуаций сближения на противоположных курсах $S_{\omega_1}^o$ (Правило 14) и подмножества сближения на пересекающихся курсах $S_{\omega_1}^c$ (Правило 15). Аналогично подмножество $S_{\omega_1}^{r2}$ содержит подмножество ситуаций сближения судов, идущих разными галсами $S_{\omega_1}^{s1}$, и подмножество ситуаций, когда парусные суда сближаются одним галсом $S_{\omega_1}^{s2}$.

Для формализации взаимодействия Bz_M необходимо аналитическое описание двух процедур: первая - по входному вектору F найти соответствующее ему подмножество возмущенных ситуаций $S_{\omega_j}^f$, которому принадлежит текущая ситуация S_i , и вторая - указать сигналы взаимодействия Y_i и связи ω_i , возникающие при реализации подмножества ситуаций $S_{\omega_j}^f$.

Первая процедура определяет частное взаимодействие $Bz_{M1}^{(j)}$, которое реализует отображение входного вектора F в подмножество ситуаций $S_{\omega_j}^f$, т.е. $S_{\omega_j}^f = Bz_{M1}^{(j)}(F)$, а вторая процедура устанавливает соответствие $Bz_{M2}^{(j)}$ между подмножествами ситуаций $S_{\omega_j}^f$ и выходными сигналами $\{Y_j, \omega_j\}$, причем $\{Y_j, \omega_j\} = Bz_{M2}^{(j)}(S_{\omega_j}^f)$.

Объединение частных взаимодействий $Bz_{M1}^{(j)}$ и $Bz_{M2}^{(j)}$ определяет частное взаимодействие $Bz_M^{(j)}$, которое формально выражается следующим образом:

$$Bz_M^{(j)} = \{ Bz_{M1}^{(j)} \wedge Bz_{M2}^{(j)} \}. \quad (3.4)$$

Рассмотрим частные взаимодействия $Bz_{M1}^{(j)}$, для чего, используя необходимые компоненты входного вектора \mathbf{F} , найдем аналитические выражения (математические условия), которые определяют принадлежность текущей ситуации судна и цели к подмножеству ситуаций $S_{\omega_j}^f$.

Раньше получили условия (3.3) принадлежности ситуации S_i к областям взаимных обязанностей S_{ω_1} , S_{ω_2} и S_{ω_3} . Поэтому частные взаимодействия первой процедуры $Bz_{M1}^{(j)}$ имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} Bz_{M1}^{(1)}(S_i \in S_{\omega_1}) &= \{\dot{D} < 0, \min D_{\text{dop}} < D \sin(K_{\text{от}} - \alpha) < D_{\text{dop}}\}, \\ Bz_{M1}^{(2)}(S_i \in S_{\omega_2}) &= \{\dot{D} < 0, \max(\min D) < D \sin(K_{\text{от}} - \alpha) < \min D_{\text{dop}}\}, \\ Bz_{M1}^{(3)}(S_i \in S_{\omega_3}) &= \{\dot{D} < 0, D \sin(K_{\text{от}} - \alpha) < \max(\min D) < \min D_{\text{dop}}\}. \end{aligned} \quad (3.5)$$

Для определения подмножеств ситуаций по признаку обгона $S_{\omega_1}^{p1}$ и $S_{\omega_1}^{p0}$ необходимо найти частные взаимодействия при наличии ситуации обгона и при ее отсутствии, при этом подмножество ситуации обгона $S_{\omega_1}^{p1}$ состоит из подмножества $S_{\omega_1}^{p2}$, когда оперирующее судно является обгоняющим, и подмножества $S_{\omega_1}^{p3}$, в котором оперирующее судно является обгоняемым. В работе [47] показано, что подмножество ситуаций обгона $S_{\omega_1}^{p2}$ имеет место, если выполняются условия $\sin(\alpha + 180 - \beta_s) > 0$ и $\sin(\beta_p - \alpha - 180) > 0$, т.е. обратный пеленг на цель $\alpha + 180$ находится между направлениями β_s и β_p , определяющими границы видимости кормового огня цели, причем $\beta_s = K_2 + 180 - 67,5$, $\beta_p = K_2 + 180 + 67,5$, как показано на рис. 3.2.

Поэтому частное взаимодействие $Bz_{M1}^{(6)}$, характеризующее оперирующее судно как обгоняющее, и его принадлежность к подмножеству $S_{\omega_1}^{p2}$, с учетом того, что реализуется ситуация S_{ω_1} , имеет вид:

$Bz_{M1}^{(6)}(S_i \in S_{\omega 1}^{p2}) = \{Bz_{M1}^{(1)}, \sin(\alpha + 180 - K_2 - 112,5) > 0, \sin(K_2 + 247,5 - \alpha - 180) > 0\}$
, или $Bz_{M1}^{(6)}(S_i \in S_{\omega 1}^{p2}) = \{Bz_{M1}^{(1)}, \sin(\alpha + 67,5 - K_2) > 0, \sin(K_2 + 67,5 - \alpha) > 0\}$.

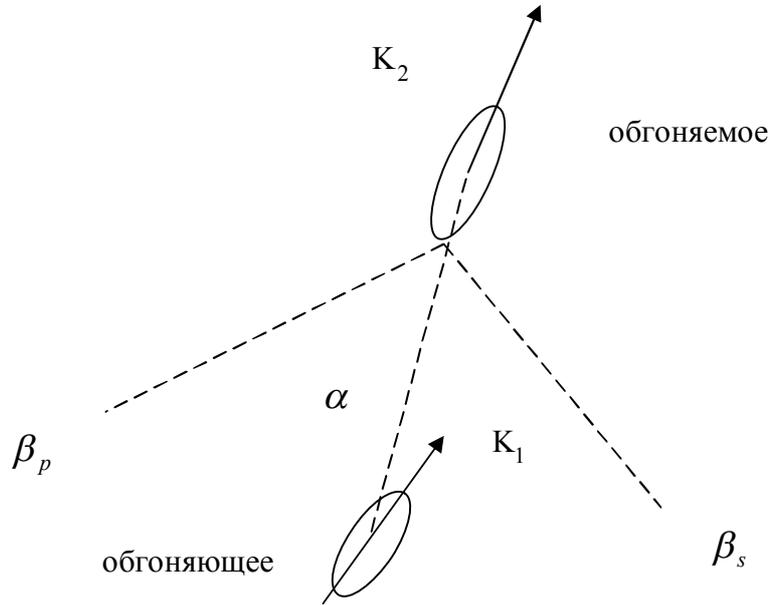


Рис. 3.2. Ситуация обгона

Из рис. 3.2 следует, что в ситуации обгона $S_{\omega 1}^{p3}$, когда оперирующее судно является обгоняемым, пеленг α заключен между направлениями β_s и β_p , которые определяются по отношению к его курсу K_1 , причем $\beta_s = K_1 + 180 - 67,5$, $\beta_p = K_1 + 180 + 67,5$ и справедливы следующие условия $\sin(\alpha - \beta_s) > 0$ и $\sin(\beta_p - \alpha) > 0$. Поэтому частное взаимодействие $Bz_{M1}^{(7)}$, соответствующее реализации подмножества $S_{\omega 1}^{p3}$, имеет вид:

$$Bz_{M1}^{(7)}(S_i \in S_{\omega 1}^{p3}) = \{Bz_{M1}^{(1)}, \sin(\alpha - 112,5 - K_1) > 0, \sin(K_1 + 247,5 - \alpha) > 0\}.$$

Частное взаимодействие $Bz_{M1}^{(4)}$ при отсутствии обгона формализуется выражением:

$$Bz_{M1}^{(4)}(S_i \in S_{\omega 1}^{p0}) = \{Bz_{M1}^{(1)}, \bar{Bz}_{M1}^{(6)}, \bar{Bz}_{M1}^{(7)}\},$$

где $\bar{Bz}_{M1}^{(6)}$ и $\bar{Bz}_{M1}^{(7)}$ - отсутствие соответствующих взаимодействий, когда необходимые условия реализации не выполняются.

В дальнейшем рассмотрим подмножества ситуаций $S_{\omega 1}^{r=}$ и $S_{\omega 1}^{r\neq}$, зависящих от соотношения статусов судна и цели, и соответствующие частные взаимодействия $Bz_{M1}^{(8)}$ и $Bz_{M1}^{(9)}$.

Очевидно, взаимодействие $Bz_{M1}^{(8)}$, характеризующее ситуации опасного сближения судов с разным статусом, имеет следующее аналитическое выражение, учитывая реализацию взаимодействия $Bz_{M1}^{(4)}$:

$$Bz_{M1}^{(8)}(S_i \in S_{\omega 1}^{r\neq}) = \{Bz_{M1}^{(4)}, r_1 \neq r_2\}.$$

Частное взаимодействие $Bz_{M1}^{(9)}$, которое имеет место при взаимодействии судов с одинаковым статусом, описывается следующим образом:

$$Bz_{M1}^{(9)}(S_i \in S_{\omega 1}^{r=}) = \{Bz_{M1}^{(4)}, r_1 = r_2\}.$$

Подмножество ситуаций опасного сближения судов с механическим двигателем $S_{\omega 1}^{r1}$ характеризуется взаимодействием $Bz_{M1}^{(10)}$, которое имеет вид:

$$Bz_{M1}^{(10)}(S_i \in S_{\omega 1}^{r1}) = \{Bz_{M1}^{(4)}, r_1 = r_2 = 1\}.$$

Частное взаимодействие $Bz_{M1}^{(11)}$, возникающее при реализации подмножества ситуаций сближения на противоположных курсах $S_{\omega 1}^o$, требует формулировки условия возникновения такой ситуации, для чего целесообразно воспользоваться результатом, изложенным в работе [97], в которой указывается, что ситуация сближения судов на встречных курсах характеризуется неравенствами $(\alpha - K_1) \leq 5^\circ$ и $(\alpha + 180 - K_2) \leq 5^\circ$, как показано на рис. 3.3.

Указанное условие имеет следующее математическое выражение:

$$\cos(\alpha - K_1) \leq \cos 5, \cos(\alpha + 180 - K_2) \leq \cos 5.$$

Поэтому взаимодействие $Bz_{M1}^{(11)}$ выражается следующим образом:

$$Bz_{M1}^{(11)}(S_i \in S_{\omega 1}^o) = \{Bz_{M1}^{(10)}, \cos(\alpha - K_1) \leq \cos 5, \cos(\alpha + 180 - K_2) \leq \cos 5\}.$$

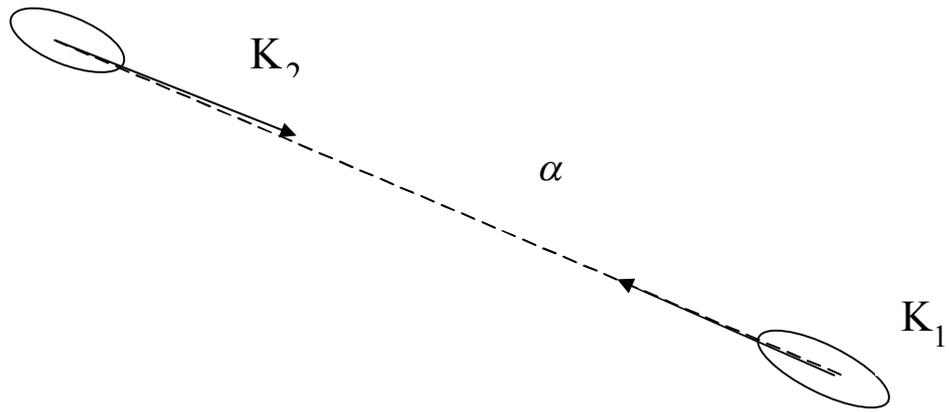


Рис. 3.3. Ситуация сближения судов на встречных курсах

Подмножеству ситуаций сближения судов с механическим двигателем на пересекающихся курсах $S_{\omega 1}^c$ соответствует частное взаимодействие $Bz_{M1}^{(12)}$, причем условие, соответствующее ситуации пересечения курсов, определяется тем, что курсовые углы β_1 и β_2 судна и цели имеют противоположные знаки, как показано на рис. 3.4., т.е. $\sin \beta_1 \sin \beta_2 < 0$.

Учитывая, что $\beta_1 = \alpha - K_1$ и $\beta_2 = \alpha + 180 - K_2$, условие возникновения ситуации $S_{\omega 1}^c$ характеризуется следующим неравенством:

$$\sin(\alpha - K_1) \sin(\alpha + 180 - K_2) < 0.$$

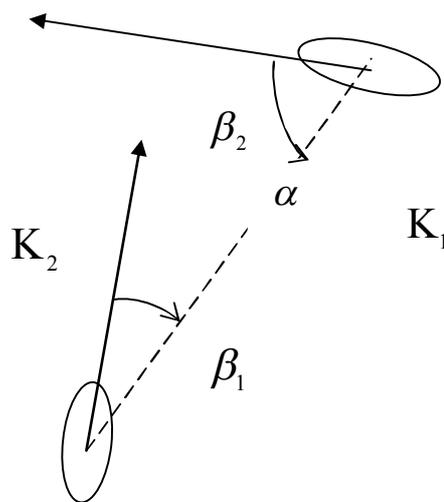


Рис. 3.4. Ситуация опасного сближения судов на пересекающихся курсах

Цель находится справа от судна, если выполняется неравенство $\sin(\alpha - K_1) > 0$. В противном случае цель находится слева от судна. Поэтому подмножество ситуаций $S_{\omega_1}^c$ целесообразно представить двумя подмножествами ситуаций пересечения курсов $S_{\omega_1}^{cs}$, когда цель справа по носу и $S_{\omega_1}^{cp}$, если цель слева от курса.

Поэтому частное взаимодействие $Bz_{M1}^{(12)}$ характеризует реализацию подмножества ситуаций $S_{\omega_1}^c$ и оно имеет вид:

$$Bz_{M1}^{(12)}(S_i \in S_{\omega_1}^c) = \{Bz_{M1}^{(10)}, \sin(\alpha - K_1)\sin(\alpha + 180 - K_2) < 0\},$$

а частные взаимодействия $Bz_{M1}^{(13)}$ и $Bz_{M1}^{(14)}$ соответствуют подмножествам $S_{\omega_1}^{cs}$ и $S_{\omega_1}^{cp}$, причем:

$$Bz_{M1}^{(13)}(S_i \in S_{\omega_1}^{cs}) = \{Bz_{M1}^{(12)}, \sin(\alpha - K_1) > 0\} \text{ и}$$

$$Bz_{M1}^{(14)}(S_i \in S_{\omega_1}^{cp}) = \{Bz_{M1}^{(12)}, \sin(\alpha - K_1) < 0\}.$$

Подмножество $S_{\omega_1}^{r2}$ характеризует взаимодействие $Bz_{M1}^{(15)}$ парусных судов, которое имеет следующий вид:

$$Bz_{M1}^{(15)}(S_i \in S_{\omega_1}^{r2}) = \{Bz_{M1}^{(4)}, r_1 = r_2 = 2\}.$$

Подмножество $S_{\omega_1}^{s1}$ парусных судов, идущих разными галсами, имеет частное взаимодействие $Bz_{M1}^{(16)}(S_i \in S_{\omega_1}^{s1}) = \{Bz_{M1}^{(15)}, \gamma_1 \neq \gamma_2\}$, а подмножество $S_{\omega_1}^{s2}$ - частное взаимодействие $Bz_{M1}^{(17)}(S_i \in S_{\omega_1}^{s1}) = \{Bz_{M1}^{(15)}, \gamma_1 = \gamma_2\}$, где γ_1, γ_2 - галсы парусных судов.

Подмножество ситуаций $S_{\omega_1}^{r>2}$, которое описывается взаимодействием $Bz_{M1}^{(18)}$ судов с одинаковым статусом большим двух, формализуется следующим образом:

$$Bz_{M1}^{(18)}(S_i \in S_{\omega_1}^{r>2}) = \{Bz_{M1}^{(4)}, r_1 = r_2 > 2\}.$$

Кроме рассмотренных ситуаций опасного сближения судов существует подмножество ситуаций сближения судов с механическим двигателем, когда относительное положение судов не относится к ситуации обгона, контркурсов и пересекающихся курсов, - это ситуации когда суда сближаются на курсовых углах одного знака.

На рис. 3.5 показана ситуация, когда сближение судов происходит на правых курсовых углах, а на рис 3.6 – на левых курсовых углах..

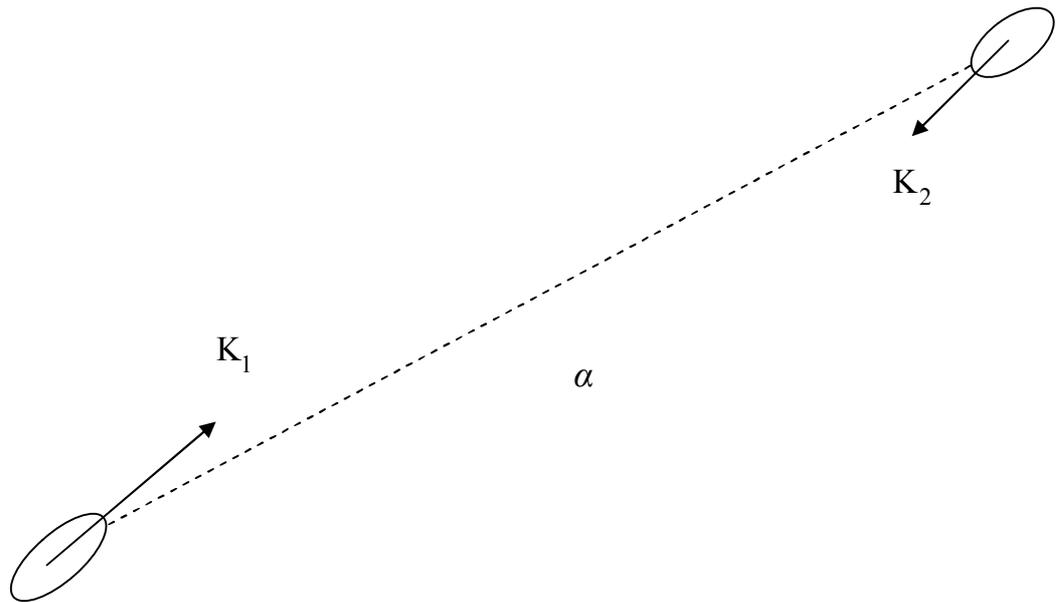


Рис. 3.5. Ситуация сближения судна и цели на правых курсовых углах

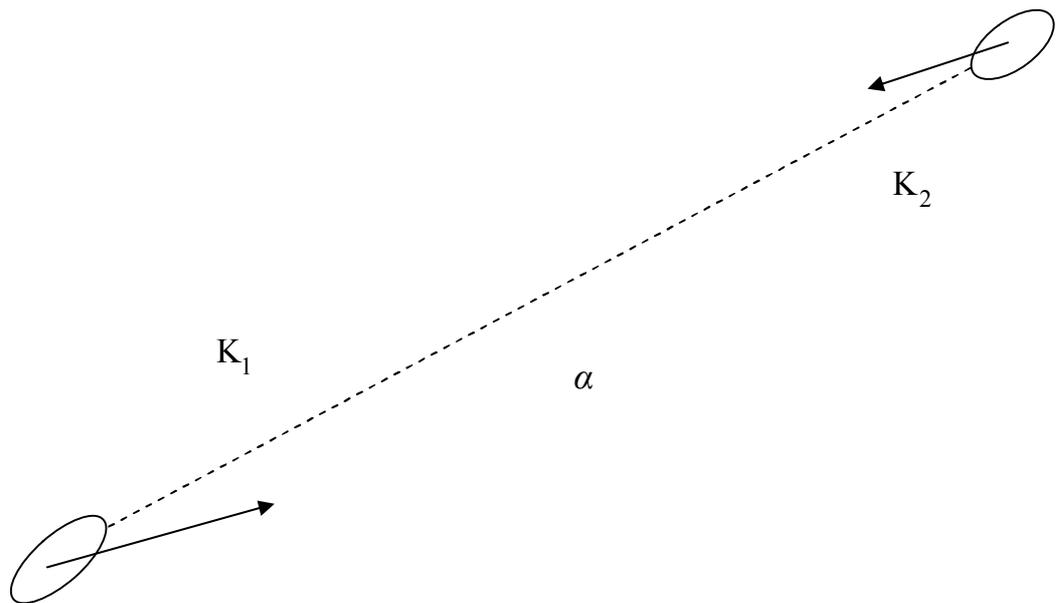


Рис. 3.6. Ситуация сближения судна и цели на левых курсовых углах

Очевидно, что условие возникновения ситуации сближения на курсовых углах одного борта, как следует из двух последних рисунков, имеет следующий вид:

$$\sin(\alpha - K_1) \sin(\alpha + 180 - K_2) > 0.$$

Обозначим подмножество таких ситуаций $S_{\omega 1}^n$, а возникающее взаимодействие - $Bz_{M1}^{(41)}$. Причем указанное взаимодействие формализуется следующим образом:

$$Bz_{M1}^{(41)}(S_i \in S_{\omega 1}^n) = \{Bz_{M1}^{(10)}, \sin(\alpha - K_1) \sin(\alpha + 180 - K_2) > 0\}$$

Подмножество ситуаций $S_{\omega 1}^n$ состоит из подмножества нахождения цели с правого борта $S_{\omega 1}^{ns}$ и с левого борта $S_{\omega 1}^{np}$, при этом возникают соответственно взаимодействия $Bz_{M1}^{(42)}$ и $Bz_{M1}^{(43)}$:

$$Bz_{M1}^{(42)}(S_i \in S_{\omega 1}^{ns}) = \{Bz_{M1}^{(41)}, \sin(\alpha - K_1) > 0\};$$

$$Bz_{M1}^{(43)}(S_i \in S_{\omega 1}^{np}) = \{Bz_{M1}^{(41)}, \sin(\alpha - K_1) < 0\}.$$

Аналогично определяются подмножества ситуаций в случае реализации второй области взаимных обязанностей $S_{\omega 2}$, причем подмножество возмущенных ситуаций обозначается $S_{\omega 2}^f$ (поменяли нижний индекс с 1 на 2), а определение частных взаимодействий $Bz_{M1}^{(j)}$ одинаково с первой областью взаимных обязанностей, т.е. $Bz_{M1}^{(j+18)}(S_i \in S_{\omega 2}^f) \equiv Bz_{M1}^{(j)}(S_i \in S_{\omega 1}^f)$.

Таким образом, совокупность частных взаимодействий $Bz_{M1}^{(j)}$ ($j = 1..36$) образуют идентификатор текущей ситуации при хорошей видимости Bz_{M1} , который по входному вектору \mathbf{F} позволяет найти соответствующее ему подмножество возмущенных ситуаций $S_{\omega j}^f$, которому принадлежит текущая

$$\text{ситуация } S_i, \text{ причем } Bz_{M1} = \bigcup_{i=1}^{36} Bz_{M1}^{(j)}.$$

Совокупность вторых частных взаимодействий $Bz_{M2}^{(j)}$ составляет координатор взаимодействий Bz_{M2} , который формирует координирующие сигналы взаимодействия Y_i и связи ω_i , соответствующие возмущенной ситуации $S_i \in S_{\omega_j}^f$. Очевидно, множество вторых частных взаимодействий $Bz_{M2}^{(j)}$ соответствует множеству типов подмножеств ситуаций, поэтому $Bz_{M2} = \bigcup_{i=1}^{36} Bz_{M2}^{(i)}$. Следует отметить, что вторые частные взаимодействия $Bz_{M2}^{(j)}$ являются формализацией Правил 12..19 МППСС-72.

Представим в табличном виде перечень подмножеств возмущенных ситуаций $S_{\omega_j}^f$, которые могут быть получены с выхода идентификатора текущей ситуации при хорошей видимости Bz_{M1} , соответствующие им сигналы $Bz_{M2}^{(j)}$ координатора взаимодействий Bz_{M2} с указанием Правила МППСС-72, по которому получено:

$$Bz_{M2}^{(j)} = \{Y_j, \omega_j\} = \{(q_{1i}, q_{2i}, q_{3i}), (q_{1j}, q_{2j}, q_{3j})\}.$$

Перечень полученных подмножеств возмущенных ситуаций $S_{\omega_j}^f$ и соответствующие им сигналы координатора взаимодействий $\{(q_{1i}, q_{2i}, q_{3i}), (q_{1j}, q_{2j}, q_{3j})\}$ приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Сигналы координатора взаимодействий $Bz_{M2}^{(j)}$

№ п/п	Ситуац.	Сигналы $Bz_{M2}^{(j)}$	Правило МППСС-72
1.	$S_{\omega_1}^{p2}$	$Bz_{M2}^{(6)} = \{(1,1,1)(-1,-1,-1)\}$	Ситуация обгона, обгоняющее судно, Правило 13.
2.	$S_{\omega_1}^{p3}$	$Bz_{M2}^{(7)} = \{(-1,-1,-1)(1,1,1)\}$	Ситуация обгона, обгоняемое судно, Правило 13.

№ п/п	Ситуац.	Сигналы $Bz_{M2}^{(j)}$	Правило МППСС-72
3.	$S_{\omega 1}^{r \neq}$	$Bz_{M2}^{(8)} = \{(-1, -1, -1)(1, 1, 1)\}$ $r_1 > r_2$	Суда с различным статусом, Правило 18.
4.	$S_{\omega 1}^{r =}$		Равные статусы, Правила 12, 14, 15.
5.	$S_{\omega 1}^{r1}$		Суда с механическим двигателем, Правила 14 и 15.
6.	$S_{\omega 1}^o$	$Bz_{M2}^{(11)} = \{(1, 1, -1)(1, 1, -1)\}$	Противоположные курсы, Правило 14.
7.	$S_{\omega 1}^c$		Пересекающиеся курсы, Правило 15.
8.	$S_{\omega 1}^{cs}$	$Bz_{M2}^{(13)} = \{(1, 1, -1)(-1, -1, -1)\}$	Пересекающиеся курсы, цель справа, Правило 15.
9.	$S_{\omega 1}^{cp}$	$Bz_{M2}^{(14)} = \{(-1, -1, -1)(1, 1, -1)\}$	Пересекающиеся курсы, цель слева, Правило 15.
10.	$S_{\omega 1}^{r2}$		Парусные суда, Правило 12.
11.	$S_{\omega 1}^{s1}$	$Bz_{M2}^{(16)} = \{(1, 1, 1)(-1, -1, -1)\}$	Разные галсы, судно идет левым галсом, Правило 12.
12.	$S_{\omega 1}^{s2}$	$Bz_{M2}^{(17)} = \{(1, 1, 1)(-1, -1, -1)\}$	Одинаковые галсы, судно на ветре, Правило 12.
13.	$S_{\omega 1}^{r > 2}$	$Bz_{M2}^{(18)} = \{(0, 0, 0)(0, 0, 0)\}$	Суда с одинаковым статусом больше второго.
14.	$S_{\omega 2}^{p2}$	$Bz_{M2}^{(24)} = \{(1, 1, 1)(0, 0, 0)\}$	Ситуация обгона, обгоняющее судно, Правило 13.

Продолжение табл. 3.1

№ п/п	Ситуац.	Сигналы $Bz_{M2}^{(j)}$	Правило МППСС-72
15.	$S_{\omega 2}^{p3}$	$Bz_{M2}^{(25)} = \{(0,0,0)(1,1,1)\}$	Ситуация обгона, обгоняемое судно, Правило 13.
16.	$S_{\omega 2}^{r \neq}$	$Bz_{M2}^{(26)} = \{(0,0,0)(1,1,1)\}$ $r_1 > r_2$	Суда с различным статусом, Правило 18.
17.	$S_{\omega 2}^{r =}$		Равные статусы судов.
18.	$S_{\omega 2}^{r1}$		Суда с механическим двигателем, Правила 14 и 15.
19.	$S_{\omega 2}^o$	$Bz_{M2}^{(29)} = \{(1,1,-1)(1,1,-1)\}$	Противоположные курсы, Правило 14.
20.	$S_{\omega 2}^c$		Пересекающиеся курсы, Правило 15.
21.	$S_{\omega 2}^{cs}$	$Bz_{M2}^{(31)} = \{(1,1,-1)(0,0,0)\}$	Пересекающиеся курсы, цель справа, Правило 15.
22.	$S_{\omega 2}^{cp}$	$Bz_{M2}^{(32)} = \{(0,0,0)(1,1,-1)\}$	Пересекающиеся курсы, цель слева, Правило 15.
23.	$S_{\omega 2}^{r2}$		Парусные суда, Правило 12.
24.	$S_{\omega 1}^{s1}$	$Bz_{M2}^{(34)} = \{(1,1,1)(0,0,0)\}$	Разные галсы, судно идет левым галсом, Правило 12.
25.	$S_{\omega 2}^{s2}$	$Bz_{M2}^{(35)} = \{(1,1,1)(0,0,0)\}$	Одинаковые галсы, судно на ветре, Правило 12.
26.	$S_{\omega 3}$	$Bz_{M2}^{(36)} = \{(1,1,1)(1,1,1)\}$	Чрезмерное сближение судов. Правило 17.

Объединим частные взаимодействия $Bz_{M1}^{(j)}$ и $Bz_{M2}^{(j)}$, а результирующее частное взаимодействие $Bz_M^{(j)}$ представим в табл. 3.2.

Результирующие частные взаимодействия $Bz_M^{(j)}$

№ п/п	Частное взаимодействие $Bz_{M1}^{(j)} (S_i \in S_{\omega j}^f)$	Сит. $S_{\omega j}^f$	Сигналы $Bz_{M2}^{(j)}$
1.	$\{\dot{D} < 0, \min D_{\text{dop}} < D \sin(K_{\text{от}} - \alpha) < D_{\text{dop}}\}$	$S_{\omega 1}$	
2.	$\{\dot{D} < 0, \max(\min D) < D_{\text{dop}}\}$	$S_{\omega 2}$	
3.	$\{\dot{D} < 0, \max(\min D) < \min D_{\text{dop}}\}$	$S_{\omega 3}$	$Bz_{M2}^{(36)} = \{(1,1,1)(1,1,1)\}$
4.	$\{Bz_{M1}^{(1)}, \bar{Bz}_{M1}^{(6)}, \bar{Bz}_{M1}^{(7)}\}$	$S_{\omega 1}^{p0}$	
5.	$\{Bz_{M1}^{(1)}, Bz_{M1}^{(6)}, Bz_{M1}^{(7)}\}$	$S_{\omega 1}^{p1}$	
6.	$\{Bz_{M1}^{(1)}, \sin(\alpha + 67,5 - K_2) > 0,$ $\sin(K_2 + 67,5 - \alpha) > 0\}$	$S_{\omega 1}^{p2}$	$Bz_{M2}^{(6)} = \{(1,1,1)(-1,-1,-1)\}$
7.	$\{Bz_{M1}^{(1)}, \sin(\alpha - 112,5 - K_1) > 0,$ $\sin(K_1 + 247,5 - \alpha) > 0\}$	$S_{\omega 1}^{p3}$	$Bz_{M2}^{(7)} = \{(-1,-1,-1)(1,1,1)\}$
8.	$\{Bz_{M1}^{(4)}, r_1 \neq r_2\} (r_1 > r_2)$	$S_{\omega 1}^{r \neq}$	$Bz_{M2}^{(8)} = \{(-1,-1,-1)(1,1,1)\}$
9.	$\{Bz_{M1}^{(4)}, r_1 = r_2\}$	$S_{\omega 1}^{r =}$	
10.	$\{Bz_{M1}^{(4)}, r_1 = r_2 = 1\}$	$S_{\omega 1}^{r1}$	
11.	$\{Bz_{M1}^{(10)}, \cos(\alpha - K_1) \leq \cos 5,$ $\cos(\alpha + 180 - K_2) \leq \cos 5\}$	$S_{\omega 1}^o$	$Bz_{M2}^{(11)} = \{(1,1,-1)(1,1,-1)\}$
12.	$\{Bz_{M1}^{(10)}, \sin(\alpha - K_1) \sin(\alpha + 180 - K_2) < 0\}$	$S_{\omega 1}^c$	
13.	$\{Bz_{M1}^{(12)}, \sin(\alpha - K_1) > 0\}$	$S_{\omega 1}^{cs}$	$Bz_{M2}^{(13)} = \{(1,1,-1)(-1,-1,-1)\}$

№ п/п	Частное взаимодействие $Bz_{M1}^{(j)} (S_i \in S_{\omega j}^f)$	Сит. $S_{\omega j}^f$	Сигналы $Bz_{M2}^{(j)}$
14.	$\{Bz_{M1}^{(12)}, \sin(\alpha - K_1) < 0\}$	$S_{\omega 1}^{cp}$	$Bz_{M2}^{(14)} = \{(-1,-1,-1)(1,1,-1)\}$
15.	$\{Bz_{M1}^{(4)}, r_1 = r_2 = 2\}$	$S_{\omega 1}^{r2}$	
16.	$\{Bz_{M1}^{(15)}, \gamma_1 \neq \gamma_2\}$	$S_{\omega 1}^{s1}$	$Bz_{M2}^{(16)} = \{(1,1,1)(-1,-1,-1)\}$
17.	$\{Bz_{M1}^{(15)}, \gamma_1 = \gamma_2\}$	$S_{\omega 1}^{s2}$	$Bz_{M2}^{(17)} = \{(1,1,1)(-1,-1,-1)\}$
18.	$\{Bz_{M1}^{(4)}, r_1 = r_2 > 2\}$	$S_{\omega 1}^{r>2}$	$Bz_{M2}^{(18)} = \{(0,0,0)(0,0,0)\}$
19.	$\{Bz_{M1}^{(1)}, \sin(\alpha + 67,5 - K_2) > 0,$ $\sin(K_2 + 67,5 - \alpha) > 0\}$	$S_{\omega 2}^{p2}$	$Bz_{M2}^{(24)} = \{(1,1,1)(0,0,0)\}$
20.	$\{Bz_{M1}^{(1)}, \sin(\alpha - 112,5 - K_1) > 0,$ $\sin(K_1 + 247,5 - \alpha) > 0\}$	$S_{\omega 2}^{p3}$	$Bz_{M2}^{(25)} = \{(0,0,0)(1,1,1)\}$
21.	$\{Bz_{M1}^{(4)}, r_1 \neq r_2\}$	$S_{\omega 2}^{r \neq}$	$Bz_{M2}^{(26)} = \{(0,0,0)(1,1,1)\}$ $r_1 > r_2$
22.	$\{Bz_{M1}^{(4)}, r_1 = r_2\}$	$S_{\omega 2}^{r=}$	
23.	$\{Bz_{M1}^{(4)}, r_1 = r_2 = 1\}$	$S_{\omega 2}^{r1}$	
24.	$\{Bz_{M1}^{(23)}, \cos(\alpha - K_1) \leq \cos 5,$ $\cos(\alpha + 180 - K_2) \leq \cos 5\}$	$S_{\omega 2}^o$	$Bz_{M2}^{(29)} = \{(1,1,-1)(1,1,-1)\}$
25.	$\{Bz_{M1}^{(10)}, \sin(\alpha - K_1) \sin(\alpha + 180 - K_2) < 0\}$	$S_{\omega 2}^c$	
26.	$\{Bz_{M1}^{(25)}, \sin(\alpha - K_1) > 0\}$	$S_{\omega 2}^{cs}$	$Bz_{M2}^{(31)} = \{(1,1,-1)(0,0,0)\}$
27.	$\{Bz_{M1}^{(25)}, \sin(\alpha - K_1) < 0\}$	$S_{\omega 2}^{cp}$	$Bz_{M2}^{(32)} = \{(0,0,0)(1,1,-1)\}$

№ п/п	Частное взаимодействие $Bz_{M1}^{(j)} (S_i \in S_{\omega_j}^f)$	Сит. $S_{\omega_j}^f$	Сигналы $Bz_{M2}^{(j)}$
28.	$\{Bz_{M1}^{(4)}, r_1 = r_2 = 2\}$	$S_{\omega 2}^{r2}$	
29.	$\{Bz_{M1}^{(28)}, \gamma_1 \neq \gamma_2\}$	$S_{\omega 1}^{s1}$	$Bz_{M2}^{(34)} = \{(1,1,1)(0,0,0)\}$
30.	$\{Bz_{M1}^{(28)}, \gamma_1 = \gamma_2\}$	$S_{\omega 2}^{s2}$	$Bz_{M2}^{(35)} = \{(1,1,1)(0,0,0)\}$

Рассмотрим взаимодействия при плавании судов в условиях пониженной видимости. Подмножество ситуаций опасного сближения S_{ω} идентифицируется с областью $S_{\omega 1}$, и оно разбивается на три области $S_{\omega 01}$, $S_{\omega 02}$ и $S_{\omega 03}$. Так как отношение приоритета между взаимодействующими судами отсутствует, для всех трех областей $q_{li(j)} = 1$.

Условием реализации ситуации $S_{\omega 01}$ является, во-первых, положение цели впереди траверза судна ($\cos(\alpha - K_1) > 0$) и судно не должно быть обгоняющим ($\sin(\alpha + 67,5 - K_2) < 0$, $\sin(K_2 + 67,5 - \alpha) < 0$). Поэтому первое частное взаимодействие $Bz_{M1}^{(29)}(S_i \in S_{\omega 01})$ в условиях пониженной видимости

$Bz_{M1}^{(29)}(S_i \in S_{\omega 01}) = \{\cos(\alpha - K_1) > 0, \sin(\alpha + 67,5 - K_2) < 0, \sin(K_2 + 67,5 - \alpha) < 0\}$ формирует координирующий сигнал $Bz_{M2}^{(37)} = \{(1,1,-1)(1,0,0)\}$.

Ситуация $S_{\omega 02}$ реализуется в случае, когда цель находится на траверзе или позади траверза ($\cos(\alpha - K_1) \leq 0$), поэтому частное взаимодействие

$Bz_{M1}^{(30)}(S_i \in S_{\omega 02})$ имеет вид $Bz_{M1}^{(30)}(S_i \in S_{\omega 02}) = \{\cos(\alpha - K_1) \leq 0\}$.

Требование запрета поворота в сторону цели формализуется следующим образом. Если цель находится справа, то $\sin(\alpha - K_1) > 0$, поэтому $q_{2i} = -1$ и

$q_{3i} = 1$, а при нахождении цели слева $\sin(\alpha - K_1) < 0$ и $q_{2i} = 1$, $q_{3i} = -1$.

Поэтому область $S_{\omega 02}$ представляем двумя подмножествами $S^S_{\omega 02}$ и $S^P_{\omega 02}$, а их первые частные взаимодействия и координирующие сигналы имеют вид:

$$Bz_{M1}^{(31)}(S_i \in S^S_{\omega 02}) = \{\cos(\alpha - K_1) < 0, \sin(\alpha - K_1) > 0\}, \quad Bz_{M2}^{(38)} = \{(1, -1, 1)(1, 0, 0)\},$$

$$Bz_{M1}^{(32)}(S_i \in S^P_{\omega 02}) = \{\cos(\alpha - K_1) < 0, \sin(\alpha - K_1) < 0\}, \quad Bz_{M2}^{(39)} = \{(1, 1, -1)(1, 0, 0)\}.$$

Если имеет место подмножество ситуаций $S_{\omega 03}$, т. е. цель впереди траверза судна ($\cos(\alpha - K_1) > 0$) и является обгоняемой, а судно обгоняющим ($\sin(\alpha + 67,5 - K_2) > 0, \sin(K_2 + 67,5 - \alpha) > 0$), то частное взаимодействие $Bz_{M1}^{(33)}(S_i \in S_{\omega 03})$ имеет следующий вид $Bz_{M1}^{(33)}(S_i \in S_{\omega 03}) = \{\cos(\alpha - K_1) > 0, \sin(\alpha + 67,5 - K_2) > 0, \sin(K_2 + 67,5 - \alpha) > 0\}$ с координирующим сигналом $Bz_{M2}^{(40)} = \{(1, 1, 1)(1, 0, 0)\}$.

Таблица 3.3

Частные взаимодействия $Bz_M^{(j)}$ для ограниченной видимости

№ п/п	Частное взаимодействие $Bz_{M1}^{(j)}(S_i \in S_{\omega j}^f)$	Сит. $S_{\omega j}^f$	Сигналы $Bz_{M2}^{(j)}$
1.	$\{\cos(\alpha - K_1) > 0, \sin(\alpha + 67,5 - K_2) < 0,$ $\sin(K_2 + 67,5 - \alpha) < 0\}$	$S_{\omega 01}$	$Bz_{M2}^{(37)} = \{(1, 1, -1)(1, 0, 0)\}$
2.	$\cos(\alpha - K_1) \leq 0$	$S_{\omega 02}$	
3.	$\cos(\alpha - K_1) < 0, \sin(\alpha - K_1) > 0$	$S^S_{\omega 02}$	$Bz_{M2}^{(38)} = \{(1, -1, 1)(1, 0, 0)\}$
4.	$\cos(\alpha - K_1) < 0, \sin(\alpha - K_1) < 0$	$S^P_{\omega 02}$	$Bz_{M2}^{(39)} = \{(1, 1, -1)(1, 0, 0)\}$
5.	$\cos(\alpha - K_1) > 0,$ $\sin(\alpha + 67,5 - K_2) > 0,$ $\sin(K_2 + 67,5 - \alpha) > 0$	$S_{\omega 03}$	$Bz_{M2}^{(40)} = \{(1, 1, 1)(1, 0, 0)\}$

Как раньше отмечалось, взаимодействие между судном и целью могут быть полными $Bz_f^{(j)}$ и частичными $Bz_p^{(j)}$ в зависимости от оценки текущей ситуации судами и своевременным выявлением возникшего ситуационного возмущения.

При полном взаимодействии $Bz_f^{(j)}$ компенсация ситуационного возмущения производится стратегиями D_1 и D_2 обоих судов по схеме, показанной на рис. 3.7. При этом согласование стратегий D_1 и D_2 производится распределенным координатором c_o .

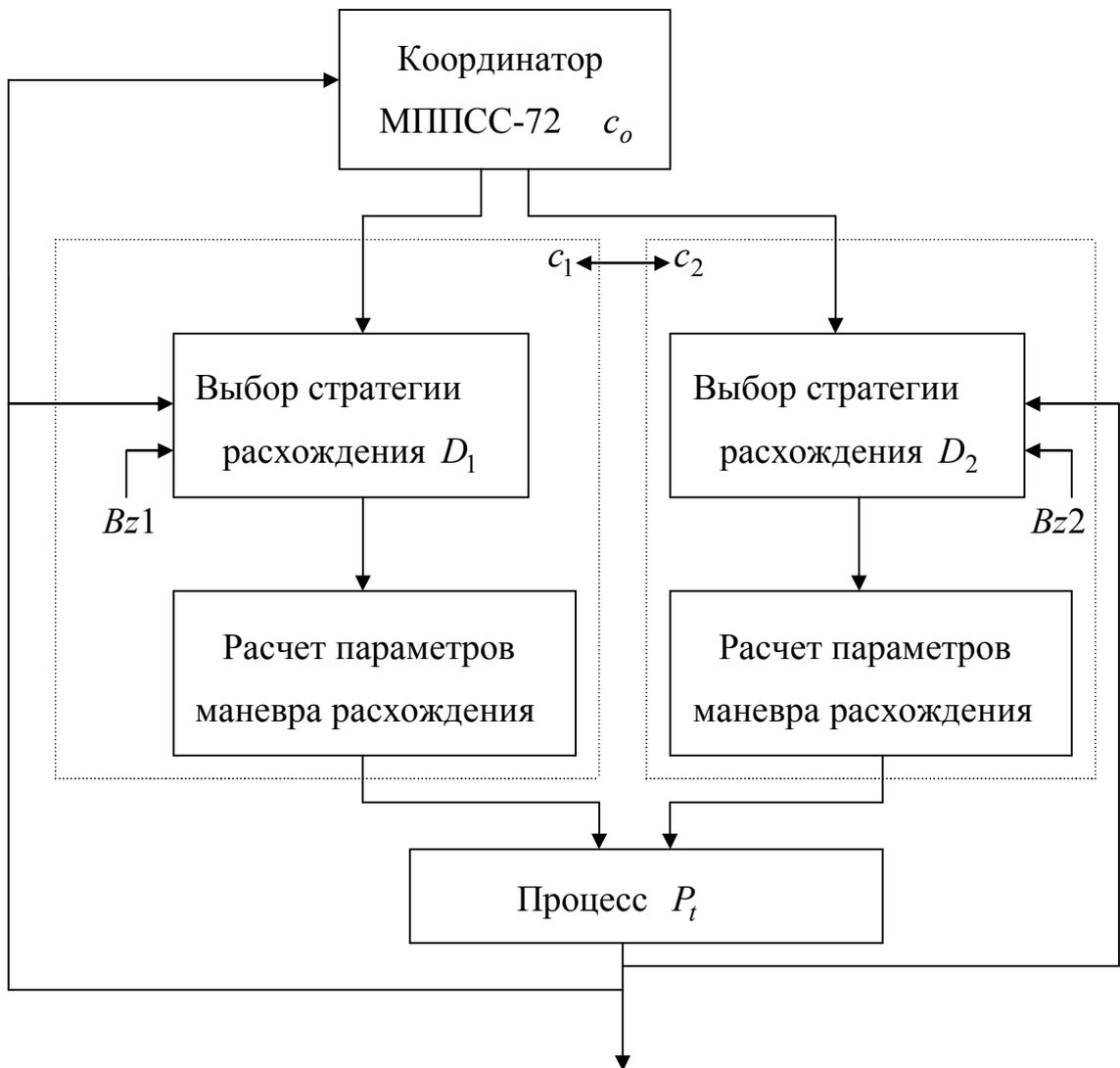


Рис. 3.7. Схема полного взаимодействия $Bz_{Mf}^{(j)}$ между судном c_1 и целью c_2

При своевременном и корректном выявлении ситуационного возмущения и выполнении требований МППСС-72 полные взаимодействия $Vz_{Mf}^{(j)}$ между судном c_1 и целью c_2 соответствуют рассмотренным частным взаимодействиям $Vz_M^{(j)}$, характеристики которых приведены в табл. 3.2 и табл. 3.3.

При частичных взаимодействиях компенсация ситуационного возмущения производится только одним судном, так как цель реализует свою программную траекторию движения, полагая, что ситуационное возмущение отсутствует, как и взаимодействие, предписанное МППСС-72. В этом случае реализуется принцип оптимального управления, т.е. одно судно управляет текущей ситуацией, стремясь осуществить безопасное расхождение, причем в любой момент цель может выявить опасное сближение, определить тип ситуационного возмущения и непредсказуемо для судна предпринять маневр расхождения.

Пока будем полагать, что цель в процессе опасного сближения следует программной траекторией с неизменными параметрами движения. Для такого предположения принцип компенсации ситуационного возмущения показан на рис. 3.8.

В этом случае частичные взаимодействия $Vz_p^{(j)}$ отличаются от частных взаимодействий $Vz_M^{(j)}$ координирующим сигналом $Vz_{M2}^{(j)}$, а именно составляющим сигналом связи $\omega_i = (0, 0, 0)$, который характеризует неопределенное поведение партнера по взаимодействию.

Поэтому при частном взаимодействии справедливо следующее соотношение $Vz_p^{(j)} = Vz_{M2}^{(j)}[Y_j, (0,0,0)]$, в котором Y_j - координирующий сигнал взаимодействия $Vz_{M2}^{(j)}$.

При реализации частных взаимодействий $Vz_p^{(j)}$ присущая им неопределенность может повести к ухудшению текущей ситуации расхождения.

Это обстоятельство должно учитываться оперирующим судном при выборе стратегии расхождения, если оно убедилось в реализации частного взаимодействия.

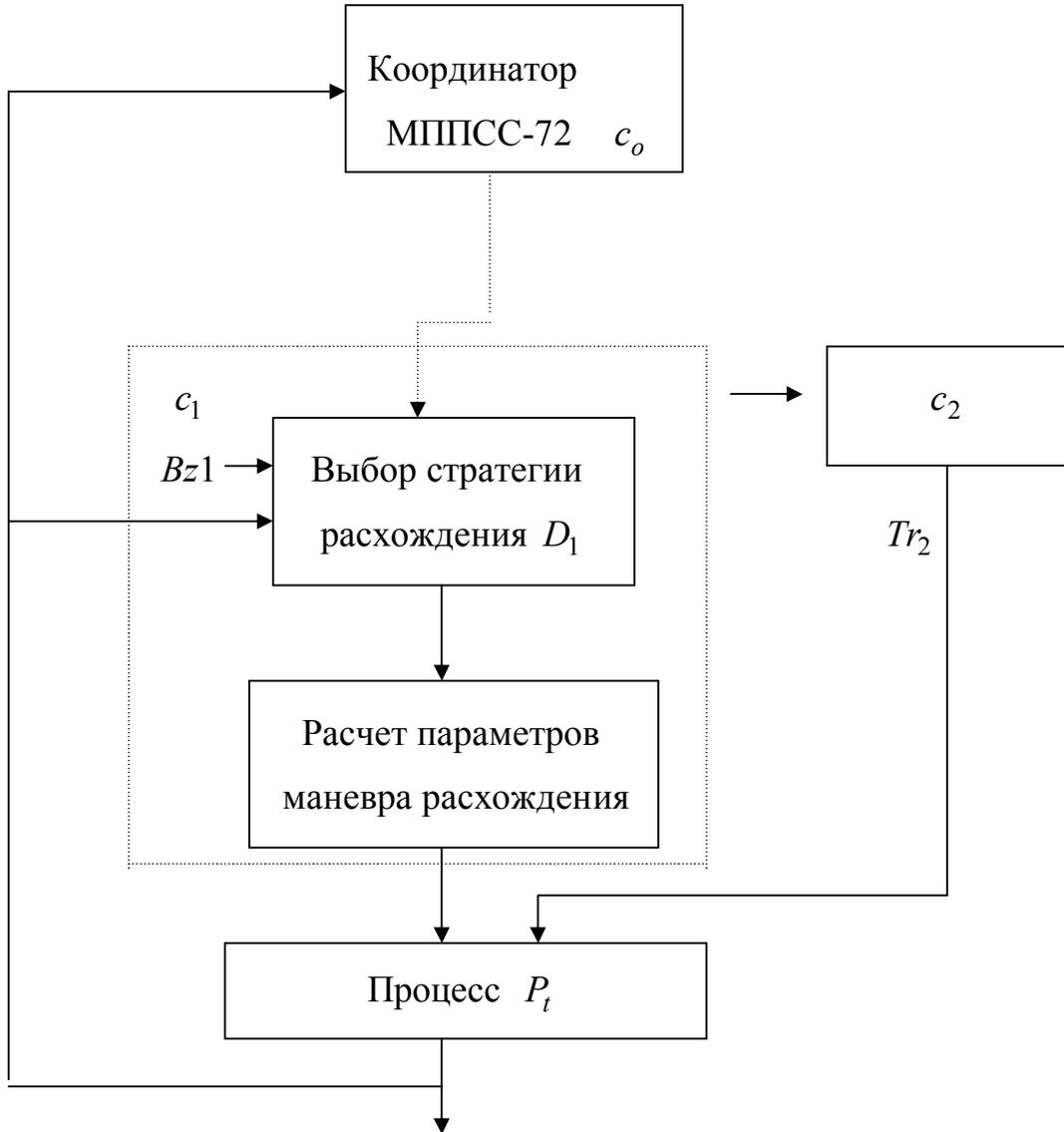


Рис. 3.8. Частичное взаимодействие $Bz_p^{(j)}$ между судном и целью

В завершение приведем нестандартные бинарные взаимодействия, которые не предусмотрены МППСС-72. Это взаимодействия, возникающие при опасном сближении на курсовых углах одного борта в первой и второй областях взаимных обязанностей, приведены в табл. 3.4.

Нестандартные частные взаимодействия $Bz_M^{(j)}$

№ п/п	Частное взаимодействие $Bz_{M1}^{(j)} (S_i \in S_{\omega j}^f)$	Сит. $S_{\omega j}^f$	Сигналы $Bz_{M2}^{(j)}$
1.	$\{Bz_{M1}^{(10)}, \sin(\alpha - K_1)\sin(\alpha + 180 - K_2) > 0\}$	$S_{\omega 1}^n$	
2.	$\{Bz_{M1}^{(41)}, \sin(\alpha - K_1) > 0\}$	$S_{\omega 1}^{ns}$	$Bz_{M2}^{(42)} = \{(1,1,1)(1,1,1)\}$
3.	$\{Bz_{M1}^{(41)}, \sin(\alpha - K_1) < 0\}$	$S_{\omega 1}^{np}$	$Bz_{M2}^{(43)} = \{(-1,-1,-1)$ $(-1,-1,-1)\}$
4.	$\{Bz_{M1}^{(10)}, \sin(\alpha - K_1)\sin(\alpha + 180 - K_2) > 0\}$	$S_{\omega 2}^n$	
5.	$\{Bz_{M1}^{(41)}, \sin(\alpha - K_1) > 0\}$	$S_{\omega 2}^{ns}$	$Bz_{M2}^{(45)} = \{(1,1,1)(0,0,0)\}$
6.	$\{Bz_{M1}^{(41)}, \sin(\alpha - K_1) < 0\}$	$S_{\omega 2}^{np}$	$Bz_{M2}^{(46)} = \{(-1,-1,-1),$ $(0,0,0)\}$

3.4. Выводы по третьей главе

В главе приведено формальное описание взаимодействия судов при опасном сближении. Каждое из взаимодействий связано с ситуацией опасного сближения.

В зависимости от уровня опасности возможного столкновения ситуации опасного сближения и соответствующие им взаимодействия относятся к разным областям взаимных обязанностей.

Получены процедуры определения принадлежности заданной начальной ситуации к стандартным подмножествам, которые в совокупности представляют метод идентификации ситуаций опасных сближений.

В главе представлен способ определения взаимодействия для реализовавшейся ситуации опасного сближения, причем взаимодействие представлено двумя процедурами, одна из которых задает условие реализации взаимодействия, а вторая – предписывает поведение каждого из взаимодействующих судов.

Произведено формальное описание МППСС-72 в части маневрирования судов, как система бинарной координации, причем определены области взаимных обязанностей, соответствующие им ситуации опасного сближения и регламентируемые способы поведения.

Рассмотрены взаимодействия в условиях хорошей и пониженной видимости.

Также установлены нестандартные ситуации и взаимодействия, координация которых не предусмотрена МППСС-72.

ГЛАВА 4.

ОЦЕНКА КООРДИНАЦИИ БИНАРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ СУДОВ

4.1. Координируемость бинарных взаимодействий

Взаимодействие Vz является способом (механизмом) согласования стратегий (маневров) расхождения судов по предупреждению опасного сближения и перевода текущей ситуации из подмножества возмущенных S_ω в подмножество безопасных ситуаций S_s . Так как предметом рассмотрения диссертационного исследования являются бинарные взаимодействия Vz , которые координируют стратегии расхождения D_1 и D_2 пары судов c_1 и c_2 , то в качестве основных характеристик взаимодействия Vz целесообразно рассмотреть координируемость стратегий $Coor(D_1, D_2)$.

Стратегии являются координируемые, если их совместное применение ведет к увеличению дистанции кратчайшего сближения D_{\min} , в этом случае $Coor(D_1, D_2) = 1$. Если же D_{\min} в результате использования стратегий D_1 и D_2 уменьшается, то $Coor(D_1, D_2) = -1$.

Запишем выражение для дистанции кратчайшего сближения D_{\min} , как функции относительных параметров движения и положения судна и цели:

$$D_{\min} = \text{Abs}[D \sin(\alpha - K_{ot})], \quad (4.1)$$

$$\text{причем } K_{ot} = \arcsin[(V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2) / V_o], \quad (4.2)$$

$$\text{где } V_o = \sqrt{V_1^2 + V_2^2 - 2V_1V_2 \cos(K_1 - K_2)}.$$

Из выражения (4.1) первая производная $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$:

$$\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} = D \cos(\alpha - K_{ot}) \frac{\partial K_{ot}}{\partial K_1}, \text{ или}$$

$$\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} = D(\cos \alpha \cos K_{ot} + \sin \alpha \sin K_{ot}) \frac{\partial K_{ot}}{\partial K_1}.$$

Из выражения (4.2):

$$\sin K_{ot} = \frac{V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2}{V_o} \quad \text{и} \quad \cos K_{ot} = \frac{V_1 \cos K_1 - V_2 \cos K_2}{V_o}.$$

Поэтому выражение для $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$ принимает вид:

$$\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} = \frac{D}{V_o} [(V_1 \cos K_1 - V_2 \cos K_2) \cos \alpha + (V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2) \sin \alpha] \frac{\partial K_{ot}}{\partial K_1}$$

Преобразуем выражение в квадратных скобках последней формулы:

$$(V_1 \cos K_1 - V_2 \cos K_2) \cos \alpha + (V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2) \sin \alpha = V_1 (\cos K_1 \cos \alpha + \sin K_1 \sin \alpha) - V_2 (\cos K_2 \cos \alpha + \sin K_2 \sin \alpha) = V_1 \cos(K_1 - \alpha) - V_2 \cos(K_2 - \alpha).$$

Следовательно,
$$\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} = \frac{D}{V_o} [V_1 \cos(K_1 - \alpha) - V_2 \cos(K_2 - \alpha)] \frac{\partial K_{ot}}{\partial K_1}. \quad (4.3)$$

Найдем выражение для производной $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_1}$, для чего обозначим:

$$V_X = V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2; \quad V_Y = V_1 \cos K_1 - V_2 \cos K_2.$$

Выражение (4.2) для K_{ot} можно записать в более удобном виде:

$$K_{ot} = \arcsin[\dot{X} / (\dot{X}^2 + \dot{Y}^2)^{1/2}], \quad \text{где} \quad \dot{X} = V_X \quad \text{и} \quad \dot{Y} = V_Y.$$

Поэтому:

$$\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_1} = [1 - \dot{X}^2 / (\dot{X}^2 + \dot{Y}^2)]^{-1/2} \frac{\partial}{\partial K_1} \{[\dot{X} / (\dot{X}^2 + \dot{Y}^2)]^{1/2}\},$$

в свою очередь справедливо выражение:

$$\frac{\partial}{\partial K_1} \{[\dot{X} / (\dot{X}^2 + \dot{Y}^2)]^{1/2}\} = \frac{\frac{\partial \dot{X}}{\partial K_1} (\dot{X}^2 + \dot{Y}^2)^{1/2} - \dot{X} \frac{\partial}{\partial K_1} [(\dot{X}^2 + \dot{Y}^2)^{1/2}]}{\dot{X}^2 + \dot{Y}^2}.$$

Находим выражение
$$\frac{\partial}{\partial K_1} [(\dot{X}^2 + \dot{Y}^2)^{1/2}] = \frac{\frac{\partial \dot{X}}{\partial K_1} \dot{X} + \frac{\partial \dot{Y}}{\partial K_1} \dot{Y}}{(\dot{X}^2 + \dot{Y}^2)^{1/2}}. \quad \text{Обозначим}$$

$$\frac{\partial \dot{X}}{\partial K_1} = \dot{X}_k \quad \text{и} \quad \frac{\partial \dot{Y}}{\partial K_1} = \dot{Y}_k. \quad \text{При этом} \quad \frac{\partial K_{ot}}{\partial K_1} \quad \text{принимает следующий вид:}$$

$$\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_1} = \frac{(\dot{X}^2 + \dot{Y}^2)^{1/2} \dot{X}_k (\dot{X}^2 + \dot{Y}^2)^{1/2} - \dot{X} (\dot{X}^2 + \dot{Y}^2)^{-1/2} (\dot{X}\dot{X}_k + \dot{Y}\dot{Y}_k)}{\dot{Y}(\dot{X}^2 + \dot{Y}^2)}.$$

Произведем преобразования последнего выражения:

$$\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_1} = \frac{\dot{X}_k (\dot{X}^2 + \dot{Y}^2) - \dot{X} (\dot{X}\dot{X}_k + \dot{Y}\dot{Y}_k)}{\dot{Y}(\dot{X}^2 + \dot{Y}^2)} = \frac{\dot{Y}(\dot{X}_k \dot{Y} - \dot{Y}_k \dot{X})}{\dot{Y}(\dot{X}^2 + \dot{Y}^2)} = \frac{(\dot{X}_k \dot{Y} - \dot{Y}_k \dot{X})}{(\dot{X}^2 + \dot{Y}^2)}.$$

Учитывая, что $\dot{X} = V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2$, $\dot{Y} = V_1 \cos K_1 - V_2 \cos K_2$,

$\dot{X}_k = V_1 \cos K_1$, $\dot{Y}_k = -V_1 \sin K_1$, получим:

$$(\dot{X}_k \dot{Y} - \dot{Y}_k \dot{X}) = V_1 [V_1 - V_2 (\cos K_1 \cos K_2 - \sin K_1 \sin K_2)] = V_1 [V_1 - V_2 \cos(K_1 - K_2)].$$

Окончательно производная $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_1}$ принимает следующий вид:

$$\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_1} = \frac{V_1 [V_1 - V_2 \cos(K_1 - K_2)]}{V_0^2}.$$

С учетом полученной формулы выражение (4.3) принимает вид:

$$\frac{\partial D_{min}}{\partial K_1} = \frac{DV_1}{V_0^3} [V_1 \cos(K_1 - \alpha) - V_2 \cos(K_2 - \alpha)] [V_1 - V_2 \cos(K_1 - K_2)], \quad (4.4)$$

Так как, согласно (4.1), дистанция кратчайшего сближения D_{min} принимает только положительные значения, то для корректного выражения ее производной выражение (4.4) следует умножить на знак выражения $\sin(\alpha - K_{ot}) = [(V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2) \cos \alpha - (V_1 \cos K_1 - V_2 \cos K_2) \sin \alpha]$ в операции Abs в формуле (4.1). Если обозначить:

$$G_s = \text{sign}[(V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2) \cos \alpha - (V_1 \cos K_1 - V_2 \cos K_2) \sin \alpha],$$

то окончательно выражение для $\frac{\partial D_{min}}{\partial K_1}$ принимает вид:

$$\frac{\partial D_{min}}{\partial K_1} = G_s \frac{DV_1}{V_0^3} [V_1 \cos(K_1 - \alpha) - V_2 \cos(K_2 - \alpha)] [V_1 - V_2 \cos(K_1 - K_2)]. \quad (4.5)$$

Необходимо учесть, что данное выражение имеет смысл только в том случае, когда судно с целью сближаются и справедливо неравенство

$$\dot{D} = V_2 \cos(K_2 - \alpha) - V_1 \cos(K_1 - \alpha) < 0.$$

Для рассмотрения координируемости взаимодействия при расхождении судов исследуем более подробно выражение (4.5).

Очевидно, смена знака производной $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$ происходит при значениях

курса судна K_1 , в которых $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} = 0$, поэтому найдем выражения для курса

K_1 , при котором $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$ обращается в ноль. Для этого найдем K_1 из

уравнения:

$$G_s \frac{DV_1}{V_0^3} [V_2 \cos(K_2 - \alpha) - V_1 \cos(K_1 - \alpha)] [V_1 - V_2 \cos(K_1 - K_2)] = 0.$$

Так как выражение $G_s \frac{DV_1}{V_0^3}$ не равно нулю, то:

$$V_2 \cos(K_2 - \alpha) - V_1 \cos(K_1 - \alpha) = 0, \quad (4.6)$$

$$V_1 - V_2 \cos(K_1 - K_2) = 0. \quad (4.7)$$

Обращаем внимание, что, учитывая фиксированное значение курса цели K_2 и неизменные значения скоростей судна V_1 и цели V_2 , уравнение (4.6) возможно в тех случаях, если выполняется неравенство:

$$V_1 \geq V_2 \cos(K_2 - \alpha). \quad (4.8)$$

В свою очередь, справедливость равенства (4.7) возможна при выполнении условия:

$$V_1 \leq V_2. \quad (4.9)$$

Допустим неравенство (4.8) выполняется, и из уравнения (4.6) следует:

$$V_1 \cos(K_1 - \alpha) = V_2 \cos(K_2 - \alpha), \text{ или}$$

$$\cos(K_1 - \alpha) = \frac{V_2}{V_1} \cos(K_2 - \alpha).$$

Решаем полученное уравнение относительно переменной K_1 и находим два корня:

$$\begin{aligned} K_{11} &= \alpha + \arccos[\rho^{-1} \cos(K_2 - \alpha)], \\ K_{12} &= \alpha - \arccos[\rho^{-1} \cos(K_2 - \alpha)], \end{aligned} \quad (4.10)$$

где $\rho = \frac{V_1}{V_2}$ - отношение скорости судна к скорости цели.

Так как выражение $V_2 \cos(K_2 - \alpha) - V_1 \cos(K_1 - \alpha)$ является скоростью изменения дистанции, т.е. $\dot{D} = V_2 \cos(K_2 - \alpha) - V_1 \cos(K_1 - \alpha)$, то полученные значения K_{11} и K_{12} являются также границами курса судна, определяющими подмножества курсов сближения и удаления.

Поэтому к подмножеству курсов сближения судна с целью относится левая граница K_{12} , курс судна, равный пеленгу $K_1 = \alpha$ (центральный курс подмножества) и правая граница подмножества K_{11} . Причем максимальная скорость сближения достигается при $K_1 = \alpha$.

Полагая справедливость условия(4.9), рассмотрим уравнение (4.7) и найдем его корни:

$$\begin{aligned} V_2 \cos(K_1 - K_2) &= V_1, \text{ или} \\ \cos(K_1 - K_2) &= \frac{V_1}{V_2} = \rho. \end{aligned}$$

Из последнего уравнения находим:

$$\begin{aligned} K_{13} &= K_2 + \arccos(\rho), \\ K_{14} &= K_2 - \arccos(\rho). \end{aligned} \quad (4.11)$$

Изменение производной также происходит, когда меняет знак величина G_s , что происходит в том случае, когда сама величина обращается в 0.

Учитываем, что:

$$G_s = \text{sign}[(V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2) \cos \alpha - (V_1 \cos K_1 - V_2 \cos K_2) \sin \alpha],$$

поэтому смена знака происходит при курсе судна K_1 , при котором наступает равенство:

$$(V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2) \cos \alpha - (V_1 \cos K_1 - V_2 \cos K_2) \sin \alpha = 0, \text{ или}$$

$$(V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2) \cos \alpha = (V_1 \cos K_1 - V_2 \cos K_2) \sin \alpha.$$

Раскрываем скобки последнего равенства:

$$V_1 \sin K_1 \cos \alpha - V_2 \sin K_2 \cos \alpha = V_1 \cos K_1 \sin \alpha - V_2 \cos K_2 \sin \alpha =$$

$$V_1 (\sin K_1 \cos \alpha - \cos K_1 \sin \alpha) = V_2 (\sin K_2 \cos \alpha - \cos K_2 \sin \alpha).$$

Из последнего равенства следует:

$$V_1 \sin(K_1 - \alpha) = V_2 \sin(K_2 - \alpha), \text{ или}$$

$$\sin(K_1 - \alpha) = \rho^{-1} \sin(K_2 - \alpha).$$

Решая последнее равенство относительно курса судна K_1 , находим два корня:

$$K_{15} = \alpha + \arcsin[\rho^{-1} \sin(K_2 - \alpha)],$$

$$K_{16} = \alpha + \pi - \arcsin[\rho^{-1} \sin(K_2 - \alpha)]. \quad (4.12)$$

Таким образом, производная $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$ в общем случае обращается в нуль при шести значениях курса судна $K_{11}..K_{16}$, из которых существенными являются только те, которые принадлежат к подмножеству курсов сближения.

Для анализа выражения (4.5) производилось имитационное моделирование, в котором исследовалась связь знака и величины производной $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$ от ее аргументов и скорости изменения расстояния \dot{D} (сближения или удаления судов).

С этой целью была написана компьютерная программа на языке высокого уровня Delphi, интерфейс которой приведен на рис. 4.1.

В программу вводятся значения дистанции D между судном и целью, пеленг с судна на цель α , параметры движения судна K_1 , V_1 и цели K_2 , V_2 .

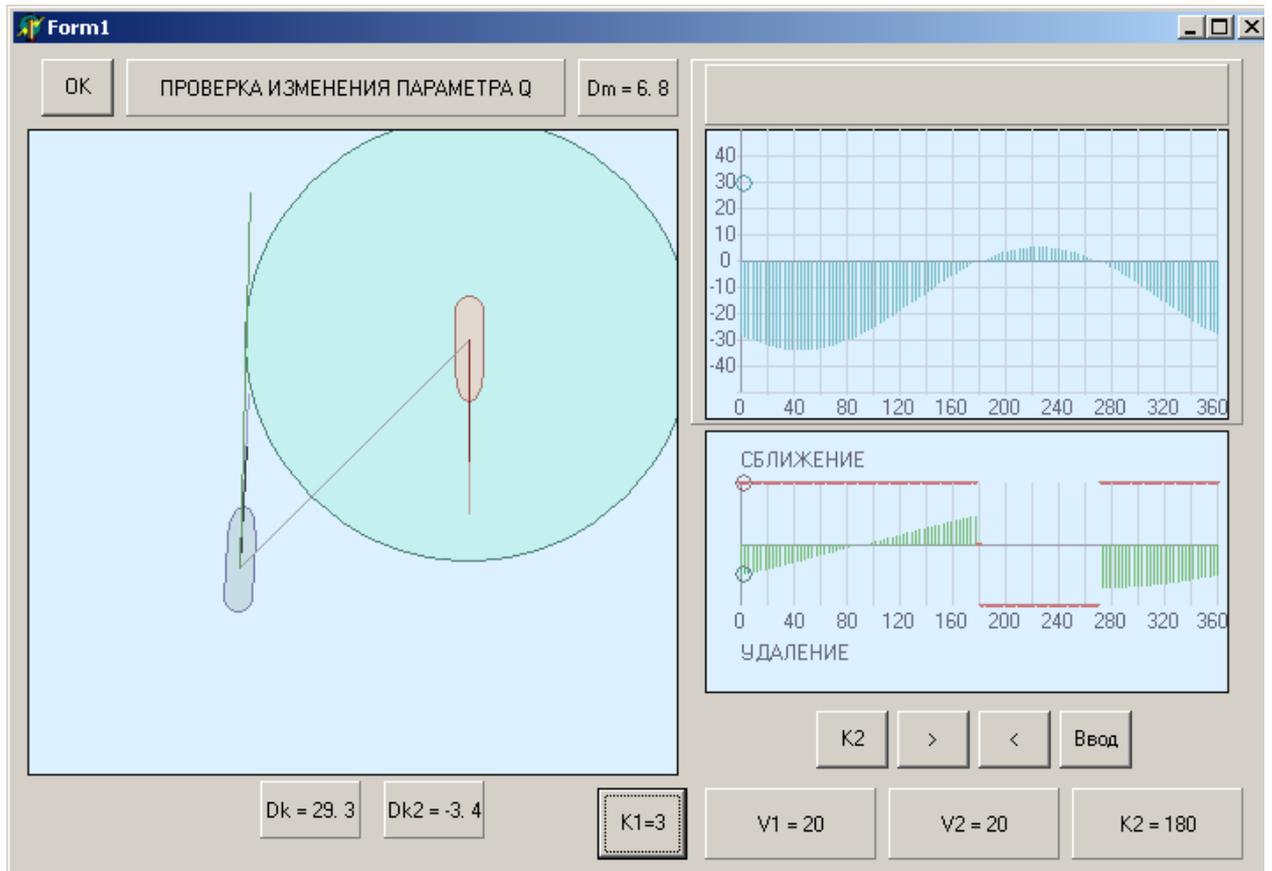


Рис. 4.1. Интерфейс имитационного моделирования зависимости $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$

Программа рассчитывает и выводит значения дистанции кратчайшего сближения D_{\min} , скорости изменения дистанции $Dk = \dot{D}$ и изменения дистанции кратчайшего сближения $Dk2 = \frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$.

Также на верхнем графике рис. 4.1 выводится графическая зависимость \dot{D} от K_1 , а на нижнем графике показана зависимость $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$ от K_1 и фиксируется сближение или удаление судна и цели.

При имитационном моделировании рассматривались три ситуации. Первая ситуация характеризуется равенством скоростей судна и цели, т.е. $V_1 = V_2$, во второй ситуации скорость судна превосходит скорость цели $V_1 > V_2$, а в третьей ситуации скорость судна меньше скорости цели $V_1 < V_2$.

В результате имитационного моделирования, которое подробно представлено в главе 5, можно сделать следующие выводы:

1. При $V_1 = V_2$ и $K_2 < 180$ характер изменения D_{\min} стабильный, причем при $K_2 = 0$ D_{\min} только возрастает, а в случаях $K_2 = 60$ и $K_2 = 120$ - только убывает. Если $K_2 > 180$, то $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$ может принимать разные знаки.

2. При $V_1 > V_2$ независимо от значений K_2 производная $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$ имеет участок положительных значений и участок отрицательных значений.

3. В случае $V_1 < V_2$ для курсов цели K_2 меньше 180° производная $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$ имеет по одному участку положительного и отрицательного значения, а в случае величины K_2 больше 180° дистанция D_{\min} имеет по два участка роста и убывания, которые чередуются друг за другом.

4.2. Изменение дистанции кратчайшего сближения при одновременном повороте судна и цели

Так как бинарные взаимодействия предусматривают изменение курса обоими судами, то необходимо найти зависимость изменения дистанции кратчайшего сближения D_{\min} от изменения курсов, как судна, так и цели. Для этого необходимо найти производную выражения (4.5) по курсу цели K_2 , для чего выражение (4.5) представим в виде:

$$\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} = G_s \frac{DV_1}{V_o} [V_2 \cos(K_2 - \alpha) - V_1 \cos(K_1 - \alpha)] \frac{[V_1 - V_2 \cos(K_1 - K_2)]}{V_o^2}.$$

Введем обозначения:

$$S_1 = \frac{DV_1}{V_o}; \quad S_3 = \frac{[V_1 - V_2 \cos(K_1 - K_2)]}{V_o^2};$$

$$S_2 = [V_2 \cos(K_2 - \alpha) - V_1 \cos(K_1 - \alpha)]. \quad (4.18)$$

Поэтому выражение для производной $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$ можно записать в следующем виде:

$$\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} = G_s S_1 S_2 S_3. \quad (4.19)$$

Найдем производную формулы (4.19) по курсу цели K_2 , которая характеризует изменение дистанции кратчайшего сближения D_{\min} от изменения курса судна K_1 и курса цели K_2 :

$$\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1 \partial K_2} = \frac{\partial}{\partial K_2} \{G_s S_1 S_2 S_3\} = G_s \left\{ \left[\frac{\partial S_1}{\partial K_2} S_3 + S_1 \frac{\partial S_3}{\partial K_2} \right] S_2 + S_1 S_3 \frac{\partial S_2}{\partial K_2} \right\}. \quad (4.20)$$

Найдем производные $\frac{\partial S_1}{\partial K_2}$, $\frac{\partial S_2}{\partial K_2}$ и $\frac{\partial S_3}{\partial K_2}$, используя полученные выражения для S_1 , S_2 и S_3 .

Рассмотрим выражение для производной $\frac{\partial S_1}{\partial K_2}$. Очевидно справедливо соотношение:

$$\begin{aligned} \frac{\partial S_1}{\partial K_2} &= \frac{\partial}{\partial K_2} \left\{ \frac{DV_1}{V_0} \right\} = DV_1 \frac{\partial}{\partial K_2} (V_0^{-1}) = DV_1 \left\{ -\frac{\frac{\partial}{\partial K_2} [\sqrt{V_1^2 + V_2^2 - 2V_1 V_2 \cos(K_1 - K_2)}]}{V_0^2} \right\} = \\ &= \frac{DV_1}{V_0^2} \left[\mp \frac{2V_1 V_2 \sin(K_1 - K_2)}{2V_0} \right] = \frac{DV_1}{V_0^2} \left[\mp \frac{V_1 V_2 \sin(K_1 - K_2)}{V_0} \right]. \end{aligned}$$

Поэтому окончательно получим:

$$\frac{\partial S_1}{\partial K_2} = \mp \frac{DV_1}{V_0^3} V_1 V_2 \sin(K_1 - K_2). \quad (4.21)$$

Найдем выражение для производной $\frac{\partial S_2}{\partial K_2}$:

$$\frac{\partial S_2}{\partial K_2} = \frac{\partial}{\partial K_2} [V_2 \cos(K_2 - \alpha) - V_1 \cos(K_1 - \alpha)] = -V_2 \sin(K_2 - \alpha). \quad (4.22)$$

Рассмотрим производную $\frac{\partial S_3}{\partial K_2}$:

$$\frac{\partial S_3}{\partial K_2} = \frac{\partial}{\partial K_2} \left\{ \frac{[V_1 - V_2 \cos(K_1 - K_2)]}{V_0^2} \right\} = \frac{\mp V_2 \sin(K_1 - K_2) V_0^2 - [V_1 - V_2 \cos(K_1 - K_2)] \frac{\partial V_0^2}{\partial K_2}}{V_0^4}.$$

Найдем производную $\frac{\partial V_0^2}{\partial K_2}$, входящую в предыдущее выражение для

производной $\frac{\partial S_3}{\partial K_2}$:

$$\frac{\partial V_0^2}{\partial K_2} = \frac{\partial}{\partial K_2} [V_1^2 + V_2^2 - 2V_1 V_2 \cos(K_1 - K_2)] = \pm 2V_1 V_2 \sin(K_1 - K_2).$$

Подставив последнюю формулу в выражение для производной $\frac{\partial S_3}{\partial K_2}$,

получим окончательно:

$$\begin{aligned} \frac{\partial S_3}{\partial K_2} &= \frac{\mp V_2 \sin(K_1 - K_2) V_0^2 - [V_1 - V_2 \cos(K_1 - K_2)] [\pm 2V_1 V_2 \sin(K_1 - K_2)]}{V_0^4}, \text{ или} \\ \frac{\partial S_3}{\partial K_2} &= \frac{\mp V_2 \sin(K_1 - K_2) \{V_0^2 - 2V_1 [V_1 - V_2 \cos(K_1 - K_2)]\}}{V_0^4}. \end{aligned} \quad (4.23)$$

Подставим выражения (4.21) .. (4.23) в формулу (4.20):

$$\begin{aligned} \frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1 \partial K_2} &= G_s \left\{ \left\{ \mp \frac{DV_1}{V_0^3} V_1 V_2 \sin(K_1 - K_2) \right\} \frac{[V_1 - V_2 \cos(K_1 - K_2)]}{V_0^2} + \right. \\ &+ \frac{DV_1}{V_0} \times \frac{\mp V_2 \sin(K_1 - K_2) \{V_0^2 - 2V_1 [V_1 - V_2 \cos(K_1 - K_2)]\}}{V_0^4} \left. \right\} [V_2 \cos(K_2 - \alpha) - V_1 \cos(K_1 - \alpha)] + \\ &+ \frac{DV_1}{V_0} \frac{[V_1 - V_2 \cos(K_1 - K_2)]}{V_0^2} [-V_2 \sin(K_2 - \alpha)]. \end{aligned} \quad (4.24)$$

В последней формуле перед некоторыми членами стоит знак « \mp », что означает применение соответствующего знака «+» или «-» в зависимости от направлений одновременного поворота судна и цели.

С помощью формулы (4.24) исследовалось изменение дистанции

кратчайшего сближения $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1 \partial K_2}$. Производилось имитационное моделирование с помощью компьютерной программы, написанной на языке Delphi, которое подробно представлено в главе 5.

Рассматривались три ситуации сближения судов с разным соотношением скоростей судна и цели ($V_1 = V_2$, $V_1 > V_2$ и $V_1 < V_2$), причем анализировались два случая: когда курсы судна и цели изменяются в одну сторону и когда производится изменение их курсов в разные стороны. При этом для заданных значений начальной разности курсов курса судна и цели ΔK приводится графическая зависимость (нижний график рис. 4.2) и регистрируются значения величин: K_n , K_k - значения курсов судна начала и конца подмножества курсов сближения; K_{sn} - значение курса судна, при котором достигается начальное ненулевое производной $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1 \partial K_2}$; K_m - значение курса судна, соответствующее изменению знака производной при максимальном значении.

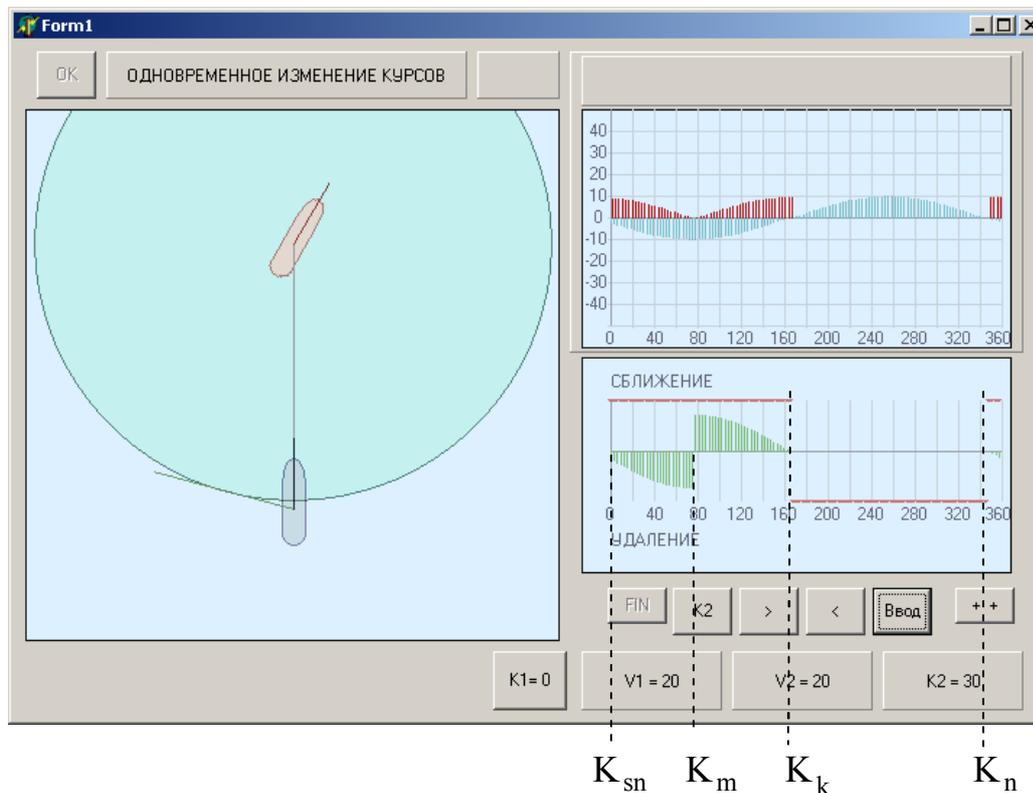


Рис. 4.2. Зависимость производной в случае «++»

В табл. 4.1 приведены результаты имитационного моделирования, в которой для трех указанных ситуаций соотношения скоростей судна и цели для различных значений разности курсов судна и цели ΔK указаны участки роста и уменьшения D_{\min} .

Таблица 4.1

Результаты имитационного моделирования

Первая ситуация $V_1 > V_2$				
Один знак изменения K_1 и K_2			Разные знаки изменения K_1 и K_2	
ΔK	рост D_{\min}	уменьшение D_{\min}	рост D_{\min}	уменьшение D_{\min}
0	0..90	270..0	0..93	270..0
60	40..130	310..40	25..55	235..25
120	20..110	290..20	35..70	250..35
180	0..90	270..0	0..90	270..0
240	340..70	250..340	325..110	290..325
300	325..50	230..325	340..125	305..340
Вторая ситуация $V_1 < V_2$				
Один знак изменения K_1 и K_2			Разные знаки изменения K_1 и K_2	
ΔK	рост D_{\min}	уменьшение D_{\min}	рост D_{\min}	уменьшение D_{\min}
60	85..170	350..85	220..5	195..220
120	40..130	310..40	270..50	230..270
180	0..90	270..0	0..90	270..0
240	320..50	230..320	95..130	310..95
300	280..5	190..280	140..170	355..140

Продолжение табл. 4.1

Третья ситуация $V_1 = V_2$		
Один знак изменения K_1 и K_2		
ΔK	рост D_{\min}	уменьшение D_{\min}
60	60..150	330..60
120	30..120	300..30
180	0..90	270..0
240	335..60	240..335
300	300..30	210..300

Как показывают материалы имитационного моделирования главы 5, производная $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1 \partial K_2}$ принимает нулевое значение, когда курс судна принимает значения K_n , K_k и K_m . При значении K_m производная скачкообразно изменяет знак с отрицательного на положительное значение. На участке $K_1 \in (K_m, K_k)$ производная положительная и отрицательна – на участке $K_1 \in (K_n, K_m)$.

Найдем аналитические выражения для расчета значений величин K_n и K_k . При этих значениях скорость изменения дистанции между судном и целью обращается в нуль, т. е.:

$$\dot{D} = V_2 \cos(K_2 - \alpha) - V_1 \cos(K_1 - \alpha) = 0.$$

Учитываем, что при одновременном повороте судна и цели с одинаковой угловой скоростью можно записать:

$$K_1 = K_{10} + DK \quad \text{и} \quad K_2 = K_{20} + \delta DK,$$

где K_{10} и K_{20} - соответственно начальные курсы судна и цели;

δ – характеристика стороны поворота цели относительно судна, причем если поворот в одну сторону, то $\delta = 1$, а при повороте в разные стороны $\delta = -1$;

DK - одинаковое приращение курса судна и цели.

Поэтому:

$$V_2 \cos(K_{20} + \delta DK - \alpha) - V_1 \cos(K_{10} + DK - \alpha) = 0.$$

Это равенство можно преобразовать к виду:

$$[V_2 \cos(K_{20} - \alpha) - V_1 \cos(K_{10} - \alpha)] \cos DK - [\delta V_2 \sin(K_{20} - \alpha) - V_1 \sin(K_{10} - \alpha)] \sin DK = 0.$$

Произведем амплитудно-фазовое преобразование последнего выражения. Для этого введем обозначения:

$$A_s = \sqrt{[V_2 \cos(K_{20} - \alpha) - V_1 \cos(K_{10} - \alpha)]^2 + [\delta V_2 \sin(K_{20} - \alpha) - V_1 \sin(K_{10} - \alpha)]^2};$$

$$\sin \psi_0 = \frac{[\delta V_2 \sin(K_{20} - \alpha) - V_1 \sin(K_{10} - \alpha)]}{A_s};$$

$$\cos \psi_0 = \frac{[V_2 \cos(K_{20} - \alpha) - V_1 \cos(K_{10} - \alpha)]}{A_s}.$$

Следовательно, $A_s \cos(\psi_0 + DK) = 0$. Откуда находим:

$$DK_1 = 90 - \psi_0; \quad DK_2 = 270 - \psi_0.$$

Поэтому искомые значения величин K_n и K_k определяются выражениями:

$$K_n = K_{10} + 270 - \psi_0 \quad \text{и} \quad K_k = K_{10} + 90 - \psi_0.$$

Рассмотрим выражение для значения K_m , при котором относительный курс K_{ot} равен пеленгу α с судна на цель, т.е. $K_{ot} = \alpha$ или $\text{tg} K_{ot} = \text{tg} \alpha$.

Подставляем значение $\text{tg} K_{ot}$:

$$\frac{(V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2)}{(V_1 \cos K_1 - V_2 \cos K_2)} = \text{tg} \alpha.$$

Преобразуем полученное выражение:

$$(V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2) \cos \alpha = (V_1 \cos K_1 - V_2 \cos K_2) \sin \alpha.$$

Если изменения курса и цели производятся в одну сторону с одинаковой угловой скоростью, то можно записать:

$$K_1 = K_{10} + DK \quad \text{и} \quad K_2 = K_{20} + DK .$$

Поэтому:

$$[V_1 \sin(K_{10} + DK) - V_2 \sin(K_{20} + DK)] \cos \alpha = [V_1 \cos(K_{10} + DK) - V_2 \cos(K_{20} + DK)] \sin \alpha .$$

Преобразуем данное выражение:

$$V_1 [\sin K_{10} \cos DK \cos \alpha + \cos K_{10} \sin DK \cos \alpha] - V_2 [\sin K_{20} \cos DK \cos \alpha + \cos K_{20} \sin DK \cos \alpha] - \\ - V_1 [\cos K_{10} \cos DK \sin \alpha - \sin K_{10} \sin DK \sin \alpha] + V_2 [\cos K_{20} \cos DK \sin \alpha - \sin K_{20} \sin DK \sin \alpha] = 0$$

Группируем члены в полученном выражении:

$$\cos DK [V_1 \sin K_{10} \cos \alpha - V_2 \sin K_{20} \cos \alpha - V_1 \cos K_{10} \sin \alpha + V_2 \cos K_{20} \sin \alpha] + \\ + \sin DK [V_1 \cos K_{10} \cos \alpha - V_2 \cos K_{20} \cos \alpha + V_1 \sin K_{10} \sin \alpha - V_2 \sin K_{20} \sin \alpha] = 0 .$$

Или, после преобразований:

$$\cos DK [V_1 \sin(K_{10} - \alpha) - V_2 \sin(K_{20} - \alpha)] + \sin DK [V_1 \cos(K_{10} - \alpha) - V_2 \cos(K_{20} - \alpha)] = 0 .$$

Произведем амплитудно-фазовое преобразование последнего выражения, для чего найдем приведенные амплитуду A_s и фазу ψ_0 :

$$A_s = \sqrt{[V_1 \sin(K_{10} - \alpha) - V_2 \sin(K_{20} - \alpha)]^2 + [V_1 \cos(K_{10} - \alpha) - V_2 \cos(K_{20} - \alpha)]^2} ; \\ \psi_0 = \text{Arcsin} \left(\frac{[V_1 \cos(K_{10} - \alpha) - V_2 \cos(K_{20} - \alpha)]}{A_s} \right) .$$

В результате преобразований получим:

$$A_s \cos(\psi_0 - DK) = 0 .$$

Откуда находим: $DK_1 = \psi_0 - 90$; $DK_2 = \psi_0 - 270$. Поэтому:

$$K_{m1} = K_{10} + \psi_0 - 90; \quad K_{m2} = K_{10} + \psi_0 - 270 .$$

В качестве расчетного значения выбираем то значение $K_{m1,2}$, которое принадлежит подмножеству курсов сближения судна (K_n, K_k).

При повороте судна и цели в разные стороны $K_2 = K_{20} - DK$. Поэтому значение K_m находим из выражения:

$$\cos DK [V_1 \sin(K_{10} - \alpha) - V_2 \sin(K_{20} - \alpha)] + \\ + \sin DK [V_1 \cos(K_{10} - \alpha) + V_2 \cos(K_{20} + \alpha)] = 0 .$$

Данное выражение преобразуем к виду:

$$\cos(\psi_0 - DK) = 0,$$

$$\text{где } \psi_0 = \text{Arctg}\left(\frac{[V_1 \cos(K_{10} - \alpha) + V_2 \cos(K_{20} + \alpha)]}{[V_1 \sin(K_{10} - \alpha) - V_2 \sin(K_{20} - \alpha)]}\right).$$

При этом $K_{m1} = K_{10} + \psi_0 + 90$; $K_{m2} = K_{10} + \psi_0 + 270$.

Из двух полученных значений выбираем то значение $K_{m1,2}$, которое принадлежит подмножеству курсов сближения судна (K_n, K_k).

4.3. Анализ координируемости бинарных взаимодействий, которые регламентируются МППСС-72

Для анализа координируемости взаимодействий, предписываемых МППСС-72 при опасном сближении судов, обобщая вышеизложенное, отметим, что в случае, когда судно изменяет курс при неизменном курсе цели базовые точки $K_{11}, K_{12}, K_{13}, K_{14}, K_{15}$ и K_{16} зависят от соотношения скоростей судна и цели ρ .

В случае $\rho=1$ расчет базовых точек производится с помощью выражений:

$$K_{11} = K_2,$$

$$K_{12} = 2\alpha - K_2,$$

$$K_{13} = K_{14} = K_2,$$

$$K_{15} = K_2, \quad K_{16} = 2\alpha + \pi - K_2.$$

$$\tilde{K}_1 = K_{12}, \quad \hat{K}_1 = K_{16}, \quad \check{K}_1 = K_{11}.$$

Также установлено, что знак производной $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$ определяется

следующим образом:

$\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} > 0$ для курсов сближения судна от $K_1 = \hat{K}_1$ до $K_1 = \tilde{K}_1$;

$\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} < 0$ для курсов сближения судна от $K_1 = \tilde{K}_1$ до $K_1 = \hat{K}_1$.

Если $\rho > 1$, то расчет базовых точек производится следующим образом:

$$K_{11} = \alpha + \arccos[\rho^{-1} \cos(K_2 - \alpha)],$$

$$K_{12} = \alpha - \arccos[\rho^{-1} \cos(K_2 - \alpha)],$$

$$K_{15} = \alpha + \arcsin[\rho^{-1} \sin(K_2 - \alpha)],$$

$$K_{16} = \alpha + \pi - \arcsin[\rho^{-1} \sin(K_2 - \alpha)].$$

Значения курсов судна K_{13} и K_{14} не существуют.

$$\tilde{K}_1 = (K_{11}, K_{12}), \quad \hat{K}_1 = K_{15}.$$

Знак производной $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$ определяется следующим образом:

$\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} > 0$ для курсов сближения судна от $K_1 = \hat{K}_1$ до $K_1 = K_k$;

$\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} < 0$ для курсов сближения судна от $K_1 = K_n$ до $K_1 = \hat{K}_1$.

Если скорость судна меньше скорости цели, т.е. при $\rho < 1$:

$$K_{11} = \alpha + \arccos[\rho^{-1} \cos(K_2 - \alpha)],$$

$$K_{12} = \alpha - \arccos[\rho^{-1} \cos(K_2 - \alpha)],$$

причем $-1 \leq \rho^{-1} \cos(K_2 - \alpha) \leq 1$.

Значения K_{13} и K_{14} существуют, и определяются выражениями:

$$K_{13} = K_2 + \arccos \rho,$$

$$K_{14} = K_2 - \arccos \rho.$$

Величины K_{15} и K_{16} рассчитываются с помощью выражений:

$$K_{15} = \alpha + \arcsin[\rho^{-1} \sin(K_2 - \alpha)],$$

$$K_{16} = \alpha + \pi - \arcsin[\rho^{-1} \sin(K_2 - \alpha)].$$

$$\tilde{K}_1 = (K_{11}, K_{12}, K_{13}), \quad \hat{K}_1 = (K_{15}, K_{16}).$$

Также установлено, что знак производной $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$ определяется

следующим образом:

Если \hat{K}_1 существует, то

$$\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} > 0 \text{ для курсов сближения судна от } K_1 = \hat{K}_1 \text{ до } K_1 = K_k;$$

$$\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} < 0 \text{ для курсов сближения судна от } K_1 = K_n \text{ до } K_1 = \hat{K}_1.$$

Если \hat{K}_1 не существует, то при наличии K_{1n} и K_{1k}

$$\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} > 0 \text{ для курсов сближения судна от } K_1 = K_{14} \text{ до } K_1 = K_k;$$

$$\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} < 0 \text{ для курсов сближения судна от } K_1 = K_n \text{ до } K_1 = K_{14}.$$

Если \hat{K}_1 , K_{1n} и K_{1k} не существует, когда судно и цель только сближаются, то

$$\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} > 0 \text{ для курсов сближения судна от } K_1 = K_{14} \text{ до } K_1 = K_{13};$$

$$\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} < 0 \text{ для курсов сближения судна от } K_1 = K_{13} \text{ до } K_1 = K_{14}.$$

В случае, когда судно и цель одновременно изменяют курс, то базовые точки K_n , K_k и K_m изменения дистанции кратчайшего сближения D_{\min} вычисляются в зависимости от стороны изменения курсов судна и цели.

Если курсы судна и цели изменяются в одну сторону, то расчет производится с помощью следующих выражений:

$$K_n = K_{10} + 270 - \psi_0 \text{ и } K_k = K_{10} + 90 - \psi_0,$$

$$\text{где } \psi_0 = \text{Arctg}\left(\frac{V_2 \sin(K_{20} - \alpha) - V_1 \sin(K_{10} - \alpha)}{V_2 \cos(K_{20} - \alpha) - V_1 \cos(K_{10} - \alpha)}\right).$$

$$K_{m1} = K_{10} + \psi_0 - 90; \quad K_{m2} = K_{10} + \psi_0 - 270,$$

$$\text{где } \psi_0 = \text{Arctg}\left(\frac{V_1 \cos(K_{10} - \alpha) - V_2 \cos(K_{20} - \alpha)}{V_1 \sin(K_{10} - \alpha) - V_2 \sin(K_{20} - \alpha)}\right).$$

В качестве расчетного значения выбирается то значение $K_{m1,2}$, которое принадлежит подмножеству курсов сближения судна (K_n, K_k).

Если повороты судна и цели производятся в разные стороны, то расчет величин K_n, K_k и K_m производится с помощью следующих выражений:

$$K_n = K_{10} + 270 - \psi_0 \text{ и } K_k = K_{10} + 90 - \psi_0,$$

$$\text{где } \psi_0 = \text{Arctg}\left(\frac{-V_2 \sin(K_{20} - \alpha) - V_1 \sin(K_{10} - \alpha)}{V_2 \cos(K_{20} - \alpha) - V_1 \cos(K_{10} - \alpha)}\right).$$

$$K_{m1} = K_{10} + \psi_0 + 90; \quad K_{m2} = K_{10} + \psi_0 + 270,$$

$$\text{где } \psi_0 = \text{Arctg}\left(\frac{[V_1 \cos(K_{10} - \alpha) + V_2 \cos(K_{20} + \alpha)]}{[V_1 \sin(K_{10} - \alpha) - V_2 \sin(K_{20} - \alpha)]}\right).$$

Как и в предыдущем случае, выбирается то значение $K_{m1,2}$, которое принадлежит подмножеству курсов сближения судна (K_n, K_k).

В этом случае, одновременного поворота судна и цели, изменение дистанции кратчайшего сближения D_{\min} происходит следующим образом.

На участке курсов судна $K_1 \in (K_m, K_k)$ производная $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1 \partial K_2}$ положительная и D_{\min} увеличивается, а на участке $K_1 \in (K_n, K_m)$ она отрицательна, и D_{\min} уменьшается.

Для анализа координируемости бинарных взаимодействий для каждой из предусмотренных в МПСС-72 ситуаций следует выявить параметры, влияющие на изменение дистанции кратчайшего сближения, значения

координирующих сигналов и сигналов связи, а затем определить возможные перемещения судна и цели, которые позволят определить координируемость предписанного взаимодействия.

Бинарные взаимодействия Vz_M можно разделить на два типа. К первому типу относятся взаимодействия, которые предусматривают при расхождении изменение курса только одним активным судном. Ко второму типу отнесем взаимодействия, предусматривающие изменение курса обоих судов.

Вначале рассмотрим взаимодействия первого типа, для оценки координируемости которых используем производную дистанции кратчайшего сближения по курсу судна $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$. Поэтому

координируемость $Coor(D_1, D_2)$ определяется знаком производной $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$,

т.е. $Coor(D_1, D_2) = \text{sign}\left(\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}\right)$.

Рассмотрим ситуации первого типа $S_{\omega j}^f$ и соответствующие им взаимодействия Vz_M . Причем следует отметить, что такие ситуации возможны только в первой области взаимных обязанностей. Из характеристики взаимодействия $Vz_{M1}^{(j)}$ можно определить взаимное положения судна и цели и взаимоотношение их параметров движения, а характеристика $Vz_{M2}^{(j)}$ определяет маневр расхождения.

Начальное значение курса K_1 определяется условием допустимости дистанции кратчайшего сближения, т.е. $D_{\min} = D_d$. Поэтому:

$$D \sin(K_{ot} - \alpha) = D_d, \text{ или } K_{ot} = \arcsin \frac{D_d}{D} + \alpha.$$

Если обозначить $\beta = \arcsin \frac{D_d}{D} + \alpha$, то $\text{tg} K_{ot} = \text{tg} \beta$ или:

$$\frac{\sin K_{ot}}{\cos K_{ot}} = \frac{\sin \beta}{\cos \beta}, \quad \frac{V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2}{V_1 \cos K_1 - V_2 \cos K_2} = \frac{\sin \beta}{\cos \beta}.$$

Из последнего уравнения получим:

$$(V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2) \cos \beta = (V_1 \cos K_1 - V_2 \cos K_2) \sin \beta,$$

$$V_1 \sin(K_1 - \beta) = V_2 \sin(K_2 - \beta).$$

Решая полученное уравнение относительно переменной K_1 , получим начальное значение $K_{1n} = \beta + \arcsin[\rho^{-1} \sin(K_2 - \beta)]$. Конечное значение курса K_1 определяется либо условием принадлежности к ситуации рассматриваемого типа K_{1k} , либо конечным значением курса сближения (K_{11}, K_{12}) .

В качестве примера рассмотрим случай наиболее часто встречающейся ситуации S_{01}^{cs} опасно сближающихся судна и цели с механическими двигателями пересекающимися курсами в первой области взаимных обязанностей. Для активного судна ситуация определяется характеристикой $Bz_{M1}^{(13)} = \{\sin(\alpha + 180 - K_2) < 0, \sin(\alpha - K_1) > 0\}$, откуда можно определить подмножества возможных курсов судна и цели, удовлетворяющих данной ситуации. Из неравенства $\sin(\alpha - K_1) > 0$ находим, что $K_1 \in (\pi + \alpha, \alpha)$, а из неравенства $\sin(\alpha + 180 - K_2) < 0$ находим подмножество возможных курсов цели K_2 , т.е. $K_{2n} = \alpha + \pi$, а конечное значение определяется условием ситуации обгона $\sin(K_2 + 67,5 - \alpha) > 0$, из которой находим $K_{2k} = \alpha - 67,5$.

Начальное значение курса K_1 определяется формулой $K_{1n} = \beta + \arcsin[\rho^{-1} \sin(K_2 - \beta)]$, а конечное $K_{1k} = \alpha$. В данной ситуации характеристика $Bz_{M2}^{(13)}$, определяющая характер маневра, для активного судна имеет вид $q_1 = (1, 1, -1)$, т.е. маневр уклонения представляет собой увеличение курса активного судна.

Для значений курса цели $K_2 \in (K_{2n}, K_{2k})$ определяем величину $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$ в интервале курсов судна $K_1 \in (K_{1n}, K_{1k})$. Аналитический анализ и имитационное моделирование показали, что при $K_2 \in (\alpha + \pi, \alpha + \pi + \Delta K_2)$ (значение ΔK_2 для величин $\rho \in (0, 6..1, 2)$ не превосходит 75°) и $K_1 = K_{1n}$ величина $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$ является отрицательной, однако изменение курса судна до величины $K_1 \geq \alpha$ обеспечивает координируемость маневра, т.е. $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} > 0$ и $D_{\min} \geq D_d$.

Таким образом, взаимодействия $Vz_{M2}^{(12)}$ и $Vz_{M2}^{(13)}$ в ситуации $S_{\omega 1}^c$ являются координируемые и $Coor(S_{\omega 1}^c)=1$. Аналогично производилось определение координируемости для остальных ситуаций первого типа, к которым относятся ситуация обгона $S_{\omega 1}^p$ и ситуация разных статусов судна и цели $S_{\omega 1}^{r \neq}$ в первой области взаимных обязанностей.

В ситуации обгона начальное значение курса судна, соответствующее ситуации, определяется величиной $K_{1n} = \beta - \arcsin[\rho^{-1} \sin(K_2 - \beta)]$, а конечное - $K_{1k} = \bar{K}_1 = \beta + \arcsin[\rho^{-1} \sin(K_2 - \beta)]$. При курсе судна $K_{1s} = \alpha + \arcsin[\rho^{-1} \sin(K_2 - \alpha)]$ относительный курс равен пеленгу, т.е. $K_{ot} = \alpha$. Поэтому, если $K_1 < K_{1s}$, то при уклонении судна влево $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} > 0$ и, следовательно, $Coor(S_{\omega 1}^p)=1$, а в случае, когда $K_1 > K_{1s}$, то при уклонении судна вправо $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} > 0$ и $Coor(S_{\omega 1}^p)=1$. Поэтому в данной ситуации $Coor(S_{\omega 1}^p)=1$.

Заключительная ситуация первого типа ситуация разных статусов судна и цели $S_{\omega 1}^{r \neq}$ может реализоваться для всех курсов судна, при котором происходит его сближение с целью, при этом $D_{\min} < D_d$, т.е.:

$$K_1 \in \{\beta - \arcsin[\rho^{-1} \sin(K_2 - \beta)], \beta + \arcsin[\rho^{-1} \sin(K_2 - \beta)]\}.$$

В этом случае при выборе стороны уклонения согласно хорошей морской практике координируемость ситуации $S_{\omega 1}^{r \neq}$ равна 1.

Характеристика координируемости для ситуаций первого типа представлена в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Координируемость ситуаций первого типа

Правило	Ситуация	q_{2i}, q_{3i}	Bz	K_{2n}	K_{2k}	K_{1k}	Coor
15	$S_{\omega 1}^c$	1, -1	$Bz_M^{(12)}$	$\alpha + \pi$	$\alpha - 67,5$	α	1
13	$S_{\omega 1}^p$	1, 1	$Bz_M^{(5)}$	$\alpha - 67,5$	$\alpha + 67,5$	\bar{K}_1	1
18	$S_{\omega 1}^{r \neq}$	1, 1	$Bz_M^{(8)}$	-	-	-	1

Рассмотрим второй тип взаимодействий, который предусматривает изменение курса обоих судов.

Этот тип взаимодействия, как показано в главе 3, может реализоваться в условиях хорошей видимости, когда судно и цель сближаются в первой, второй и третьей областях взаимных обязанностей, и в условиях пониженной видимости.

Вначале исследуем взаимодействия второго типа в условиях хорошей видимости, когда судно и цель находятся в первой области взаимных обязанностей. К этому случаю относятся ситуации опасного сближения судов с механическим двигателем на противоположных курсах $S_{\omega 1}^o$ с взаимодействием $Bz_{M2}^{(11)} = \{(1,1,-1)(1,1,-1)\}$ и ситуация сближения судов с

одинаковым статусов выше второго $S_{\omega 1}^{r>2}$, в которой регламентируется взаимодействие $Vz_{M2}^{(18)} = \{(0,0,0)(0,0,0)\}$.

В случае возникновения взаимодействия $Vz_{M2}^{(11)} = \{(1,1,-1)(1,1,-1)\}$ начальное положение судна и цели определяется выражениями $\cos(\alpha - K_1) \leq \cos 5$ и $\cos(\alpha + 180 - K_2) \leq \cos 5$, откуда значение курса судна, соответствующее данной ситуации, принадлежит интервалу $K_1 \in (\alpha - 5, \alpha + 5)$, а значение курса цели может принимать значения $K_2 \in (\alpha + 175, \alpha + 185)$. В этой ситуации взаимодействие предусматривает изменение курсов судна и цели вправо, т.е. вариант «+ +», который в данной ситуации обеспечивает максимальное увеличение дистанции кратчайшего сближения $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1 \partial K_2} > 0$. Поэтому координируемость ситуации $Coor(S_{\omega 1}^0) = 1$.

Координируемость в ситуации $S_{\omega 1}^{r>2}$ Правилами МППСС-72 не предусмотрена, поэтому по определению в этой ситуации $Coor(S_{\omega 1}^{r>2}) = -1$.

Во второй области взаимных обязанностей к ситуациям второго типа относятся ситуация обгона $S_{\omega 2}^p$ с взаимодействием $Vz_{M2}^{(24)} = \{(1,1,1)(0,0,0)\}$, в результате которого возможны совместные повороты судна и цели в одну и в противоположные стороны, т.е. «+ +» и «+ -». Учитывая начальное значение курса судна, соответствующее ситуации, $K_{1n} = \beta - \arcsin[\rho^{-1} \sin(K_2 - \beta)]$ и $K_{1k} = \bar{K}_1 = \beta + \arcsin[\rho^{-1} \sin(K_2 - \beta)]$, а также курс цели, удовлетворяющей данной ситуации, может принимать значения $K_2 \in (\alpha - 67,5, \alpha + 67,5)$.

Если судно и цель изменяют курсы в одну сторону, т.е. «+ +», то для курсов цели $K_2 \in (\alpha - 67,5, \alpha)$ и курсов судна $K_1 \in (K_{1n}, K_{1k})$ величина производной $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1 \partial K_2} < 0$ и координируемость $Coor(S_{\omega 2}^p) = -1$.

Для курсов цели $K_2 \in (\alpha, \alpha + 67,5)$ при тех же начальных курсах судна производная $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1 \partial K_2} > 0$, следовательно, $\text{Coor}(S_{\omega 2}^p) = 1$.

При изменении курсов судна и цели в разные стороны («+ -») для всех значений начальных курсов цели $K_2 \in (\alpha - 67,5, \alpha + 67,5)$ и начальных курсов судна $K_1 \in (K_{1n}, K_{1k})$ дистанция кратчайшего сближения D_{\min} увеличивается, т. е. $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1 \partial K_2} > 0$ и $\text{Coor}(S_{\omega 2}^p) = 1$.

Рассмотрим ситуацию опасного сближения судов с разным статусом во второй области взаимных обязанностей $S_{\omega 2}^{r \neq}$ с взаимодействием $Vz_{M2}^{(26)} = \{(0,0,0)(1,1,1)\}$. При этом взаимодействии на всех курсах опасного сближения возможны варианты изменения курсов судна и цели в одну сторону «+ +» или в разные стороны «+ -». Начальные курсы цели могут принимать значения $K_2 \in (\alpha + 67,5, \alpha - 67,5)$ (исключая ситуацию обгона).

В случае «+ +» для курсов цели $K_2 \in (\alpha + 67,5, \alpha + \pi)$, если $K_1 \in (K_{1n}, K_{1s})$, где $K_{1s} = \alpha + \arcsin[\rho^{-1} \sin(K_2 - \alpha)]$, производная $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1 \partial K_2} < 0$ и координируемость $\text{Coor}(S_{\omega 2}^{r \neq}) = -1$, если же $K_1 \in (K_{1s}, K_{1k})$, то $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1 \partial K_2} > 0$ и $\text{Coor}(S_{\omega 2}^{r \neq}) = 1$.

Если же $K_2 \in (\alpha + \pi, \alpha - 67,5)$ то для всех начальных курсов судна $K_1 \in (K_{1n}, K_{1k})$ производная $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1 \partial K_2} > 0$ и $\text{Coor}(S_{\omega 2}^{r \neq}) = 1$.

В случае «+ -» для начальных курсов цели $K_2 \in (\alpha + 67,5, \alpha + \pi)$ при начальных курсах $K_1 \in (K_{1n}, K_{1s})$ производная $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1 \partial K_2} < 0$ и координируе-

мость $\text{Coor}(S_{\omega_2}^p) = -1$, если же начальные курсы судна $K_1 \in (K_{1s}, K_{1k})$, то производная $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1 \partial K_2} > 0$ и $\text{Coor}(S_{\omega_2}^{r\neq}) = 1$.

Если начальные курсы цели $K_2 \in (\alpha + \pi, \alpha - 67,5)$, то для всех начальных курсов судна $K_1 \in (K_{1n}, K_{1k})$ $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1 \partial K_2} > 0$ и $\text{Coor}(S_{\omega_2}^{r\neq}) = 1$.

Рассмотрим ситуацию опасного сближения судов с механическим двигателем на пересекающихся курсах $S_{\omega_2}^c$ во второй области взаимных обязанностей, в которой реализуется взаимодействие $\text{Vz}_{M2}^{(31)} = \{(1,1,-1)(0,0,0)\}$. В этой ситуации начальное значение курсов судна принимает значения в пределах $K_{1n} = \beta + \arcsin[\rho^{-1} \sin(K_2 - \beta)]$, и $K_{1k} = \alpha$.

Граничные значения начального курса цели $K_{2n} = \alpha + \pi$ и $K_{2k} = \alpha - 67,5$ определяют подмножество допустимых начальных курсов K_2 .

В случае поворота судна и цели в одну сторону, т.е. «+ +», для всех возможных значений начального курса цели $K_2 \in (K_{2n}, K_{2k})$, и всех значений начального курса судна $K_1 \in (K_{1s}, K_{1k})$ дистанция кратчайшего сближения D_{\min} уменьшается, т.е. производная $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1 \partial K_2} < 0$ и координируемость $\text{Coor}(S_{\omega_2}^c) = -1$.

Если повороты судна и цели происходят в разные стороны («+ -»), то для всех значений начального курса цели $K_2 \in (K_{2n}, K_{2k})$ при начальных курсах $K_1 \in (K_{1n}, K_{1s})$ производная $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1 \partial K_2} < 0$ и координируемость $\text{Coor}(S_{\omega_2}^c) = -1$,

а в случае начальных курсов судна $K_1 \in (K_{1s}, K_{1k})$ производная $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1 \partial K_2} > 0$ и координируемость $\text{Coor}(S_{\omega_2}^p) = 1$.

В третьей области взаимных обязанностей S_{ω_3} реализуется взаимодействие $Vz_{M2}^{(36)} = \{(1,1,1)(1,1,1)\}$, в котором судно и цель обязательно меняют свои курсы либо в одну сторону, либо в противоположные, при условии принадлежности начальных курсов судна и цели к множеству курсов сближения. При этом координация маневров судна и цели по условиям МППСС-72 отсутствует. Следовательно, координируемость ситуации $Coor(S_{\omega_3}) = -1$.

Рассмотрим ситуации, возникающие в условиях пониженной видимости, которые изложены в Правиле 19 МППСС-72. Первой ситуацией является $S_{\omega_{01}}$, в которой реализуется взаимодействие $Vz_{M2}^{(37)} = \{(1,1,-1)(1,0,0)\}$, предусматривающее возможные изменения курсов судна и цели в одну и в разные стороны.

Условием возникновения данной ситуации являются неравенства, которые приведены в главе 3:

$$(\cos(\alpha - K_1) > 0) \text{ и } \{(\sin(\alpha + 67,5 - K_2) < 0, \sin(K_2 + 67,5 - \alpha) < 0)\},$$

из которых получаем подмножество начальных курсов судна $K_1 \in (\alpha - 90, \alpha + 90)$ и подмножество начальных курсов цели $K_2 \in (\alpha + 67,5, \alpha - 67,5)$.

В случае «+ +» - изменения курсов K_1 и K_2 в одну сторону установлено, что при любых начальных курсах цели $K_2 \in (\alpha + 67,5, \alpha - 67,5)$ при значениях

курса судна $K_1 \in (K_{1n}, K_{1s})$ производная $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1 \partial K_2} < 0$ и координируемость

$Coor(S_{\omega_2}^p) = -1$, а при значениях курса судна $K_1 \in (K_{1s}, K_{1k})$ производная

$\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1 \partial K_2} > 0$ и координируемость $Coor(S_{\omega_{01}}) = 1$.

Аналогично ведет себя производная $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1 \partial K_2}$ в случае изменения курсов

судна и цели в противоположные стороны, т. е. «+ -».

Очередной ситуацией, возникающей в условиях пониженной видимости, является ситуация $S_{\omega 02}$ с взаимодействием $Bz_M^{(30)}$ и условием реализации $(\cos(\alpha - K_1) \leq 0$, при этом запрет поворота в сторону цели формализуется следующим образом. Для цели, находящейся справа, $\sin(\alpha - K_1) > 0$, поэтому $q_{21} = -1$ и $q_{31} = 1$, а при нахождении цели слева $\sin(\alpha - K_1) < 0$ и $q_{21} = 1, q_{31} = -1$.

Имитационное моделирование и аналитический анализ показали, что в случаях «+ +» и «+ -» производная $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1 \partial K_2} > 0$ и координируемость $Coor(S_{\omega 02}) = 1$.

Заключительная ситуация $S_{\omega 03}$ не рассматривается в МППСС-72 и поэтому не является координируемой, т. е. $Coor(S_{\omega 02}) = -1$. Координируемость ситуаций второго типа представлена в тал. 4.3.

Таблица 4.3

Координируемость ситуаций второго типа

Правило	Ситуация	Bz	q_{21}, q_{31}	q_{22}, q_{32}	« $x_1 x_2$ »	Coor
Первая область взаимных обязанностей $S_{\omega 1}$						
14	$S_{\omega 1}^o$	$Bz_M^{(11)}$	1, -1	1, -1	«+ +»	1
-	$S_{\omega 1}^{r>2}$	$Bz_M^{(18)}$	-	-	-	-1
Вторая область взаимных обязанностей $S_{\omega 2}$						
13	$S_{\omega 2}^p$	$Bz_M^{(24)}$	1, 1	1, 1	«+ +» «+ -»	-1, 1 1

Продолжение табл.4.3

Правило	Ситуация	Bz	q_{21}, q_{31}	q_{22}, q_{32}	« $x_1 x_2$ »	Coor
18	$S_{\omega 2}^{r \neq}$	$Bz_M^{(26)}$	1, 1	1, 1	«+ +» «+ -»	-1, 1 -1, 1
15	$S_{\omega 2}^c$	$Bz_M^{(31)}$	1,-1	1, 1	«+ +» «+ -»	-1 -1, 1
Третья область взаимных обязанностей $S_{\omega 3}$						
17	$S_{\omega 3}$	$Bz_M^{(36)}$	-	-	-	-1
Ситуации пониженной видимости						
19	$S_{\omega 01}$	$Bz_M^{(24)}$	1, -1	1, 1	«+ +» «+ -»	-1, 1 -1, 1
19	$S_{\omega 02}$	$Bz_M^{(30)}$	1, -1 -1, 1	1, 1	-	1
19	$S_{\omega 03}$	$Bz_M^{(33)}$	-	-	-	-1

Анализ табл. 4.2 и табл. 4.3 позволяет сделать следующие выводы:

1. Все ситуации первого типа являются координируемые, как и ситуация сближения на встречных курсах $S_{\omega 1}^0$, относящаяся к ситуациям второго типа. Также является координируемой ситуация $S_{\omega 02}$ в условиях пониженной видимости.

2. Ситуация второго типа сближения судна и цели одинакового статуса больше второго $S_{\omega 1}^{r > 2}$ является некоординируемой, как и ситуация чрезмерного сближения $S_{\omega 3}$ в третьей области взаимных обязанностей.

3. Ситуации второго типа для второй области взаимных обязанностей являются некоординируемые из-за наличия второй области взаимных обязанностей, которая делает неопределенным поведение судна, которому уступают дорогу.

4.4. Другие типы взаимодействий судов при расхождении

Маневрирование судов в ситуации опасного сближения, т.е. операции перевода возмущаемых ситуаций в невозмущаемые, регламентируется МППСС-72. При этом рассматриваются самые элементарные ситуации расхождения только двух судов на уровне бинарной координации, когда предписывается, какое из судов активное, а какое пассивное, и в некоторых случаях указывается сторона уклонения активного судна. Следовательно, множество регламентируемых операций перевода G_p , устанавливаемых МППСС-72, которое обозначим MG_p , является достаточно ограниченным. В противовес этому, исходное множество возмущаемых ситуаций, которое необходимо перевести в невозмущенные, обуславливает множество реальных операций перевода G , которое обозначим MG .

Число элементов множества MG неизмеримо превосходит число элементов множества MG_p . Другими словами, многообразие исходных реальных ситуаций и, следовательно, операций перевода G намного превосходит многообразие рекомендуемых МППСС-72 операций G_p . Указанное обстоятельство объясняет низкую эффективность МППСС-72, так как не соответствует «закону необходимого разнообразия» Росса Эшби [98], согласно которому именно внутреннее многообразие и сложность системы МППСС-72 как координатора (множество MG_p), не соответствует многообразию внешней среды (множество MG), зачастую не позволяя МППСС-72 отвечать на ситуационные вызовы внешней среды, создавая неразрешимые в рамках множества MG_p ситуации.

Единственным выходом из такой противоречивой ситуации является увеличение многообразия реакций координатора, которое должно быть сопоставимо с многообразием ситуационных возмущений MG . Если учесть, что МППСС-72 является законодательным документом, т.е. множество MG_p

не может быть изменено (пока не принята другая система координации взаимодействия судов), то увеличение многообразия реакций координатора, не нарушая множества MG_p , возможно за счет синтеза более сложных операций перевода из нескольких операций G_p . Эта процедура представляет собой разложение операции перевода реальной ситуации G на совокупность нескольких регламентируемых операций перевода G_p (возможно и одну) при условии, что такое разложение возможно. Предположим, что ситуационное возмущение содержит несколько возмущающих целей, которым необходимо уступить дорогу. Возможен вариант, что одним уклонением судна, общим для всех целей, производится компенсация ситуационного возмущения. В ситуации, когда судно опасно сближается с несколькими целями и по отношению к одним целям оно должно сохранять параметры движения неизменными, а по отношению к другим – уступать им дорогу, то такое ситуационное возмущение не может быть разложено стандартным образом. Для преодоления такого рода противоречий необходимо введение дополнительной элементарной операции (например, связи с обоими судами и договоренности о порядке расхождения).

При рассмотрении парных стратегий судов D_1 и D_2 возможны неопределенные условия поведения партнера, когда даже вероятностное распределение выбора партнером стратегии расхождения обосновать затруднительно, поэтому судну надлежит использовать принцип применения гибких стратегий расхождения [47] (компенсации ситуационных возмущений).

Смысл этого принципа заключается в минимаксных подходах судна к использованию партнером возможных альтернативных стратегий расхождения. Другими словами, судном определяется наиболее неблагоприятная стратегия $\tilde{D}_{1(2)}$ расхождения партнера из перечня возможных, который соответствует оценке полученной судном области

взаимных обязанностей. С учетом этой стратегии партнера $\tilde{D}_{1(2)}$ и соответствующей стратегии судна производится расчет параметров маневра расхождения судна, и отслеживается стратегия поведения партнера. Если партнером изменяется либо стратегия расхождения, либо параметры маневра расхождения, то судном производится коррекция параметров маневра расхождения, а в случаях необходимости и стратегии расхождения.

Гибкие стратегии в общем случае являются функциями времени, так как должны учитывать многовариантность поведения судна-партнера и возможность ухудшения ситуации расхождения с течением времени.

Таким образом, подводя итог рассмотрения гибких стратегий расхождения, отмечаем, что гибкие стратегии расхождения, которые обозначим D_{f1} и D_{f2} соответственно для судов c_1 и c_2 , имеют три следующие особенности:

- они носят минимаксный характер, т.е. из перечня возможных стратегий расхождения судна-партнера выбирается наиболее неблагоприятная, с тем, чтобы выбрать маневр, минимизирующий угрозу столкновения;
- они зависят от времени, так как контролируют поведение судна-партнера и при изменении параметров его маневра расхождения в случае необходимости может быть изменен маневр или даже стратегия расхождения;
- если стратегией является необходимость сохранения параметров движения, то заблаговременно просчитывается возможный вариант стратегии расхождения, если ситуация ухудшится переходом в следующую область взаимных обязанностей.

В случае если судно опасно сближается с несколькими целями, то общий координирующий сигнал $Y_s = (q_{1s}, q_{2s}, q_{3s})$, определяющий структуру маневра расхождения судна с целями, определяется сочетанием частных координирующих сигналом Y_i .

В ситуации, если для всех опасных целей $q_{li} = 1$ или $q_{li} = 0$, т. е. $q_{li} \geq 0$ для всех целей, то $q_{1s} = 1$, другими словами судно должно уступать дорогу всем целям. Наиболее целесообразным является общий маневр уклонения от всех целей одновременно, если такой существует.

Если же для всех опасных целей значения $q_{li} = -1$ или $q_{li} = 0$, т. е. $q_{li} \leq 0$ для всех целей, то в общем сигнале координации $q_{1s} = -1$, что означает сохранение параметров движения судна в процессе расхождения со всеми целями.

В остальных ситуациях, когда значения q_{li} имеют разные знаки, структура маневра расхождения является более сложной и маневр может иметь несколько участков, на которых судно уклоняется при необходимости уступать дорогу или же сохраняет свои параметры движения (курс и скорость).

4.5. Выводы по четвертой главе.

В главе рассмотрена координация бинарных взаимодействий и предложен способ ее формализации.

Показано, что координируемость взаимодействия определяется изменением дистанции кратчайшего сближения, вызванной маневрами судов предписанными взаимодействиями.

Получена аналитическая зависимость изменения дистанции кратчайшего сближения от курса судна, выполняющего уклонения, при неизменных параметрах движения второго судна. Имитационным моделированием произведена проверка корректности полученной зависимости.

Для взаимодействий, предусматривающих маневрирование обоих судов, получена аналитическая зависимость изменения дистанции кратчайшего сближения от курсов обоих взаимодействующих судов с учетом стороны

поворота, когда поворот обоих судов производится в одну сторону или в противоположные стороны.

Произведена оценка координируемости взаимодействий, предусмотренных МППСС-72.

Рассмотрены также другие типы взаимодействий.

ГЛАВА 5

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ
ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

5.1. Алгоритм идентификации текущей ситуации согласно требованиям МППСС-72 и определение реализовавшегося типа взаимодействия

Общий алгоритм определения принадлежности текущей ситуации S_i к одной из множества S приведен на рис. 5.1. В нем приняты следующие обозначения условий:

$$Y1 = \{V_2 \cos(K_2 - \alpha) - V_1 \cos(K_1 - \alpha)\} < 0,$$

$$Y2 = \{\max(\min D) < \min D_{\text{dop}}\},$$

$$Y3 = \{\min D_{\text{dop}} < \max(\min D) < D_{\text{dop}}\},$$

$$Y4 = \{D \sin(K_{\text{от}} - \alpha) < D_{\text{dop}}\}.$$

Для определения истинности условий $Y2..Y4$ необходимо рассчитать максимальную величину дистанции кратчайшего сближения $\max(\min D)$. Если скорость оперирующего судна V_1 превосходит скорость цели V_2 , т.е. $V_1 > V_2$, то в первом приближении без учета инерционности судна дистанция D между судном и целью является максимальной величиной дистанции кратчайшего сближения, так как судно, развернувшись от цели, начнет увеличивать дистанцию D . Поэтому в этом случае $\max(\min D) = D$.

В случае, когда $V_1 < V_2$, величина $\max(\min D)$ рассчитывается согласно [47] следующим образом. Вначале вычисляются величины:

$$\max D_{\min}^{(\text{mx})} = D_n \sin(K_{\text{отmax}} - \alpha_n) \text{ и } \max D_{\min}^{(\text{mn})} = D_n \sin(K_{\text{отmin}} - \alpha_n),$$

где $K_{\text{отmin}} = \pi + K_2 - \arcsin \rho$ и $K_{\text{отmax}} = \pi + K_2 + \arcsin \rho$, причем $\rho = V_1 / V_2$.

Затем из полученных значений $\max D_{\min}^{(\text{mx})}$ и $\max D_{\min}^{(\text{mn})}$ выбирается большее,

т.е. $\max(\min D) = \max(\max D_{\min}^{(mx)}, \max D_{\min}^{(mn)})$.

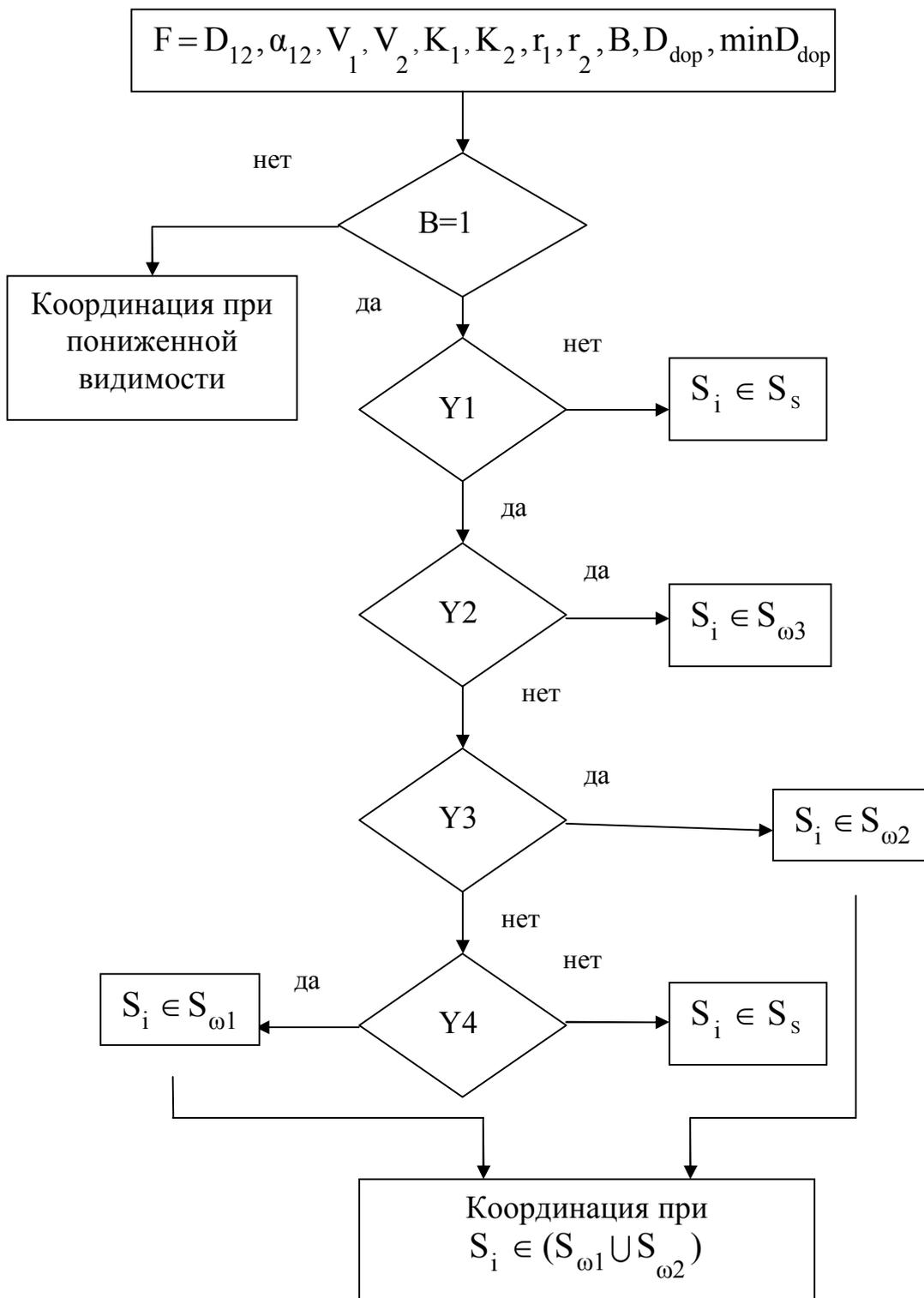


Рис. 5.1. Общий алгоритм идентификации текущей ситуации S_i

Алгоритм идентификации текущей ситуации, при условии, что она принадлежит области $S_{\omega 1}$ или $S_{\omega 2}$, причем известно какой именно, приведен

на рис. 5. 2.

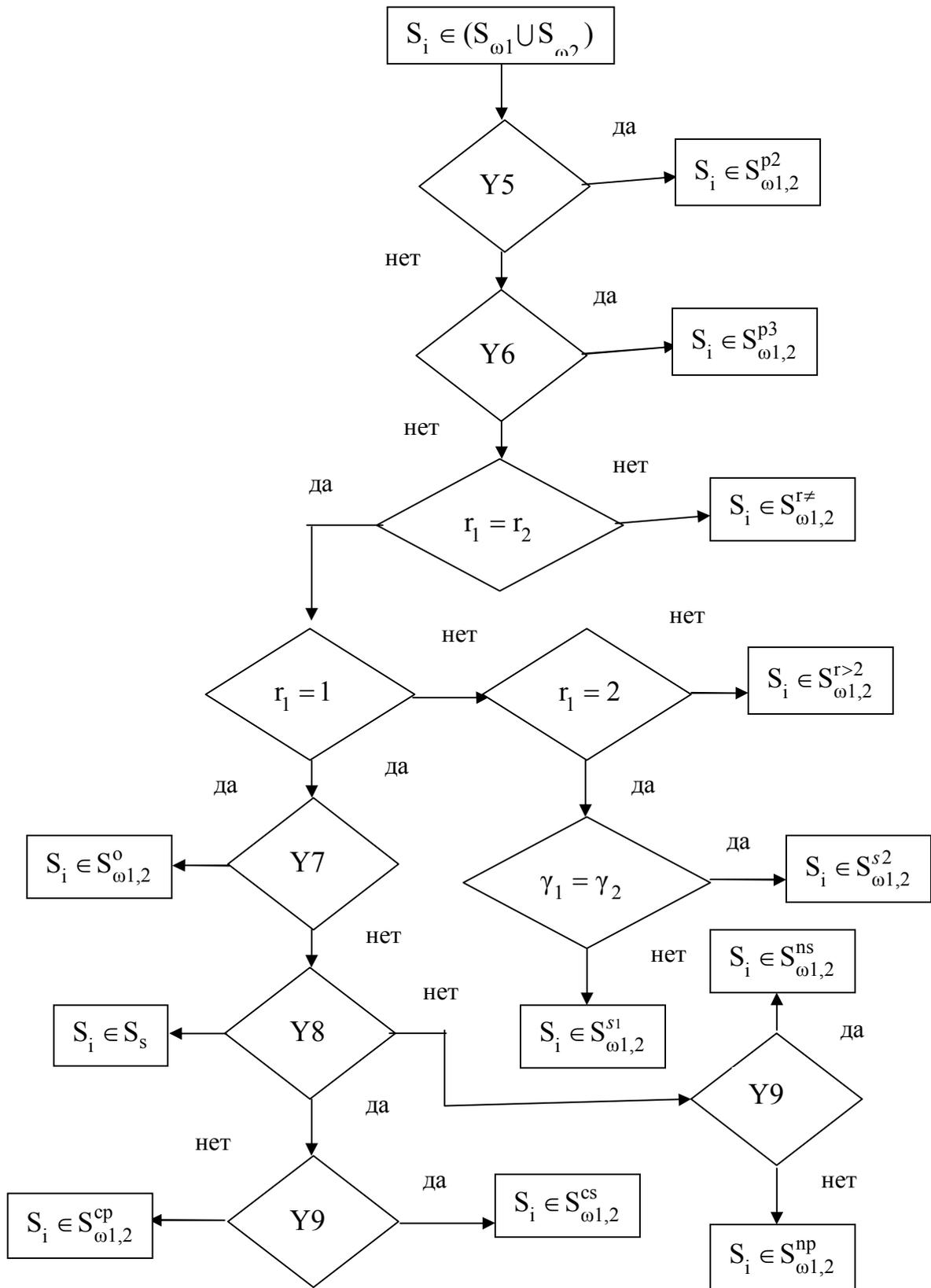


Рис. 5.2. Алгоритм определения ситуации S_i в областях S_{ω_1} и S_{ω_2}

В данном алгоритме приняты следующие обозначения условий:

$$Y5 = \{\sin(\alpha + 67,5 - K_2) > 0, \sin(K_2 + 67,5 - \alpha) > 0\},$$

$$Y6 = \{\sin(\alpha - 112,5 - K_1) > 0, \sin(K_1 + 247,5 - \alpha) > 0\},$$

$$Y7 = \{\cos(\alpha - K_1) \leq \cos 5, \cos(\alpha + 180 - K_2) \leq \cos 5\},$$

$$Y8 = \{\sin(\alpha - K_1)\sin(\alpha + 180 - K_2) < 0\},$$

$$Y9 = \{\sin(\alpha - K_1) > 0\}.$$

Принадлежность к подмножествам соответственных ситуаций в первой и во второй области взаимных обязанностей обозначается следующим образом $S_{\omega 1,2}^f$, причем нижние индексы 1 и 2 свидетельствует о том, что условия одинаковые для обеих областей $S_{\omega 1}$ и $S_{\omega 2}$.

Приоритеты оперирующего судна r_1 и опасной цели r_2 формально выражается цифрой от 1 до 6, причем самый низкий приоритет, который равен $r_i=1$, имеет судно с механическим двигателем, а далее приоритет присваивается в соответствии с Правилем 18 МППСС-72 («Взаимные обязанности судов») следующим образом:

$r_i=2$ – парусному судну;

$r_i=3$ – судну, занятому ловом рыбы;

$r_i=4$ – судну, стесненному своей осадкой;

$r_i=5$ – судну, ограниченному в возможности маневрировать;

$r_i=6$ – судну, лишенному возможности управляться.

Рассмотрим случай пониженной видимости, в этом случае параметр, характеризующий видимость $V=0$. Как раньше отмечали, в этом случае отсутствует понятие приоритета и судов, уступающего дорогу и следующего с постоянными курсом и скоростью. Также не существуют области взаимных обязанностей.

Таким образом, в данном случае отсутствует координация во взаимодействиях судна и цели, что значительно снижает эффективность МППСС-72 как нормативного документа по предупреждению столкновений судов.

На рис. 5.3 представлен алгоритм идентификации текущей ситуации в условиях пониженной видимости. На рисунке для условий приняты следующие обозначения:

$$Y10 = \{ \cos(\alpha - K_1) > 0, \sin(\alpha + 67,5 - K_2) < 0, \sin(K_2 + 67,5 - \alpha) < 0 \},$$

$$Y11 = \cos(\alpha - K_1) \leq 0,$$

$$Y12 = \sin(\alpha - K_1) > 0.$$

Отметим, что условие $Y10$ идентифицирует цель, которая находится впереди траверза ($\cos(\alpha - K_1) > 0$) и не является обгоняемой, в случае, когда справедливы неравенства $\sin(\alpha + 67,5 - K_2) < 0$ и $\sin(K_2 + 67,5 - \alpha) < 0$.

Условие $Y11$ характеризует цель, которая находится на траверзе или позади траверза, а условие $Y12$ – сторону, с которой находится цель относительно судна.

Для подмножества опасных ситуаций $S_{\omega_j}^f$, использованных в приведенных алгоритмах, применены обозначения, приведенные в главе 3.

Причем область $S_{\omega 01}$ является подмножеством ситуаций, в которых положение цели впереди траверза судна и судно не является обгоняющим. Область $S_{\omega 02}$ реализуется в случае, когда цель находится на траверзе или позади траверза, причем $S_{\omega 02}^S$ - подмножество ситуаций, когда цель справа и $S_{\omega 02}^P$ - когда положение цели слева. Подмножество ситуаций $S_{\omega 03}$ составляют ситуации, которые не относятся к одному из трех упомянутых подмножеств.

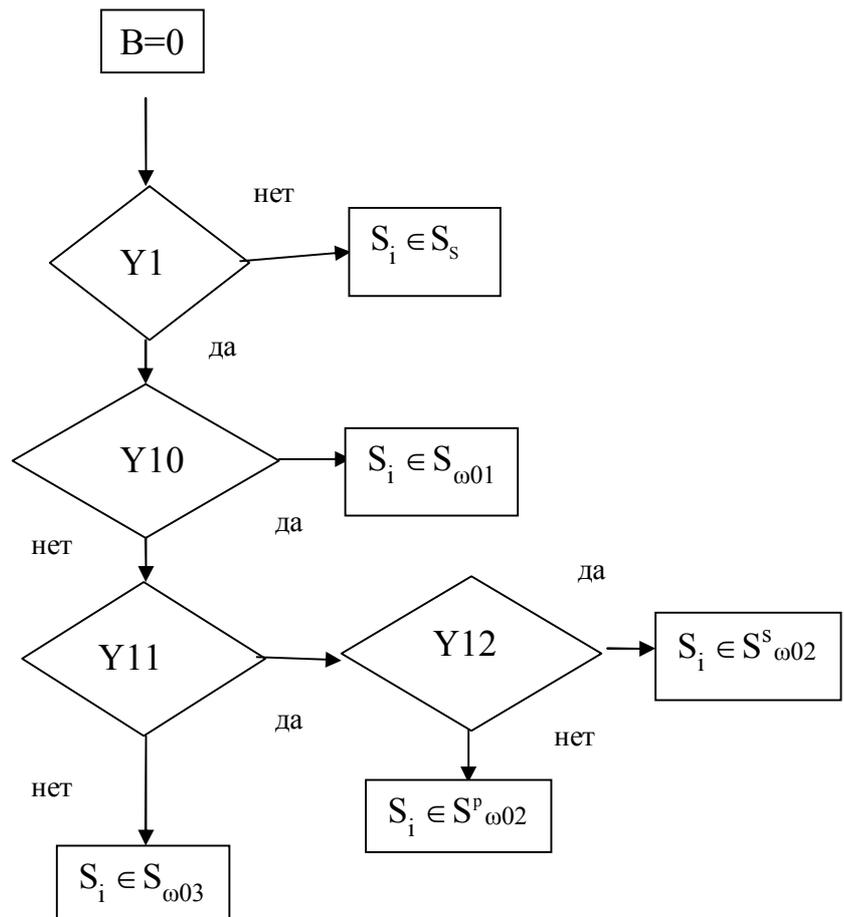


Рис. 5.3. Алгоритм определения ситуации S_i при пониженной видимости

5.2. Имитационное моделирование идентификации ситуаций опасного сближения и реализовавшегося бинарного взаимодействия

Для проверки разработанного аналитического метода, позволяющего идентифицировать любую начальную относительную ситуацию, которая может возникнуть между судном и целью, и при опасном сближении определить регламентированное МППСС-72 взаимодействие, была разработана компьютерная имитационная модель.

Разработка модели была произведена на компьютерном языке высокого уровня Delphi.

На рис. 5.4 показан интерфейс начала работы программы имитационного моделирования. С помощью кнопки «CRL» выбирается режим проверки изменения дистанции кратчайшего сближения в зависимости от относительной позиции и параметров движения судна и цели. Кнопкой «B» выбирается режим идентификации начальной ситуации и вводится состояние видимости.

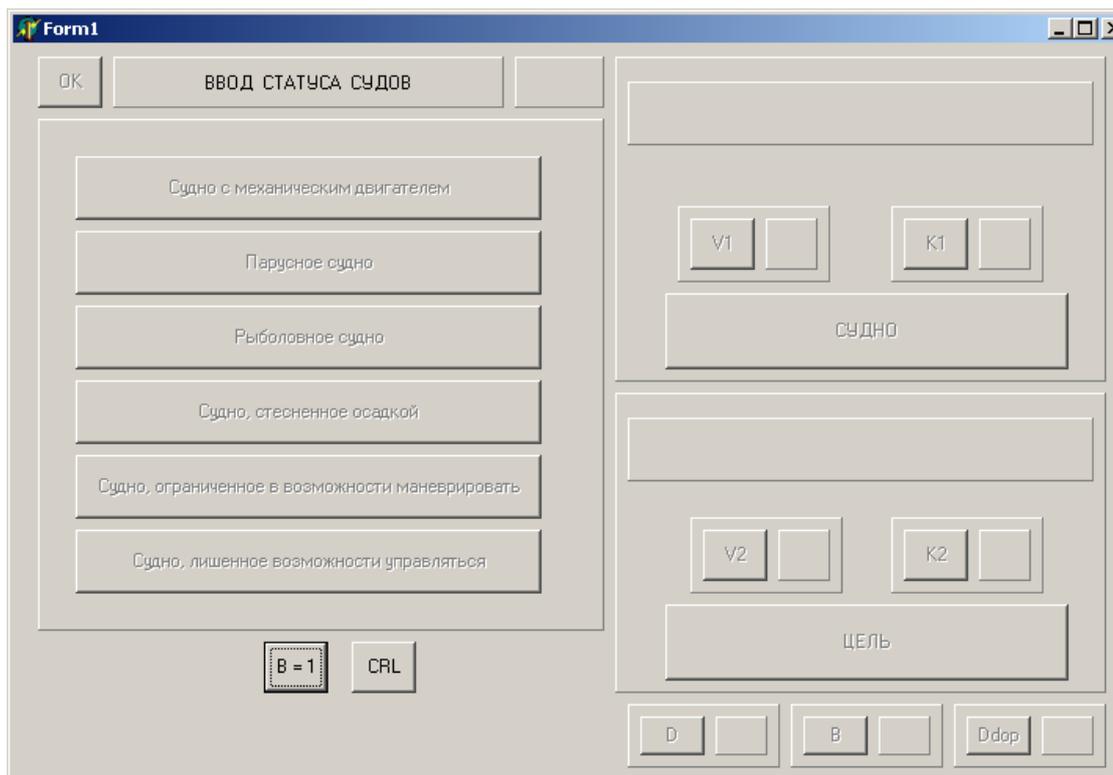


Рис. 5.4. Интерфейс начала работы программы

При выборе режима идентификации активизируются клавиши выбора статуса судов, расположенные в левой части монитора, как показано на рис. 5.5. Используя кнопки «Судно» и «Цель» совместно с клавишами статусов, выбираются статусы судна и цели. В приведенном примере выбран статус «судно с механическим двигателем» для судна и статус «судно, стесненное осадкой» для цели. После выбора статусов судна и цели производится ввод начальной ситуации, как показано на рис. 5.6.

Рис. 5.5. Выбор статусов судна и цели

Рис. 5.6. Ввод начальной ситуации

При вводе начальной ситуации активизируются все клавиши ее ввода,

так на рис. 5.7 показан ввод начальной дистанции с помощью линейки прокрутки, а на рис. 5.8 – ввод начального пеленга.

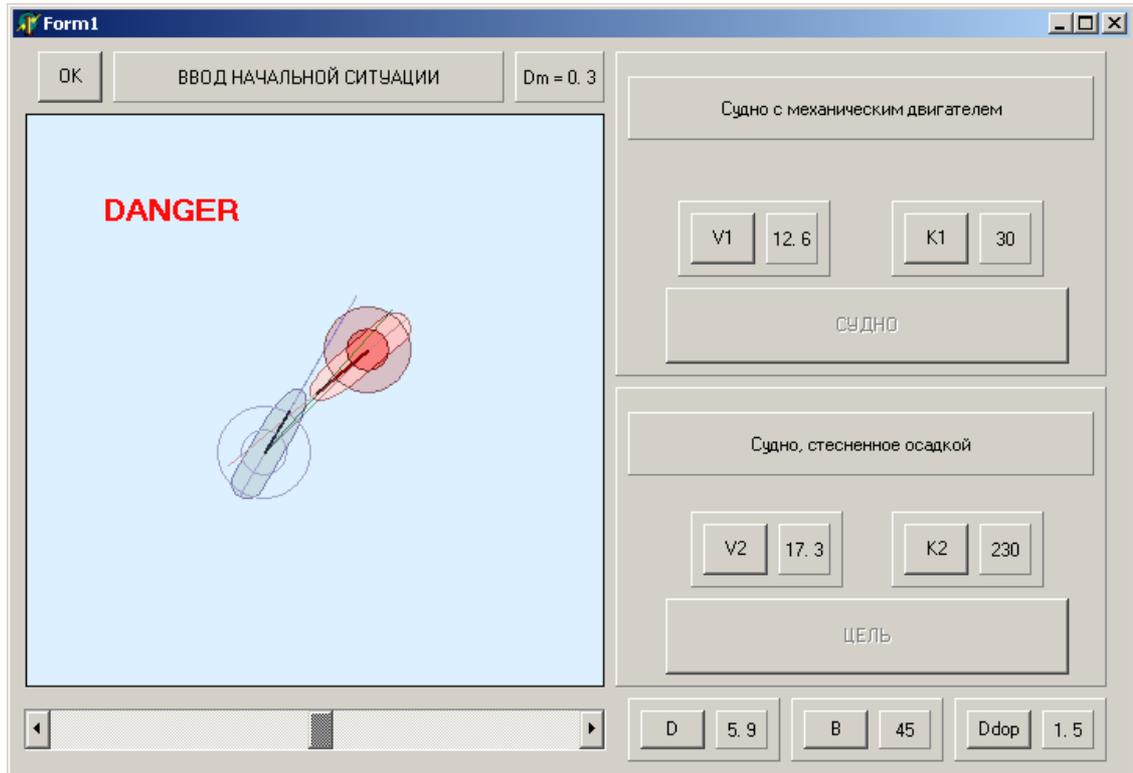


Рис. 5.7. Ввод начальной дистанции

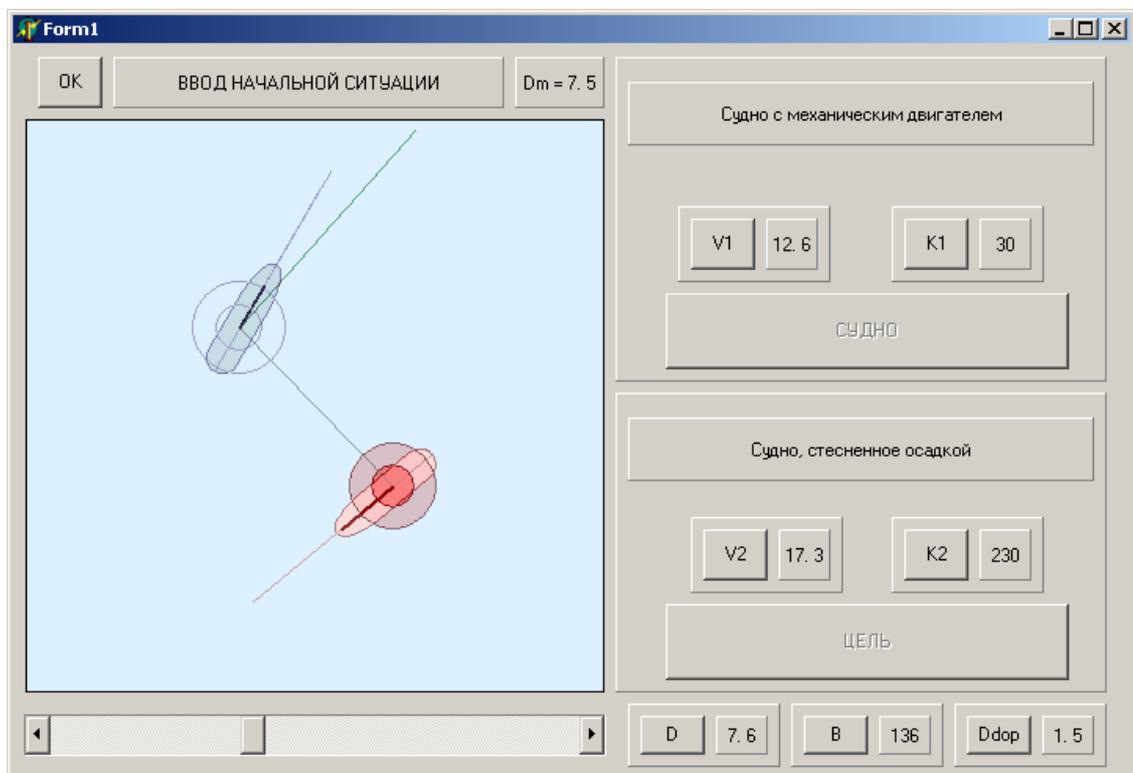


Рис. 5.8. Ввод начального пеленга

Для ввода параметров начальной ситуации необходимо вначале выбрать клавишу требуемого параметра, а затем с помощью линейки прокрутки (Scroll Bar) выбирается необходимое значение вводимого параметра.

При изменении вводимого параметра его значение выводится на соответствующей панели, расположенной рядом с клавишей ввода соответствующего параметра. При этом изменение параметра отображается на графической панели, показывающей текущее состояние вводимой ситуации.

На рис. 5.9 показан ввод предельно-допустимой дистанции, причем она увеличена в приводимом примере вдвое до 3-х миль.

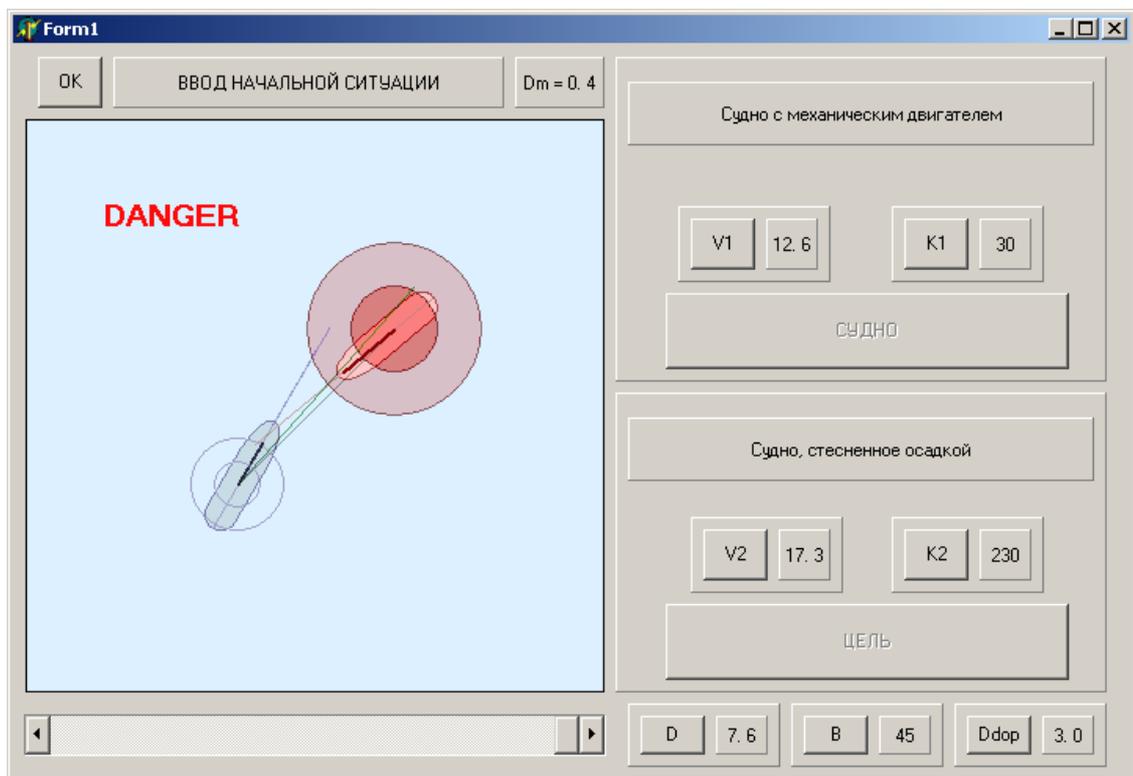


Рис. 5.9. Ввод предельно-допустимой дистанции

Ввод параметров движения судна и цели показан на рис. 5.10, причем для текущей ситуации рассчитывается дистанция кратчайшего сближения D_{\min} , и ее значение выводится на панели в верхней части монитора.

Рис. 5.10. Ввод параметров движения судна и цели

После выбора всех параметров начальной ситуации их вводимые значения подтверждаются нажатием кнопки «ОК». При этом производится идентификация введенной ситуации и в правой верхней части монитора выводится информация о Правиле МППСС-72, которому соответствует введенная ситуация.

Для рассматриваемого примера, как показано на рис. 5.11, указывается Правило 18 и указаны статусы судов, согласно Правилу. При этом вводится условное обозначение реализовавшейся ситуации.

Также определяются значения координирующих сигналов и сигналов связи судна и цели, которые выводятся на соответствующих информационных панелях, имеющих отношение к судну и к цели.

Для рассматриваемого примера судну предписываются координирующие сигналы $q_{11} = 1$, $q_{12} = 1$, $q_{13} = 1$, и координирующие сигналы связи $q_{21} = -1$, $q_{22} = -1$, $q_{23} = -1$.

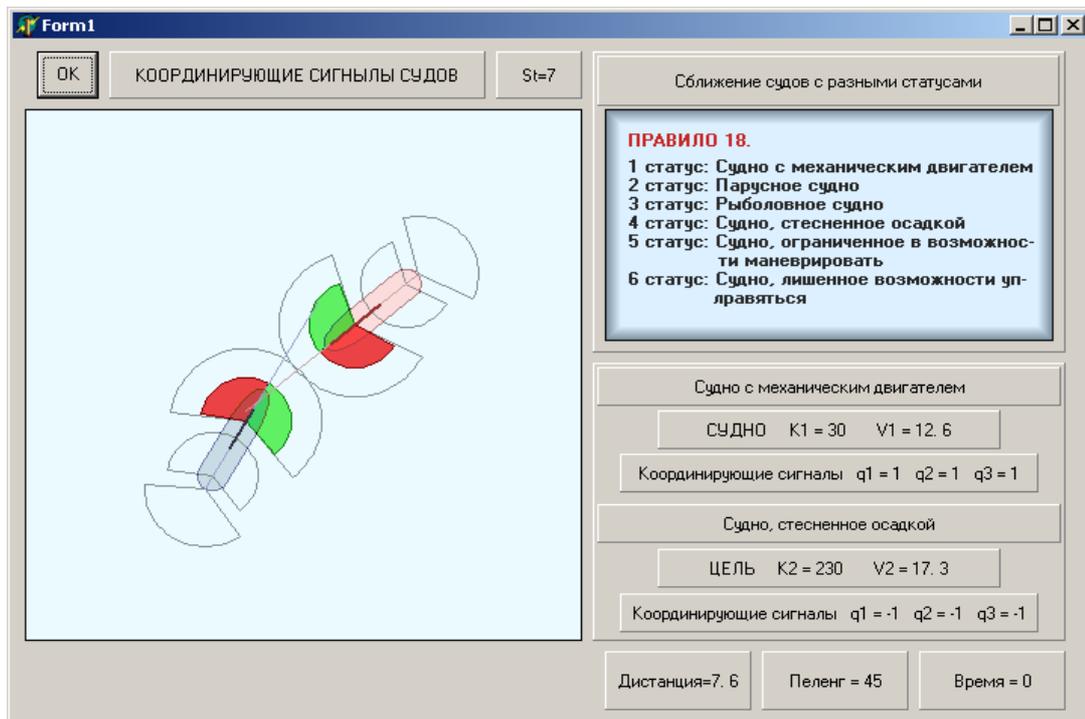


Рис. 5.10. Вывод координирующих сигналов и сигналов связи

После очередного использования клавиши «ОК» появляется кнопка «TIMER» (рис. 5. 11), позволяющая показать процесс движения судна и цели.

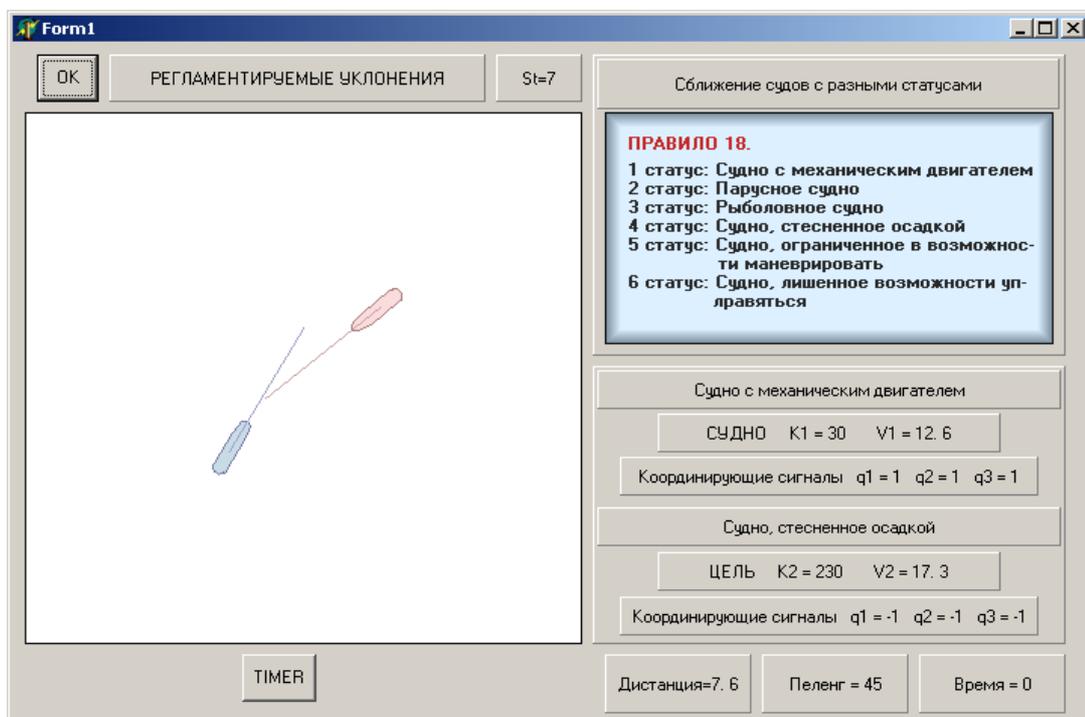


Рис. 5.11. Имитация регламентирующего движения судна и цели

Если координирующие сигналы судна $q_{11} = 1$, $q_{12} = 1$, $q_{13} = 1$, а цели $q_{21} = -1$, $q_{22} = -1$, $q_{23} = -1$, т. е. цель должна сохранять свои параметры движения, то судно может иметь два возможных движения: уклонение вправо и уклонение влево, которое имитируется при активизации таймера, как показано на рис. 5.12.

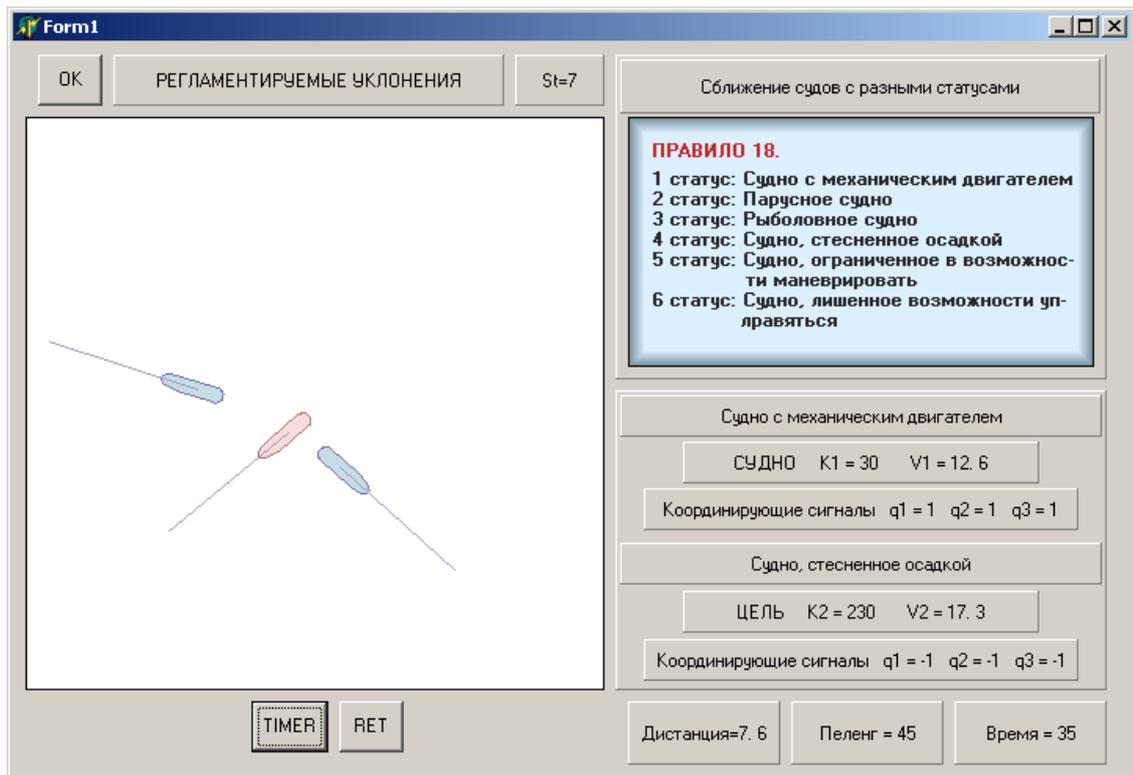


Рис. 5.12. Случай двух возможных движений судна

Если координирующий сигнал судна позволяет только одно уклонение, например, $q_{11} = 1$, $q_{12} = 1$, $q_{13} = -1$, а координирующий сигнал цели $q_{21} = 0$, $q_{22} = 0$, $q_{23} = 0$, т. е. она может сохранять параметры движения или уклоняться в любую сторону, - другими словами иметь три возможных движения, то возможные траектории имитируется программой, как показано на рис. 5.13. В случае координационных сигналов судна и цели $q_{11} = 0$, $q_{12} = 0$, $q_{13} = 0$ и $q_{21} = 0$, $q_{22} = 0$, $q_{23} = 0$, а их возможные перемещения показаны на рис. 5.14.

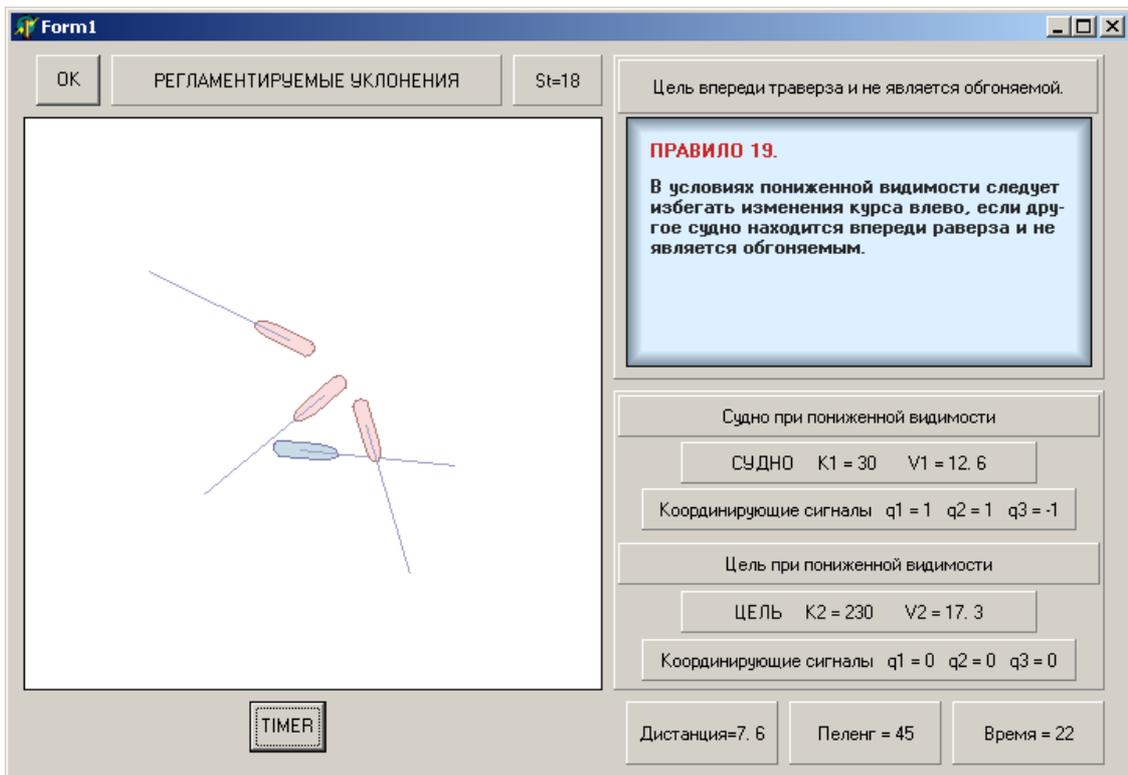


Рис. 5.13. Случай трех возможных движений цели

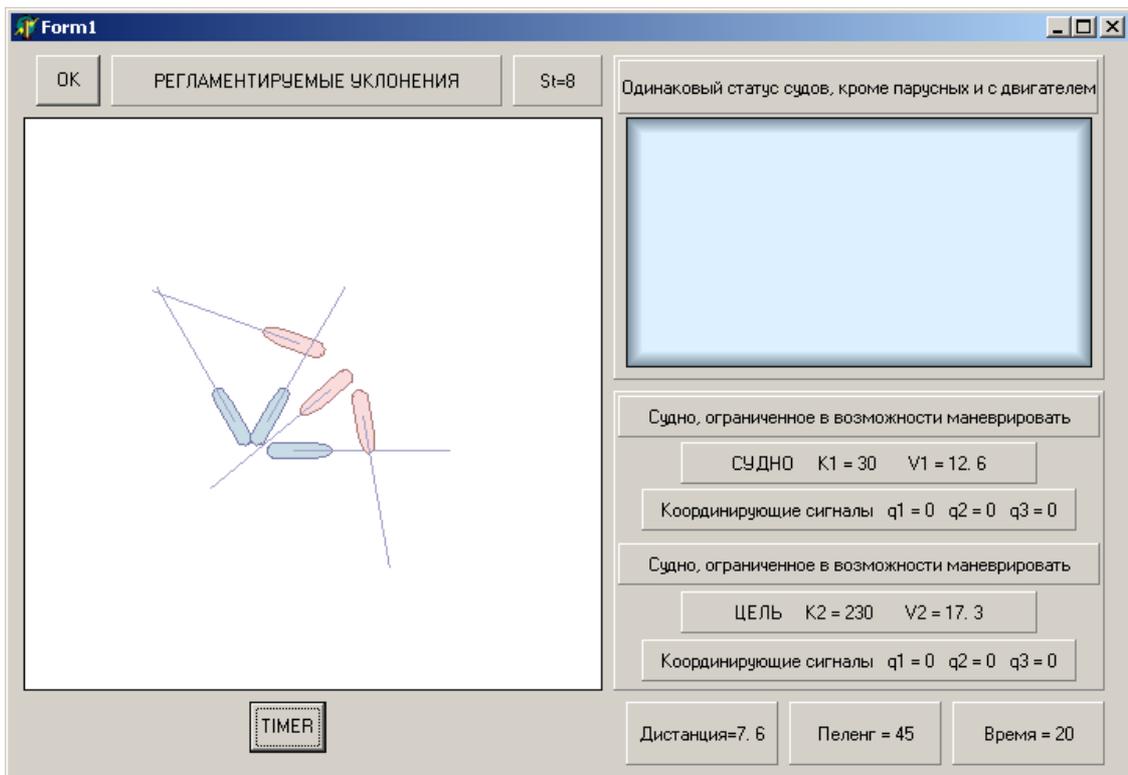


Рис. 5.14. Случай трех возможных движений судна и цели

При взаимодействии парусных судов предусмотрена возможность выбора галсов судна и цели, как показано на рис. 5.15, а в случае одинаковых галсов – выбор наветренной или подветренной стороны (рис. 5.16).

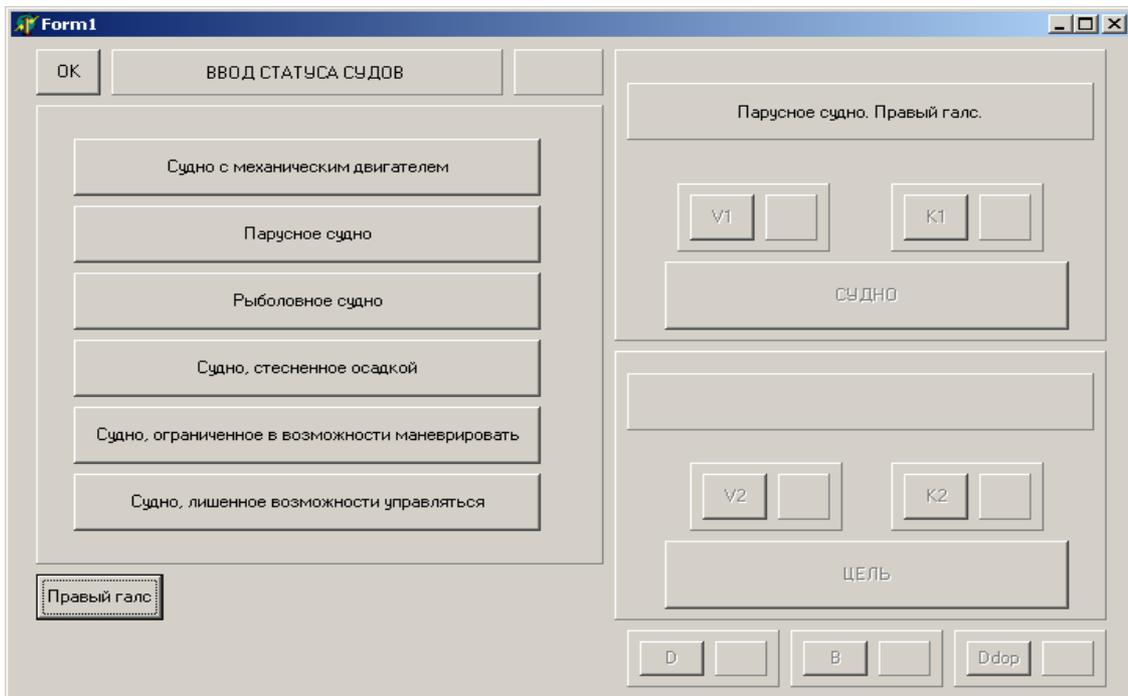


Рис. 5.15. Выбор галса парусных судов

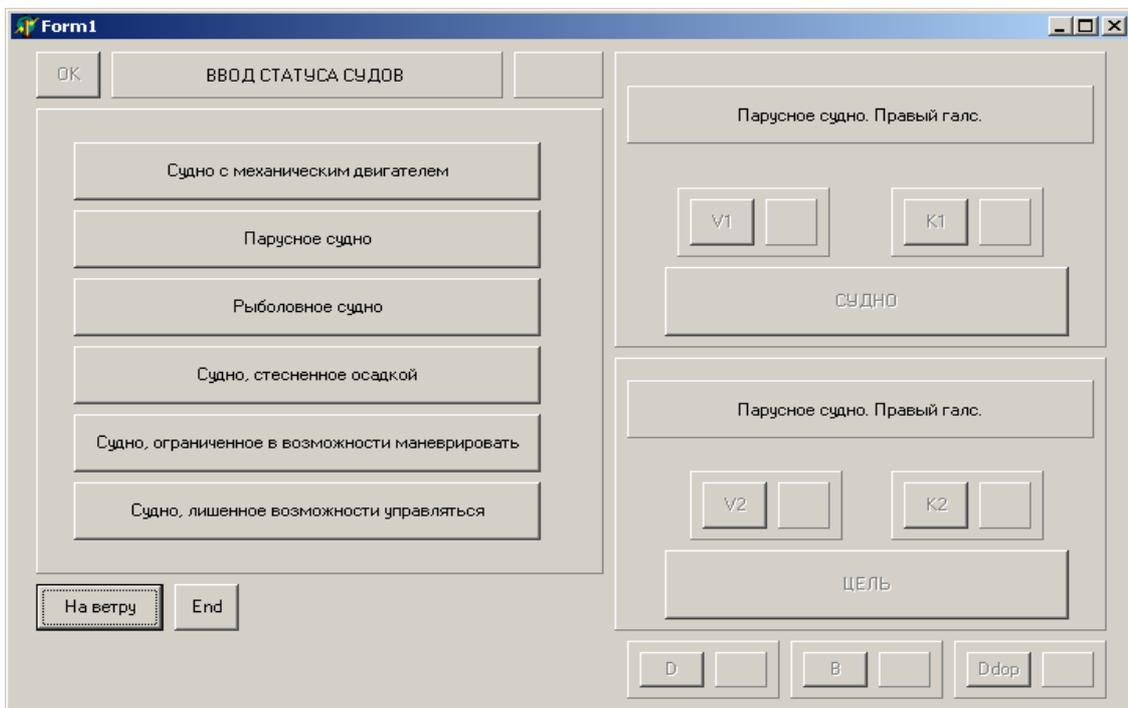


Рис. 5.16. Выбор галса парусных судов

При выборе режима проверки изменения дистанции кратчайшего сближения в зависимости от относительной позиции и параметров движения судна и цели предусмотрено два варианта: курс изменяет только судно при фиксированном курсе цели и одновременное изменение курса судна и цели.

Рассмотрим первый вариант, когда поворот выполняет только судно. При имитационном моделировании предусмотрена возможность ввода параметров движения судна и цели при неизменной относительной позиции, характеризующейся дистанцией 10 миль и пеленгом 45° (рис. 5. 17).

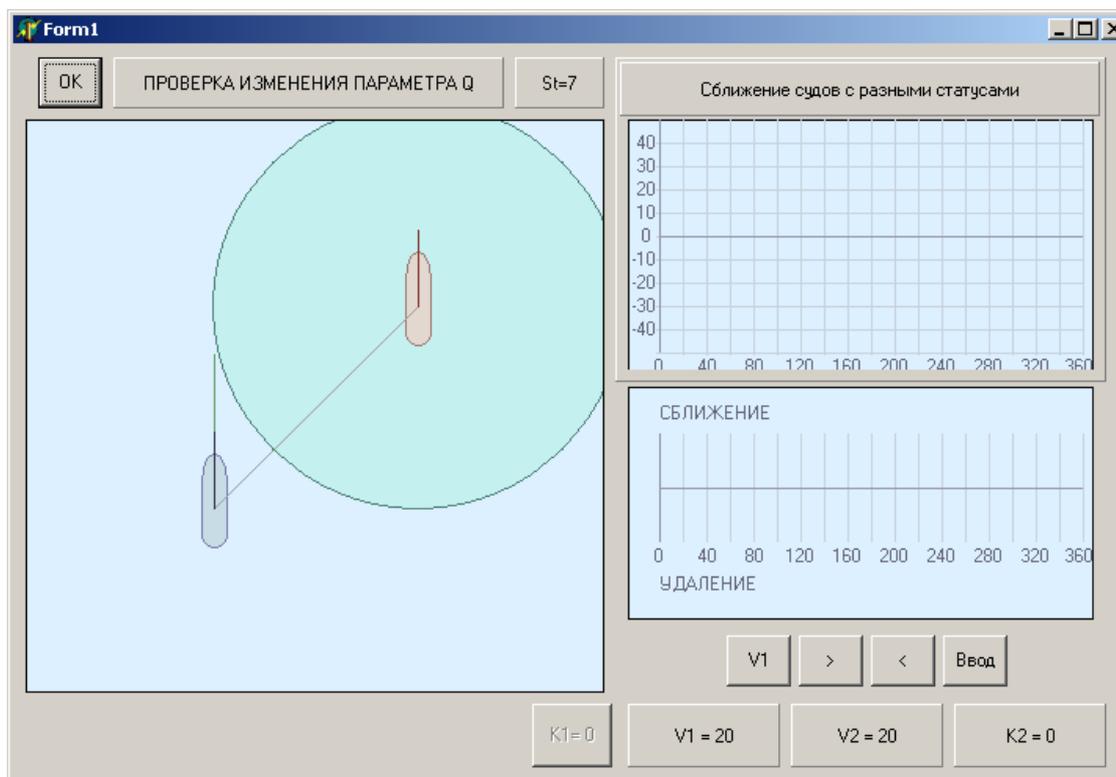


Рис. 5.17. Интерфейс режима проверки изменения D_{\min}

После ввода необходимой информации рассчитываются и выводятся значения дистанции кратчайшего сближения D_{\min} , скорости изменения дистанции $D_k = \dot{D}$ и изменения дистанции кратчайшего сближения

$$Dk2 = \frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}.$$

На верхнем графике рис. 5.18 выводится графическая зависимость \dot{D} от K_1 , а на нижнем графике показана зависимость $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$ от K_1 и фиксируется сближение или удаление судна и цели.

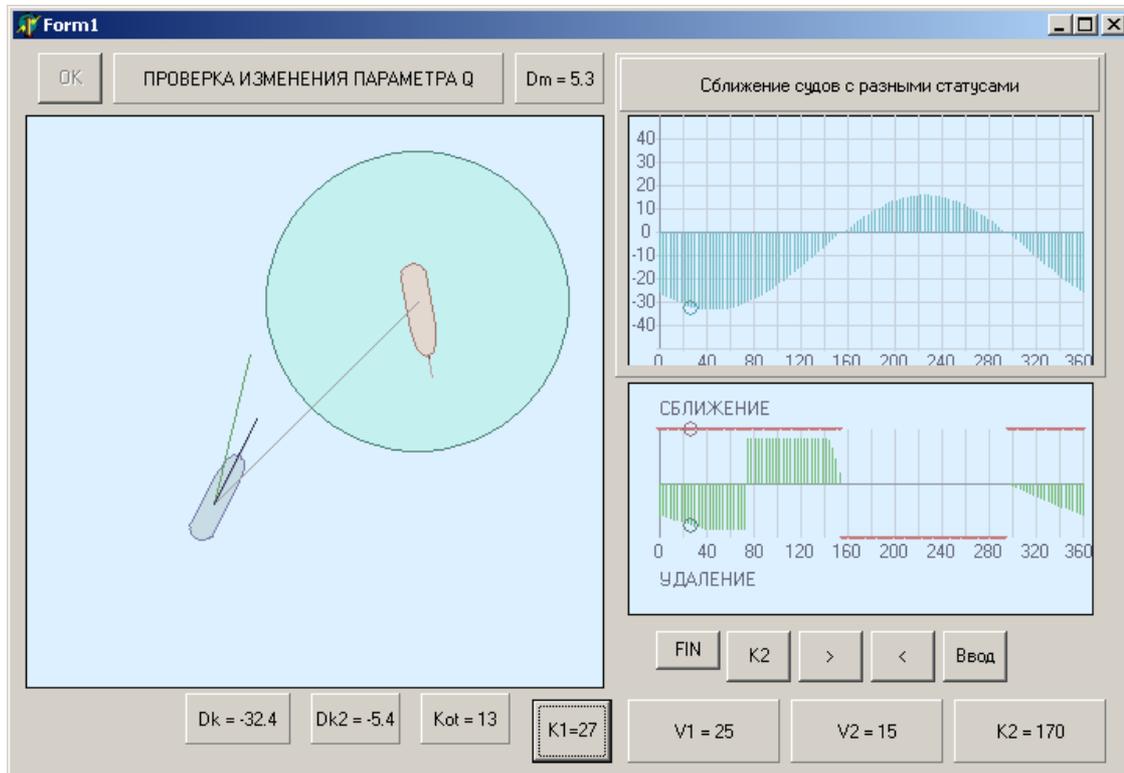


Рис. 5.18. Вариант поворота только судна

При одновременном повороте судна и цели в одну сторону вычисляется величина изменения дистанции кратчайшего сближения $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1 \partial K_2}$ и ее зависимость от курса судна K_1 выводится на нижнем графике, как показано на рис. 5.19. В случае поворота судна и цели в разные стороны производная $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1 \partial K_2}$ имеет другой характер, что видно из нижнего графика, приведенного на рис. 5.20.

5.3. Применение имитационного моделирования для исследования зависимости изменения дистанции кратчайшего сближения от изменения курса судна

Для анализа полученной зависимости изменения дистанции кратчайшего сближения D_{\min} от изменения курса судна K_1 :

$$\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} = \frac{DV_1}{V_o^3} [(V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2) \cos \alpha - (V_1 \cos K_1 - V_2 \cos K_2) \sin \alpha] \times \\ \times [V_1 - V_2 \cos(K_1 - K_2)]$$

производилось имитационное моделирование, в котором исследовалась связь знака и величины производной $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$ от ее аргументов и скорости изменения расстояния \dot{D} (сближения или удаления судов).

С этой целью была написана компьютерная программа на языке высокого уровня Delphi, интерфейс которой приведен на рис. 5.21. В программу вводятся значения дистанции D между судном и целью, пеленг с судна на цель α , параметры движения судна K_1 , V_1 и цели K_2 , V_2 .

Программа рассчитывает и выводит значения дистанции кратчайшего сближения D_{\min} , скорости изменения дистанции $Dk = \dot{D}$ и изменения дис-

танции кратчайшего сближения $Dk2 = \frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$.

Также на верхнем графике рис. 5.21 выводится графическая зависимость \dot{D} от K_1 , а на нижнем графике показана зависимость $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$ от K_1 и фиксируется сближение или удаление судна и цели.

При имитационном моделировании рассматривались три ситуации. Первая ситуация характеризуется равенством скоростей судна и цели, т.е.

$V_1 = V_2$, во второй ситуации скорость судна превосходит скорость цели $V_1 > V_2$, а в третьей ситуации скорость судна меньше скорости цели $V_1 < V_2$.

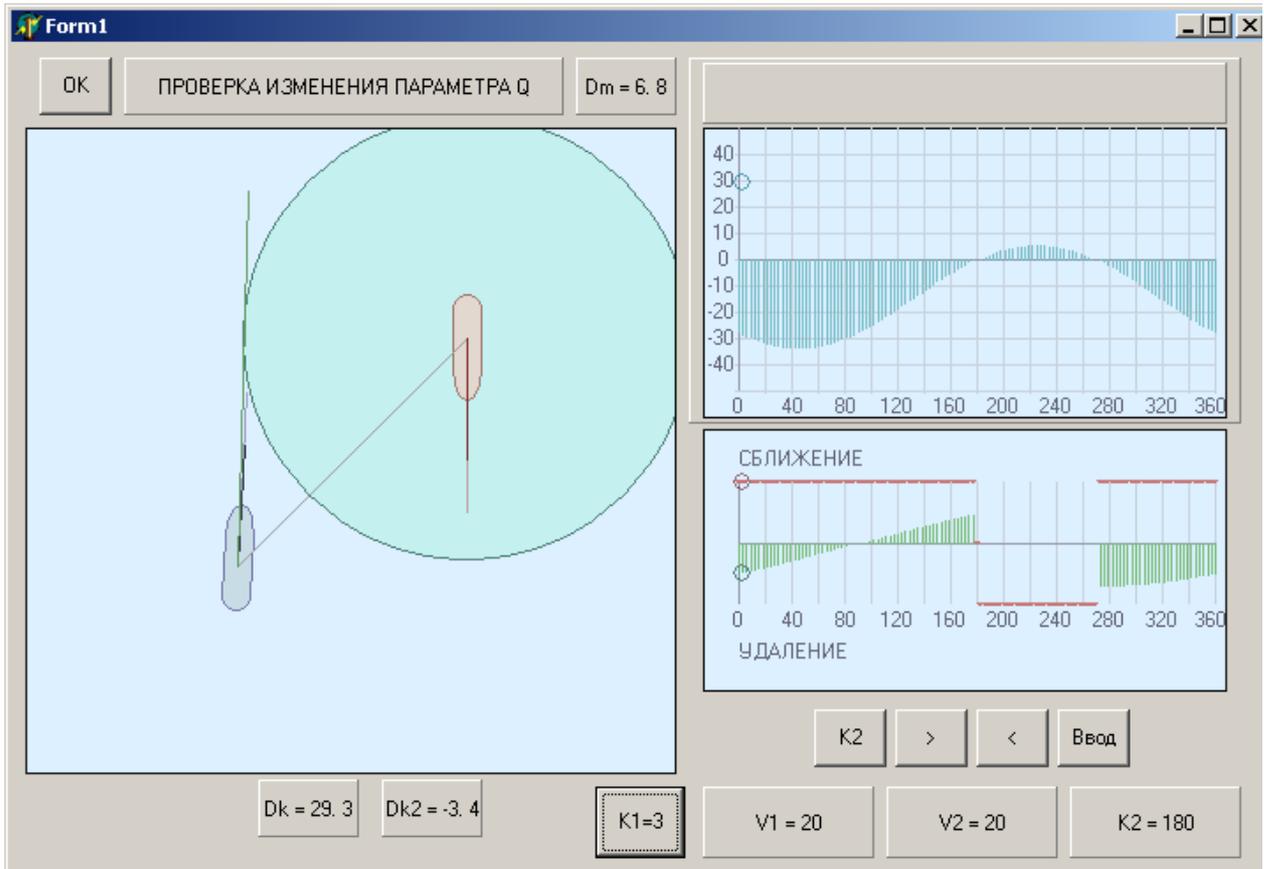


Рис. 5.21. Интерфейс имитационного моделирования зависимости $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$

В Приложении А приведено описание имитационного моделирования для упомянутых трех ситуаций, основные результаты которого представим в табличном виде.

В табл. 5.1 для различных курсов цели K_2 приведены подмножества курсов судна K_1 , на которых происходит увеличение или уменьшение дистанции кратчайшего сближения $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$, полученные в результате имитационного моделирования первой ситуации.

Анализ приведенной таблицы показывает, что при $K_2 < 180$ характер изменения D_{\min} стабильный, причем при $K_2 = 0$ D_{\min} только возрастает, а в

случая $K_2 = 60$ и $K_2 = 120$ - только убывает. Если $K_2 > 180$, то $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$ может принимать разные знаки.

Таблица 5.1

Зависимость изменения D_{\min} от K_1 для различных K_2 при $V_1 = V_2$

K_2	Увеличение D_{\min} ($\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} > 0$)	Уменьшение D_{\min} ($\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} < 0$)
0	$K_1 \in (0..90)$	-
60	-	$K_1 \in (30..60)$
120	-	$K_1 \in (330..120)$
180	$K_1 \in (90..180)$	$K_1 \in (270..90)$
270	$K_1 \in (0..180)$	$K_1 \in (270..360)$

Основные результаты имитационного моделирования второй ситуации представлены в табл. 5.2 ($V_1=25$ уз., $V_2=15$ уз.).

Таблица 5.2

Зависимость изменения D_{\min} от K_1 для различных K_2 при $V_1 > V_2$

K_2	Увеличение D_{\min} ($\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} > 0$)	Уменьшение D_{\min} ($\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} < 0$)
0	$K_1 \in (20..110)$	$K_1 \in (340..20)$
90	$K_1 \in (70..110)$	$K_1 \in (340..70)$
180	$K_1 \in (70..160)$	$K_1 \in (290..70)$
270	$K_1 \in (20..160)$	$K_1 \in (290..20)$

В этой ситуации производная $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$ имеет участок положительных значений и участок отрицательных значений.

Рассмотрим третью ситуацию, когда скорость судна меньше скорости цели $V_1 < V_2$, причем принимаем $V_1 = 15$ узлов и $V_2 = 25$ узлов. В этом случае для курсов цели K_2 меньше 130° судно и цель не сближаются, поэтому имитационное моделирование рассмотрено для курсов цели начиная с 130° . Результаты имитационного моделирования представлены в табл. 5.3.

Таблица 5.3

Зависимость изменения D_{\min} от K_1 для различных K_2 при $V_1 < V_2$

K_2	Увеличение D_{\min} ($\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} > 0$)	Уменьшение D_{\min} ($\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} < 0$)
130	$K_1 \in (77..127)$	$K_1 \in (323..77)$
180	$K_1 \in (127..233)$	$K_1 \in (233..127)$
210	$K_1 \in (70..157)$ $K_1 \in (200..263)$	$K_1 \in (157..200)$ $K_1 \in (263..70)$
240	$K_1 \in (20..187)$ $K_1 \in (250..293)$	$K_1 \in (187..250)$ $K_1 \in (293..20)$
270	$K_1 \in (323..217)$	$K_1 \in (217..323)$
310	$K_1 \in (3..143)$	$K_1 \in (307..3)$

Анализ полученной таблицы показывает, что для курсов цели K_2 меньше 180° производная $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$ имеет по одному участку положительного и отрицательного значения, а в случае величины K_2 больше 180° дистанция D_{\min} имеет по два участка роста и убывания, которые чередуются друг за другом.

5.4. Имитационное моделирование зависимости дистанции кратчайшего сближения от одновременного изменения курса судна и курса цели

С помощью программы имитационного моделирования рассматривались три ситуации сближения судов с разным соотношением скоростей судна и цели ($V_1 = V_2$, $V_1 > V_2$ и $V_1 < V_2$), причем анализировались два случая: когда курсы судна и цели изменяются в одну сторону и когда производится изменение их курсов в разные стороны.

Производился расчет значения производной $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1 \partial K_2}$, которая имеет

следующий аналитический вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1 \partial K_2} = G_s \left\{ \left[\mp \frac{DV_1}{V_o^3} V_1 V_2 \sin(K_1 - K_2) \right] \frac{[V_1 - V_2 \cos(K_1 - K_2)]}{V_o^2} + \right. \\ \left. + \frac{DV_1}{V_o} \times \frac{\mp V_2 \sin(K_1 - K_2) \{V_o^2 - 2V_1[V_1 - V_2 \cos(K_1 - K_2)]\}}{V_o^4} \right\} [V_2 \cos(K_2 - \alpha) - V_1 \cos(K_1 - \alpha)] + \\ + \frac{DV_1}{V_o} \frac{[V_1 - V_2 \cos(K_1 - K_2)]}{V_o^2} [-V_2 \sin(K_2 - \alpha)] \}. \end{aligned}$$

При этом для заданных значений начальной разности курсов курса судна и цели ΔK приводится графическая зависимость (нижний график рис. 5.22) и регистрируются значения величин: K_n , K_k - значения курсов судна начала и конца подмножества курсов сближения; K_{sn} - значение курса судна, при котором достигается начальное ненулевое производной $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1 \partial K_2}$; K_m - значение курса судна, соответствующее изменению знака $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1 \partial K_2}$ при максимальном значении.

В дальнейшем для характеристики поворота судна и цели в одну сторону будем использовать обозначение «++», а в разные стороны обозначение «+-».

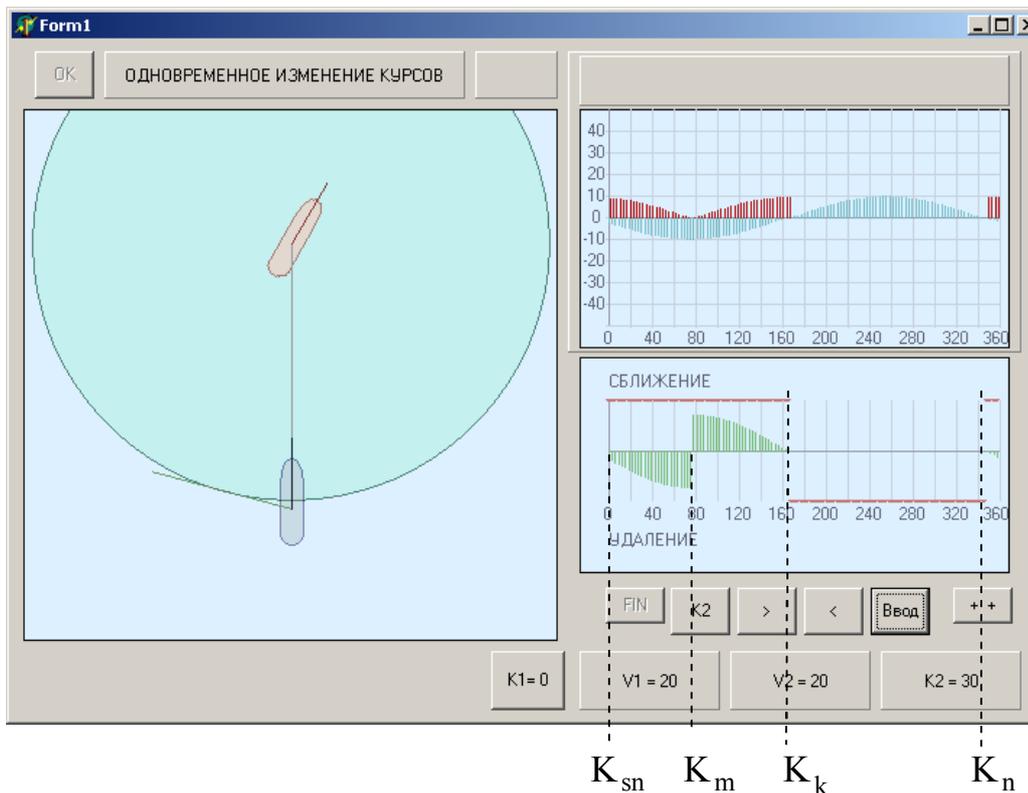


Рис. 5.22. Зависимость производной $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1 \partial K_2}$ в случае «++»

Рассмотрим первую ситуацию, когда $V_1 > V_2$. На рис. 5.23 представлен интерфейс модуля имитационного моделирования.

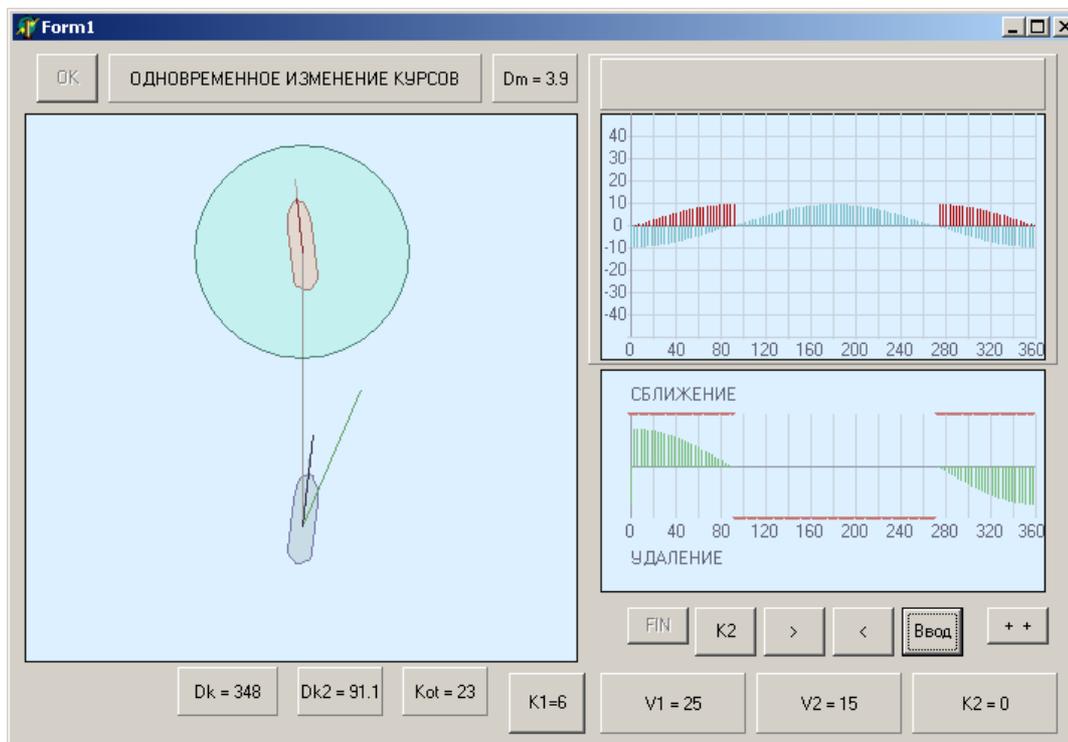


Рис. 5.23. Интерфейс модуля для первой ситуации в случае «++» и $\Delta K = 0$

На рис. 5.24 показана та же ситуация для случая «+-».

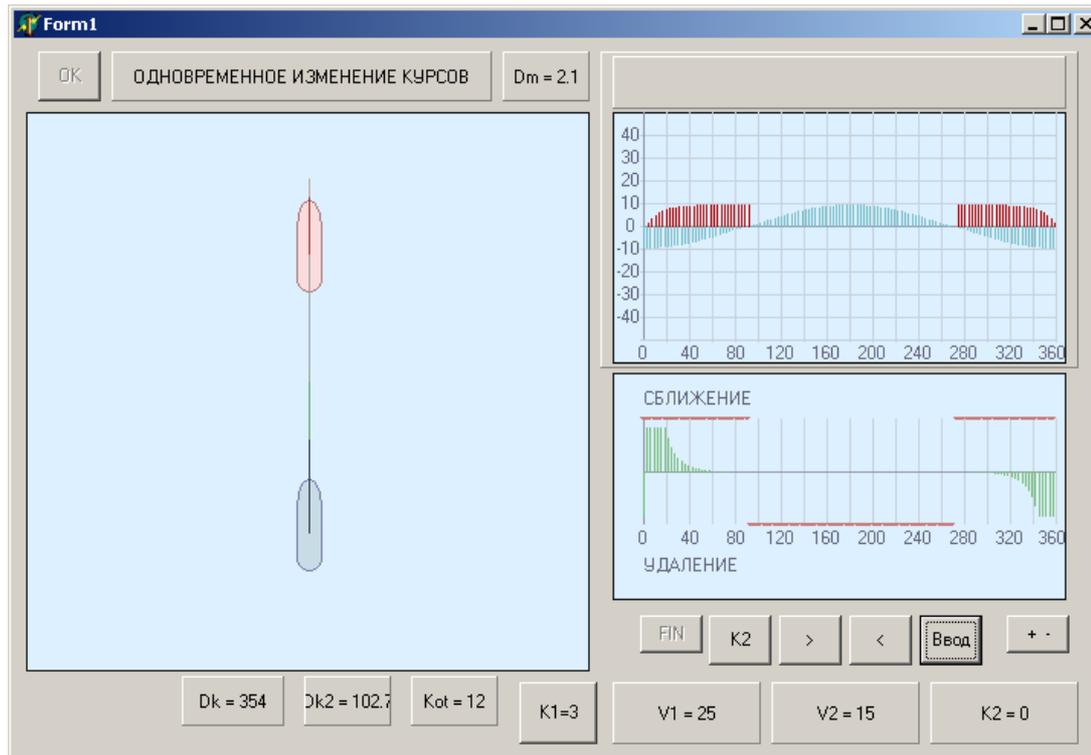


Рис. 5.24. Интерфейс модуля для первой ситуации в случае «+» и $\Delta K = 0$

В табл. 5.4 приведены значения величин K_n , K_k и K_m , а также участки роста и падения D_{\min} в первой ситуации (превосходство скорости судна над скоростью цели). Причем выбраны следующие значения скорости: судна $V_1 = 25$ узлов, $V_2 = 15$ узлов.

Таблица 5.4

Результаты имитационного моделирования для $V_1 > V_2$

Один знак изменения K_1 и K_2						Разные знаки изменения K_1 и K_2				
ΔK	K_n	K_k	K_m	рост	пад.	K_n	K_k	K_m	рост	пад.
0	270	90	0	0..90	270..0	270	90	0	0..93	270..0
10	285	105	15	15..105	285..15	255	75	5	5..75	255..5
30	300	120	35	35..120	300..35	240	60	15	15..60	240..15
60	310	130	40	40..130	310..40	235	55	25	25..55	235..25
90	300	120	30	30..120	300..30	240	60	30	30..60	240..30

120	290	110	20	20..110	290..20	250	70	35	35..70	250..35
150	280	100	15	15..100	280..15	260	80	35	35..80	260..35
180	270	90	0	0..90	270..0	270	90	0	0..90	270..0
210	260	80	350	350..80	260..350	280	100	330	330..100	280..330
240	250	70	340	340..70	250..340	290	110	325	325..110	290..325
270	240	60	330	330..60	240..330	300	120	330	330..120	300..330
300	230	50	325	325..50	230..325	305	125	340	340..125	305..340
330	240	60	330	330..60	240..330	305	120	350	350..120	305..350

Как показывает анализ табл. 5.4, производная $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1 \partial K_2}$ для обоих случаев «++» и «+-» принимает нулевое значение, т. е. $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1 \partial K_2} = 0$, в трех точках: K_n , K_k и K_m , причем при значении K_m производная скачкообразно изменяет знак с отрицательного на положительный.

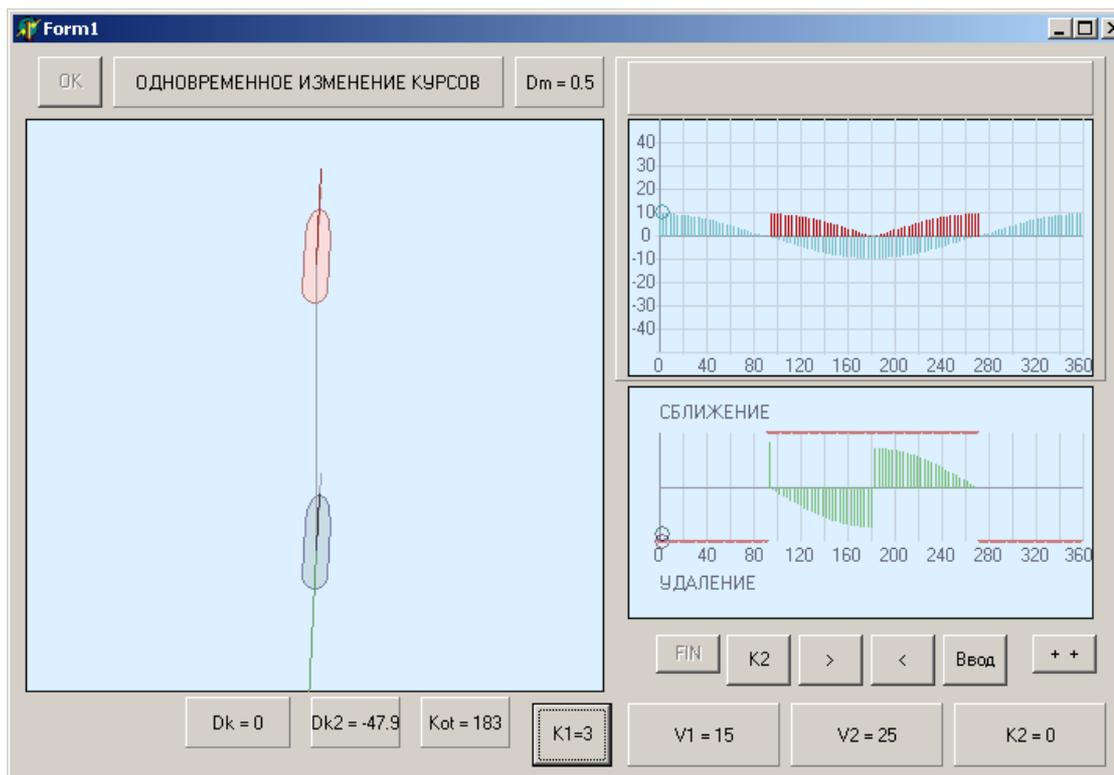


Рис. 5.25. Интерфейс модуля для второй ситуации в случае «+ +»

На рис. 5.26 показан интерфейс модуля программы для второй ситуации в случае «+ -».

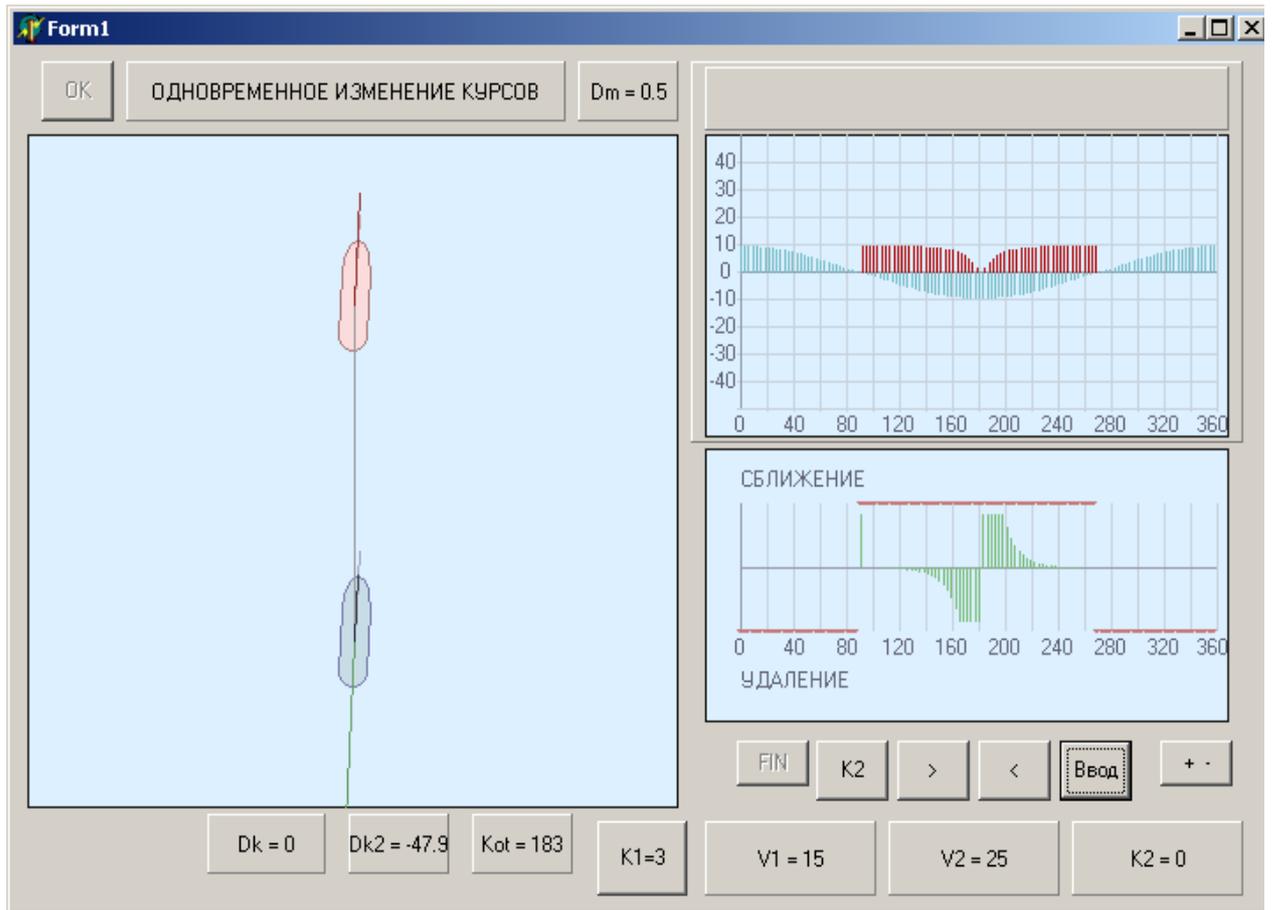


Рис. 5.26. Интерфейс модуля для второй ситуации в случае «+ -»

В табл. 5.5 приведены значения величин K_n , K_k , K_{sn} , K_m и участки положительного и отрицательного значений производной $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1 \partial K_2}$ для второй ситуации ($V_1 < V_2$).

Таблица 5.5

Результаты имитационного моделирования для $V_1 < V_2$

Один знак изменения K_1 и K_2						Разные знаки изменения K_1 и K_2				
ΔK	K_n	K_k	K_m	рост	пад.	K_n	K_k	K_m	рост	пад.
0	90	270	180	180..270	90..180	90	270	180	180..270	90..180
30	30	210	120	120..210	30..120	150	330	200	200..330	150..200
60	350	170	85	85..170	350..85	195	5	220	220..5	195..220
90	330	150	60	60..150	330..60	210	30	240	240..30	210..240

120	310	130	40	40..130	310..40	230	50	270	270..50	230..270
150	290	110	20	20..110	290..20	255	70	230	230..70	255..230
180	270	90	0	0..90	270..0	270	90	0	0..90	270..0
210	250	70	345	345..70	250..345	290	110	65	65..110	290..65
240	230	50	320	320..50	230..320	310	130	95	95..130	310..95
270	210	30	300	300..30	210..300	330	150	120	120..150	330..120
300	190	5	280	280..5	190..280	355	170	140	140..170	355..140
330	155	335	245	245..335	155..245	30	210	165	165..210	30..165

Анализ табл. 5.5 показывает, что для обоих случаев «++» и «+-» производная $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1 \partial K_2}$ принимает нулевое значение, т. е. $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1 \partial K_2} = 0$, когда курс судна принимает значения K_n , K_k и K_m . При значении K_m производная скачкообразно изменяет знак с отрицательного на положительный. Производная положительная на участке $K_1 \in (K_m, K_k)$ и отрицательна – на участке $K_1 \in (K_n, K_m)$.

В табл. 5.6 приведены значения величин K_n , K_k , K_{sn} и K_m , а также участки роста и падения производной дистанции кратчайшего сближения D_{\min} для третьей ситуации ($V_1 = V_2$).

Как показывает анализ выражения (4.24) и имитационное моделирование, в случае «+ -» дистанция кратчайшего сближения D_{\min} не

изменяется и имеет место $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1 \partial K_2} = 0$. В случае «++» при $\Delta K = 0$ производная

$$\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1 \partial K_2} = 0.$$

На рис. 5.27 приведен интерфейс модуля имитационного моделирования в третьей ситуации для случая «+ +».

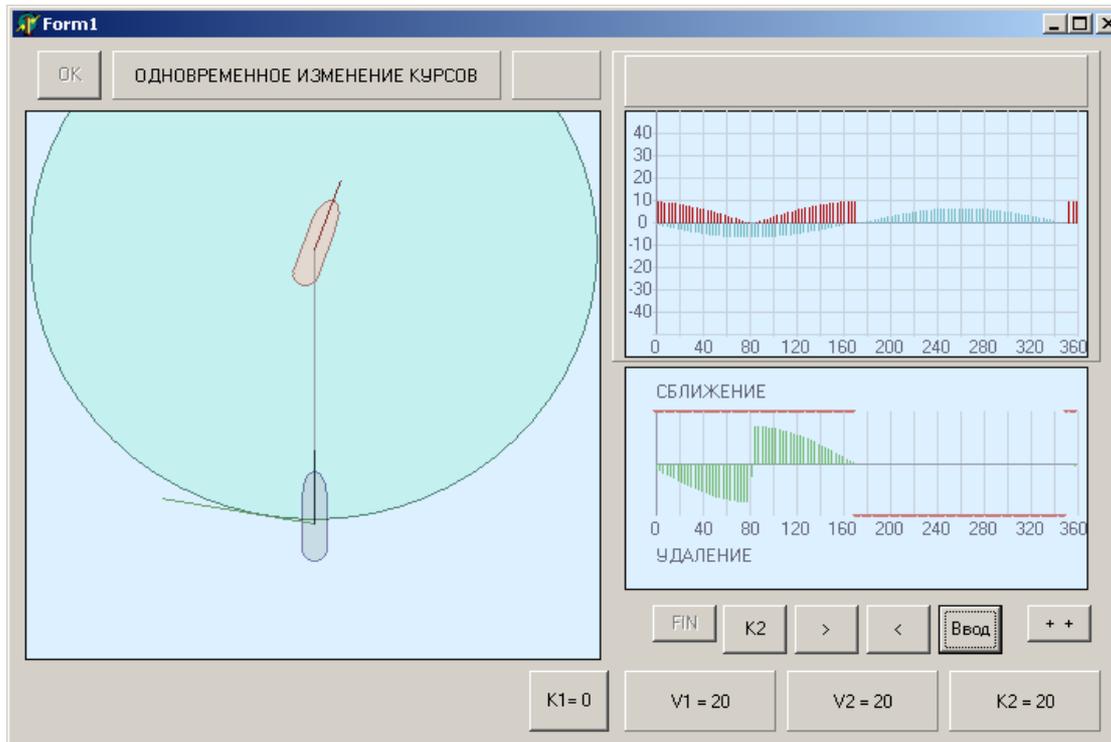


Рис. 5.27. Интерфейс модуля для третьей ситуации в случае «+ +»

Таблица 5.6

Результаты имитационного моделирования для $V_1 = V_2$

Один знак изменения K_1 и K_2						Разные знаки изменения K_1 и K_2				
ΔK	K_n	K_k	K_m	рост	пад.	K_n	K_k	K_m	рост	пад.
10	0	180	90	90..180	0..90					
30	345	170	75	75..170	345..75					
60	330	150	60	60..150	330..60					
90	315	135	45	45..135	315..45					
120	300	120	30	30..120	300..30					
150	285	105	15	15..105	285..15					
180	270	90	0	0..90	270..0					
210	255	75	345	345..75	255..345					
240	240	60	335	335..60	240..335					
270	225	45	315	315..45	225..315					
300	210	30	300	300..30	210..300					
330	195	15	285	285..15	195..285					

Как показывает анализ табл. 5.6, производная $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1 \partial K_2}$ принимает нулевое значение, когда курс судна принимает значения K_n , K_k и K_m . При значении K_m производная скачкообразно изменяет знак с отрицательного на положительное значение. На участке $K_1 \in (K_m, K_k)$ производная положительная и отрицательна – на участке $K_1 \in (K_n, K_m)$.

5.5. Выводы по пятой главе

В данной главе приведены результаты имитационного моделирования основных теоретических результатов диссертационного исследования.

Приведен алгоритм идентификации начальной ситуации опасного сближения судна и цели согласно требованиям МППСС-72. Для каждой ситуации опасного сближения определены реализовавшиеся типы взаимодействия с указанием регламентируемых способов поведения для компенсации возникших ситуационных возмущений.

Приведено описание компьютерной программы для имитационного моделирования идентификации ситуаций опасного сближения и реализовавшегося бинарного взаимодействия с указанием координационных сигналов и сигналов связи.

Описано применение имитационного моделирования для исследования зависимости изменения дистанции кратчайшего сближения от текущего курса судна при повороте с учетом неизменных параметров движения цели.

Произведено имитационное моделирование зависимости дистанции кратчайшего сближения от одновременного изменения курса судна и курса цели, причем рассмотрены два случая, когда происходит одновременный поворот судна и цели в одну сторону и повороты в разные стороны.

ВЫВОДЫ

1. Оценка состояния вопроса. Обеспечение безопасности судовождения остается наиболее актуальной проблемой судоходства, решение которой возможно путем повышения его надежности и снижения вероятности возникновения аварийных случаев, что особенно актуально в стесненных водах. Наличие навигационных опасностей и интенсивные судопотоки в значительной мере осложняют судовождение в стесненных водах и создают повышенные риски возникновения аварийных ситуаций.

В случае опасного сближения судов возникает ситуационное возмущение и взаимодействие, которое предполагает совместные согласованные действия судов по предупреждению возможного столкновения.

При возникновении угрозы столкновения судов характер маневра их расхождения определяют Международные правила предупреждения столкновений судов (МППСС-72), которые содержат систему бинарной координации, регламентирующую поведение судов для безопасного расхождения.

Однако, вопросы формализации взаимодействия судов и особенно координируемости взаимодействий мало исследованы, хотя проблема очень актуальна, так как ее решение позволяет обеспечить более высокий уровень безопасности расхождения судов, что обуславливает актуальность и перспективность данного диссертационного исследования.

2. Методы решения поставленной проблемы. Решение главной задачи диссертации, которая заключается в разработке алгоритма выбора безопасного маневра расхождения судов с учетом особенности их взаимодействия, производилось путем ее декомпозиции на три составные

независимые задачи. Решение составных задач было достигнуто методами системного анализа для выбора темы диссертационной работы и ее методологического обеспечения, теории исследования операций для декомпозиции главной задачи диссертационного исследования на три составных, математического анализа для определения зависимостей изменения дистанции кратчайшего сближения от курсов взаимодействующих судов, теории координации для определения координируемости взаимодействия судов в ситуациях опасного сближения.

3. Формулировка решенной научной задачи, ее значение для науки и практики. В результате решения главной научной задачи получен метод идентификации начальной ситуации опасного сближения судов, определения ее координируемости и регламентируемых уклонений, который отличается учетом особенностей взаимодействия судов в реализовавшейся ситуации и позволяет произвести выбор безопасного маневра.

Наряду с решением главной задачи, в работе также получены решения трех частных задач в виде научных результатов, содержащих научную новизну:

- впервые предложен метод формального описания взаимодействий судов при опасном сближении и возникновении угрозы столкновения;
- впервые разработан способ идентификации ситуаций опасного сближения МППСС-72 и реализовавшегося бинарного взаимодействия;
- впервые предложен метод оценки координации бинарных взаимодействий судов при опасном сближении;
- впервые получены зависимости изменения дистанции кратчайшего сближения только от изменения курса судна, а также при одновременном повороте судна и цели;
- впервые разработана формальная модель МППСС-72 и определена координируемость взаимодействий, регламентируемых МППСС-72.

Указанные научные результаты составляют научную значимость решенной задачи.

Ее практическая значимость заключается в том, что полученные в диссертации результаты могут быть применены судоводителями при расхождении, использованы при разработке новых поколениях САРП, а также при создании современных морских тренажеров.

4. Выводы и рекомендации относительно научного и практического использования полученных результатов. Основные результаты, разработанные в диссертации алгоритмы и программы, могут быть использованы при эксплуатации судна, а также в процессе обучения и повышения квалификации судоводителей.

5. Качественные и количественные показатели полученных результатов. Качественным показателем результатов диссертационной работы является возможность оценки координируемости взаимодействия судов при опасном сближении. Анализ МППСС-72 с помощью разработанного в диссертации метода оценки координируемости взаимодействия судов показал, что из 16 типов взаимодействий, регламентируемых Правилами, 6 типов являются координируемыми, у 4 типов координируемость отсутствует, а 6 типов в зависимости от начальных условий ситуации опасного сближения могут быть координируемыми или координируемость у них отсутствует.

6. Обоснование достоверности полученных результатов.

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается корректным применением математических моделей и результатами имитационного моделирования, полученными с помощью разработанных компьютерных программ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мальцев А. С. Управление движением судна / Мальцев А. С. – Одесса: Весть, 1995.- 230 с.
2. Мальцев А. С. Маневрирование судов при расхождении / Мальцев А. С. – Одесса: Морской тренажерный центр, 2002. – 208 с.
3. Куликов А. М. Оптимальное управление расхождением судов / Куликов А. М., Поддубный В. В // Судостроение. – 1984. - № 12. - С. 22-24.
4. Поддубный В. В., Куликов А. А. Метод возможных направлений в задачах безопасного расхождения судов /ВИНИТИ. – М, 1987. – 21 с. – Рус. Деп. // Анот. в ж. «Водный транспорт», №2, 1987.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Павлов В. В. Начала теории эргатических систем / Павлов В. В. - Киев: Наукова думка, 1975. - 240 с.
9. Павлов В. В. Инвариантность и автономность нелинейных систем управления / Павлов В. В. - Киев: Наукова думка, 1971. - 272 с.
10. 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.

11. 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.
12. Богачук Ю. П. Эргатическая дифференциально- игровая система предотвращения столкновений судов / Богачук Ю. П., Положенцев М. А. // Дискретные и эргатические системы управления. - Киев: Ин-т кибернетики, 1983. – С. 98-105.
13. Шепетуха Ю. М. Применение комбинированного маневра в эргатических системах разрешения навигационного конфликта / Шепетуха Ю. М. // Кибернетика и вычислительная техника. - 1985. - №68. - С. 45-48.
14. Положенцев М. А. Применение двухэлементных стратегий расхождения в эргатических системах предупреждения столкновений судов/ Положенцев М. А., Шепетуха Ю. М. // Кибернетика и вычислительная техника. -1987. - № 76. - С. 19-21.
15. Положенцев И. А. Двухступенчатая система предотвращения столкновения судов / Положенцев И. А. // Автоматика. – 1981. - № 3. - С. 73-76.
16. Положенцев И. А. Эргатическая дифференциально-игровая система предупреждения столкновения судов / Положенцев И. А. // Кибернетика и вычислительная техника. - 1980. - № 50. - С. 38-41.
17. Богачук Ю. П., Положенцев И. А. Эргатическая система управления групповым движением судов / Богачук Ю. П., Положенцев И. А. // Кибернетика и вычислительная техника. - 1984. - № 61. - С. 20-23.
18. Шептуха Ю. М. Некоторые вопросы постановки задачи синтеза систем управления движением судна в условиях конфликта / Шептуха Ю.М. // Кибернетика и вычислительная техника. - 1984. - № 61. - С. 44-48.
19. Вычислительная система «Антикон» для предотвращения столкновений судов. А. с. 1136178. СССР. Ин-т кибернетики им. В. М. Глушкова. - 1985.

20. Павлов В.В. Экспериментальное исследование модели эргатической системы предотвращения столкновений судов/ : Павлов В.В., Шептуха Ю. М. Препр. / АН Украины. Ин-т кибернетики; № 52. – К.: 1985. - 24 с.
21. Шептуха Ю. М. К вопросу синтеза эргатической системы принятия решений о маневре безопасного расхождения судов / Шептуха Ю. М. // Кибернетика и вычислительная техника. - 1989. - № 84.- С. 43-45.
22. Фрейдзон И. Р. Моделирование корабельных систем управления / Фрейдзон И. Р. – Л.: Судостроение, 1975. - 232 с.
23. Кудряшов В. Е. Математическая модель процесса расхождения нескольких управляемых объектов / Кудряшов В. Е. // Известия ЛЭТИ. - 1976. - № 206. - С. 15-19.
24. Кудряшов В. Е. Разработка и исследование алгоритма управления движением судов для предотвращения столкновений в процессе расхождения с несколькими опасными объектами. Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.22.16 /Лен. гос. мор. акад. – Л., 1976. –23 с.
25. Кудряшов В. Е. Синтез алгоритмов безопасного управления судном при расхождении с несколькими объектами / Кудряшов В. Е. // Судостроение. – 1978. -№ 5. – С. 35-40.
26. Иванов В. А. К вопросу построения систем предупреждения столкновений судов в море / Иванов В. А. // Известия ЛЭТИ. – 1975. - № 166. - С. 26-29.
27. Каплин С.И. О предупреждении столкновения судов / Каплин С.И., Леонтьев В.В. // Известия ЛЭТИ. – 1977. - № 215. – С. 45-49.
28. Lisovski I. A. Differential Game Model of Ship Control Process / Lisovski I. //Link. Sei. and Appl. Automat. Contr. – Helsingky. – 1978, - Vol.2.- P.1557-1603
29. Оуэн Г. Теория игр /. Оуэн Г. - М.: Мир, 1971. - 232 с.
30. Красовский Н. Н. Позиционные дифференциальные игры / Красовский Н. Н., Субботин А. И. - М.: Наука, 1974. - 456 с.

31. Айзекс Р. Дифференциальные игры / Айзекс Р. - М.: Мир, 1967. - 480 с.
32. Ватель И. А. Математика конфликта и сотрудничества / Ватель И. А., Ерешко Ф. И. - М.: Знание, 1973. - 64 с.
33. Петросян Л. А. Кооперативные дифференциальные игры и их приложения / Петросян Л. А., Данилов Н. Н. – Томск: Изд-во Томского университета, 1985. -276 с.
34. Петросян Л.А. Динамические игры и их приложения / Петросян Л.А., Томский Г.В. -Л.: Изд. ЛГУ, 1982. - 252 с.
35. Lisowski J. The dynamic game models of safe navigation / Lisowski J. // Advances in Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. - 2007. - P. 23 - 30.
36. Lisowski J. Comparative analysis of safe ship control methods / Lisowski J. // Proc. of the 11th Int. Conf. on Methods and Models in Automation and Robotics, Międzyzdroje. – 2005. – P. 149-154.
37. Lisowski J. Intelligent safe ship control methods in collision avoidance / Lisowski J. // Proc. of European Control Conference. - 2007. – P. 1-6.
38. 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.
39. 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.
40. 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.
41. 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.

42. Lisowski J. Mathematical modeling of a safe ship optimal control process / Lisowski J. // Polish Journal of Environmental Studies. – 2005. - Vol. 14. – P. 68-75.
43. Заичко С.И. Управление взаимодействием судов в ситуации опасного сближения / Заичко С.И., Пятаков Э.Н. // Судовождение: Сб. научн. трудов. / ОНМА, – Вып.11. - Одесса: "ИздатИнформ", 2006. – С. 56 – 60.
44. Заичко С.И. Возможности синтеза системы формирования стратегий расхождения группы судов / Заичко С.И., Пятаков Э.Н. // Судовождение: Сб. научн. трудов. / ОНМА, – Вып.12. - Одесса: "ИздатИнформ", 2006. –С. 63 – 66.
45. Пятаков Э.Н. Требование к процедуре формирования второго уровня иерархической системы управления взаимодействием судов / Пятаков Э.Н. // Судовождение: Сб. научн. трудов. / ОНМА, – Вып.13. - Одесса: "ИздатИнформ", 2007. – С. 145 – 148.
46. Пятаков Э.Н.. Оценка эффективности парных стратегий расходящихся судов / Пятаков Э.Н., Заичко С.И // Судовождение: Сб. научн. трудов. / ОНМА, – Вып.15. - Одесса: "ИздатИнформ", 2008. – С. 166 – 171.
47. Цымбал Н.Н. Гибкие стратегии расхождения судов / Цымбал Н.Н., Бурмака И.А., Тюпиков Е.Е. – Одесса: КП ОГТ, 2007. – 424 с.
48. Tsymbal M. Method of synthesis of flexible strategies for preventing collisions // Advances in Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. - 2007. - P. 429 - 433.
49. Цымбал Н.Н. Метод формирования множества безопасных маневров расхождения судов // Тезисы докладов на III международной научно-технической конференции «Живучесть корабля и безопасность на море». – Севастополь. – 2005. - С. 91-94.
50. Цымбал Н.Н. Перспективные системы предупреждения столкновений судов и принципы их разработки // Материалы I международной научно-практической конференции «Науковий потенціал світу 2004». – том 60. – Днепропетровск. – Наука і освіта, 2004. - С. 44-45.

51. Цымбал Н.Н. Значение прогноза развития ситуации в задаче безопасного расхождения судов/ Цымбал Н.Н. // Судовождение. - 2001. –№ 3. - С. 193 – 197.
52. Цымбал Н.Н. Описание управляемого движения множества судов/ Цымбал Н.Н., Северин В.В. // Судовождение. – 2005. - № 9. – С. 104 – 109.
53. Цымбал Н.Н. Оценка риска аварии при расхождении судов в стесненных водах/ Цымбал Н.Н., Петриченко Е.А // Судовождение. – 2005. - № 10. – С. 93 – 96.
54. Цымбал Н.Н. Учет ограничений МППСС-72 при выборе маневра расхождения судов/ Цымбал Н.Н., Бужбецкий Р.Ю. // Судовождение. – 2006. - № 11. - С. 134 – 138.
55. Цымбал Н.Н. Формализация МППСС-72 в части координации взаимодействия судов при расхождении / Цымбал Н.Н., Бужбецкий Р.Ю. // Судовождение. – 2006. - № 12. – С. 124 – 129.
56. Цымбал Н.Н. Применение методов теории динамических n – управляемых систем для формализации процесса расхождения судов / Цымбал Н.Н., Урбанский И.А. // Судовождение. – 2007. - № 13. – С. 178 – 187.
57. Урбанский И.А. Оптимизация параметров возвращения судна на заданную траекторию после расхождения с целью / Урбанский И.А., Цымбал Н.Н. // Автоматизация судовых технических средств.- 2007. -№ 12 – С. 120 – 124.
58. Цымбал Н.Н. Метод расхождения судов при чрезмерном сближении / Цымбал Н.Н. // Автоматизация судовых технических средств.- 2006. - № 11 – С. 88 – 93.
59. Тюпиков Е.Е. Зависимость момента начала маневра расхождения изменением скорости от инерционных характеристик судна / Тюпиков Е.Е., Цымбал Н.Н. // Судовождение. – 2007. - № 14. – С. 130 –135.
60. Сафин И. В. Условия существования безопасных маневров расхождения / Сафин И. В. // Судовождение. - 2001. - № 3. - С. 158 – 163.

61. Сафин И.В. Расчет граничных значений параметров множества допустимых маневров расхождения / Сафин И.В. // Судовождение. - №4. - 2002. – С. 95 – 100.
62. Сафин И.В. Выбор оптимального маневра расхождения / Сафин И.В. // Автоматизация судовых технических средств. - №7. - 2002. - С. 115-120.
63. Сафин И.В. Анализ результатов имитационного моделирования процесса расхождения судов / Сафин И.В. // Судовождение. - №6 - 2003. – С. 122-129.
64. 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.
65. Бурмака И.А. Учет динамики судна при выборе маневра расхождения / Бурмака И.А. // Судовождение. – 2002. - №4. – С. 32- 36.
66. Бурмака И.А. Учет инерционности судна при расчете момента времени завершения маневра расхождения / Бурмака И.А. // Судовождение. - № 5. - 2002. – С. 13 – 21.
67. Бурмака И.А. Расчет длительности поворота судна при расхождении / Бурмака И.А. // Автоматизация судовых технических средств. - 2002. - №7. - С. 3- 6.
68. Бурмака И.А. Применение численных методов для расчета времени начала уклонения судна при расхождении / Бурмака И.А. // Судовождение. - 2003. - № 6. – С. 27-31.
69. 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.
70. Бурмака И.А. Расчет характеристик поворотливости судна по экспериментальным данным / Бурмака И.А. // Судовождение. - 2005. - № 9. - С. 7-13.

71. Бурмака И.А. Результаты имитационного моделирования процесса расхождения судов с учетом их динамики / Бурмака И.А. // Судовождение. – 2005. - №10. – С. 21 – 25.
72. Чапчай Е.П. Экспериментальное исследование моделей поворотливости судна / Чапчай Е.П. // Судовождение. – 2006. - № 11. – С. 139 – 142.
73. Чапчай Е.П. Учет времени перекладки пера руля при повороте судна/ Чапчай Е.П. // Судовождение. – 2005. - № 9. – С. 110 – 113.
74. Петриченко Е.А. Описание навигационных опасностей в задаче расхождения судов / Петриченко Е.А. // Судовождение. - 2002. - №5. – С. 89- 95.
75. Петриченко Е.А. Вывод условия существования множества допустимых маневров расхождения с учетом навигационных опасностей / Петриченко Е.А. // Судовождение. – 2003. – №.6. – С. 103-107.
76. Петриченко Е.А. Учет линейной навигационной опасности при расхождении судов / Петриченко Е.А. // Автоматизация судовых технических средств. – 2003. – №8. – С. 72-76.
77. Северин В.В. Постановка задачи расхождения судна с несколькими целями / Северин В.В. // Судовождение. – 2003. – № 6. – С. 130-135.
78. Северин В.В. Выбор маневра расхождения с двумя целями / Северин В.В. // Автоматизация судовых технических средств.- 2005. - № 9. – С. 91 – 95.
79. Сафин В.И. Использование маневра изменения скорости для предотвращения столкновения судов / Сафин В.И., Тюпиков Е.Е. // Судовождение. – 2005. - № 10. – С. 143-147.
80. Тюпиков Е.Е. Особенности расхождения с целью изменением скорости судна / Тюпиков Е.Е. // Судовождение. – 2006. - № 11. – С. 122 – 126.
81. Тюпиков Е.Е. Анализ возможности расхождения судна с целью изменением скорости / Тюпиков Е.Е. // Судовождение. – 2006. - № 12. – С. 122 – 126.

82. Урбанский И.А. Обеспечение безопасного выхода судов на программные траектории движения / Урбанский И.А., Цымбал Н.Н. // Автоматизация судовых технических средств. – 2008. – № 14– С. 97-100
83. Бужбецкий Р.Ю. Алгоритм идентификации начальных ситуаций опасного сближения судов в рамках МППСС-72/ Бужбецкий Р.Ю. // Судовождение.- 2007. – № 13. – С. 124 – 129.
84. Цымбал Н.Н. Стратегии расхождения судов, учитывающие требования МППСС-72 / Цымбал Н.Н., Бужбецкий Р.Ю. // Судовождение: Сб. научн. трудов./ ОНМА, Вып. 21. – Одесса: «ИздатИнформ», 2012 - С. 243-247
85. Бужбецкий Р.Ю. Определение структуры маневра расхождения с несколькими судами с учетом бинарной координации / Бужбецкий Р.Ю.// Судовождение: Сб. научн. трудов./ ОНМА, Вып. 21. – Одесса: «ИздатИнформ», 2012 - С. 22-25.
86. Бужбецкий Р.Ю. Типы взаимодействия судов при опасном сближении
87. Hirsch Werner. A new larboard helm rule for powerdriven vessels// // The Journal of Navigation. - 1980. - № 3. - P. 403-407.
88. Cockroft A. N. Enige gezichtspunten t. a. v. de bepalingen ter voorkoming van aanvazing op Zee // Nautisch en technisch tijdschrift. - 1981.- № 10.- P. 238-241.
89. Cannell W. P. Collision avoidance as a game of coordination // The Journal of Navigation. – 1981. - № 2. - P. 220-239.
90. Scheffel B. Überlegungen zum Kollisionsschutz auf See. Linksdrehende Peilung und kooperative Ausweichmanöver zwischen Schiffen //Hansa. - 1987. - № 12. - P. 775-778.
91. Piattelly M., Tiano A. On the automatic determination of an optimal anti-collision strategy // Ship. Operat. Automat. – Amsterdam-Oxford.-1975.- P. 106-114.

92. Corlet A. G. Automation of collision avoidance at sea with special referens to, the international regulations for preventing collisions at sea // Ship. Operat. Automat.- Amsterdam - Oxford. – 1975. - P. 93-100.
93. Hilgert Helmut, Zopf Peter. «Manover des Kurchaltors» und «Manover des letzten Augenblicks» // Seewirtschaft. – 1989. - № 11. - P. 536-539.
94. Sclienk A., Ruttler H. Zur optimaien Steuerung eine Schiffes in Kollisionssitationen unter Berucksichtigung des dynanuschen Manovrierverhaltens des Eigenschiffes // Schiffbauforachung. – 1988. - № 2. - P. 87-99.
95. Hilgert Helmut. Die kritische Distanz in der Nebelfahrt // Hansa. – 1988. - 15. P. 153-162.
96. Вагущенко Л.Л. Расхождение с судами смещением на параллельную линию пути. / Л.Л. Вагущенко. – Одесса: Феникс, 2013. – 180 с.
97. Цымбал Н.Н. Формализация ситуаций МППСС-72 при опасном сближении судов в условиях хорошей видимости /Цымбал Н.Н., Василенко А.В. // Судовождение: Сб. научн. трудов./ ОНМА, Вып. 19. – Одесса: Латстар, 2010. - С. 127-131.
98. Sorge K. Die Theorie der optimalen Steuerung als Grundlage fur die Modellierung von Prozessen in Schiffes // Ingenerhochsch, Seefahrt, Warnomunde-Wustrow. – 1987. - № 3. - P. 85-88.
99. Бужбецкий Р.Ю. Типы взаимодействия судов при опасном сближении/ Бужбецкий Р.Ю. // Эксплуатация, безопасность и экономика водного транспорта: Вестник ГМУ им. адм. Ушакова/ ГМУ, Вып. 1(6) 2014. – Новороссийск, 2014 – С. 16-19.
100. Бурмака И.А. Экстренная стратегия расхождения при чрезмерном сближении судов / Бурмака А.И., Бурмака И.А., Бужбецкий Р.Ю. // LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014 – 202с.
101. 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.

ПРИЛОЖЕНИЕ А.

А1. Результаты имитационного моделирования изменения дистанции кратчайшего сближения при изменении только курса судна

В этом приложении приведены результаты имитационного моделирования, в котором исследовалась связь знака и величины производной $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$ от ее аргументов и скорости изменения расстояния \dot{D} (сближения или удаления судов).

Производная $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$ описывается выражением:

$$\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} = G_s \frac{DV_1}{V_0^3} [V_2 \cos(K_2 - \alpha) - V_1 \cos(K_1 - \alpha)] [V_1 - V_2 \cos(K_1 - K_2)].$$

При имитационном моделировании рассматривались три ситуации. Первая ситуация характеризуется равенством скоростей судна и цели, т.е. $V_1 = V_2$, во второй ситуации скорость судна превосходит скорость цели $V_1 > V_2$, а в третьей ситуации скорость судна меньше скорости цели $V_1 < V_2$.

Для каждой ситуации задается фиксированный курс цели через 60° , а курс судна изменяется не меньше, чем через 3° , при этом определяется сближаются или удаляются судно с целью соответственно символами «с» или «у», значения скорости изменения дистанции между судном и целью \dot{D} , дистанции кратчайшего сближения D_{\min} , ее изменение $Dk2 = \frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$, и относительный курс K_{ot} .

Результаты имитационного моделирования для первой ситуации при курсе цели $K_2 = 0$ показаны на рис. А.1 и представлены в табл. А.1.

Как следует из рис. А.1, судно с целью сближаются при курсах судна K_1 от 0° до 90° , а на остальных курсах они удаляются. Поэтому в табл. А.1

вносятся только те данные, которые соответствуют курсам судна K_1 , при которых оно сближается с целью.

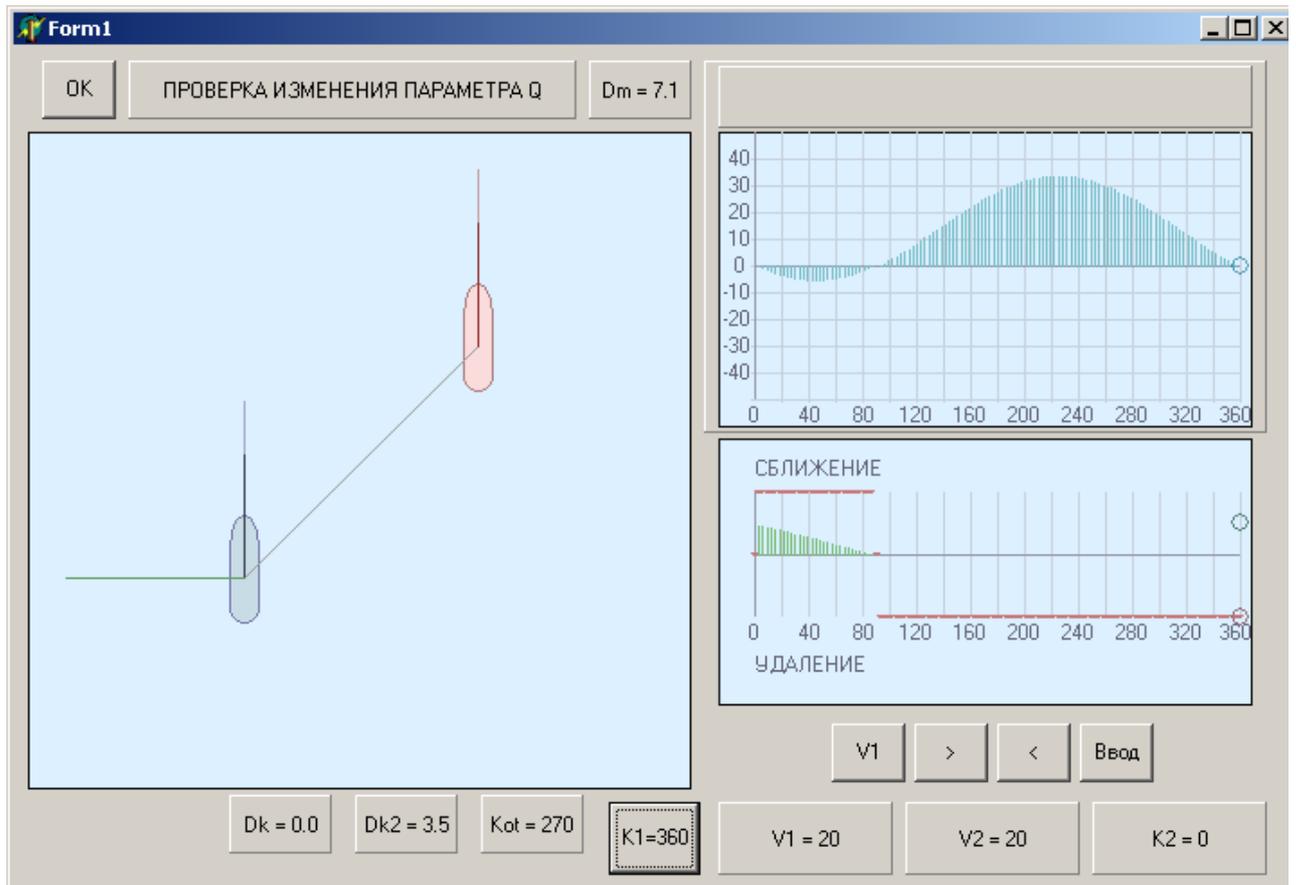


Рис. А.1. Имитационное моделирование первой ситуации для $K_2=0$

Таблица А.1

Значение \dot{D} , $Dk2 = \frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$, D_{\min} и K_{ot} при $V_1=V_2$ и $K_2=0$

K_1	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
	у	с	с	с	с	с	с	с	с	с	С
\dot{D}	0.0	-0.7	-1.4	-2.	-2.6	-3.2	-3.7	-4.1	-4.5	-4.9	-5.2
$Dk2$	3.5	3.4	3.3	3.2	3.1	3.0	2.9	2.8	2.7	2.6	2.5
D_{\min}	7.1	7.3	7.4	7.6	7.8	7.9	8.1	8.2	8.3	8.5	8.7
K_{ot}	270	91	93	94	96	97	99	100	102	103	105
K_1	33	36	39	42	45	48	51	54	57	60	63
	с	с	с	с	с	с	с	с	с	с	С
\dot{D}	-5.4	-5.6	-5.7	-5.8	-5.9	-5.8	-5.7	-5.6	-5.4	-5.2	-4.9
$Dk2$	2.4	2.3	2.2	2.0	1.9	1.8	1.7	1.6	1.4	1.3	1.2
D_{\min}	8.8	8.9	9.0	9.1	9.2	9.3	9.4	9.5	9.6	9.6	9.7
K_{ot}	106	108	109	111	112	114	115	117	118	120	121

Продолжение табл. А.1

K_1	66	69	72	75	78	81	84	87	90	93
	с	с	с	с	с	с	с	с		у
\dot{D}	-4.5	-4.1	-3.7	-3.2	-2.6	-2.0	-1.4	-0.7	0.0	0.7
Dk_2	1.0	0.9	0.8	0.7	0.5	0.4	0.3	0.1	0.0	-0.1
D_{\min}	9.8	9.8	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9
K_{ot}	123	124	126	127	129	130	132	133	135	136

Анализ табл. А.1 показывает, что увеличение дистанции кратчайшего сближения $Dk_2 = \frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$ происходит на всех курсах сближения судна с целью, т.е. $Dk_2 = \frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} > 0$ при $K_2 = 0$, если $\dot{D} < 0$, т.е. $K_1 \in (0..90)$.

На рис. А.2 и в табл. А.2 представлены результаты имитационного моделирования для первой ситуации при курсе цели $K_2 = 60$.

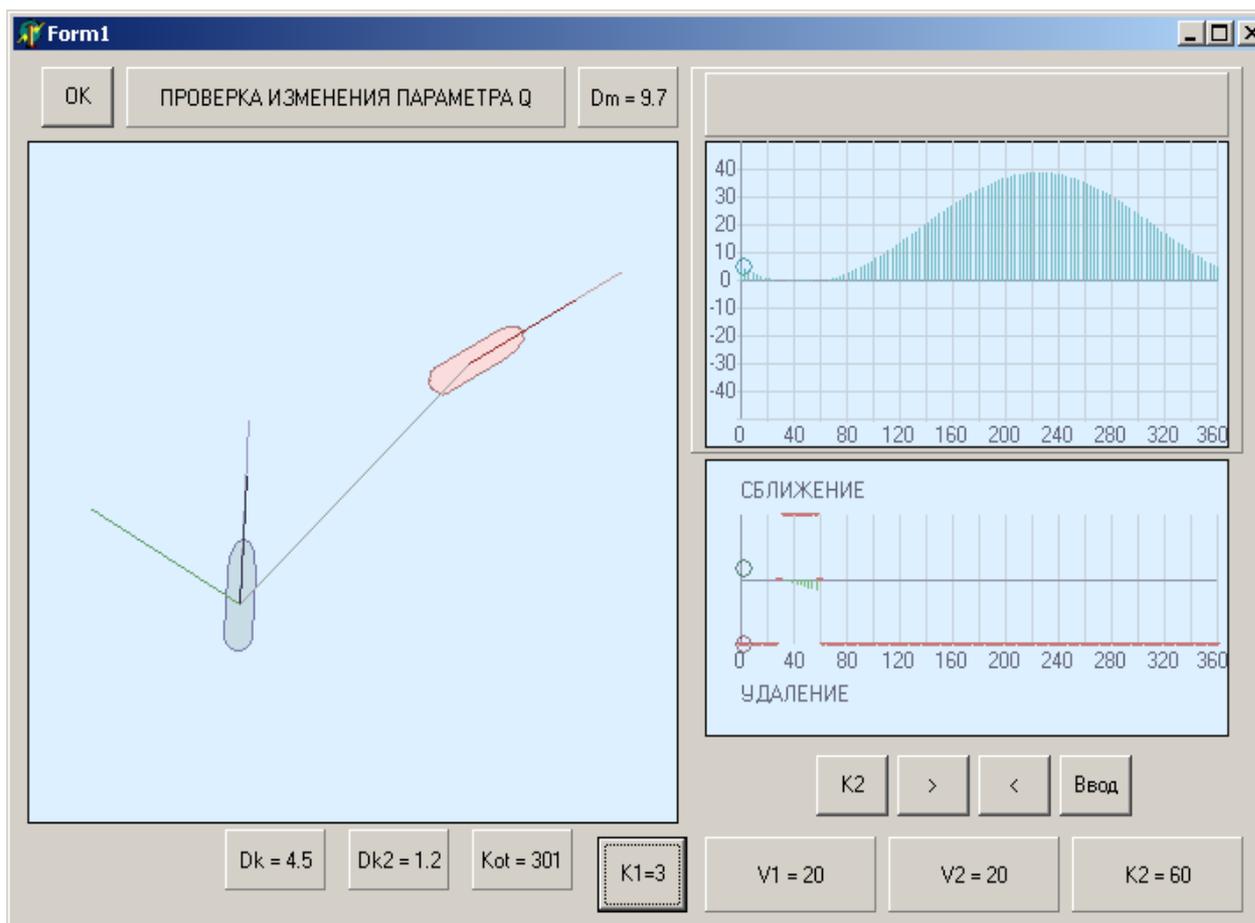


Рис. А.2. Имитационное моделирование первой ситуации для $K_2 = 60$

Значение \dot{D} , $Dk2 = \frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$, D_{\min} и K_{ot} при $V_1=V_2$ при $K_2=60$

K_1	33	36	39	42	45	48	51	54	60	63
	с	с	с	с	с	с	с	с	с	у
\dot{D}	-0.2	-0.4	-0.6	-0.7	-0.7	-0.7	-0.6	-0.4	0.0	
$Dk2$	-0.1	-0.3	-0.4	-0.5	-0.7	-0.8	-0.9	-1.0	0.0	
D_{\min}	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.8	9.7	9.8	
K_{ot}	316	318	319	321	322	324	325	327	330	

Обращаем внимание на то, что на курсах сближения при увеличении курса судна дистанция кратчайшего сближения уменьшается, т.е.

справедливы соотношения $Dk2 = \frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} < 0$ при $K_2=60$, если $\dot{D} < 0$, т.е.

$K_1 \in (30..60)$.

Результаты имитационного моделирования для первой ситуации при курсе цели $K_2=120^\circ$ показаны на рис. А.3 и в табл. А.3.

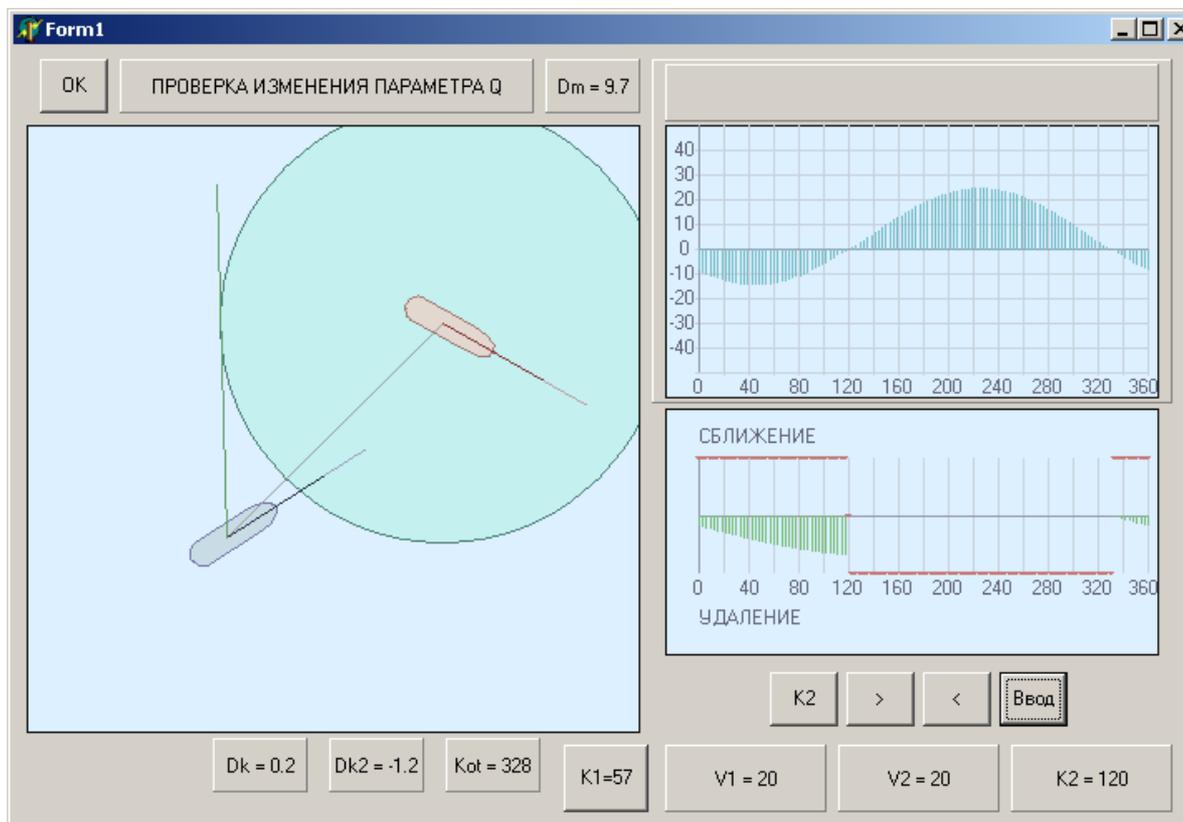


Рис. А.3. Имитационное моделирование первой ситуации для $K_2=120$

Таблица А.3

Значение \dot{D} , $Dk_2 = \frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$, D_{\min} и K_{ot} при $V_1=V_2$ и $K_2=120$

K_1	0	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60
	с	с	с	с	с	с	с	с	с	с	с
\dot{D}	-8.1	-10	-11	-13	-14	-14	-15	-15	-15	-15	-14
Dk_2	-1.3	-1.5	-1.8	-2.0	-2.3	-2.5	-2.7	-2.9	-3.1	-3.3	-3.5
D_{\min}	9.7	9.5	9.3	9.1	8.9	8.6	8.3	8.1	7.8	7.4	7.1
K_{ot}	330	333	336	339	342	345	348	351	354	357	360
K_1	66	72	78	84	90	96	102	108	114	120	333
	с	с	с	с	с	с	с	с	с	у	с
\dot{D}	-14	-13	-12	-10	-8.1	-7.4	-5.7	-3.9	-1.1	0	-0.1
Dk_2	-3.7	-3.9	-4.0	-4.2	-4.3	-4.5	-4.6	-4.7	-4.8	0	-0.1
D_{\min}	6.6	6.3	5.9	5.4	5.0	4.5	4.1	3.6	3.1	7.1	9.9
K_{ot}	3	6	9	12	15	18	21	24	27	0	316

Анализ табл. А.3 и рис. А.3 показывает, что с ростом курса судна при сближении судна с целью дистанция кратчайшего сближения уменьшается,

т.е. $Dk_2 = \frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} < 0$ при $K_2=120$, если $\dot{D} < 0$, т.е. $K_1 \in (330..120)$.

Если фиксированный курс цели $K_2=180$, то имитационное моделирование дает следующие результаты, которые представлены на рис. А1.4 и в табл. А1.4.

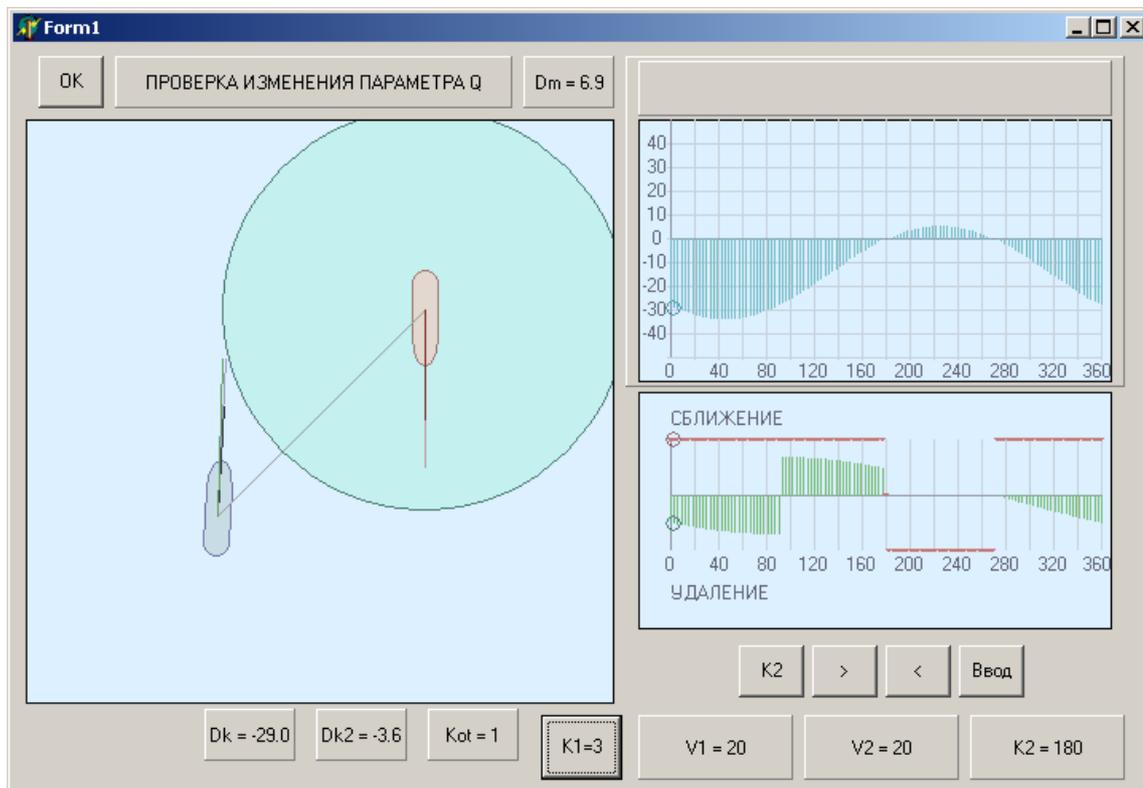
Таблица А.4

Значение \dot{D} , $Dk_2 = \frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$, D_{\min} и K_{ot} при $V_1=V_2$ и $K_2=180$

K_1	0	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60
	с	с	с	с	с	с	с	с	с	с	с
\dot{D}	-28	-30	-31	-31	-33	-34	-34	-34	-34	-34	-34
Dk_2	-3.5	-3.7	-3.9	-4.0	-4.2	-4.3	-4.5	-4.6	-4.7	-4.8	-4.8
D_{\min}	7.1	6.7	6.3	5.9	5.4	5.0	4.5	4.1	3.6	3.1	2.6
K_{ot}	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30

Продолжение табл. А.4

K_1	66	72	78	84	90	96	102	108	114	120	126
	с	с	с	с	с	с	с	с	с	с	с
\dot{D}	-33	-31	-31	-30	-28	-27	-25	-23	-21	-19	-17
D_{k2}	-4.9	-4.9	-4.1	-4.1	-4.1	4.1	4.1	4.9	4.9	4.8	4.8
D_{\min}	2.1	1.6	1.0	0.5	0.0	0.5	1.0	1.6	2.1	2.6	3.1
K_{ot}	33	36	39	42	45	48	51	54	57	60	63
K_1	132	138	144	150	156	162	168	174	180	183	273
	с	с	с	с	с	с	с	с	у	с	
\dot{D}	-15	-13	-11	-8.1	-6.1	-5.1	-3.2	-1.6	0		-0.8
D_{k2}	4.7	4.6	4.5	4.3	4.2	4.0	3.9	3.7	0		-0.1
D_{\min}	3.6	4.1	4.5	4.1	5.4	5.9	6.3	6.7	7.1		9.1
K_{ot}	66	69	72	75	78	81	84	87	0		316
K_1	282	294	300	306	312	318	324	330	336	348	354
	с	с	с	с	с	с	с	с	с	с	с
\dot{D}	-3.2	-6.1	-8.1	-11	-13	-15	-17	-19	-21	-25	-27
D_{k2}	-0.6	-1.0	-1.3	-1.5	-1.8	-2.0	-2.3	-2.5	-2.7	-3.2	-3.7
D_{\min}	9.9	9.8	9.7	9.5	9.3	9.1	8.9	8.7	8.4	7.8	7.4
K_{ot}	321	327	330	333	336	339	342	345	348	354	357

Рис. А.4. Имитационное моделирование первой ситуации для $K_2=180$

Анализ результатов имитационного моделирования при $K_2=180$ показывает, что для курсов судна K_1 от 270° до 90° дистанция кратчайшего сближения с ростом курса убывает $D_{k2} = \frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$, при курсах K_1 от 90° до 180° - возрастает, т.е.:

$$\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} < 0, \text{ при } K_1 \in (270..90); \quad \frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} > 0, \text{ при } K_1 \in (90..180).$$

Обращаем внимание, что смена знака изменения дистанции кратчайшего сближения D_{\min} , т.е. $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} = 0$, происходит при $K_1=90$, когда $K_{от}=\alpha=45^\circ$, при этом $D_{\min} = 0$.

Результаты имитационного моделирования при $K_2=270^\circ$ показаны на рис. А.5 и в табл. А.5.

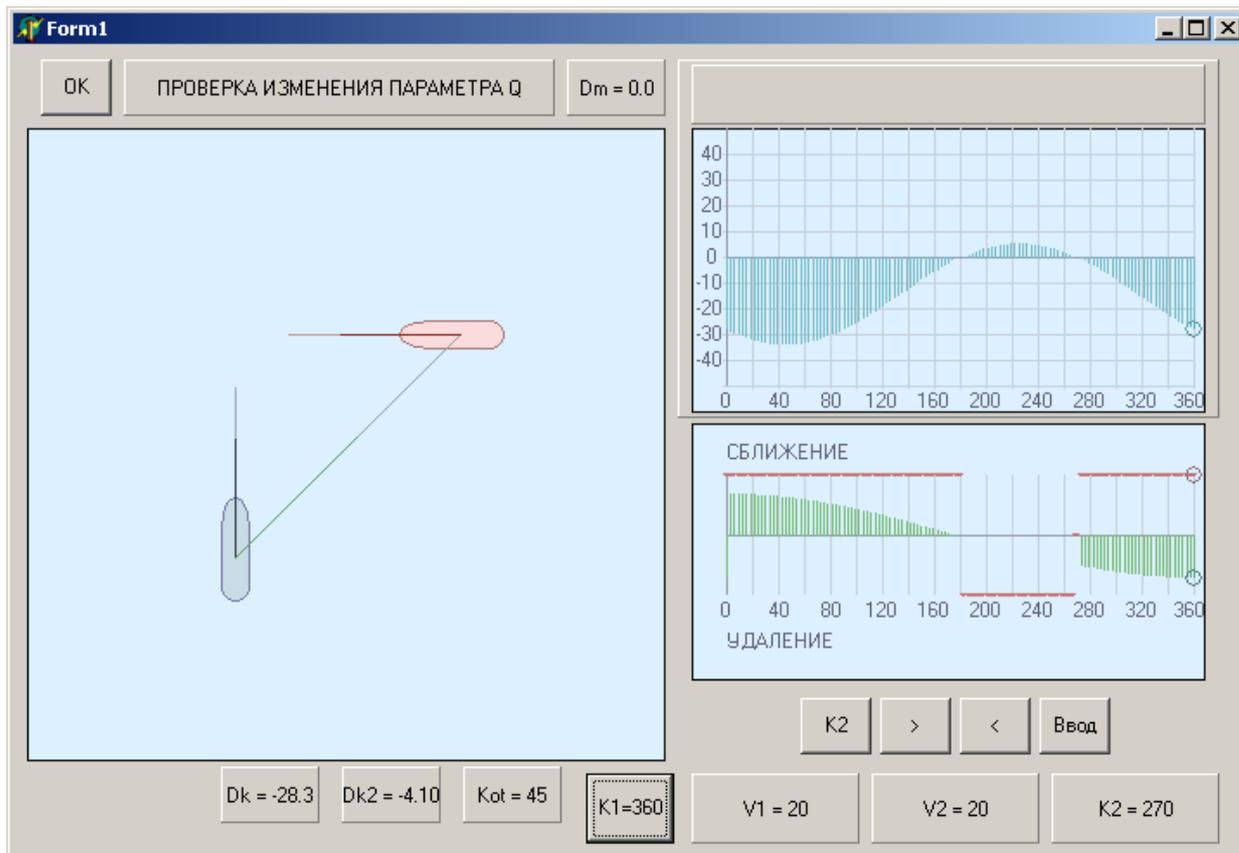


Рис. А.5. Имитационное моделирование первой ситуации для $K_2=270$

Значение \dot{D} , $Dk_2 = \frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$, D_{\min} и K_{ot} при $V_1=V_2$ и $K_2=270$

K_1	0	12	24	36	48	60	72	84	90	96	108
	с	с	с	с	с	с	с	с	с	с	с
\dot{D}	-28	-31	-33	-34	-34	-34	-31	-30	-29	-27	-23
Dk_2	-4.1	4.1	4.9	4.8	4.6	4.1	4.0	3.7	3.5	3.3	2.9
D_{\min}	0	1.0	2.1	3.1	4.1	4.1	5.9	6.7	7.1	7.4	8.1
K_{ot}	45	51	57	63	69	75	81	87	90	93	99
K_1	120	132	144	156	168	180	183	270	282	315	348
	с	с	с	с	с	с	у		с	с	с
\dot{D}	-19	-15	-11	-6.1	-3.3	0		0	-3.2	-14	-25
Dk_2	2.5	2.0	1.5	1.0	0.5	0.0		-3.6	-3.9	-4.6	-4.1
D_{\min}	8.7	9.1	9.5	9.8	9.9	9.1		7.1	6.3	3.8	1.0
K_{ot}	105	111	117	123	129	135		0	6	22	39

Анализ результатов имитационного моделирования первой ситуации, когда $V_1=V_2$, при курсе цели $K_2=270$ показал, что в диапазоне курсов сближения K_1 от 0° до 180° дистанция кратчайшего сближения увеличивается с ростом курса K_1 , и уменьшается при курсах от 270° до 360° , т.е. справедливы соотношения:

$$\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} < 0, \text{ при } K_1 \in (270..360); \quad \frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} > 0, \text{ при } K_1 \in (0..180).$$

Смена знака изменения дистанции кратчайшего сближения D_{\min} , т.е.

$\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} = 0$, происходит при $K_1=0$, когда $K_{ot}=\alpha=45^\circ$, при этом $D_{\min} = 0$, и при

$K_1=180$, когда $K_{ot}=135$ и $D_{\min}=9.1$.

Рассмотрим вторую ситуацию, когда скорость судна превосходит скорость цели $V_1>V_2$, причем принимаем $V_1=25$ узлов и $V_2=15$ узлов. Значения фиксированных курсов цели принимают величины через 90° , а значения курсов судна изменяются через 12° .

Величина дистанции и пеленга с судна на цель остаются неизменными и

равны $D = 10$ миль и $\alpha = 45^\circ$.

Результаты имитационного моделирования для $K_2 = 0$ представлены на рис. А.6 и в табл. А.6.

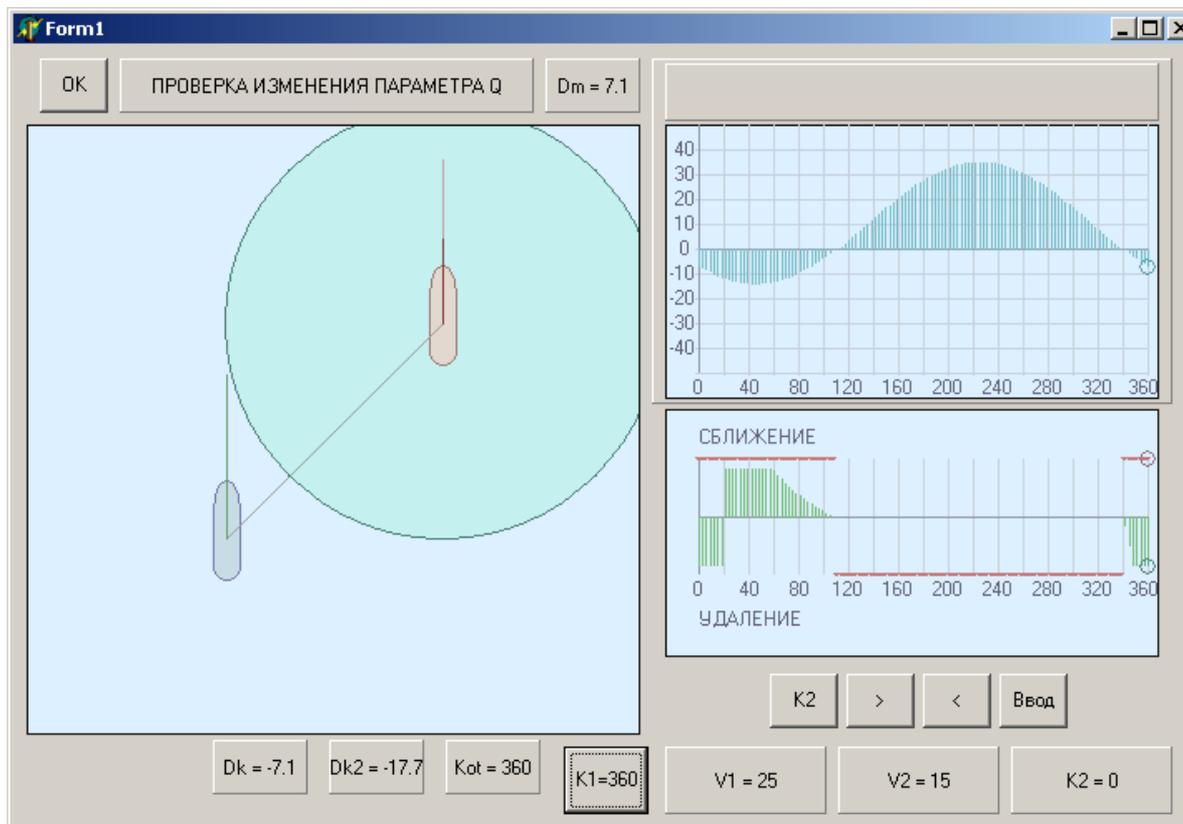


Рис. А.6. Имитационное моделирование второй ситуации для $K_2 = 0$

Таблица А.6

Значение \dot{D} , $Dk2 = \frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$, D_{\min} и K_{ot} при $V_1 > V_2$ и $K_2 = 0$

K_1	0	12	24	36	48	60	72	84	90	96	108
	с	с	с	с	с	с	с	с	с	с	с
\dot{D}	-7.1	-10	-13	-14	-14	-14	-12	-8.8	-7.1	-5.1	-0.7
$Dk2$	-18	-21	16	12	8.3	5.7	3.9	2.4	1.8	1.2	0.2
D_{\min}	7.1	2.8	1.3	4.3	6.4	7.8	8.8	9.5	9.7	9.9	9.1
K_{ot}	0	29	52	70	85	97	107	116	121	125	134
K_1	111	339	342	345	348	351	354	357	360		
	у	у	с	с	с	с	с	с	с		
\dot{D}			-0.7	-1.9	-3.0	-4.1	-5.1	-6.1	-7.1		
$Dk2$			-1.2	-3.5	-6.3	-9.1	-12	-15	-18		
D_{\min}			9.1	9.9	9.6	9.2	8.7	7.9	7.1		
K_{ot}			319	325	331	338	345	352	0		

Результаты имитационного моделирования показывают, что при $K_2=0$ величина дистанции кратчайшего сближения возрастает с ростом K_1 на курсах сближения, если $K_1 \in (20..110)$, а при $K_1 \in (340..20)$ величина D_{\min} убывает с ростом K_1 . Следовательно, можно записать:

$$\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} < 0, \text{ при } K_2=0 \text{ и } K_1 \in (340..20);$$

$$\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} > 0, \text{ при } K_2=0 \text{ и } K_1 \in (20..110).$$

Смена знака изменения дистанции кратчайшего сближения D_{\min} , т.е.

$\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} = 0$, происходит при $K_1=20$, когда $K_{от}=\alpha=45^\circ$, при этом $D_{\min} = 0$ и

$K_1=110$, когда $K_{от}=\alpha=135^\circ$, при этом $D_{\min} = 9.1$.

Для $K_2=90$ и $V_1 > V_2$ результаты имитационного моделирования представлены на рис. А.7 и в табл. А.7.

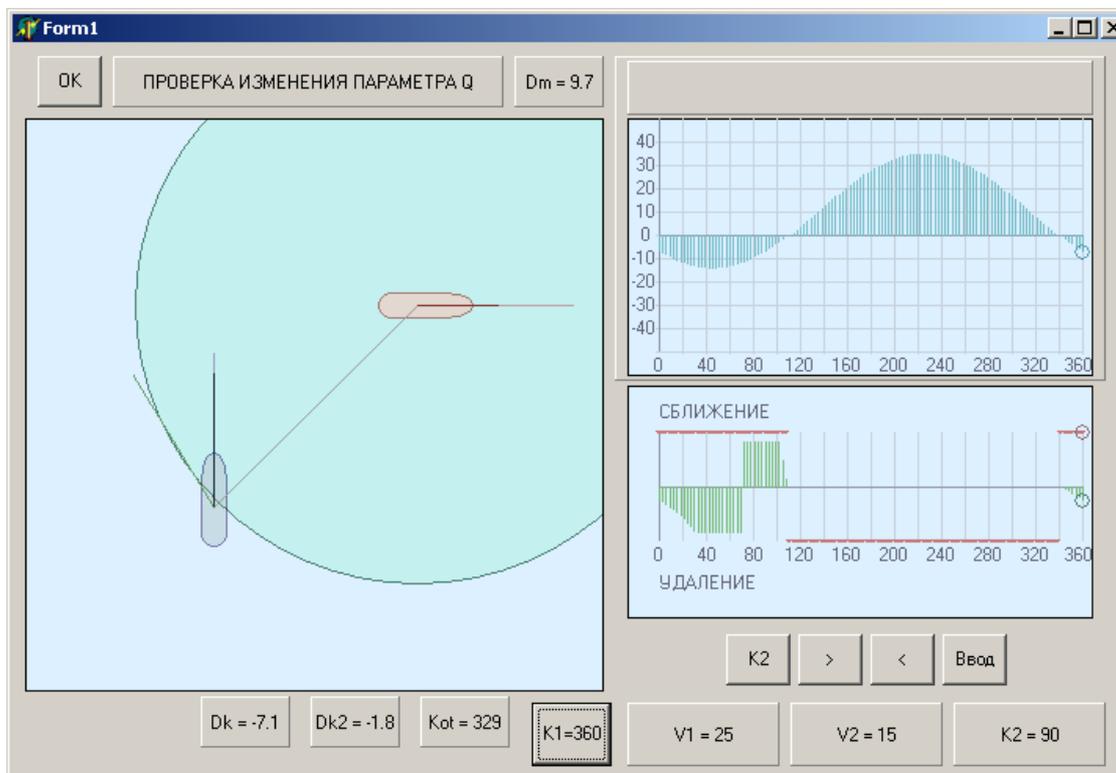


Рис. А.7. Имитационное моделирование второй ситуации для $K_2=90$

Значение \dot{D} , $Dk_2 = \frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$, D_{\min} и $K_{\text{от}}$ при $V_1 > V_2$ и $K_2 = 90$

K_1	0	12	24	36	48	60	70	84	110	111	342
	с	с	с	с	с	с	с	с	с	у	с
\dot{D}	-7.1	-10	-13	-14	-14	-14	-12	-8.8	-0.7		-0.7
Dk_2	-1.8	-3.1	-4.7	-6.9	-9.9	-14	19	21	0.2		-0.2
D_{\min}	9.7	9.2	8.4	7.2	5.4	2.9	0.0	5.0	9.1		9.9
$K_{\text{от}}$	329	338	348	359	12	28	45	75	131		315

Таким образом, в результате имитационного моделирования установлено, что при $K_2 = 90$ величина дистанции кратчайшего сближения возрастает с ростом K_1 на курсах сближения, если $K_1 \in (70..110)$, а при $K_1 \in (340..70)$ величина D_{\min} убывает с ростом K_1 . Следовательно:

$$\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} < 0, \text{ при } K_2 = 90 \text{ и } K_1 \in (340..70);$$

$$\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} > 0, \text{ при } K_2 = 90 \text{ и } K_1 \in (70..110).$$

Смена знака изменения дистанции кратчайшего сближения D_{\min} , т.е.

$\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} = 0$, происходит при $K_1 = 70$, когда $K_{\text{от}} = \alpha = 45^\circ$, при этом $D_{\min} = 0$, а

также при $K_1 = 340$, когда $K_{\text{от}} = \alpha = 315^\circ$, при этом $D_{\min} = 9.9$.

На рис. А.8 и в табл. А.8 для $K_2 = 180$ во второй ситуации, когда скорость судна превосходит скорость цели, т.е. при $V_1 > V_2$, приведены результаты имитационного моделирования.

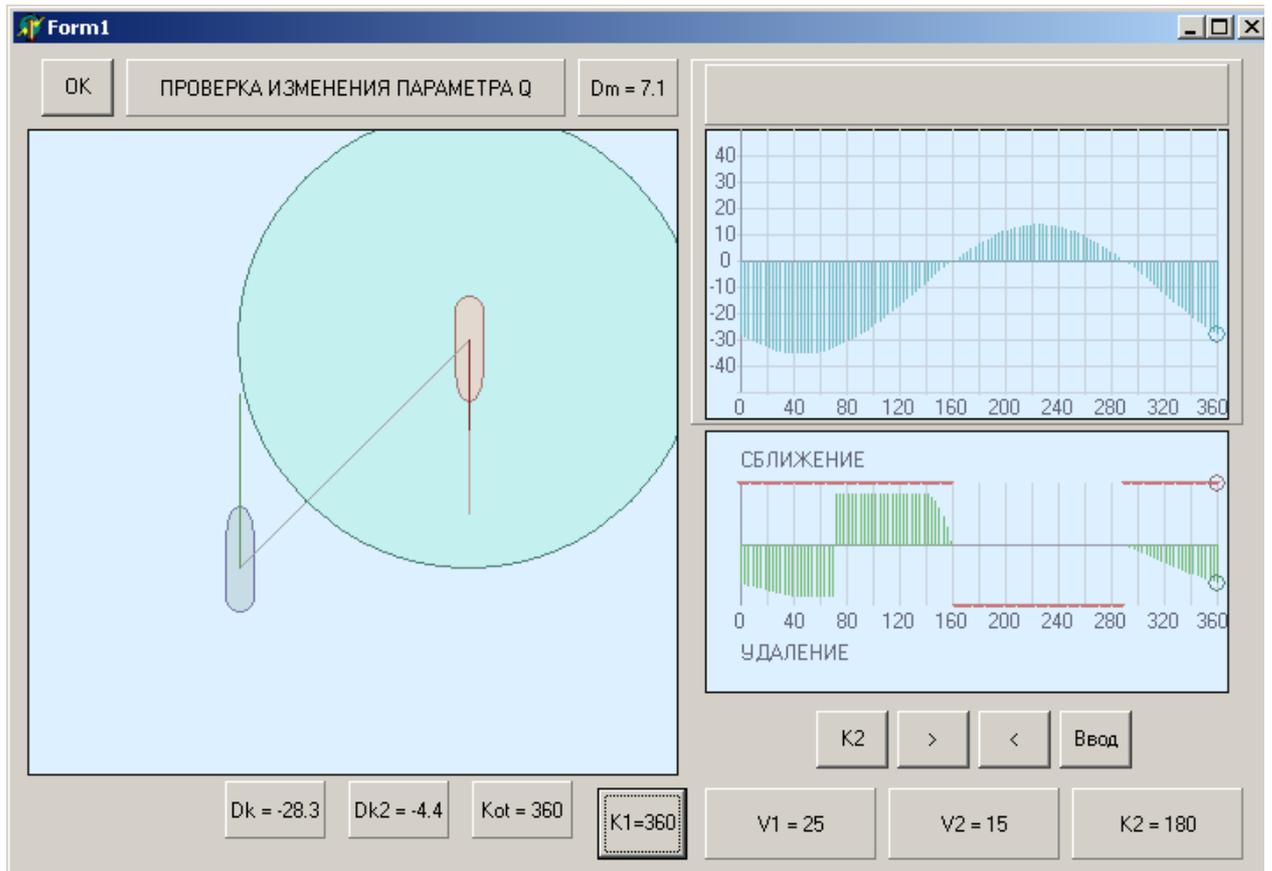


Рис. А.8. Имитационное моделирование второй ситуации для $K_2=180$

Таблица А.8

Значение \dot{D} , $Dk2 = \frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$, D_{\min} и K_{ot} при $V_1 > V_2$ и $K_2=180$

K_1	0	12	24	36	48	60	70	72	90	96	108
	с	с	с	с	с	с	с	с	с	с	с
\dot{D}	-28	-32	-34	-36	-36	-35	-33	-33	-28	-26	-21
$Dk2$	-4.4	-4.1	-5.5	-5.9	-6.3	-6.6	-6.8	6.8	7.1	7.2	7.3
D_{\min}	7.1	6.1	4.1	3.8	2.5	1.2	0.0	0.2	2.4	3.2	4.7
K_{ot}	0	8	15	23	30	38	45	46	59	64	73
K_1	120	132	144	156	160	162	290	315	327	339	351
	с	с	с	с	с	у	с	с	с	с	с
\dot{D}	-17	-12	-6.7	-1.6	0.0		0.0	-11	-16	-21	-26
$Dk2$	7.2	6.9	5.7	2.2	0.0		0.0	-1.8	2.6	-3.3	-3.1
D_{\min}	6.2	7.7	9.0	9.9	9.1		9.9	9.6	9.1	8.5	7.7
K_{ot}	83	95	110	128	135		315	332	339	347	354

В результате имитационного моделирования получили, что при $K_2=180$

дистанция кратчайшего сближения D_{\min} возрастает с ростом K_1 на курсах сближения, если $K_1 \in (70..160)$, а при $K_1 \in (290..70)$ величина D_{\min} убывает с ростом K_1 . Следовательно:

$$\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} < 0, \text{ при } K_2=180 \text{ и } K_1 \in (290..70);$$

$$\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} > 0, \text{ при } K_2=180 \text{ и } K_1 \in (70..160).$$

Смена знака $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$, т.е. $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} = 0$, происходит при $K_1=70$, когда

$K_{\text{от}}=\alpha=45^\circ$, при этом $D_{\min} = 0$, $K_1=160$, когда $K_{\text{от}}=\alpha=135^\circ$, при этом $D_{\min} = 9.1$ и $K_1=290$, когда $K_{\text{от}}=\alpha=315^\circ$, при этом $D_{\min} = 9.9$.

Результаты имитационного моделирования для $K_2=270$ в случае $V_1 > V_2$ представлены на рис. А.9 и в табл. А.9.

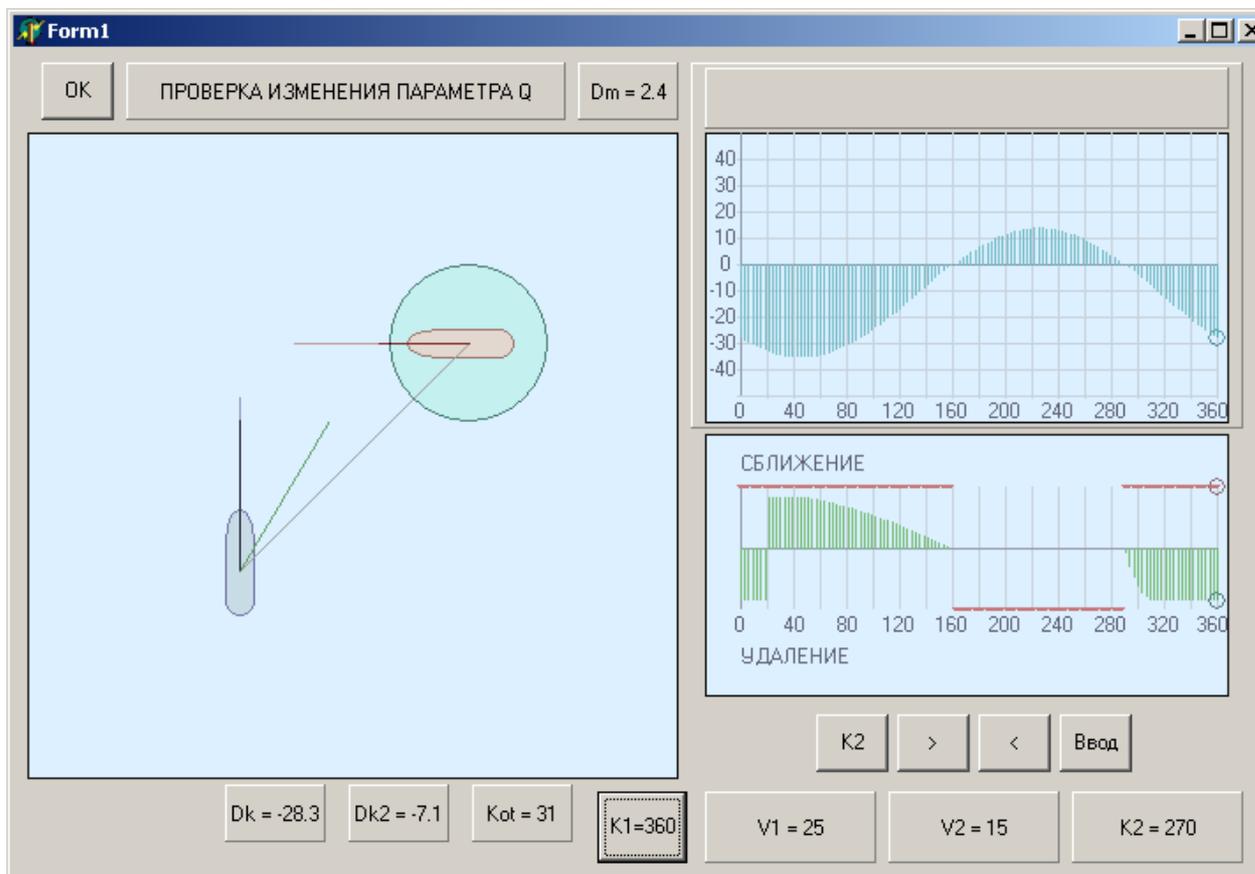


Рис. А.9. Имитационное моделирование второй ситуации для $K_2=270$

Значение \dot{D} , $Dk_2 = \frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$, D_{\min} и K_{ot} при $V_1 > V_2$ и $K_2 = 270$

K_1	0	12	18	21	36	48	60	72	84	96	108
	с	с	с	с	с	с	с	с	с	с	с
\dot{D}	-28	-32	-33	-34	-35	-36	-35	-33	-30	-26	-21
Dk_2	-7.1	-6.1	-6.8	6.8	6.4	6.1	5.7	5.2	4.7	4.1	3.5
D_{\min}	2.4	0.9	0.2	0.1	1.9	3.2	4.4	5.6	6.6	7.5	8.3
K_{ot}	31	40	44	46	56	64	71	79	86	94	101
K_1	120	132	144	159	160	162	290	315	327	339	354
	с	с	с	с	с	у	с	с	с	с	с
\dot{D}	-17	-13	-6.7	-0.4	0		0	-11	-16	-21	-26
Dk_2	2.8	2.0	1.2	0.1	0		0	-6.7	-7.2	-7.3	-7.2
D_{\min}	8.1	9.5	9.8	9.9	9.9		9.9	8.1	6.6	5.1	3.2
K_{ot}	109	116	124	134	135		315	351	4	14	26

Анализ результатов имитационного моделирования показал, что при $K_2 = 270$ дистанция кратчайшего сближения D_{\min} возрастает с ростом K_1 на курсах сближения, если $K_1 \in (20..160)$, а при $K_1 \in (290..20)$ величина D_{\min} убывает с ростом K_1 . Следовательно:

$$\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} < 0, \text{ при } K_2 = 270 \text{ и } K_1 \in (290..20);$$

$$\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} > 0, \text{ при } K_2 = 270 \text{ и } K_1 \in (20..160).$$

Смена знака изменения D_{\min} , т.е. $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} = 0$, происходит при $K_1 = 20$,

когда $K_{ot} = \alpha = 45^\circ$, при этом $D_{\min} = 0$, $K_1 = 160$, когда $K_{ot} = \alpha = 135^\circ$, при этом $D_{\min} = 9.9$, $K_1 = 290$, когда $K_{ot} = \alpha = 315^\circ$, при этом $D_{\min} = 9.9$.

Рассмотрим третью ситуацию, когда скорость судна меньше скорости цели $V_1 < V_2$, причем принимаем $V_1 = 15$ узлов и $V_2 = 25$ узлов. Значения фиксированных курсов цели принимают величины не менее 30° , а значения курсов судна изменяются через 12° .

Величина дистанции и пеленга с судна на цель остаются неизменными и равны $D = 10$ миль и $\alpha = 45^\circ$. В случае $K_2 < 98$ судно при любых курсах K_1 не сближается с целью, поэтому начинаем имитационное моделирование с $K_2 = 130$.

Результаты имитационного моделирования для $K_2 = 130$ представлены на рис. А.10 и в табл. А.10.

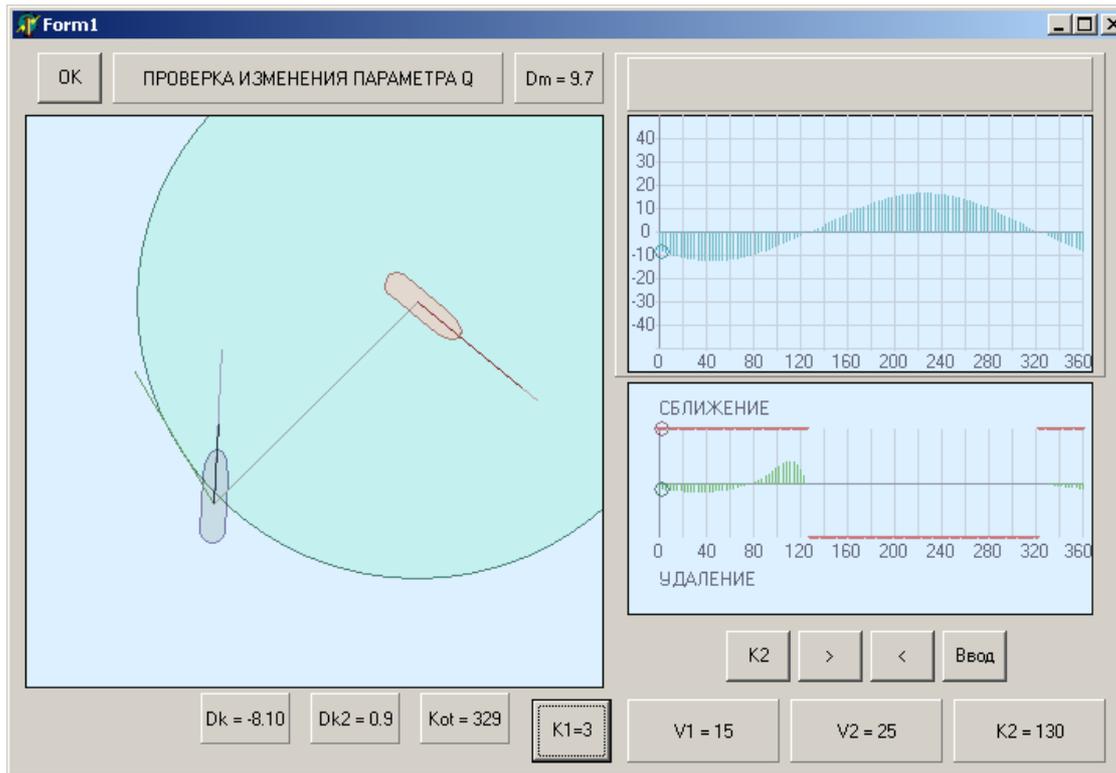


Рис. А.10. Имитационное моделирование третьей ситуации для $K_2 = 130$

Таблица А.10

Значение \dot{D} , $Dk2 = \frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$, D_{\min} и K_{ot} при $V_1 < V_2$ и $K_2 = 130$

K_1	0	12	24	36	48	60	75	84	96	108	120
	с	с	с	с	с	с	с	с	с	с	с
\dot{D}	-8.4	-10	-11	-12	-13	-12	-11	-10	-7.3	-4.6	-1.7
$Dk2$	-0.8	-1.0	-1.1	-1.2	-1.1	-0.8	-0.1	0.6	1.8	2.1	2.1
D_{\min}	9.7	9.8	9.3	9.1	8.8	8.6	8.5	8.5	8.8	9.3	9.9
K_{ot}	328	326	336	340	343	345	347	346	344	337	324

K_1	127	130	323	357
		у	с	с
\dot{D}	0.0		-0.2	-7.9
Dk_2	0.0		0.0	-0.8
D_{\min}	9.1		9.9	9.8
K_{ot}	311		315	327

Имитационное моделирование показало, что в третьей ситуации при $K_2=130$ дистанция кратчайшего сближения D_{\min} возрастает с ростом K_1 на курсах сближения, если $K_1 \in (77..127)$, а при $K_1 \in (323..77)$ величина D_{\min} убывает с ростом K_1 . Следовательно:

$$\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} < 0, \text{ при } K_1 \in (323..77); \quad \frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} > 0, \text{ при } K_1 \in (77..127).$$

Смена знака изменения D_{\min} , т.е. $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} = 0$, происходит при $K_1=77$,

$K_1=127$ и при $K_1=323$.

Рассмотрим третью ситуацию для $K_2=180$ и $V_1 < V_2$, результаты моделирования которой приведены в табл. А.11 и на рис. А.11.

Таблица А.11

Значение \dot{D} , $Dk_2 = \frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$, D_{\min} и K_{ot} при $V_1 < V_2$ и $K_2=180$

K_1	0	12	24	36	48	60	72	84	96	108	127
	с	с	с	с	с	с	с	с	с	с	с
\dot{D}	-28	-30	-32	-33	-33	-32	-31	-29	-27	-25	-20
Dk_2	-2.7	-2.8	-2.1	-3.1	-3.1	-3.1	-2.1	-2.7	-2.4	-1.7	0.0
D_{\min}	7.1	6.5	5.9	5.2	4.6	3.9	3.3	2.7	2.2	1.7	1.4
K_{ot}	0	4	9	13	18	22	26	29	32	35	37
K_1	144	168	180	198	233	246	258	273	330	345	354
	с	с	с	с	с	с	с	с	с	с	с
\dot{D}	-15	-9.5	-7.1	-4.3	-2.9	-3.7	-5.1	-7.6	-22	-25	-27
Dk_2	3.2	11	11	3.6	0.0	-0.2	-0.4	-0.7	-2.0	-2.4	-2.5
D_{\min}	1.8	4.7	7.1	9.3	9.9	9.9	9.8	9.7	8.3	7.7	7.3
K_{ot}	34	17	0	337	323	324	326	330	349	354	358

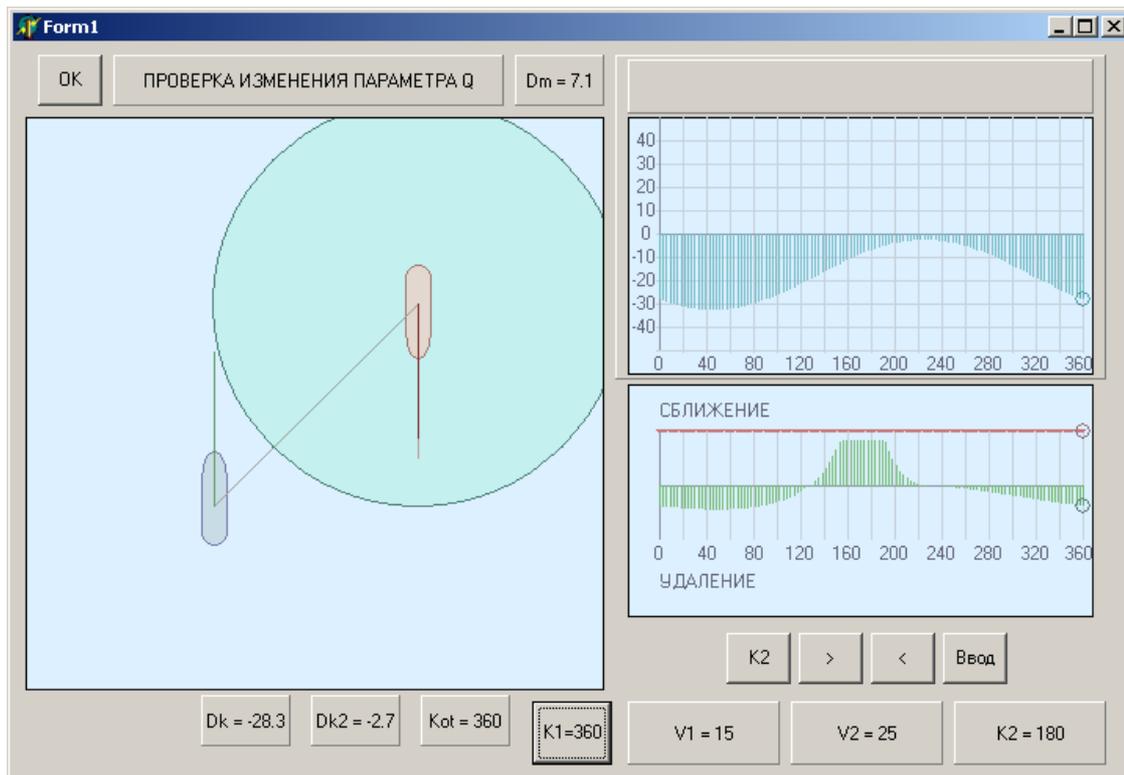


Рис. А.11. Имитационное моделирование третьей ситуации для $K_2=180$

Анализ полученных результатов для третьей ситуации при $K_2=180$ показал, что на всех курсах судна K_1 судно и цель сближаются.

На курсах K_1 от 127 до 233 дистанция кратчайшего сближения D_{\min} увеличивается с ростом курса, а на остальных курсах, т.е. $K_1 \in (233..127)$ она

убывает и ее изменение $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$ имеет отрицательный знак, т.е. справедливы

следующие соотношения:

$$\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} < 0, \text{ при } K_1 \in (233..127);$$

$$\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} > 0, \text{ при } K_1 \in (127..233).$$

Смена знака изменения D_{\min} , т.е. $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} = 0$, происходит при $K_1 = 127$,

когда $K_{ot} = 37^\circ$, при этом $D_{\min} = 1.4$ и при $K_1 = 233$, когда $K_{ot} = 323^\circ$, при этом $D_{\min} = 9.9$.

Рассмотрим третью ситуацию, когда скорость цели превосходит скорость судна, для фиксированного курса цели $K_2 = 210$, а результаты имитационного моделирования представим на рис. А.12 и в табл. А.12.

Из рис. А.12 видно, что на всех курсах судна K_1 скорость изменения дистанции \dot{D} отрицательна, т.е. судно и цель сближаются, а скорость изменения дистанции кратчайшего сближения D_{\min} , т.е. $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$ изменяет свой знак четыре раза.

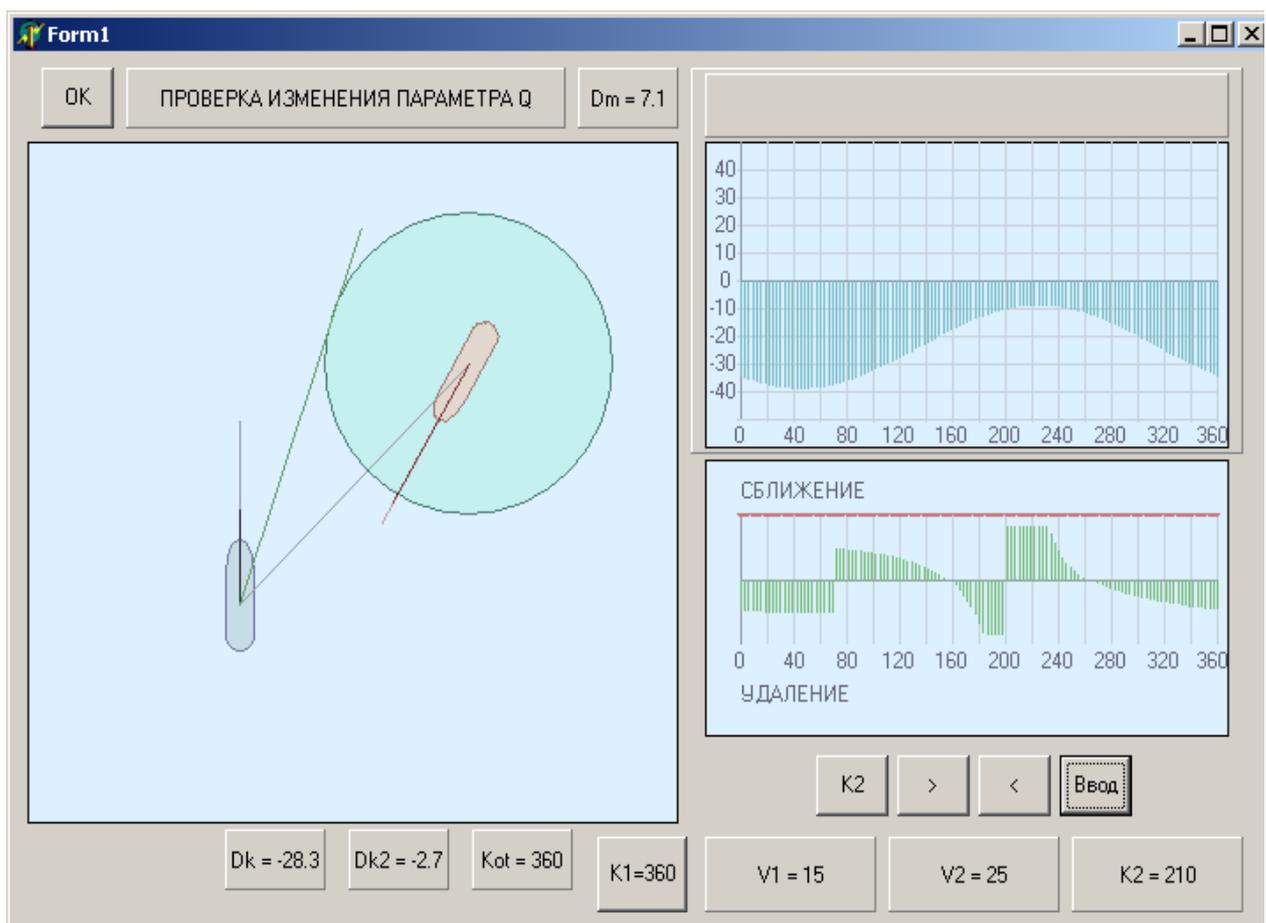


Рис. А.12. Имитационное моделирование третьей ситуации для $K_2 = 210$

Значение \dot{D} , $Dk_2 = \frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$, D_{\min} и K_{ot} при $V_1 < V_2$ и $K_2 = 210$

K_1	0	12	24	36	48	60	70	84	96	108	126
	с	с	с	с	с	с	с	с	с	с	с
\dot{D}	-35	-37	-38	-38	-39	-39	-38	-36	-34	-30	-27
Dk_2	-3.3	-3.5	-3.6	-3.7	-3.7	-3.7	-3.6	3.4	3.2	2.9	2.3
D_{\min}	4.4	3.7	2.1	2.2	1.4	0.7	0.0	0.8	1.5	2.2	3.0
K_{ot}	19	23	28	32	37	41	45	50	54	58	62
K_1	144	157	180	186	200	225	234	263	330	345	354
	с	с	с	с	с	с	с	с	с	с	с
\dot{D}	-22	-19	-14	-13	-10	-9.1	-9.3	-13	-28	-32	-34
Dk_2	1.2	0.0	-3.8	-6.9	0.0	8.9	5.2	0.0	-2.7	-3.0	-3.2
D_{\min}	3.6	3.7	2.9	2.3	0.0	5.8	6.9	7.9	5.1	5.2	4.8
K_{ot}	66	67	62	58	45	10	2	353	8	13	17

Анализ результатов моделирования для третьей ситуации при $K_2 = 210$ показал, что на курсах K_1 от 70 до 157 дистанция кратчайшего сближения D_{\min} увеличивается с ростом курса, затем на курсах с 157 до 200 дистанция кратчайшего сближения убывает, дальше с курсов судна от 200 до 263 D_{\min} снова увеличивается, а на курсах K_1 с 263 до 70 – опять убывает.

Поэтому можно записать:

$$\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} > 0, \text{ при } K_1 \in (70..157);$$

$$\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} < 0, \text{ при } K_1 \in (157..200);$$

$$\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} > 0, \text{ при } K_1 \in (200..263);$$

$$\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} < 0, \text{ при } K_1 \in (263..70).$$

Смена знака изменения D_{\min} , т.е. $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} = 0$, происходит при $K_1=70$, когда $K_{ot}=45^\circ$, при этом $D_{\min} = 0.0$ и при $K_1=156$, когда $K_{ot}=67^\circ$, при этом $D_{\min} = 3.7$.

Затем значение $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} = 0$ достигается при $K_1=200$, когда $K_{ot}=45^\circ$, при этом $D_{\min} = 0.0$ и при $K_1=264$, когда $K_{ot}=353^\circ$, при этом $D_{\min} = 7.9$.

Рассмотрим третью ситуацию, в которой скорость судна меньше скорости цели, для фиксированного курса цели $K_2=240$, а результаты имитационного моделирования представим на рис. А.13 и в табл. А.13.

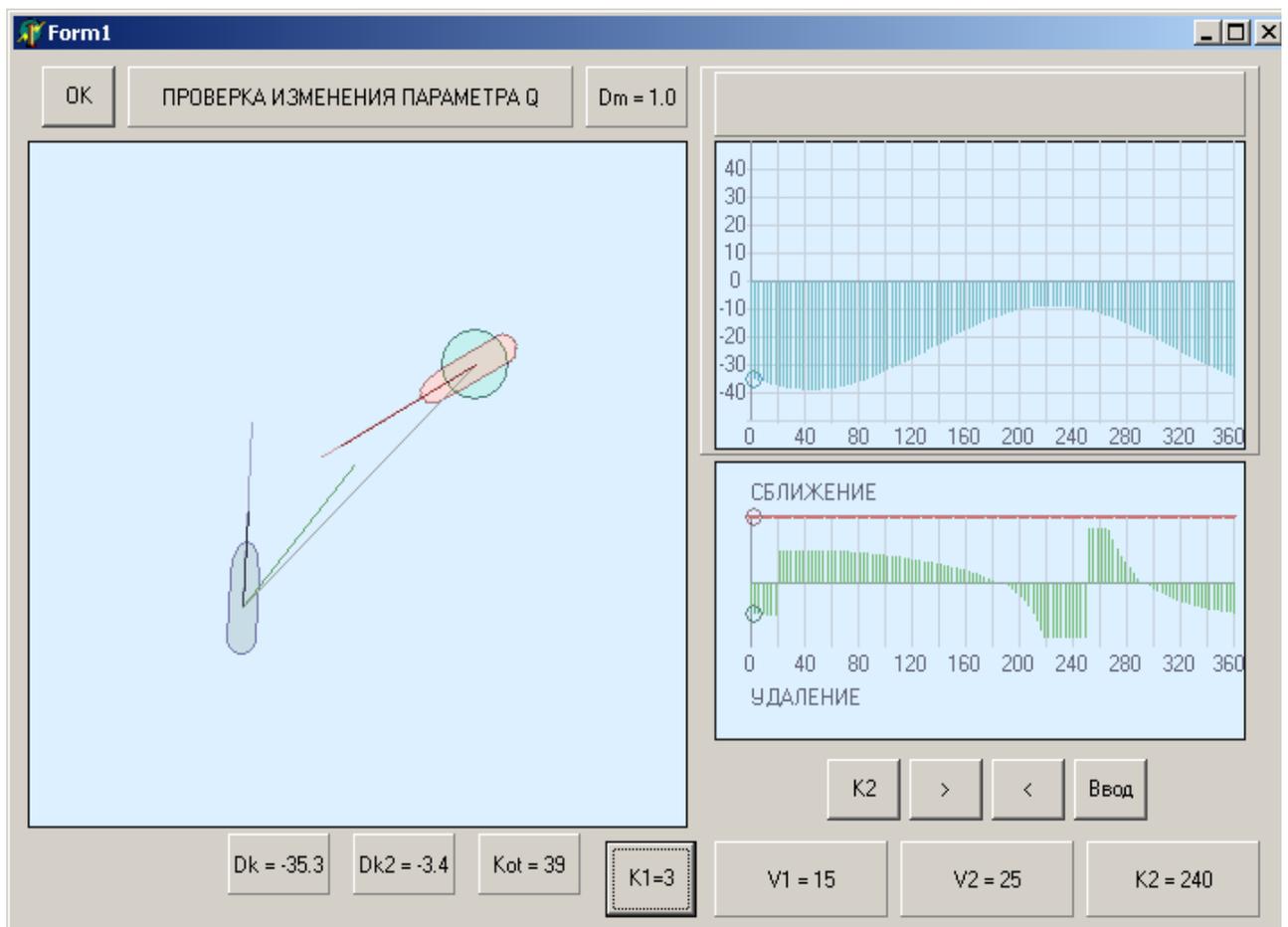


Рис. А.13. Имитационное моделирование третьей ситуации для $K_2=240$

Значение \dot{D} , $Dk_2 = \frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$, D_{\min} и K_{ot} при $V_1 < V_2$ и $K_2 = 240$

K_1	0	12	20	36	48	72	84	96	108	120	144
	с	с	с	с	с	с	с	с	с	с	с
\dot{D}	-35	-37	-38	-38	-39	-38	-36	-34	-30	-28	-22
Dk_2	-3.3	-3.5	0.0	3.7	3.7	3.5	3.4	3.2	2.1	2.7	2.0
D_{\min}	1.2	0.5	0.0	1.1	1.8	3.3	4.1	4.7	5.4	5.1	6.1
K_{ot}	38	42	45	51	55	64	69	73	78	82	89
K_1	162	174	187	210	225	246	250	270	293	339	354
	с	с	с	с	с	с	с	с	с	с	с
\dot{D}	-17	-15	-13	-9.7	-9.1	-10	-11	-14	-19	-30	-34
Dk_2	1.4	0.8	0.0	-3.4	-8.9	-14	0.0	4.2	0.0	-2.9	-3.2
D_{\min}	7.5	7.8	7.9	7.3	5.8	1.1	0.0	2.9	3.7	2.3	1.5
K_{ot}	94	96	97	92	80	51	45	28	23	32	36

Имитационное моделирование для третьей ситуации при $K_2 = 240$ показало, что на всех курсах судна K_1 судно и цель сближаются, причем на курсах K_1 от 20 до 187 дистанция кратчайшего сближения D_{\min} увеличивается с ростом курса, на курсах с 187 до 250 дистанция кратчайшего сближения D_{\min} убывает, затем с курсов судна от 250 до 293 D_{\min} опять увеличивается, а на курсах K_1 с 293 до 20 – снова убывает.

Следовательно, имеют место соотношения:

$$\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} > 0, \text{ при } K_1 \in (20..187)$$

$$\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} < 0, \text{ при } K_1 \in (187..250);$$

$$\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} > 0, \text{ при } K_1 \in (250..293)$$

$$\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} < 0, \text{ при } K_1 \in (293..20).$$

Изменение знака производной дистанции D_{\min} , т.е. $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} = 0$, происходит при $K_1=20$, когда $K_{ot}=45^\circ$, при этом $D_{\min} = 0.0$, при $K_1=187$, когда $K_{ot}=97^\circ$, при этом $D_{\min} = 7.9$.

Затем значение $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} = 0$ достигается при $K_1=250$, когда $K_{ot}=45^\circ$, при этом $D_{\min} = 0.0$ и при $K_1=293$, когда $K_{ot}=23^\circ$, при этом $D_{\min} = 3.7$.

С помощью имитационного моделирования произведем анализ третьей ситуации, в которой скорость судна меньше скорости цели, для фиксированного курса цели $K_2=270$, причем результаты имитационного моделирования представим на рис. А.14 и в табл. А.14.

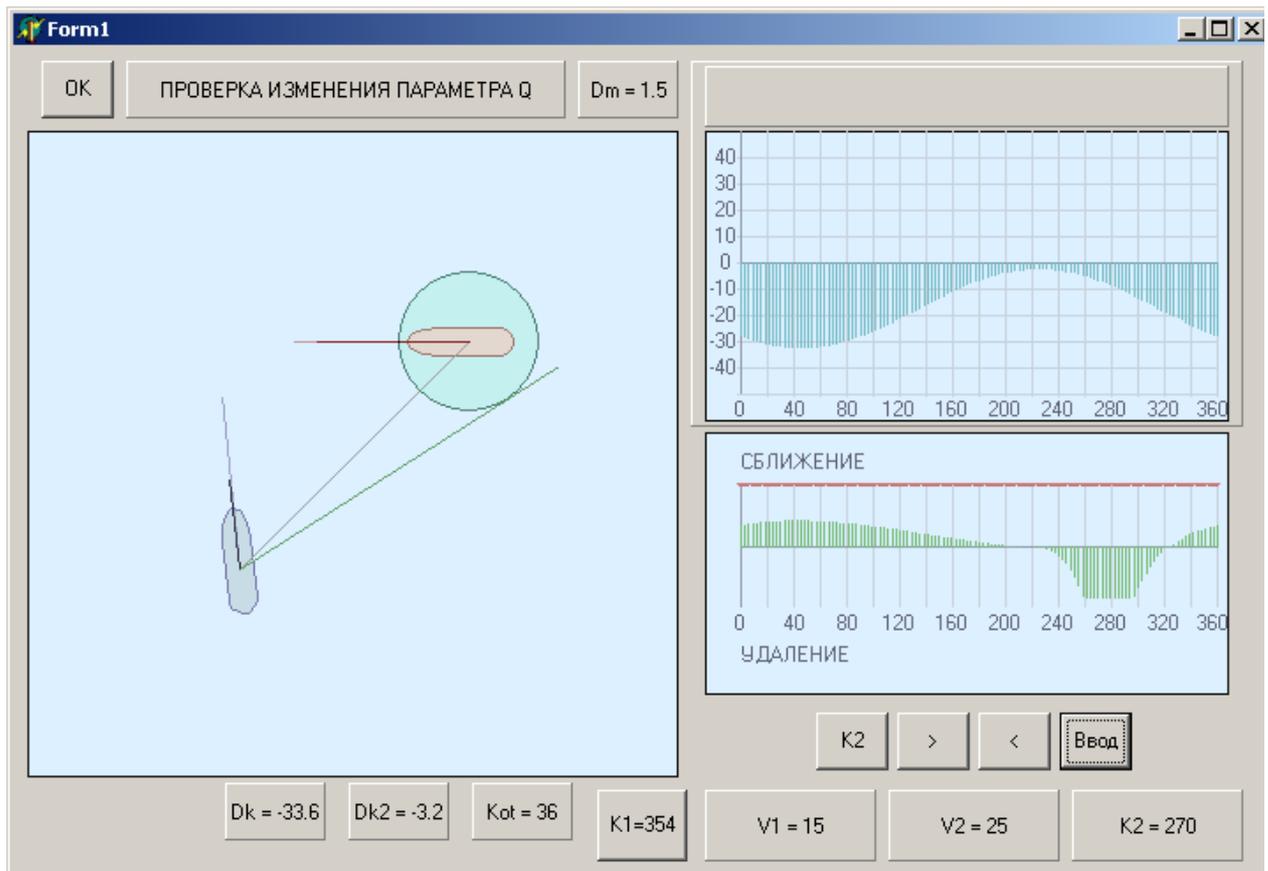


Рис. А.14. Имитационное моделирование третьей ситуации для $K_2=270$

Значение \dot{D} , $Dk_2 = \frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$, D_{\min} и K_{ot} при $V_1 < V_2$ и $K_2 = 270$

K_1	0	12	24	36	48	72	84	96	108	120	144
	с	с	с	с	с	с	с	с	с	с	с
\dot{D}	-29	-30	-32	-33	-33	-31	-29	-27	-25	-22	-15
Dk_2	2.7	2.9	2.0	1.5	3.1	2.9	2.8	2.5	2.3	2.0	1.5
D_{\min}	2.4	2.1	3.6	4.3	4.9	6.2	6.8	7.3	7.8	8.3	9.0
K_{ot}	59	62	66	70	74	83	88	92	97	101	110
K_1	162	192	204	217	225	258	273	291	323	342	354
	с	с	с	с	с	с	с	с	с	с	с
\dot{D}	-11	-5.1	-3.7	-2.9	-2.7	-5.2	-7.6	-11	-20	-25	-27
Dk_2	1.0	0.4	0.2	0.0	-0.2	-5.8	-11	7.9	0.0	1.7	2.4
D_{\min}	9.4	9.8	9.9	9.9	9.9	8.8	6.5	3.2	1.4	1.7	2.2
K_{ot}	116	124	126	127	126	107	86	64	53	55	58

Анализ полученных результатов для третьей ситуации при $K_2 = 270$ показал, что на всех курсах судна K_1 судно и цель сближаются.

На курсах K_1 от 323 до 217 дистанция кратчайшего сближения D_{\min} увеличивается с ростом курса, а на остальных курсах, т.е. $K_1 \in (217..323)$ она

убывает и ее изменение $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$ имеет отрицательный знак, т.е. справедливы

следующие соотношения:

$$\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} < 0, \text{ при } K_1 \in (217..323);$$

$$\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} > 0, \text{ при } K_1 \in (323..217).$$

Смена знака изменения D_{\min} происходит при $K_1 = 217$, когда $K_{ot} = 127^\circ$, при этом $D_{\min} = 9.9$ и при $K_1 = 323$, когда $K_{ot} = 53^\circ$, при этом $D_{\min} = 1.4$.

Рассмотрим третью ситуацию для курса цели $K_2 = 310$, а результаты имитационного моделирования приведем на рис. А.15 и в табл. А.15.

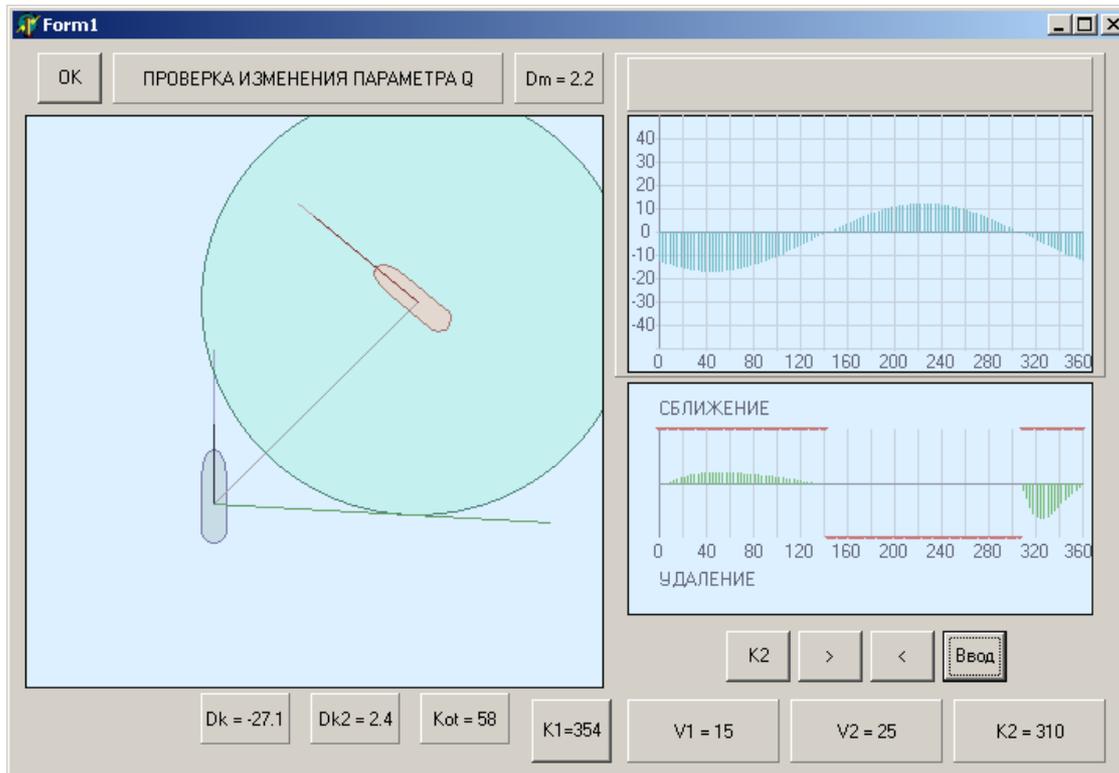


Рис. А.15. Имитационное моделирование третьей ситуации для $K_2=310$

Таблица А.15

Значение \dot{D} , $Dk2 = \frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$, D_{\min} и K_{ot} при $V_1 < V_2$ и $K_2=310$

K_1	3	12	24	36	48	72	84	96	108	143	144
	с	с	с	с	с	с	с	с	с		у
\dot{D}	-13	-15	-16	-17	-17	-16	-14	-12	-8.1	0.0	
$Dk2$	0.0	0.7	1.2	1.5	1.6	1.5	1.3	1.1	0.8	0.0	
D_{\min}	7.4	7.5	7.7	7.1	8.3	8.1	9.3	9.5	9.7	9.9	
K_{ot}	93	94	95	98	101	109	113	117	122	135	
K_1	306	307	324	330	351						
	у	с	с	с	с						
\dot{D}		0.0	-4.5	-6.1	-10						
$Dk2$		0.0	-4.7	-4.4	-1.3						
D_{\min}		9.9	9.1	8.6	7.6						
K_{ot}		131	111	105	94						

Анализ полученных результатов для третьей ситуации при $K_2=310$ показал, что на курсах K_1 от 3 до 143 на курсах сближения дистанция кратчайшего сближения D_{\min} увеличивается с ростом курса, а на курсах с

307 до 3, т.е. $K_1 \in (307..3)$ она убывает и ее изменение $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$ имеет отрицательный знак, т.е. справедливы следующие соотношения:

$$\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} < 0, \text{ при } K_2=330 \text{ и } K_1 \in (307..3);$$

$$\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} > 0, \text{ при } K_2=330 \text{ и } K_1 \in (3..143).$$

Смена знака изменения дистанции кратчайшего сближения D_{\min} , т.е. $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} = 0$, происходит при $K_1=3$, когда $K_{\text{от}}=93^\circ$, при этом $D_{\min} = 7.4$, при $K_1=143$, когда $K_{\text{от}}=135^\circ$, при этом $D_{\min} = 9.9$, при $K_1=307^\circ$, когда $K_{\text{от}}=131^\circ$, при этом $D_{\min} = 9.9$.

A2. Сравнительная характеристика результатов имитационного моделирования и аналитического расчета изменения дистанции кратчайшего сближения при изменении курса судна

В данном приложении произведено сравнение результатов имитационного моделирования, полученных в A1, с рассчитанными значениями с помощью полученных аналитических выражений, характеризующих поведение $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$ в зависимости от курса судна.

Как и в предыдущем приложении рассматривались три ситуации. Первая ситуация характеризуется равенством скоростей судна и цели, т.е. $V_1=V_2$, во второй ситуации скорость судна превосходит скорость цели $V_1>V_2$, а в третьей ситуации скорость судна меньше скорости цели $V_1<V_2$.

Рассмотрим первую ситуацию. При равенстве скоростей судна V_1 и цели V_2 условия (4.8) и (4.9) выполняются. Значения курсов судна $K_{11}..K_{16}$ определяются с помощью следующих выражений, учитывая, что $\rho=1$.

Из соотношений (4.10):

$$K_{11} = \alpha + \arccos[\cos(K_2 - \alpha)] = K_2,$$

$$K_{12} = \alpha - \arccos[\cos(K_2 - \alpha)] = 2\alpha - K_2.$$

Значения K_{13} и K_{14} находим из формул (4.11), причем:

$$K_{13} = K_2 + \arccos 1 = K_2,$$

$$K_{14} = K_2 - \arccos 1 = K_2.$$

Следовательно, $K_{13} = K_{14} = K_2$.

Из выражений (4.12) находим формулы для расчета K_{15} и K_{16} :

$$K_{15} = \alpha + \arcsin[\sin(K_2 - \alpha)] = K_2,$$

$$K_{16} = \alpha + \pi - \arcsin[\sin(K_2 - \alpha)] = 2\alpha + \pi - K_2.$$

При имитационном моделировании значение пеленга α было выбрано равным 45° , поэтому расчетные значения $K_{11}..K_{16}$ определяются следующим образом:

$$K_{11} = K_2; K_{12} = 90 - K_2; K_{13} = K_{14} = K_2; K_{15} = K_2; K_{16} = 270 - K_2. \quad (A.1)$$

В данном случае применяются следующие обозначения:

K_{1n} - левая (начальная) граница подмножества курсов сближения;

K_{1k} - правая (конечная) граница подмножества курсов сближения.;

\tilde{K}_1 - значения курса судна, при котором изменения дистанции

кратчайшего сближения $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$ плавно переходит нулевое значение;

\hat{K}_1 - значения курса судна, при котором изменения дистанции

кратчайшего сближения $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$ скачкообразно изменяет свой знак,

перескакивая нулевое значение;

\tilde{K}_1 - значения курса судна, при котором изменения дистанции кратчайшего сближения $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$ совершает единичный переход к нулевому

значению, возвращаясь к предыдущим значениям.

Для сравнения результатов имитационного моделирования с полученными аналитическими выражениями, характеризующими поведение $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$ в зависимости от курса судна, фиксировались курсы цели K_2 через 30° приводились значения K_1 , рассчитанные по (А.13), и результаты имитационного моделирования в табл.А.16 для K_2 от 0° до 90° .

Таблица А.16

Результаты расчета и имитационного моделирования для $K_2=0..90$

	Курс цели K_2											
	0	рас	мод	30	рас	мод	60	рас	мод	90	рас	мод
K_{11}	0			30			60			90		
K_{12}	90			60			30			0		
K_{13}	0			30			60			90		
K_{14}	0			30			60			90		
K_{15}	0			30			60			90		
K_{16}	270			240			210			180		
K_{1n}	0	0		30	30		30	30		0	0	
K_{1k}	90	90		60	60		60	60		90	90	
\tilde{K}_1	90	90		60	60		30	30		0	0	
\hat{K}_1	-	-		-						-		
\tilde{K}_1	-	-		30	30		60	60		90	90	
рост >0		0..90		30..60			-			-		
пад. <0		-		-			30..60			0..90		

В табл. А.17 представлено сравнение результатов имитационного моделирования и расчетных значений изменения дистанции кратчайшего сближения $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$ для курсов цели K_2 , равных 120° , 150° , 180° и 210° .

Таблица А.17

Результаты расчета и имитационного моделирования для $K_2=120..210$

	Курс цели K_2											
	120		150		180		210					
	рас	мод	рас	мод	рас	мод	рас	мод	рас	мод	рас	мод
K_{11}	120		150		180		210					
K_{12}	330		300		270		240					
K_{13}	120		150		180		210					
K_{14}	120		150		180		210					
K_{15}	120		150		180		210					
K_{16}	150		120		90		60					
K_{1n}	330	330	300	300	270	270	240	240				
K_{1k}	120	120	150	150	180	180	210	210				
\tilde{K}_1	330	330	300	300	270	270	240	240				
\hat{K}_1	-	-	120	120	90	90	60	60				
\check{K}_1	120	120	150	150	180	180	210	210				
рост >0		-	120..150		90..180		60..210					
пад. <0	330..120		300..120		270..90		240..60					

В табл. А.18 представлено сравнение результатов имитационного моделирования и расчетных значений изменения дистанции кратчайшего сближения $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$ для курсов цели K_2 , равных 240° , 270° , 300° и 330° .

Анализ таб. А.16, А.17 и А.18 показал, что имеют место следующие равенства:

$$\tilde{K}_1 = K_{12}, \hat{K}_1 = K_{16}, \check{K}_1 = K_{11}.$$

Результаты расчета и имитационного моделирования для $K_2=240..330$

		Курс цели K_2									
		240		270		300		330			
	рас	мод	рас	мод	рас	мод	рас	мод	рас	мод	
K_{11}	240		270		300		330		330		
K_{12}	210		180		150		120				
K_{13}	240		270		300		330				
K_{14}	240		270		300		330				
K_{15}	240		270		300		330				
K_{16}	30		0		330		300				
K_{1n}	240	240	270	270	300	300	330	330	330	330	
K_{1k}	210	210	180	180	150	150	120	120	120	120	
\tilde{K}_1	210	210	180	180	150	150	120	120	120	120	
\hat{K}_1	30	30	0	0	330	330	300	-			
\check{K}_1	240	240	270	270	300	300	330	330			
рост >0	30...210		0..180		330..150		330..120				
пад. <0	240..30		270..0		300..330		-				

Также установлено, что знак производной $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$ определяется

следующим образом:

$$\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} > 0 \text{ для } K_1 \in (\hat{K}_1, \tilde{K}_1); \quad \frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} < 0 \text{ для } K_1 \in (\tilde{K}_1, \hat{K}_1).$$

Произведем аналогичные исследования с помощью имитационного моделирования для второй ситуации, принимая $V_1=25$ узлов и $V_2=15$ узлов.

Отметим, что при $V_1 > V_2$ условие (4.9) не выполняется, поэтому значения курсов судна K_{13} и K_{14} не существуют.

Как и в предыдущей ситуации, при имитационном моделировании значение пеленга α было выбрано равным 45° , поэтому расчетные значения K_{11} , K_{12} , K_{15} и K_{16} определяются следующим образом:

$$\begin{aligned}
 K_{11} &= 45 + \arccos[0,6 \cos(K_2 - 45)]; \\
 K_{12} &= 45 - \arccos[0,6 \cos(K_2 - 45)]; \\
 K_{15} &= 45 + \arcsin[0,6 \sin(K_2 - 45)]; \\
 K_{16} &= 225 - \arcsin[0,6 \sin(K_2 - 45)].
 \end{aligned}
 \tag{A.2}$$

Для сравнения результатов имитационного моделирования с полученными аналитическими выражениями, характеризующими поведение $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$ в зависимости от курса судна фиксировались курсы цели K_2 через 30° и приводились значения K_1 , рассчитанные по формулам (A.2), и результаты имитационного моделирования в табл.А.19 для K_2 от 0° до 90° .

Таблица А.19

Результаты расчета и имитационного моделирования для $K_2=0..90$

	Курс цели K_2												
	0		30			60			90				
	рас	мод	рас	мод	рас	мод	рас	мод	рас	мод	рас	мод	
K_{11}	11		100		100		110						
K_{12}	34		350		350		340						
K_{15}	20		36		54		70						
K_{16}	70		54		36		20						
K_{1n}	34	340	350	350	350	350	340	340					
K_{1k}	11	110	100	100	100	100	110	110					
\tilde{K}_1	11	110, 0, 340	100, 350	100, 350	100, 350	100, 350	110, 340	110, 340					
\hat{K}_1	20	20	-	36	54	54	70	70					
рост >0	20..110		36..100			54..100			70..110				
пад. <0	340..20		350..36			350..54			340..70				

В табл. А.20 представлено сравнение результатов имитационного моделирования и расчетных значений изменения дистанции кратчайшего сближения $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$ для курсов цели K_2 , равных 120° , 150° , 180° и 210° .

Расчетные значения особых курсов судна K_{11} , K_{12} , K_{15} и K_{16} были вычислены с помощью ранее полученных аналитических выражений (А.2), определяющих границы характерных подмножеств курсов судна, на которых оно сближается с целью.

Таблица А.20

Результаты расчета и имитационного моделирования для $K_2=120..210$

	Курс цели K_2											
	120	рас	мод	150	рас	мод	180	рас	мод	210	рас	мод
K_{11}		126			306			290			280	
K_{12}		324			144			160			170	
K_{15}		80			80			70			54	
K_{16}		10			190			200			216	
K_{1n}		324	324		306	306		290	290		280	280
K_{1k}		126	126		144	144		160	160		170	170
\tilde{K}_1		126,	126,		144,	144,		160,	160,		170,	170,
		324	324		306	306		290	290		280	280
\hat{K}_1		80	80		80	80		70	70		54	54
рост >0		80..126			80..144			70..160			54..170	
пад. <0		324..80			306..80			290..70			280..54	

В табл. А.21 представлено сравнение результатов имитационного моделирования и расчетных значений изменения дистанции кратчайшего сближения $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$ для курсов цели K_2 , равных 240° , 270° , 300° и 330° .

Анализ таб. А.19, А.20 и А.21 показал, что имеют место следующие равенства:

$$\tilde{K}_1 = (K_{11}, K_{12}), \hat{K}_1 = K_{15}.$$

Таблица А.21

Результаты расчета и имитационного моделирования для $K_2=240..330$

		Курс цели K_2									
240	рас	мод	270	рас	мод	300	рас	мод	330	рас	мод
K_{11}	280			290			306			126	
K_{12}	170			160			144			324	
K_{15}	36			20			10			10	
K_{16}	234			250			260			260	
K_{1n}	280	280		290	290		306	306		324	
K_{1k}	170	170		160	160		144	144		126	
\tilde{K}_1	170, 280	170, 280		160, 290	160, 290		144, 306	144, 306		126, 324	
\hat{K}_1	36	36		20	20		10	10		10	
рост >0	36...170			20..160			10..144			10..126	
пад. <0	280..36			290..20			306..10			324..10	

Также установлено, что знак производной $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$ определяется

следующим образом:

$$\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} > 0 \text{ для курсов сближения судна от } K_1 = \hat{K}_1 \text{ до } K_1 = K_k;$$

$$\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} < 0 \text{ для курсов сближения судна от } K_1 = K_n \text{ до } K_1 = \hat{K}_1.$$

Рассмотрим третью ситуацию, когда скорость судна меньше скорости цели, т. е. $V_1 < V_2$. В этом случае условие (4.8) имеет место не для всех значений K_2 , а для тех, при которых справедливо выражение $V_2 \cos(K_2 - \alpha) \leq V_1$, или $\cos(K_2 - \alpha) \leq \rho$.

Очевидно, для курсов цели K_2 , для которых $\cos(K_2 - \alpha) \leq \rho$, судно и цель удаляются при всех значениях K_1 . Если же $\cos(K_2 - \alpha) \leq -\rho$, то судно и цель сближаются при любых K_1 , в остальных случаях судно и цель могут как сближаться, так и удаляться в зависимости от значения курса судна K_1 .

Поэтому границы K_{11} и K_{12} отсутствуют в случае:

- 1). $K_2 \in (\alpha + 2\pi - \arccos \rho, \alpha + \arccos \rho)$, когда судно и цель удаляются при всех значениях K_1 (Условие 1);
- 2). $K_2 \in [\alpha + \arccos(-\rho), \alpha + 2\pi - \arccos(-\rho)]$, при сближении курса и цели независимо от курса судна K_1 (Условие 2).

При значениях курсов цели K_2 , удовлетворяющих условиям:

- 1). $K_2 \in [\alpha + \arccos \rho, \alpha - \arccos(-\rho)]$ (Условие 3),
- 2). $K_2 \in [\alpha + 2\pi - \arccos(-\rho), \alpha + 2\pi - \arccos \rho]$ (Условие 4),

судно и цель могут сближаться или удаляться в зависимости от курса судна K_1 , причем существуют границы K_{11} и K_{12} , которые определяются выражениями:

$$\begin{aligned} K_{11} &= \alpha + \arccos[\rho^{-1} \cos(K_2 - \alpha)], \\ K_{12} &= \alpha - \arccos[\rho^{-1} \cos(K_2 - \alpha)], \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

причем $-1 \leq \rho^{-1} \cos(K_2 - \alpha) \leq 1$.

Условие (4.9) в рассматриваемой ситуации выполняется, поэтому значения K_{13} и K_{14} существуют и определяются выражениями:

$$\begin{aligned} K_{13} &= K_2 + \arccos \rho, \\ K_{14} &= K_2 - \arccos \rho. \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

Корни K_{15} и K_{16} рассчитываются с помощью выражений:

$$\begin{aligned} K_{15} &= \alpha + \arcsin[\rho^{-1} \sin(K_2 - \alpha)], \\ K_{16} &= \alpha + \pi - \arcsin[\rho^{-1} \sin(K_2 - \alpha)]. \end{aligned} \quad (\text{A.5})$$

Затем производилось сравнение результатов имитационного моделирования с полученными аналитическими выражениями, характеризующими поведение $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$ в зависимости от курса судна. Для этого для фиксированных курсов цели K_2 через 30° приводим значения K_1 , рассчитанные по формулам (A.3), (A.4) и (A.5), а результаты имитационного моделирования представлены в табл. A.22 для K_2 от 0° до 90° .

Для имитационного моделирования третьей ситуации принимаем $V_1=15$ узлов и $V_2=25$ узлов. Поэтому $\rho=0,6$, $\arccos\rho=53^\circ$ и $\arccos(-\rho)=233^\circ$.

Как и в предыдущей ситуации, при имитационном моделировании значение пеленга α было выбрано равным 45° , поэтому условия сближения и удаление судна с целью в зависимости от курса цели K_2 принимают следующий вид:

Условие 1. $K_2 \in [352, 98]$ - судно и цель только удаляются при всех K_1 ;

Условие 2. $K_2 \in [172, 278]$ - судно и цель только удаляются при всех K_1 ;

При этих условиях значения K_{11} и K_{12} отсутствуют.

Условие 3. $K_2 \in [98, 172]$ - судно и цель удаляются или сближаются в зависимости от значения K_1 ;

Условие 4. $K_2 \in [278, 352]$ - судно и цель удаляются или сближаются в зависимости от значения K_1 .

При соблюдении условия 3 или условия 4 значения K_{11} и K_{12} вычисляются с помощью формул:

$$K_{11} = 45 + \arccos[1,66\cos(K_2 - 45)];$$

$$K_{12} = 45 - \arccos[1,66\cos(K_2 - 45)],$$

при этом должно выполняться неравенство $-1 \leq 1,66\cos(K_2 - 45) \leq 1$.

Значения K_{13} и K_{14} рассчитываются по выражениям:

$$K_{13} = K_2 + 53;$$

$$K_{14} = K_2 - 53.$$

Корни K_{15} и K_{16} рассчитываются с помощью выражений:

$$K_{15} = 45 + \arcsin[1,66\sin(K_2 - \alpha)],$$

$$K_{16} = 225 - \arcsin[1,66\sin(K_2 - \alpha)],$$

при этом должно выполняться неравенство $-1 \leq 1,66\sin(K_2 - \alpha) \leq 1$.

Так как судно и цель для курсов K_2 до 98° только удаляются, то в табл. А.22 приводятся значения курса цели, начиная с 100° .

Таблица А.22

Результаты расчета и имитационного моделирования для $K_2=100..170$

	Курс цели K_2											
	100	рас	мод	130	рас	мод	160	рас	мод	170	рас	мод
K_{11}		63			127			270			243	
K_{12}		27			323			180			207	
K_{13}		153			183			213			223	
K_{14}		47			77			107			117	
K_{15}		-			-			-			-	
K_{16}		-			-			-			-	
K_{1n}		27	27		127	127		180			207	207
K_{1k}		63	63		323	323		270			243	243
\tilde{K}_1		-	-		77,	77,		107,			117,	117,
					127,	127,		180,			207,	207,
					323	323		270			243	243
\hat{K}_1		-	-		-	-		-			-	-
рост >0		-			77..127			107..180			117..207	
пад. <0		-			323..77			270..107			243..117	

В табл. А.23 представлено сравнение результатов имитационного моделирования и расчетных значений изменения дистанции кратчайшего

сближения $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$ для курсов цели K_2 , равных 180° , 210° , 240° и 270° .

Таблица А.23

Результаты расчета и имитационного моделирования для $K_2=180..270$

	Курс цели K_2											
	180	рас	мод	210	рас	мод	240	рас	мод	270	рас	мод
K_{11}	-			-			-			-		
K_{12}	-			-			-			-		
K_{13}	233			263			293			323		
K_{14}	127			157			187			217		
K_{15}	-			70			20			-		
K_{16}	-			200			250			-		
K_{1n}	-	-		-			-	-	-	-	-	-
K_{1k}	-	-		-			-	-	-	-	-	-
\tilde{K}_1	127,	127,		157,			187,	187,	187,		217,	217,
	233	233		263			293	293	293		323	323
\hat{K}_1	-	-		70,			20,	20,	20,		-	-
				200			250	250	250			
рост	127..233			70..157			20..187			323..217		
>0				200..263			250..293					
пад.	233..127			157..200			187..250			217..323		
<0				263..70			293..20					

В табл. А.24 представлено сравнение результатов имитационного моделирования и расчетных значений изменения дистанции кратчайшего

сближения $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$ для курсов цели K_2 , равных 280° , 310° и 340° .

Анализ таб. А.22, А.23 и А.24 показал, что имеют место следующие равенства:

$$\tilde{K}_1 = (K_{11}, K_{12}, K_{13}), \quad \hat{K}_1 = (K_{15}, K_{16}).$$

Также установлено, что знак производной $\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1}$ определяется

следующим образом:

Результаты расчета и имитационного моделирования для $K_2=240..330$

		Курс цели K_2						
	рас	мод	310	рас	мод	340	рас	мод
K_{11}	243			307			90	
K_{12}	207			143			0	
K_{13}	333			3			33	
K_{14}	227			257			287	
K_{15}	-			-			-	
K_{16}	-			-			-	
K_{1n}	207	207		143	143		0	0
K_{1k}	243	243		307	307		90	90
\tilde{K}_1	207, 333	207, 333		3, 143, 307	3, 143, 307		0, 33, 90	0, 33, 90
\hat{K}_1	-	-		-	-		-	-
рост >0	333..207			3..143			33..90	
пад. <0	243..333			307..3			0..33	

Если \hat{K}_1 существует, то:

$$\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} > 0 \text{ для курсов сближения судна от } K_1 = \hat{K}_1 \text{ до } K_1 = K_k;$$

$$\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} < 0 \text{ для курсов сближения судна от } K_1 = K_n \text{ до } K_1 = \hat{K}_1.$$

Если \hat{K}_1 не существует, то при наличии K_{1n} и K_{1k}

$$\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} > 0 \text{ для курсов сближения судна от } K_1 = K_{14} \text{ до } K_1 = K_k;$$

$$\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} < 0 \text{ для курсов сближения судна от } K_1 = K_n \text{ до } K_1 = K_{14}.$$

Если \hat{K}_1 , K_{1n} и K_{1k} не существует, когда судно и цель только сближаются, то:

$$\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} > 0 \text{ для курсов сближения судна от } K_1 = K_{14} \text{ до } K_1 = K_{13};$$

$$\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} < 0 \text{ для курсов сближения судна от } K_1 = K_{13} \text{ до } K_1 = K_{14}.$$

ПРИЛОЖЕНИЕ Б.

Б1. Программный код процедуры идентификации начальной ситуации

```
unit Unit_Bz;

interface

uses

  Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs,
  ExtCtrls, StdCtrls;

type

  TForm1 = class(TForm)
    ImageBz: TImage;
    Panel1: TPanel;
    Panel2: TPanel;
    ScrollBar1: TScrollBar;
    ButtonV: TButton;
    ButtonT: TButton;
    PanelT: TPanel;
    PanelV: TPanel;
    PanelSt: TPanel;
    ButtonM: TButton;
    ButtonS: TButton;
    ButtonF: TButton;
    ButtonH: TButton;
    ButtonMan: TButton;
    ButtonC: TButton;
    Panel3: TPanel;
    ButtonOK: TButton;
    Panel4: TPanel;
    Panel5: TPanel;
    Panel6: TPanel;
    PanelD: TPanel;
    PanelB: TPanel;
    ButtonD: TButton;
    ButtonB: TButton;
    ButtonDd: TButton;
    PanelDd: TPanel;
```

```
Panel10: TPanel;
Panel11: TPanel;
Panel7: TPanel;
Panel8: TPanel;
ButtonVv: TButton;
ButtonKv: TButton;
PanelVv: TPanel;
PanelKv: TPanel;
ButtonVc: TButton;
ButtonKc: TButton;
PanelVc: TPanel;
PanelKc: TPanel;
ButtonVis: TButton;
PanelDm: TPanel;
ImagePv: TImage;
Panel9: TPanel;
Panel12: TPanel;
Panel13: TPanel;
Panel14: TPanel;
Panel15: TPanel;
ButtonSail: TButton;
ButtonEnd: TButton;
Timer1: TTimer;
ButtonTimer: TButton;
ButtonRet: TButton;
ImageQ: TImage;
ButtonCtrl: TButton;
Panel16: TPanel;
procedure FormCreate(Sender: TObject);
procedure ButtonVClick(Sender: TObject);
procedure ButtonMClick(Sender: TObject);
procedure ButtonSClick(Sender: TObject);
procedure ButtonFClick(Sender: TObject);
procedure ButtonHClick(Sender: TObject);
procedure ButtonManClick(Sender: TObject);
procedure ButtonCClick(Sender: TObject);
procedure ButtonOKClick(Sender: TObject);
procedure ButtonTClick(Sender: TObject);
procedure ButtonDClick(Sender: TObject);
procedure ButtonVisClick(Sender: TObject);
procedure ScrollBar1Scroll(Sender: TObject; ScrollCode: TScrollCode;
    var ScrollPos: Integer);
```

```

procedure ButtonBClick(Sender: TObject);
procedure ButtonDdClick(Sender: TObject);
procedure ButtonVvClick(Sender: TObject);
procedure ButtonVcClick(Sender: TObject);
procedure ButtonKvClick(Sender: TObject);
procedure ButtonKcClick(Sender: TObject);
procedure ImageBzMouseMove(Sender: TObject; Shift: TShiftState; X,
    Y: Integer);
procedure ButtonSailClick(Sender: TObject);
procedure ButtonEndClick(Sender: TObject);
procedure Timer1Timer(Sender: TObject);
procedure ButtonTimerClick(Sender: TObject);
procedure ButtonRetClick(Sender: TObject);
procedure ButtonCr1Click(Sender: TObject);
private
    { Private declarations }
public
    { Public declarations }
end;

type
Pt = array[0..120] of TPoint;
APt = array[0..30] of TPoint;
var
    Form1: TForm1;
    FirstBmp,CopyBmp,CopyBmp1 : TBitmap;
    StrM : array [1..6] of string;
    IndOk,IndV,IndT,ro,rv,rt,IndScroll,B,Sw,sv,Bv,Lv,L1,L2 : byte;
    D,V1,V2,Ddop,Kot,Vot,Dm,Vd,maxDm,Dk2,Dm0: real;
    Pel,K1,K2,Xv,Yv,Xc,Yc,t,q1,q2,q3,w1,w2,w3,IndMv,IndMt,K21,Roll : Integer;
    {a1,b1,a2,b2 : Integer;}
    St,Count : byte;
    StrR : string;
    Re,ReV: Pt;
    Re1 : APt;
    gamv,gamc,Wndv,Wndc,IndTimer,IndV1,IndRol : byte;
    K10,K20,a1,b1,a2,b2,Xv1,Xc1,Yv1,Yc1 : array[1..3] of Integer;
    S1,S2 : array[1..3] of byte;

implementation

{$R *.DFM}

```

```

uses Unit_2D;

procedure TForm1.FormCreate(Sender: TObject);
var
  StrF :string[2];
  StrD :string[1];

begin
  FirstBmp := TBitmap.Create;
  FirstBmp.Width:=800;
  FirstBmp.Height:=600;

  CopyBmp := TBitmap.Create;
  CopyBmp.Width:=800;
  CopyBmp.Height:=600;

  CopyBmp1 := TBitmap.Create;
  CopyBmp1.Width:=800;
  CopyBmp1.Height:=600;

  Form1.Left:=0;
  Form1.Top:=0;
  {Form1.Color:=RGB(190,190,190);}

  IndOk:=0; IndV:=0; IndT:=0; IndScroll:=0; D:=7.6; Pel:=45;
  K1:=30; V1:=12.7; K2:=230; V2:=17.3; Ddop:=1.5; B:=1; t:=0;
  Bv:=20; L1:=25; L2:=10; Lv:=80;
  gamv:=1; gamc:=1; Wndv:=1; Wndc:=2; IndTimer:=0; IndV1:=0; IndRol:=1;
  Count:=0; Roll:=1;

  StrM[1]:= 'Ñóáíí ñ íãðàíè÷ãñèèì ààèãàòãèàì';
  StrM[2]:= 'Ìàðóñííà ñóáíí';
  StrM[3]:= 'Ðúáíèíâííà ñóáíí';
  StrM[4]:= 'Ñóáíí, ñòãñíáííâ ìñàãèé';
  StrM[5]:= 'Ñóáíí, íãðàíè÷ãñííâ â âíçíæíñòè ìáíááðèðíààòù';
  StrM[6]:= 'Ñóáíí, èèòáííâ âíçíæíñòè òíðáãèÿòüñý';

  ButtonM.Caption:=StrM[1];
  ButtonS.Caption:=StrM[2];
  ButtonF.Caption:=StrM[3];
  ButtonH.Caption:=StrM[4];
  ButtonMan.Caption:=StrM[5];

```

```
ButtonC.Caption:=StrM[6];
```

```
{PanelSt.Visible:=False;}
```

```
(*ColorRect(FirstBmp,ImageBz,0,0,369,369,RGB(220,240,255 {50,50,70}),0);
```

```
Xv:=185+Round(18.5*D*sin((Pel+180)/57.3)/2); Yv:=185-Round(18.5*D*cos((Pel+180)/57.3)/2);
```

```
Xc:=185+Round(18.5*D*sin(Pel/57.3)/2); Yc:=185-Round(18.5*D*cos(Pel/57.3)/2);
```

```
with ImageBz.Canvas do
```

```
begin
```

```
Font.Color:=TColor(RGB(150,150,100));
```

```
Font.Size:=16;
```

```
Font.Style:=[fsBold];
```

```
Pen.Color:=TColor(RGB(120+40,120+40,160+40));
```

```
Brush.Style:=bsClear;
```

```
Ellipse(Xv-30,Yv-30,Xv+30,Yv+30);
```

```
Ellipse(Xv-15,Yv-15,Xv+15,Yv+15);
```

```
Pen.Color:=TColor(RGB(160+40,120+40,120+40));
```

```
Ellipse(Xc-30,Yc-30,Xc+30,Yc+30);
```

```
Ellipse(Xc-15,Yc-15,Xc+15,Yc+15);
```

```
ColorLine(FirstBmp,ImageBz,Xc,Yc,Xv,Yv,RGB(160,160,160),1,0);
```

```
ColorLine(FirstBmp,ImageBz,Xv,Yv,Xv+Round(100*sin(K1/57.3)),
```

```
Yv-Round(100*cos(K1/57.3)),RGB(160,160,200),1,0);
```

```
ColorLine(FirstBmp,ImageBz,Xv,Yv,Xv+Round(2.5*V1*sin(K1/57.3)),
```

```
Yv-Round(2.5*V1*cos(K1/57.3)),RGB(50,50,70),1,0);
```

```
ColorLine(FirstBmp,ImageBz,Xc,Yc,Xc+Round(100*sin(K2/57.3)),
```

```
Yc-Round(100*cos(K2/57.3)),RGB(200,160,160),1,0);
```

```
ColorLine(FirstBmp,ImageBz,Xc,Yc,Xc+Round(2.5*V2*sin(K2/57.3)),
```

```
Yc-Round(2.5*V2*cos(K2/57.3)),RGB(150,50,50),1,0);
```

```
end;*)
```

```
ImageBz.Visible:=False;  
ButtonV.Enabled:=False;  
end;
```

```
procedure TForm1.ButtonVClick(Sender: TObject);
```

```
begin  
if IndOk=1 then  
begin  
IndV:=1;  
ButtonM.Enabled:=True;  
ButtonS.Enabled:=True;  
ButtonF.Enabled:=True;  
ButtonH.Enabled:=True;  
ButtonMan.Enabled:=True;  
ButtonC.Enabled:=True;  
{ButtonOK.Enabled:=True;}  
ButtonVis.Visible:=False;  
end;  
if IndOk=3 then  
begin  
IndV:=0;  
  
end;  
end;
```

```
procedure TForm1.ButtonMClick(Sender: TObject);
```

```
begin  
ro:=1;  
ButtonOK.Enabled:=True; ButtonV.Enabled:=False; ButtonT.Enabled:=False;  
if IndV=1 then  
begin  
PanelV.Caption:=StrM[1];  
end;  
if IndT=1 then  
begin  
PanelT.Caption:=StrM[1];  
end;  
end;
```

```
procedure TForm1.ButtonSClick(Sender: TObject);
```

```
begin
```

```

ro:=2;
{ButtonOK.Enabled:=True;} ButtonV.Enabled:=False; ButtonT.Enabled:=False;
if IndV=1 then
  begin
  PanelV.Caption:=StrM[2];
  ButtonSail.Visible:=True;
  end;
if IndT=1 then
  begin
  PanelT.Caption:=StrM[2];
  if rv=2 then ButtonSail.Visible:=True
  else ButtonOK.Enabled:=True;

  end;

end;

```

```

procedure TForm1.ButtonFClick(Sender: TObject);
begin
ro:=3;
ButtonOK.Enabled:=True; ButtonV.Enabled:=False; ButtonT.Enabled:=False;
if IndV=1 then
  begin
  PanelV.Caption:=StrM[3];
  end;
if IndT=1 then
  begin
  PanelT.Caption:=StrM[3];
  end;
end;

```

```

procedure TForm1.ButtonHClick(Sender: TObject);
begin
ro:=4;
ButtonOK.Enabled:=True; ButtonV.Enabled:=False; ButtonT.Enabled:=False;
if IndV=1 then
  begin
  PanelV.Caption:=StrM[4];
  end;
if IndT=1 then
  begin

```

```

    PanelT.Caption:=StrM[4];
    end;
end;

procedure TForm1.ButtonManClick(Sender: TObject);
begin
    ro:=5;
    ButtonOK.Enabled:=True; ButtonV.Enabled:=False; ButtonT.Enabled:=False;
    if IndV=1 then
        begin
            PanelV.Caption:=StrM[5];
            end;
        if IndT=1 then
            begin
                PanelT.Caption:=StrM[5];
                end;
            end;
        end;

procedure TForm1.ButtonCClick(Sender: TObject);
begin
    ro:=6;
    ButtonOK.Enabled:=True; ButtonV.Enabled:=False; ButtonT.Enabled:=False;
    if IndV=1 then
        begin
            PanelV.Caption:=StrM[6];
            end;
        if IndT=1 then
            begin
                PanelT.Caption:=StrM[6];
                end;
            end;
        end;
        { OK }

procedure TForm1.ButtonOKClick(Sender: TObject);
label 1;
var
    StrF,StrD :string[2];
    StrF1 :string[3];
    StrF2 :string[5];
    StrQ1,StrQ2,StrQ3 :string[2];
    Rc,Rc1 : word;
    i,Rd,Gr,Bl,s : byte;
    maxDm1,maxDm2,Kotmx,Kotmn,X,Y,Dt,Dk,Dk1,Dk12 : real;

```

Xn,Yn,Xa1,Ya1,Xa2,Ya2,{a,K,V,R,} Xr,Yr,al,Xk,Yk,Xb1,Xb2,Xs,Ys,Rdo : Integer;

L,Alf : array[0..120] of real;

StrX,StrY : array[1..10] of string[3];

Xp : array[1..12] of word;

Kmn,K11,K12,K13,K14,K15,K16,a12,b12 :real;

So,Co,psi: real;

begin

if IndOK=0 then

begin

{ButtonV.Enabled:=True;}

ButtonVis.Visible:=False;

end;

if IndOk=1 then

begin

if IndV=1 then

begin

rv:=ro;

end;

ButtonV.Enabled:=False;

ButtonT.Enabled:=True;

ButtonSail.Visible:=False;

ButtonM.Enabled:=False;

ButtonS.Enabled:=False;

ButtonF.Enabled:=False;

ButtonH.Enabled:=False;

ButtonMan.Enabled:=False;

ButtonC.Enabled:=False;

ButtonOK.Enabled:=False;

IndV:=0;

end;

if IndOk=2 then

begin

if B=0 then

begin

PanelV.Caption:='İàðàìáòðû äâèæáíèý ñóäíà ÿðè ñíèèæáííé âèèèìñòè';

PanelT.Caption:='İàðàìáòðû äâèæáíèý öâèè ÿðè ñíèèæáííé âèèèìñòè';

ButtonVis.Visible:=False;

```

end;
if IndT=1 then
begin
rt:=ro;
end;
PanelSt.Visible:=False;
ButtonV.Enabled:=False;

Panel3.Caption:='ÁÂÃ Ä Å × Æ Ë Ì Í Î Ï Ñ Ò Ó Ä Ö È Ë';
{ButtonV.Enabled:=True;}
ButtonD.Enabled:=True;
ButtonB.Enabled:=True;
ButtonDd.Enabled:=True;

ButtonVv.Enabled:=True;
ButtonKv.Enabled:=True;
ButtonVc.Enabled:=True;
ButtonKc.Enabled:=True;

ButtonSail.Visible:=False;

{ButtonOK.Enabled:=False;}

Str(Trunc(D),StrF);
Str(10*(D-Trunc(D)),StrD);

PanelD.Caption:=StrF+'!'+StrD;

Str(Trunc(Ddop),StrF);
Str(10*(Ddop-Trunc(Ddop)),StrD);
PanelDd.Caption:=StrF+'!'+StrD;

Str(Trunc(V1),StrF);
Str(10*(V1-Trunc(V1)),StrD);
PanelVv.Caption:=StrF+'!'+StrD;

Str(Trunc(V2),StrF);
Str(10*(V2-Trunc(V2)),StrD);
PanelVc.Caption:=StrF+'!'+StrD;

Str(Pel,StrF1);
PanelB.Caption:=StrF1;

```

```

Str(K1,StrF1);
PanelKv.Caption:=StrF1;

Str(K2,StrF1);
PanelKc.Caption:=StrF1;
ScrollBar1.Visible:=True;

KotVot(K1,K2,V1,V2,Kot,Vot);

Dm:=Abs(D*sin((Pel-Kot)/57.3));

Str(Trunc(Dm),StrF);
Str(10*(Dm-Trunc(Dm)),StrD);
PanelDm.Caption:='Dm = '+StrF+'.'+StrD;

ImageBz.Visible:=True;

ColorRect(FirstBmp,ImageBz,0,0,369,369,RGB(220,240,255{50,50,70}),0);

Xv:=185+Round(18.5*D*sin((Pel+180)/57.3)/2); Yv:=185-Round(18.5*D*cos((Pel+180)/57.3)/2);
Xc:=185+Round(18.5*D*sin(Pel/57.3)/2); Yc:=185-Round(18.5*D*cos(Pel/57.3)/2);
Rc:=Round(18.5*Ddop); Rc1:=Round(18.5*Ddop/2);

Ship(FirstBmp,ImageBz,IndOk,Lv,Bv,L1,L2,Xv,Yv,K1,Xc,Yc,K2,V1,V2);

with ImageBz.Canvas do
begin
Font.Color:=TColor(RGB(255,10,10));
Font.Size:=16;
Font.Style:=[fsBold];
Brush.Color:=TColor(RGB(220,240,255));
if Dm<Ddop then TextOut(50,50,'DANGER');
Pen.Color:=TColor(RGB(160,160,200));
Brush.Style:=bsClear;

Ellipse(Xv-30,Yv-30,Xv+30,Yv+30);

```

```

Ellipse(Xv-15,Yv-15,Xv+15,Yv+15);

Pen.Color:=TColor(RGB(140,120,120));
Brush.Color:=TColor(RGB(250,200,200));

Pen.Mode:=pmMask;

Ellipse(Xc-Rc,Yc-Rc,Xc+Rc,Yc+Rc);

Brush.Color:=TColor(RGB(250,150,150));

Ellipse(Xc-Rc1,Yc-Rc1,Xc+Rc1,Yc+Rc1);

Pen.Mode:=pmCopy;
ColorLine(FirstBmp,ImageBz,Xv,Yv,Xv+Round((18.5*D+30)*sin(Kot/57.3)),
Yv-Round((18.5*D+30)*cos(Kot/57.3)),RGB(100,160,100),1,0);

ColorLine(FirstBmp,ImageBz,Xc,Yc,Xv,Yv,RGB(160,160,160),1,0);

ColorLine(FirstBmp,ImageBz,Xv,Yv,Xv+Round(100*sin(K1/57.3)),
Yv-Round(100*cos(K1/57.3)),RGB(160,160,200),1,0);
ColorLine(FirstBmp,ImageBz,Xv,Yv,Xv+Round(2.5*V1*sin(K1/57.3)),
Yv-Round(2.5*V1*cos(K1/57.3)),RGB(50,50,70),1,0);

ColorLine(FirstBmp,ImageBz,Xc,Yc,Xc+Round(100*sin(K2/57.3)),
Yc-Round(100*cos(K2/57.3)),RGB(200,160,160),1,0);
ColorLine(FirstBmp,ImageBz,Xc,Yc,Xc+Round(2.5*V2*sin(K2/57.3)),
Yc-Round(2.5*V2*cos(K2/57.3)),RGB(150,50,50),1,0);

end;

IndOK:=3;
goto 1;
end;
if IndOK=10 then
begin
ButtonSail.Caption:='Íá ááòðó';
ButtonOK.Enabled:=False;
end;
if IndOK=3 then
begin
Panel3.Caption:='ÊÏÐÄÈËÐÓÐÙÈÀ ÑÈÃÍÛÊÛ ÑÓÃÎ';

```

```

ScrollBar1.Visible:=False;
ButtonVv.Visible:=False;
ButtonKv.Visible:=False;
ButtonV.Visible:=False;
ButtonVc.Visible:=False;
ButtonKc.Visible:=False;
ButtonT.Visible:=False;
ButtonD.Visible:=False;
ButtonB.Visible:=False;
ButtonDd.Visible:=False;
PanelVc.Visible:=False;
PanelKc.Visible:=False;
PanelVv.Visible:=False;
PanelKv.Visible:=False;
Panel10.Visible:=False;
Panel11.Visible:=False;
PanelD.Visible:=False;
PanelB.Visible:=False;
PanelDd.Visible:=False;

```

```

PanelV.Left:=3;
PanelV.Top:=3;
PanelV.Width:=306;
PanelV.Height:=35;

```

```

{K1:=215; V1:=17.3; D:=8.5; Pel:=45; Ddop:=1.5;
K2:=15; V2:=21.8; Sw:=1; } {gamv:=1; gamc:=1; Wndv:=1; Wndc:=2; B:=1;

```

```

rv:=1; rt:=1;}
Vd:=-V1*cos((Pel-K1)/57.3)-V2*cos((K2-(Pel+180))/57.3);

```

```

if V1<V2 then
begin
Kotmx:=K2+180+ArcSin(V1/V2);
maxDm1:=Abs(D*sin((Kotmx-Pel)/57.3));
Kotmn:=K2+180-ArcSin(V1/V2);
maxDm2:=Abs(D*sin((Kotmn-Pel)/57.3));
if maxDm1>maxDm2 then maxDm:=maxDm1
else maxDm:=maxDm2;
end

```

```

else maxDm:=D;

if Vd>0 then St:=0
else
  begin
  if B=1 then
    begin
    if Dm>Ddop then St:=1
    else
      begin
      if maxDm>Ddop then
        begin
          St:=2; Sw:=1;
        end
      else
        begin
          if maxDm>Ddop/2 then
            begin
              St:=3; Sw:=2;
            end
          else St:=4; {÷ðâçîâðíîâ ñâèèæâíèèâ}
          end;
        end;
      end;

  if (St=2) or (St=3) then
    begin
    if (sin((Pel+67.5-K2)/57.3)>0) and (sin((K2+67.5-Pel)/57.3)>0) then St:=5 {îâîîîÿpùââ}
    else
      begin
      if (sin((Pel-112.5-K1)/57.3)>0) and (sin((K1+247.5-Pel)/57.3)>0) then St:=6 {îâîîîÿâîîâ}
      else
        if rv<rt then St:=7 {ðâçîúâ ñòàòòñû}
        else
          begin
          if rv>2 then St:=8 {îâèîâèîâîé ñòàòòñ âíèüøâ 2}
          else
            begin
            if rv=1 then
              begin
              if (cos((Pel-K1)/57.3)>=0.996) and (cos((Pel+180-K2)/57.3)>=0.996) then St:=9 {îâðâîèè-âñèèèâ
èîîððîèèóðñ}
              else

```

```

begin
if sin((Pel-K1)/57.3)*sin((Pel+180-K2)/57.3)>0 then {iã iãðãñãéãpòñý }
begin
if sin((Pel-K1)/57)>0 then St:=16 {öãëü ñiðãää }
else St:=17; {öãëü ñëää }
end
else
begin
if sin((Pel-K1)/57)>0 then St:=10 {iãðãñã÷ãíèã ñiðãää }
else St:=11; {iãðãñã÷ãíèã ñëää }
end;
end;
end
else
begin
if gamv=gamc then
begin
if Wndv=1 then St:=12 {iã äãòðã}
else St:=13; {iã äãòði }
end
else
begin
if gamv=1 then St:=15 {iðããúé äãèñ}
else St:=14; {ëããúé äãèñ}
end;
end;
end;
end;
end;
end
else {iïèæãííãý äèèiñòü}
begin
if ((cos((Pel-K1)/57.3)>0) and (sin((Pel+67.5-K2)/57.3)<0)
and (sin((K2+67.5-Pel)/57.3)<0)) then St:=18
else
begin
if cos((Pel-K1)/57.3)<0 then
begin
if sin((Pel-K1)/57.3)>0 then St:=19
else St:=20;
end
end
end

```

```

else
  begin
    St:=21;
    end;
end;

end;
end;

Str(St,StrF);
PanelDm.Caption:='St'+StrF;

Rd:=120; Gr:=140; Bl:=155;
ImagePv.Visible:=True;
ColorRect(FirstBmp,ImagePv,0,0,297,161,RGB(Rd+100,Gr+100,Bl+100),0);

for i:=1 to 10 do
  begin
    ColorLine(FirstBmp,ImagePv,i,160-i,297-i,160-i,RGB(Rd+10*i,Gr+10*i,Bl+10*i),1,0);
    ColorLine(FirstBmp,ImagePv,i,i,296-i,i,RGB(Rd+10*i,Gr+10*i,Bl+10*i),1,0);
    ColorLine(FirstBmp,ImagePv,i,i,i,160-i,RGB(Rd+10*i,Gr+10*i,Bl+10*i),1,0);
    ColorLine(FirstBmp,ImagePv,296-i,i,296-i,160-i,RGB(Rd+10*i,Gr+10*i,Bl+10*i),1,0);
  end;

  {St:=19;}

Rules(FirstBmp,ImagePv,St,rv,rt,Sw,StrR,q1,q2,q3,w1,w2,w3);

PanelV.Caption:= StrR;

Str(Trunc(V1),StrF);
Str(10*(V1-Trunc(V1)),StrD);

Str(K1,StrF1);

PanelT.Left:=3;
PanelT.Top:=3;
PanelT.Width:=307;
PanelT.Height:=27;
if B=1 then PanelT.Caption:=StrM[rv]

```

else PanelT.Caption:='Ñóáíí ìðè ñíèæáííé àèàèìñòè';

Panel7.Left:=43;

Panel7.Top:=33;

Panel7.Width:=227;

Panel7.Height:=27;

Panel7.Caption:='ÑÓÄÍÍ Ê1 = '+StrF1+' V1 = '+StrF+'.'+StrD;

Panel8.Left:=18;

Panel8.Top:=63;

Panel8.Width:=277;

Panel8.Height:=27;

Str(q1,StrQ1); Str(q2,StrQ2); Str(q3,StrQ3);

Panel8.Caption:='Êíñðäèìèðòðùèà ñèàíàèù q1 = '+StrQ1+' q2 = '+StrQ2+' q3 = '+StrQ3;

Str(K2,StrF1);

Str(Trunc(V2),StrF);

Str(10*(V2-Trunc(V2)),StrD);

Panel9.Left:=3;

Panel9.Top:=98;

Panel9.Width:=307;

Panel9.Height:=27;

if B=1 then Panel9.Caption:=StrM[rt]

else Panel9.Caption:='Öâëü ìðè ñíèæáííé àèàèìñòè';

Panel9.Visible:=True;

Panel12.Left:=43;

Panel12.Top:=129;

Panel12.Width:=227;

Panel12.Height:=27;

Panel12.Caption:='ÖÅËÛ Ê2 = '+StrF1+' V2 = '+StrF+'.'+StrD;;

Panel12.Visible:=True;

Panel13.Left:=18;

Panel13.Top:=160;

Panel13.Width:=277;

Panel13.Height:=27;

Str(w1,StrQ1); Str(w2,StrQ2); Str(w3,StrQ3);

Panel13.Caption:='Êñðäëíèðùèà ñëãíäëû q1 = '+StrQ1+' q2 = '+StrQ2+' q3 = '+StrQ3;

Panel13.Visible:=True;

Str(Trunc(D),StrF);

Str(10*(D-Trunc(D)),StrD);

Panel4.Caption:='Äëñòàíîèÿ=' + StrF+'.'+StrD;

Str(Pel,StrF1);

Panel5.Caption:='Ïâëãíã = '+ StrF1;

Str(t,StrF2);

Panel6.Caption:='Ăđâÿ = '+ StrF2;

ImageBz.Visible:=True;

ColorRect(FirstBmp,ImageBz,0,0,369,369,RGB(220,240,255 {50,50,70}),0);

Bv:=20; L1:=25; L2:=10; Lv:=80;

if B=1 then

Ship(FirstBmp,ImageBz,3,Lv,Bv,L1,L2,Xv,Yv,K1,Xc,Yc,K2,V1,V2)

else

begin

Ship(FirstBmp,ImageBz,2,Lv,Bv,L1,L2,Xv,Yv,K1,Xc,Yc,K2,V1,V2);

end;

IndOK:=4;

goto 1;

end;

if IndOK=4 then

begin

Panel3.Caption:='ÐĂÄËÀÍÁÍÒÈÐÓÀÏÛĂ ÓËËÏÁÍÈß';

ColorRect(FirstBmp,ImageBz,0,0,369,369,RGB(255,255,255),0);

Bv:=10; L1:=12; L2:=5; Lv:=40;

Vsl(FirstBmp,ImageBz,1,Lv,Bv,L1,L2,Xv,Yv,K1,V1,0,Xn,Yn,Xk,Yk,Xs,Ys);

Vsl(FirstBmp,ImageBz,0,Lv,Bv,L1,L2,Xc,Yc,K2,V2,0,Xn,Yn,Xk,Yk,Xs,Ys);

ColorLine(FirstBmp,ImageBz,Xv,Yv,Xv+Round(100*sin(K1/57.3)),

Yv-Round(100*cos(K1/57.3)),RGB(160,160,200),1,0);

```
ColorLine(FirstBmp,ImageBz,Xc,Yc,Xc+Round(100*sin(K2/57.3)),  
Yc-Round(100*cos(K2/57.3)),RGB(200,160,160),1,0);  
for i:=1 to 3 do  
  begin  
    Xv1[i]:=Xv; Yv1[i]:=Yv; Xc1[i]:=Xc; Yc1[i]:=Yc;  
  end;  
  
ButtonTimer.Visible:=True;  
end;
```

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Акты внедрения результатов диссертации

**ЦЕНТР ПІДГОТОВКИ
МОРЯКІВ-«АВАНТ»**

68001, м. Іллічівськ
сmt. Олександрівка, вул. Перемоги, 93,
Тел./факс: +38 (048) 718-37-92
Email: info@avant.od.ua
Web: www.tcsavant.com



**TRAINING CENTER
OF SEAFARERS-“AVANT”**

93, Peremogy str., smt. Oleksandrivka,
Illichivsk, 68001, Ukraine
Tel./fax: +38 (048) 718-37-92
Email: info@avant.od.ua
Web: www.tcsavant.com

от 27.05.2014 № *116/4-05-2014*

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Настоящим актом удостоверяется, что в ООО «ЦЕНТР ПОДГОТОВКИ МОРЯКОВ-«АВАНТ» получили внедрение следующие результаты диссертационной работы Бужбецкого Ростислава Юрьевича на тему «Совершенствование методов предупреждения столкновения судов с учетом особенностей их взаимодействия»:

- формальная модель МППСС-72 и координируемость взаимодействий, регламентируемых МППСС-72;
- формальная модель МППСС-72 и определена координируемость взаимодействий, регламентируемых МППСС-72.

Директор
ООО «ЦПМ-«АВАНТ»



Ю. С. Васильева



ТОВ "МОРСЬКЕ АГЕНТСТВО "УКРАЇНА"



Код ЄДРПОУ 21028445,
вул. Преображенська, 1
м. Одеса, Україна, 65082,
тел.: +38 (0482) 378 578 (5 ліній)
факс: +38 (0482) 345 332
e-mail: mau@mau.com.ua
www.mau.com.ua
Ліцензія Міністерства Праці та
Соціальної політики АВ № 487510



ISO 9001:2000
Quality System Certified

№ 78/14 от «29» мая 2014 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Настоящим актом удостоверяется, что в компании ООО «Морское Агентство «Украина» получил внедрение способ идентификации ситуаций опасного сближения, предусмотренных МППСС-72 и реализовавшегося бинарного взаимодействия, разработанный в диссертационной работе Бужбецкого Ростислава Юрьевича на тему „Совершенствование методов предупреждения столкновения судов с учетом особенностей их взаимодействия”.

Метод используется при подготовке грузовых помощников капитана компании.

Д.И. Грошев
Генеральный Директор





А К Т

про використання результатів дисертаційної роботи здобувача Бужбецького Ростислава Юрійовича на тему „Вдосконалення методів попередження зіткнення суден з урахуванням особливостей їх взаємодії” у навчальному процесі академії

Ми, що нижче підписалися, начальник навчального відділу Пархоменко М.М., декан судноводійного факультету д. т. н., професор Цимбал М.М. і завідувач кафедри Управління судном д. т. н., професор Мальцев А.С.. склали цей акт в тому, що результати кандидатської дисертації здобувача Бужбецького Ростислава Юрійовича на тему „Вдосконалення методів попередження зіткнення суден з урахуванням особливостей їх взаємодії” впроваджені у навчальний процес на кафедрі Управління судном в розділах дисципліни „Міжнародні правила попередження зіткнень суден у морі та використання РЛС і ЗАРП при розходженні суден”.

Начальник навчального
відділу
Декан судноводійного факультету,
д.т.н., професор
Завідувач кафедри Управління
судном, д.т.н., професор

М.М. Пархоменко

М.М. Цимбал

А.С. Мальцев