

Министерство науки и образования Украины
Национальный университет «Одесская морская академия»

На правах рукописи

Булгаков Александр Юрьевич



УДК 656.61.052.484

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ВЫБОРА СТРАТЕГИИ РАСХОЖДЕНИЯ
СУДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБЛАСТЕЙ ОПАСНЫХ КУРСОВ**

Специальность 05.22.13 – навигация и управление движением

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
к. т. н., доцент Бурмака И.А.

Одесса – 2016

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПО ПРОБЛЕМЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ СУДОВОЖДЕНИЯ И ВЫБОР ТЕМЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ.....	11
1.1. Обзор литературных источников по решению проблемы обеспечения безаварийного плавания судов.....	11
1.2. Обоснование основного направления диссертационного исследо- вания.....	34
1.3. Выводы по первой главе	35
ГЛАВА 2. МЕТОДОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИ- ОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ	36
2.1. Выбор темы научного исследования.....	36
2.2. Методы исследования, применяемые в диссертационной работе	38
2.3. Методика проведения исследования по теме диссертационной работы	44
2.4. Выводы по второй главе	46
ГЛАВА 3. ФОРМАЛИЗАЦИЯ СИТУАЦИИ ОПАСНОГО СБЛИЖЕНИЯ ГРУППЫ СУДОВ.....	47
3.1. Определение взаимодействующей группы судов в ситуации воз- никновения угрозы столкновения	47
3.2. Влияние параметров движения пары судов на изменение относи- тельного курса и дистанции кратчайшего сближения.....	55

3.3. Использование недопустимой области курсов двух судов для выбора безопасного маневра расхождения изменением курсов.....	76
3.4. Выводы по третьей главе.....	82
ГЛАВА 4. УПРАВЛЕНИЕ ГРУППОЙ СУДОВ В СИТУАЦИИ ОПАСНО- ГО СБЛИЖЕНИЯ	84
4.1. Принцип выбора стратегии расхождения группы судов.....	84
4.2. Стратегия расхождения трех судов изменением их курсов	89
4.3. Формализация задачи определения оптимального вектора управ- ления.....	95
4.4. Определение параметров оптимального маневра расхождения с помощью графического способа компьютерного моделирования.....	118
4.5. Выводы по четвертой главе	127
ГЛАВА 5. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СПОСОБА УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОЙ СУДОВ ПРИ ОПАСНОМ СБЛИЖЕНИИ.....	128
5.1. Выбор оптимального вектора управления способом компьютерно- го сканирования опасных областей парных маневров.....	128
5.2. Реализация графического способа определения оптимального ма- невра расхождения группы судов с помощью компьютерного мо- делирования.....	134
5.3. Выводы по пятой главе	164
ВЫВОДЫ.....	166
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	169

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Фрагмент кода программы имитационного моделирования по выбору оптимального маневра расхождения группы судов изменением курсом.....	186
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Акты внедрения результатов диссертации.....	248

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Одной из важнейших является проблема обеспечение безопасности судовождения, - от ее успешного решения зависит уменьшение количества аварийных случаев и, как следствие, снижение вреда человеческой жизни, окружающей среде, имуществу и производственным процессам.

Интенсивное судоходство и навигационные опасности осложняют плавание морских судов в стесненных условиях и создают предпосылки для возникновения аварийных ситуаций. Стесненные воды являются сложнейшими по своим условиям районами плавания, в которых происходит свыше 80 % всех навигационных аварий, что свидетельствует не только о большой сложности условий плавания, но и о несовершенстве методов судовождения в таких районах, делая определяющими в обеспечении безопасности судовождения личные и профессиональные качества судоводителей.

В настоящее время стесненные районы плавания с особенно интенсивным движением оборудуются станциями управления движением судов (СУДС), которые предназначены для контроля процесса судовождения и управления движением опасно сближающихся судов. Поэтому разработка способов управления опасно сближающимися судами, чему посвящена данная работа, является актуальным и перспективным научным направлением.

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), решения Совета национальной безопасности и обороны Украины от 16.05.2008 г. «О мероприятиях по обеспечению развития Украины как морского государства» (указ Президента Украины от 20.05.2008 г. №463/2008), а также в рамках планов научных исследований Одесской

национальной морской академии по госбюджетным теме "Разработка методов обеспечения безаварийного плавания судов" (№ ГР 0111U001610, 2012 г.), в которой соискатель выполнил отдельный раздел.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационного исследования является обеспечение безопасности судовождения путем разработки метода выбора стратегии расхождения с помощью областей опасных курсов судов.

Рабочая гипотеза исследования заключается в существовании возможности внешним управлением производить выбор маневра расхождения группы судов изменением курсов с помощью областей опасных курсов.

Главная задача исследования заключается в разработке алгоритма выбора маневра расхождения при внешнем управлении с помощью областей опасных курсов судов.

Решение главной задачи достигнуто путем исследования составных задач:

- формализация области опасных курсов двух судов;
- разработка графического способа компьютерного моделирования для выбора оптимального маневра расхождения;
- разработка способа сканирования плоскостей с областями опасных курсов для выбора маневра расхождения.

Объектом исследования диссертации является предупреждение столкновений судов.

Предметом исследования являются методы выбора безопасного маневра расхождения судна.

Методы исследования. В диссертационном исследовании для поиска решений поставленных задач были применены методы:

- дедукции при анализе основных подходов решения проблемы безопасности судовождения;
- системного анализа для выбора темы диссертационной работы и при формировании технологии научного исследования;

- исследования операций для декомпозиции главной задачи диссертации на независимые составные задачи;
- математического анализа для поиска зависимости дистанции кратчайшего сближения и параметров относительного движения от курсов и скоростей судов;
- аналитической геометрии для формализации области опасных курсов двух судов.

Научная новизна полученных результатов заключается в создании нового метода выбора безопасной стратегии расхождения группы судов в стесненных районах, который отличается принципом внешнего управления при использовании областей опасных курсов судов.

В диссертационной работе:

- впервые разработан способ аналитического описания области опасных курсов пары судов и отображение ее на расширенной плоскости их курсов;
- впервые создан графический способ компьютерного моделирования для выбора оптимального маневра расхождения группы судов изменением их курсов;
- получили дальнейшее развитие методы предупреждения столкновения судов разработкой способа сканирования плоскостей с областями опасных курсов для выбора маневра расхождения.

Практическое значение полученных результатов заключается в том, что они могут быть использованы разработчиками в новых поколениях САРП, а также в СУДС для управления опасно сближающимися судами.

Практические результаты диссертационного исследования внедрены в производственную деятельность учебно-тренажерного центра «Альфа-Трейнинг» для обучения, подготовки и переподготовки офицеров морских судов по направлению «Судовождения» с целью обеспечения безопасности плавания (акт внедрения от 23.11.2015 г.), частного высшего учебного заведе-

ния «Институт последипломного образования» «Одесский морской тренажерный центр» для подготовки судоводительского плавсостава (акт внедрения от 16.11.2015 г.), Материалы диссертационного исследования используются в научных исследованиях Одесской национальной морской академии (акт внедрения от 07.12.2015 г.), а также в учебном процессе при преподавании дисциплины «Забезпечення навігаційної безпеки плавання» (акт от 12.11.2015 г.).

Личный вклад соискателя. Вся диссертационная работа выполнена диссертантом самостоятельно без соавторов: соискателем проведен информационный поиск и выполнен анализ основных подходов решения проблемы обеспечения безопасности судовождения, обеспечено методологическое обоснование диссертационного исследования, разработан и изложен метод выбора безопасной стратегии расхождения судна с опасной целью путем применения областей опасных курсов пары судов, отображенных на расширенных плоскостях их курсов, выполнено имитационное моделирование, внедрены результаты работы в производственный процесс. Из научных работ, опубликованных в соавторстве, в диссертации использованы только те положения, которые принадлежат автору лично: формирование маневра расхождения группы судов с позиций внешнего управления [105], определение взаимодействующей группы судов в районе контроля СУДС [143], процедура расчета границ области опасных курсов пары судов [146], способ выбора маневра расхождения судов изменением их курсов [147], использование областей опасных курсов судов при расхождении трех судов [148], процедура управления группой судов в ситуации опасного сближения [149], способ формализации множества опасно сближающихся судов [151], принцип внешнего управления движением судов в районах контроля СУДС [153], выбор маневра расхождения нескольких судов изменением курсов [154], определение параметров маневра расхождения нескольких судов [156] и принцип формирования оптимального вектора управления судами для безопасного расхождения [158].

Апробация результатов диссертации. Основные результаты и положения работы докладывались, обсуждались и были одобрены на научно-практических, научно-технических и научно-методических конференциях: научно-техническая конференция «Эффективная и безопасная эксплуатация морских судов и сооружений» (Севастополь, 23-25 сентября 2009 г.), «Сучасні проблеми підвищення безпеки судноводіння» (Одесса, 7-8 октября 2009 г.), научно-техническая конференция «Судноплавство: перевезення, технічні засоби, безпека» (Одесса, 19-20 ноября 2013 г.), научно-техническая конференция «Эффективная и безопасная эксплуатация морских судов и сооружений» (Севастополь, 2-4 октября 2013 г.), Всеукраинская научно-техническая конференция «Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд» (Николаев, 21-23 мая 2014 г.), VI Международная научно - практическая конференция «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2014)» (Херсон, 27-29 мая. 2014 г.), научно-техническая конференция « Морські перевезення та інформаційні технології в судноплавстві» (Одесса, 18-19 ноября 2014 г.), Всеукраинская научно - техническая конференция «Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд» (Николаев, 20-22 мая 2015г.), научно - практическая конференция «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2015)» (Херсон, 26-28 мая, 2015 г.).

Публикации. По результатам выполненных исследований автором опубликовано 19 научных работ (из них 8 единолично), в том числе: в научных профильных изданиях, входящих в перечень МОН Украины — 8 научных статей [143–148, 150, 160]; в зарубежных научных профильных изданиях — 2 научных статьи [149, 161]; в 1 монографии [105], в сборниках материалов научных конференций — 8 тезисов докладов [151–158].

Структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных литературных источников (159 наименований)

и двух приложений. Общий объем работы составляет 252 страниц и содержит 61 рисунок и 2 таблицы, в частности: 168 страниц основного текста, 18 страниц списка использованных источников, 66 страниц приложений.

ГЛАВА 1

АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПО ПРОБЛЕМЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ СУДОВОЖДЕНИЯ И ВЫБОР ТЕМЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1.1. Обзор литературных источников по решению проблемы обеспечения безаварийного плавания судов.

Как показал обзор и анализ литературных источников, проблема обеспечения безаварийного плавания судов решается по следующим направлениям:

1. Разработка мер по предупреждению столкновений судов.
2. Использованием систем управления движением судов (СУДС).
3. Применение современных информационно - управляющих технологий и средств для обеспечения безопасности судовождения.
4. Повышение точности определения места судна.

В работах [1-12] рассмотрены основные аспекты проблемы обеспечения безопасности судовождения.

Предупреждение столкновений судов в прибрежных районах интенсивного судоходства является центральной проблемой обеспечения безаварийного судовождения.

Рассмотрим основные концепции формирования безопасной стратегии расхождения опасно сближающихся судов для различных ситуаций.

Сотрудниками Института проблем управления в работах [13-15] исследовались вопросы расхождения судна с одиночной целью. В рассматриваемых математических моделях не учитывались навигационные опасности и инерционные характеристики маневрирующего судна. При этом параметры движения встречной цели считались неизменными. В данных работах рассмотрены зависимости между истинными и относительными

параметрами движения оперирующего судна для различных случаев. Получены аналитические выражения, описывающие допустимые области безопасных курсов и скоростей маневрирующих судов в функции их начального относительного положения и параметров движения. Задача в предлагаемой постановке решена корректно с помощью методов оптимального управления.

В работах [16, 17] сотрудниками Томского университета предложено решение задачи синтеза оптимального управления судна при расхождении методами теории оптимальных дискретных процессов. В поставленной задаче делаются допущения об отсутствии внешних возмущений и неизменности скоростей и курсов встречных судов. Учитываются ограничения по безопасному расхождению со встречными судами, по максимальному изменению начального курса, боковому отклонению и максимальной величине угловой скорости.

Обобщенный учет динамики оперирующего судна, как и учет условий района плавания и судоходной обстановки являются особенностями решения поставленной задачи при данном подходе. Поиск локально оптимальной безопасной траектории расхождения судна с целями производится с использованием ЭВМ.

Математическая формулировка задачи заключается в следующем. В районе плавания имеется n судов A_j с заданными скоростями V_j . В интервале времени $[0 - T]$ расхождение оперирующего судна A с остальными судами A_j считается безопасным, если текущая дистанция между оперирующим судном и другими судами превосходит предельно-допустимую дистанцию сближения. В задаче рассматриваются три критерия оптимальности: критерий минимума переключений руля (МПР), критерий минимального среднеквадратического отклонения судна от заданной траектории (МОТ) и критерий минимального среднеквадратического отклонения судна от заданного курса (МОК).

В качестве управляющего воздействия (управления) выбрана угловая скорость $u(t)$ оперирующего судна при неизменном модуле его скорости. Постановка оптимизационной задачи производится следующим образом. Среди допустимых управлений $u(t)$ необходимо найти оптимальное управление $u(t)_{\text{оп}}$ и оптимальную траекторию $x(t)_{\text{оп}}$, которые минимизируют функционал:

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

где $\varphi = u(t)$, при использовании критерия оптимальности МПР;

$\varphi = x_1(t)$, в случае выбора критерия оптимальности МОТ;

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

В работе показано, что для сформулированной постановки задачи справедлива теорема о достаточных условиях существования оптимального управления, т. е. оно существует, если для данного начального состояния $x(0)$ существует хотя бы одно допустимое управление. Из-за аналитического вида критерия оптимальности и накладываемых ограничений решение задачи в явном виде невозможно и приводится алгоритм ее численного решения, использующий аппарат теории оптимальных дискретных процессов.

С помощью метода возможных направлений, который реализован на ЭВМ, разработаны идентичные алгоритмы поиска оптимального управления $u(t)_{\text{оп}}$ по каждому из критериев (МПР, МОТ, МОК). Согласно алгоритмам вначале находится хотя бы одно допустимое управление $u(t)$, относительно которого методом итераций производится поиск оптимального управления без нарушения принятых ограничений. При обновлении информации задача решается заново.

Процесс расхождения судов в работах ученых ЛЭТИ [18-23] и профессора J. Lisowski [24] описывается, как взаимодействие конфликтующих сторон, причем конфликт возникает на почве пересечения

интересов экономичности движения (в обоих случаях в качестве критерия оптимальности выбрано расстояние до пункта назначения).

Вначале рассмотрим исследования, которые выполнены в ЛЭТИ под руководством академика Фрейдзона И.Р., результаты которого опубликованы в работах [18-23].

В работе [18] изложен начальный этап исследований, который характерен попыткой формализации процесса расхождения судна с n целями методами теории оптимального управления с учетом требований МППСС-72.

В работе для решения задачи расхождения предложена двухшкальная система управления, которая при помощи модели динамического состояния управляемого судна и алгоритма поиска безопасного маневра позволяет прогнозировать движение судна и опасных целей при заданных возмущениях и различных управляющих воздействиях. В этом случае по принятому критерию оптимальности можно определить требуемые управляющие воздействия.

Для реализации алгоритма управления судном используется быстродействующая часть системы, которая включает процедуру поиска безопасного маневра, модель управляющего судна и модели управляющих устройств, которые работают в режиме периодического решения задачи в ускоренном масштабе времени.

В работе предложен вариант формализации МППСС, который в качестве выхода содержит логические переменные, позволяющие определять возможность изменения курса вправо и влево, уступить дорогу или сохранять параметры движения при допущении, что параметры движения судов, с которыми решается задача расхождения, неизменные, а предельно-допустимые дистанции кратчайшего сближения с судами известные.

В процессе решения задачи для каждого из встречных судов по исходным данным находится допустимая область W_i курсов K и скоростей V оперирующего судна, которая разбивается на две области W_{1i} и W_{2i} по

признаку стороны изменения курса судна (вправо или влево) по отношению к начальному.

Формальное описание МППСС-72 производится введением логической функции пяти двоичных переменных, которые характеризуют как относительное положение судна и цели, так и параметры их движения. Отворот судна вправо необходим при значении логической функции равном 1, и, следовательно, выбора значений K и V из допустимой области W_{1i} . Для каждого из судов вводится характеристика опасности, зависящая от дистанции, времени кратчайшего сближения, а также от предельно-допустимой дистанции кратчайшего сближения и времени торможения или циркуляции.

Алгоритм поиска маневра расхождения заключается в следующем. Вначале определяется допустимая область W_{g1} для наиболее опасного судна, затем производится поиск допустимой области $W_{g12} = W_{g1} \cap W_{g2}$, являющейся пересечением уже найденной области W_{g1} с допустимой областью W_{g2} следующего по опасности судна. В дальнейшем процедура пересечения допустимых областей с учетом требований МППСС-72 продолжается вплоть до последнего судна.

Описанным образом с помощью описанного алгоритма формируется безопасная область курсов K и скоростей V судна, решающего задачу расхождения с учетом начальной относительной позиции окружающих судов и существенных ограничений, накладываемых требованиями МППСС-72 и допустимыми дистанциями кратчайшего сближения.

Из сформированной области допустимых курсов K и скоростей V производится выбор оптимального маневра, причем в работе критерием оптимальности является проекция скорости движения оперирующего судна на направление его программного движения, а ограничениями являются линейные неравенства, формализующие безопасное расхождение судна с

каждой из целей. Для поиска решения предлагается использовать метод линейного программирования.

После выбора оптимального безопасного маневра, т. е. пары V и K , поиск соответствующих значений управляющих воздействий u (угла кладки руля и оборотов двигателя) производится с помощью модели управляемого движения судна, которая учитывает динамику оперирующего судна.

С появлением теории позиционных дифференциальных разностных игр появился новый подход к пониманию и формализации процесса расхождения, основанный на методах теории игр. Поэтому первоначальная модель в дальнейшем была значительно дополнена, причем дальнейшее развитие анализируемой модели производилось в направлении использования методов позиционных дифференциально-разностных игр и нашло свое отражение в работах [19-21].

В предлагаемой математической модели оперирующее судно и все цели представляются в виде динамической системы, текущее состояние которой, определенное с помощью датчиков навигационной информации оперативного судна, описывается фазовым вектором X , который изменяется во времени в соответствии с дифференциальным уравнением движения.

Фазовые координаты оперирующего судна имеют ограничения, обусловленные особенностями района плавания. Наклаываются также ограничения на управляющий вектор оперирующего судна, учитывающие возможности оперирующего судна, требования МППСС и условия безопасности расхождения, т. е. $D_j(t) \geq D_{\text{dop}}$.

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

Как и в работе [18] задача поиска оптимальных значений позиционной стратегии u , , редуцируется к задаче линейного программирования, для чего

нелинейные ограничения по безопасности расхождения и учета навигационных опасностей линеаризуются.

Позиционная стратегия оперирующего судна и представлена проекциями его скорости, что требует поиска значений управляющих воздействий (угла кладки руля и оборотов винта), обеспечивающих 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 [18].

Отметим, что применение дифференциальных игр к формализации процесса расхождения также подробно рассмотрено в работе [24].

Сотрудниками Института Кибернетики им. В.М. Глушкова АН Украины, был выполнен ряд работ [25-39], посвященных применению метода нелинейной интегральной инвариантности [25,26] для описания процесса расхождения судов и создания системы предупреждения столкновений.

Метод нелинейной интегральной инвариантности [26] позволяет синтезировать стратегию управления динамической системой, обеспечивающую инвариантность некоторых фазовых координат управляемой системы относительно возникающих внешних возмущений.

В качестве внешнего возмущения в рассматриваемой задаче расхождения рассмотрен $2n$ -мерный вектор скоростей и курсов n встречных судов, затрудняющих движение оперирующего судна, а инвариантными координатами выбраны расстояния от оперирующего судна до встречных судов. Автор допускает, что с помощью упомянутого метода, задавая возможные наихудшие для процесса расхождения значения V и K каждого из встречных судов, можно найти допустимую область одношаговых стратегий оперирующего судна, которые обеспечивают расхождение со всеми судами на заданных допустимых расстояниях. В качестве

одношаговых стратегий предполагается изменение только одного параметра движения судна (скорости или курса).

Кратко изложим рассматриваемый подход к описанию процесса расхождения, анализируя работы [27, 28]. В предлагаемом подходе учет и алгоритмизация МППСС-72 производятся 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. Вторым параметром пары S – множество функций выбора альтернатив в различных ситуациях сближения, которые необходимо построить, считая их функциями формального аргумента.

Так как МППСС-72 применяется при расхождении только пар судов, т.е. они носят характер бинарной координации, то в работах рассмотрена система парных отношений на множестве всех наблюдаемых судов и композиции, порождаемых ими функций. При этом фиксируется судно, относительно которого необходимо решать задачу выбора, и выделяется множество сближающихся с ним судов.

При решении задачи расхождения указанным способом возможно противоречие по отворотам вправо и влево. Для этого задаются функции выбора на объединениях различных классов встречных целей.

Ряд особенностей задачи расхождения судов в море освещен в монографии [40], приведены результаты разработки и анализа метода предупреждения столкновения судов путем смещения на параллельную линию пути. В работе 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.

В работе [41] отражены основные направления обеспечения безаварийного плавания судов.

Различные аспекты проблемы оценки ситуации расхождения судов рассмотрены в работах [42-45], а в работах [46-50] представлены подробные исследования ситуации опасного сближения пары судов, причем рассмотрены условия существования множества безопасных маневров расхождения и выбор оптимального маневра.

Как отмечается в работах [51, 52], практическая реализация предлагаемых современных теоретических концепций создания систем синтеза безопасного маневра, встречает значительные затруднения в части синтеза множества безопасных маневров расхождения, удовлетворяющих накладываемым ограничениям по безопасному расхождению с целями, учету навигационных опасностей и мешающих судов, а также не противоречат МППСС-72. В данных работах предложен способ индивидуального учета каждого из перечисленных ограничений, после чего был разработан метод их совместного учета. Причем стратегией расхождения является маневр изменением курса, который может содержать несколько участков уклонения и участка возвращения на заданную траекторию движения.

Работы [53-55] посвящены учету навигационных опасностей при выборе безопасного маневра расхождения судна с целью в ситуации опасного сближения.

В работе [56] рассмотрена проблема учета маневренных характеристик судна для обеспечения безопасности плавания в стесненных условиях, а в работе [57] изложен инверсный метод планирования траектории движения объектов управления, согласно которому в кинематические уравнения движения объекта вводится отрицательное время, а в качестве начальных условий выбирается желаемое финальное состояние объекта. Решение уравнений дает момент времени начала маневра и его параметры.

В работе [58] с помощью алгебры логики предложена формализация МППСС. Автор рассматривает три области на плоскости с осями времени и дистанции кратчайшего сближения. Каждая из областей, при попадании в нее судна, характеризует предписанное МППСС поведение одного судна при встрече с другим.

Анализ достоверности разных методов прогнозирования развития опасной ситуации сближения судов приведен в публикации [59].

Работы [60-62] посвящены вопросам вычисления предельно-допустимой дистанции кратчайшего сближения и разработки аналитического аппарата определения реализовавшейся области взаимных обязанностей расходящихся судов.

В работах [63-69] рассмотрен расчет параметров маневра безопасного расхождения судов с учетом их инерционности, при этом используются различные модели поворотливости судна.

Вопрос выбора оптимального курса для расхождения судов при криволинейном движении рассмотрен в публикации [70].

Правила по предотвращению столкновений судов в море разбираются в работе [71], в частности комментируются положения пунктов 2 и 3 статьи 17 этих Правил. При этом обсуждается, возможно ли применение принципа — Principle of Confidence при общих действиях (Cooperated action) в ситуации уклонения от столкновения при разборе случая в Морском арбитражном суде. Из-за того, что размеры судов и их скорости увеличились и требуется больше времени и большее расстояние до их полной остановки предлагается, что пункт 2 статьи должен иметь преимущество перед пунктом 3 статьи.

В работе [72] проанализированы возможные критерии установления факта сближения судов противоположными курсами прямо друг на друга. Показано, что ни по одному из них не возможно уверенно судить о сближении судов прямо друг на друга, так что в реальности следует ориентироваться на рекомендации правила 14 МППСС-72, т. е. заблаговременно отворачивать вправо.

В работах [73,74] рассмотрены вопросы расхождения с несколькими судами в ситуации опасного сближения.

Как указывается в публикации [75], СУДС как правило не имеет технических возможностей контролировать движение судов на участках скопления судов для обеспечения безопасности судоходства. В статье как дополнение к средствам возможности уклонения от столкновения системы СУДС/АИС предложен новый фуззи-метод. Ввод данных СУДС совместно с данными АИС в Морскую географическую информационную систему MGIS (Marine Geographic Information System) дает платформу для расчета сведений об области нахождения судна, инерционных сил, действующих на судно, а также используется для определения модели защитного круга и опасного индекса. Используя аналитическую модель морской системы GIS может быть получено точное прогнозирование времени столкновения и позиции. Предложенный метод дает оператору СУДС возможность принятия решений по предупреждению столкновения судов.

В работе [76] рассмотрены перспективы использования современных технических средств для управления судами в стесненных условиях плавания с целью предупреждения столкновений судов.

В работе [77] указывается, что университет отрасли морского транспорта (Китай) разработал систему поддержки принятия решений управления морским судном, которая минимизирует риски столкновения судов. Применение системы представляется актуальным, поскольку в настоящее время не менее 60% всех аварий с морскими судами имеют основной причиной столкновение.

Метод расчета дистанции и времени кратчайшего сближения по наблюдениям со своего судна предложен в статье [78], который позволяет непосредственно получить информацию о величине риска столкновения своего судна с судном-целью, что обеспечивает вахтенного офицера и экспертную систему по предотвращению столкновения эффективным средством для уточнения принятых решений по уклонению от столкновения.

В работе [79] рассмотрены сложные ситуации в стесненных водах, когда ограниченная пропускная способность восприятия информации судоводителем не дает возможности произвести переработку ее необходимого объема, и затрудняет принятие корректных решений, особенно в ситуациях опасного сближения.

В работе [80] обсуждается нетрадиционный подход заблаговременного определения ситуации сближения судов, который заключается в нахождении моментов времени одновременного выхода их на одинаковые широты и одинаковые долготы, учитывая информацию о движении судов с помощью АИС. При совпадении этих моментов времени неизбежно столкновение судов, и сразу по значению их получаем время до столкновения. Если эти моменты времени не равны, то суда не смогут одновременно выйти в одну и ту же точку и столкновение не состоится. Произведен анализ различных случаев сближения судов и определены признаки того или иного вида сближения.

В работах [81-83] отмечается, что задача выбора оптимального маневра расхождения очень сложная, как так как процесс управления движением судна является многомерным с нелинейными и нестационарными характеристиками, причем задача носит игровой характер.

В статье [84] рассмотрена модель автоматизированной системы предупреждения столкновений судов, которая может использоваться для построения базы знаний. Также предложен алгоритм модели и программа, имитирующая сближения судов. Результаты имитации доказывают осуществимость, применимость и эффективность модели.

Глобальный контроль систем управления стал слишком дорогостоящим и неэффективным, как указывается в статье [85], так как он требует большого числа измерений вектора управления и определения статуса процесса. Динамика судна описывается нелинейными и нестационарными характеристиками, а управляющие воздействия зависят от течения, ветра и волнения моря.

В работе [86] предлагается метод neural fuzzy system для оценки риска столкновения судов, полученный на основе результатов последних исследований технических проблем морского судоходства. Новый тип системы neural network system может быть создан с учетом преимущества искусственной нейронной сети в системе fuzzy. Некоторые проблемы, которые трудно решались традиционными методами fuzzy, могут быть разрешены легко и эффективно в новой системе. Полученные результаты показали, что новый метод более эффективен по сравнению с традиционными методами.

В статье [87] представлена модель, позволяющая оценить риск столкновения высокоскоростных судов в порядке значимости. По основной модели прогнозируется степень риска в результате поворота рулей, изменения скорости и величины дистанции кратчайшего сближения, что позволяет вахтенному помощнику определить, где может случиться столкновение и делать вывод о степени риска.

Как показано в статье [88], для повышения безопасности и эффективности управления судами разработана система ATSM (Autonomous Traffic Management System), в которой первоначально используются данные АИС, получаемые с судна — тренажера Shioji Maru и данные о перемещении судов в Токийском заливе, получаемые по радиолокационным наблюдениям для оценки условий судоходства. Вычисление оптимальных траекторий для всех судов в районе по системе ATSM, используя программы Forward Dynamics Programming, является следующим этапом работы системы. На пути имеется много опасных сближений, вызванных одновременным входом судов, свободно выбирающих путь в зоне разделения на входе в Токийский залив, где часть судов движется в южном направлении из Токио/Чиба, а часть судов движется в обоих направлениях из района Иокогама. Оптимальный путь, предлагаемый по системе ATSM, позволяет сократить время прохода на 3,88% при входе в Токийский залив.

В работе [89] излагается понимание содержания автономной судовой системы уклонения от столкновения CA (Collision avoidance) и её теоретическое обоснование. Совместно с алгоритмом по уклонению от столкновения рассмотрены дополнительно познавательные возможности человека и Правила уклонения от столкновения COLREG. С учетом факторов, влияющих на процесс уклонения от столкновения, рассматриваются требования к автономной навигации. Эти факторы способен оценить человек и осуществить управление судном на удовлетворительном уровне, однако принятые решения являются субъективными и могут быть ошибочными, в результате чего может возникнуть столкновение. Исследования по автоматизации управления судном могут быть представлены в классическом или компьютерном категориях.

Классическая техника основана на математических моделях и алгоритмах. Программы основаны на использовании искусственного интеллекта AI (Artificial Itelligence). Областью AI для систем автономного уклонения от столкновения, рассматриваемых в статье, являются эволюционные алгоритмы, логика фуззи, экспертные методы, нейросеть NN (Neural networks) и комбинация этих методов — гибридные системы (hybrid system).

В работе [90] указывается, что одним из фундаментальных действий при уклонении от столкновения является измерение азимутального пеленга цели, причем безопасность собственного судна зависит также от скорости изменений курсового угла. Дистанция до цели является важнейшим фактором при расчете по числовой формуле. В заключении указано, что выражение, использующее время (ТСРА), имеет большее значение, чем расстояние до цели.

В работе [91] рассмотрена модель US-model, которая является методом оценки потенциального риска столкновения. Стандартная модель оценки риска столкновения была усовершенствована с учетом малых препятствий на пути судна, такие как опоры мостов. Усовершенствованная модель дает возможность более точно оценить опасность ситуации для судна. На

предлагаемом тренажере моделируется ряд навигационных ситуаций. По результатам экспериментов рассмотрен риск столкновений для судов длиной менее 80 м и при углах пересечения курса другого судна под углом 135° . Величина интервала между судами может различаться при использовании стандартного метода или по усовершенствованной модели.

Оценочная система действий по уклонению от столкновения с одиночным судном рассмотрена в работе [92]. В статье описывается трехуровневая моделирующая схема, базирующаяся на технологии синтеза. Модули, описывающие трассу движения судна и параметры движения, базируются на преобразовании координат и геометрической модели. По этим данным определяются идентификация маневрирования, оценка риска столкновения и этапы действий по уклонению от столкновения.

На основе исследований по автоматизации маневром уклонения судна от столкновения, электронных карт и информационных систем, в статье [93] предложен новый тип автоматизированной системы VICAN (Vessel Intelligent Collision Avoidance Navigator). Поясняются состав, функции и рабочий процесс системы VICAN и новые пункты для дальнейшей разработки.

В статье [94] контроль и управление движением судна рассматривается, как многоуровневая система, которая управляет системами судна при его переходе между портами, причем судовым подсистемам поставлены в соответствие слои системы контроля.

В работе [95] показано, что столкновения судов происходят сразу же перед входом в узкость и после выхода из неё; сразу же перед подходом к препятствию и после огибания его. В работе определена зависимость числа столкновений от количества судов в группе, её конфигурации, соотношения ширины группы и ширины узкости, а также отстояния намеченной точки пересечения курса группы судов с центральной осью узкости от входа в узкость.

Для судов, следующих встречными курсами прямо друг на друга, в работе [96] сделана попытка определить минимально допустимую дистанцию

между судами для осуществления маневра безопасного расхождения на заданном расстоянии кратчайшего сближения с учетом маневренных характеристик судов.

В работах [97-99] обсуждаются вопросы экстренного маневрирования судов для расхождения в ситуации чрезмерного сближения.

Вопросам формирования судовой безопасной зоны посвящены публикации [100-103]. В них предложены математические модели, содержащие системный учет существенных факторов, которые ориентированы на практическое использование в процессе плавания судна в различных условиях.

В работе [104] рассмотрена проблема безопасного расхождения судов с учетом особенностей их взаимодействия, возникающего при опасном сближении и определяющего процесс расхождения. Произведена формализация бинарной координации, которая реализована для регламентации взаимодействия судов в МППСС-72.

Предложена стратегия экстренного расхождения при чрезмерном сближении судов в ситуации неопределенности их дальнейшего поведения и отсутствия координации.

В качестве характеристик взаимодействия судов при их опасном сближении в работе [105] рассмотрены координируемость бинарных взаимодействий и их эффективность, получены аналитические выражения для их численной оценки. Предложена математическая модель взаимодействия группы опасно сближающихся судов при различных типах управления.

Вопросам оборудования узкостей системами управления движением судов посвящены работы [106-110].

В работе [106] указывается, что Германская фирма Atlas Electronic заключила договор о поставке в порт Китая системы проводки судов (VTS), которая предназначена для контроля и проводки в порт сухогрузов, а также других судов дедвейтом до 100 тыс. т. Систему VTS составляют ступенчатая

радарная система фирмы Atlas, две установки Close Circuit TV, имеющие связь со специальной лоцманской станцией и AIS для передачи информации на судно.

Как сообщается в публикации [107], на центры по управлению движением судов СУДС возложена обязанность по обеспечению безопасности судоходства и защиты окружающей среды. Роль центров СУДС изменится со вступлением в силу ISPS Кода, смещаясь в сторону контроля безопасности судна. Фирмы Norcontrol IT (Норвегия) и Simrad Mesotech Ltd (Канада) разработали новое оборудование для удовлетворения требованиям Кода, с использованием системы АИС.

Возможность использования подводного кабеля в качестве эталона траектории движения судна при плавании в стесненных условиях рассматривается в публикации [108]. Отмечается, что использование подводного кабеля наиболее целесообразно на стесненных участках закрытых акваторий с очень малым запасом глубин в ситуации недостаточно эффективного применения створов при высокоточной проводке по криволинейной траектории.

В статье [109] описывается проектирование системы информации и управления судоходством VTMS (Vessel Traffic Management & Information System) в турецких проливах. В статье указывается, что моделирование движения судов может повысить безопасность судовождения при наличии переменных течений в стесненных водах.

В публикации [110] сообщается, что в порту Шанхай ведущая германская фирма в области электроники и системотехники STN ATLAS Electronic разработала и внедрила систему контроля и управления движением судов VTS. Оптимизация беспрепятственного судоходства и обеспечение безопасности достигнуто целенаправленным контролем и управлением движением судов VTS, что исключительно важно для п. Шанхай, акваторию которого ежедневно посещает не

менее 1000 судов. VTS располагает радиолокационной станцией, которая может различать в радиусе 40 миль до 300 целей.

В публикациях [111-132] рассмотрены вопросы моделирования движения судна в стесненных условиях, которые посвящены вопросам выполнения судами различных маневров, способствующих более эффективному и безопасному плаванию.

В работе [111] для различных типов морских подвижных объектов, движущихся с постоянной скоростью, предлагается унифицированная математическая модель движения в виде нелинейного матричного дифференциального уравнения, анализ которого определяет требования к системам управления морскими подвижными объектами, формулирующимися как задачи оптимального управления.

Задача синтеза управления движением судна при стабилизации на траектории по точностному и комплексному экономическому критериям с учетом нелинейной модели судна и возмущений формализована в работе [112]. Обосновывается применение линейно-квадратичного метода, причем предлагается идентификация математической модели судна с использованием многоальтернативной фильтрации.

В работе [113] рассмотрен вопрос о влиянии отстояния рулевого органа от центра масс судна на связь между углом его дрейфа и угловой скоростью, а процесс моделирования движения судов в скоплении описывается в работе [114] и по полученным результатам предложены рекомендации для определения оптимальных параметров поведения судов в скоплении.

В работе [115] предложены математические модели оптимизации параметров водных путей в виде целевых функций и результаты оптимизации имитационным моделированием поворота на фарватере Свиноуйсце - Щецин, а также западного паромного причала Центрум в Свиноуйсце.

Разработке высокоточного управления судна в стесненных условиях на криволинейных участках движения посвящены работы [116, 117].

Как отмечается в работе [118], значительную роль в обеспечении безопасности судоходства играют навигационно-информационные системы (НИС) судна. В работе подробно представлены сведения о них и электронных картах, приведены характеристика составных частей, функциональных возможностей и рассмотрены особенности отображения информации НИС. Произведен анализ современных датчиков оперативной навигационной информации, а также указываются ограничения и недостатки рассматриваемых систем.

Основные сведения о бортовых автоматизированных системах для оценки, прогноза и оптимизации мореходности изложены в работе [119]. Освещены методы прогноза мореходности, а также рассмотрены принципы выбора решений для обеспечения безопасности в штормовых условиях. Освещены особенности отображения информации, приведены характеристики функциональных возможностей таких средств.

Вопросы интеграции сенсоров автоматической идентификационной системы (АИС) в системы управления движением судов (СУДС) рассматриваются в работе [120], причем обсуждаются преимущества, возникающие при интеграции данных судовых АИС транспондеров в СУДС.

Как указывается в работе [121], по данным статистики в узкостях, проливах, на рейдах и портовых акваториях происходит не менее 90% общего числа навигационных аварий, и в первую очередь крупнотоннажных судов. Основным источником ошибок приводящих к авариям является субъективная оценка ситуации до начала маневра, и после его реализации. Результаты диссертационной работы могут быть использованы при практическом построении математических моделей судов, а также при построении компьютерных тренажеров швартовок в море в сложных условиях или маневрировании на гибких связях.

Вопросы управления судном в экстремальных условиях рассмотрены в работе [122]. Для этого требуется произвести расчет влияния всех внешних сил, имеющих отношение к управлению судном в сложных условиях. В статье представлены основные принципы оценки внешних сил на управление судном и возможность использовать эти силы в экстремальных условиях с учетом необходимости использования буксиров.

В работе [123] рассматривается нелинейная задача управления морским объектом в целях его удержания в заданной точке и с заданным курсом. Для формирования требуемого закона управления синтезируется алгоритм нелинейного фильтра Калмана с локальными итерациями, с помощью которого производится оценка текущего состояния системы. Приводятся результаты моделирования, подтверждающие возможность удержания судна в пределах 4-8 м от заданной точки при стабилизации по курсу не хуже 2° .

В работе [124] описан способ выполнения анализа данных нестационарных перемещений корпуса морского судна, который предложен университетом отрасли морского транспорта (Япония). Задача решена способом авторегрессионного моделирования с варьируемыми во времени значениями коэффициентов.

В работе [125] предлагается структура системы управления движением скоростных судов, состоящей из стратегического и исполнительного уровней. При этом приводится структура двухуровневой системы, определяется ее состав на примере двух типов скоростных судов, описаны подходы к проектированию локальных подсистем управления.

Понятие коэффициентов влияния параметров математической модели судна на его маневренные характеристики введено в работе [126]. Рассчитаны коэффициенты влияния для радиуса установившейся циркуляции судна, выдвиг, начальной поворотливости судна и всех характеристик одерживания.

Вопросам разработки системы управлений курсом судна авторулевым с использованием принципов нечеткой логики посвящена статья [127], в которой рассматриваются вопросы адаптации системы, учитывающие сложную динамику и нелинейности математической модели судна как объекта управления при случайно изменяющихся условиях работы системы.

Оценка адекватности принятой к исследованию математической модели путем исследования влияния дополнительных нелинейных членов на режимы движения судна проведена в работе [128]. Рассмотрена зависимость бифуркационной картины от изменения ветра. Введение интеллектуальной составляющей в алгоритм авторулевого позволило не только существенно повысить его эффективность, но и преодолевать некоторую степень неуправляемости.

Теория управления динамическими объектами с переменными параметрами с позиций синергетики изложена в работе [129]. В работе рассмотрены нейросети и их архитектура, описаны традиционные системы управления и управление на основе нечеткой логики. Приведены примеры нейронного управления и результаты синтеза нейросетевых систем управления.

В работе [130] представлены программа и результаты статистического моделирования процесса движения судов по линейному фарватеру. На первом этапе получены основные результаты, которые касаются зависимостей количества ситуаций опасного сближения от различных параметров, характеризующих навигационные условия плавания.

В большинстве современных систем управления сложными динамическими объектами, как отмечается в работе [131], для формирования управляющих воздействий используется модель управляемого объекта, для получения которой используются нейронные сети. Утверждается, что морские подвижные объекты и, в частности, морские суда относятся к классу т. н. неопределенных объектов.

В публикации [132] указывается, что широкое внедрение современных методов и средств комплексной автоматизации на судах обеспечивает рост их провозной способности, сокращение эксплуатационных расходов, снижение уровня аварийности за счёт исключения субъективных факторов из процесса управления судном.

Проблема обеспечения безопасности судовождения путем повышения точности контроля места судна рассмотрена в работах [133-142].

Погрешностям измерений навигационных параметров посвящены работы [133, 134], а в работе [135] рассмотрена зависимость между точностью и надежностью навигации.

В работе [136] проведено исследование возможности применения исходных поправок станции Dziwnow в районе порта Щецин при использовании радионавигационной системы DGPS, которое показало целесообразность использования таких поправок. Также указано, что измерения, которые были проведены во время исследований, и полученные результаты будут способствовать более широкому применению системы DGPS для навигационных целей в порту Щецин.

Как показали исследования, приведенные в работе [137], для описания систем зависимых случайных величин можно использовать обобщенное распределение Пуассона с базовым нормальным распределением.

В работе [138] произведен анализ различных подходов для оценки точности определения места судна с помощью приёмника спутниковой радионавигационной системы. Показано, что классический метод оценки, основанный на предположении о распределении случайных погрешностей определения широты и долготы по закону Гаусса не является корректным и требует альтернативного подхода.

Аналитические выражения для оценки вероятности навигационной безопасности плавания при наличии неравноточных коррелированных погрешностей положения кромок фарватера получены в работе [139], причем

достоверность полученных зависимостей доказана методом статистического моделирования.

Методы снижения влияния систематических и случайных погрешностей измерений на точность обсерваций разработаны в работе [140], также предложен новый подход к модели формирования случайных величин навигационных измерений, который отличается от модели, предложенной для обоснования нормального закона распределения вероятностей случайных величин.

В работе [141] показано, что дифференциальные методы корректируют погрешности в определении местоположения по системе GPS, однако поправки могут оказаться недостаточными с течением времени и с увеличением расстояния пользователя системы от станции нулевого отсчета. Показано, что погрешности возрастают при увеличении расстояния навигационного приемника системы DGPS от базовой станции, причем погрешность составляет 1 м на каждые 150 км расстояния от базовой станции. Чтобы оценить реальную погрешность приемника шесть таких приемников были размещены вдоль португальского побережья через 50 миль к северу и югу от станции отсчета Sagres Broadcast Station. Полученные данные показали, что реальная погрешность позиционирования составляет 0,22 м на каждые 100 км расстояния от станции отсчета, что меньше теоретического значения. Ошибки в позиционировании могут быть выше в портах при отсутствии прямой видимости спутника.

Модели для оценки вероятности безопасного плавания в стесненных районах, в которых стесненность выражается в виде распределения частот боковых расстояний от середины фарватера до его границ приведены в работе [142], причем вероятность безопасного плавания заданным маршрутом рассчитывается при известной плотности распределения погрешности бокового отклонения судна и продолжительности маршрута.

Определение группы взаимодействующих судов в ситуации опасного сближения рассматривается в работе [143], а в работах [144] и [155]

освещены вопросы влияние изменения курсов судов на относительный курс и расчет изменения относительного курса при изменении параметров движения судов.

Работа [149] посвящена вопросам управления группы судов в ситуации опасного сближения, а вопросы определения и формализации характеристик управляемой динамической системы судов рассмотрены в работах [150-152].

Вопросам совершенствования технологии управления движением судов в районах контроля СУДС посвящена работа [153].

В работах [145-148, 154, 156, 157] рассмотрены вопросы выбора маневра расхождения нескольких судов изменением курсов.

1.2. Обоснование основного направления диссертационного исследования.

Как показал выполненный обзор и анализ литературных источников по тематике обеспечения безопасного судовождения, наиболее актуальной проблемой обеспечения безопасности судовождения является предупреждение столкновения судов при их опасном сближении. Эта проблема особенно актуальна при плавании судов в стесненных водах, специфическими особенностями которых являются повышенная интенсивность судоходства и большое количество навигационных опасностей, затрудняющих безопасное расхождение судов.

Именно в стесненных водах возникают ситуации опасного сближения групп, состоящих из нескольких судов, для безопасного расхождения которых целесообразно использовать принцип внешнего управления, позволяющего произвести выбор оптимального маневра изменением курсов судов.

Поэтому задача разработки безопасной стратегии расхождения судов изменением их курсов, с помощью принципа внешнего управления является

актуальной и перспективной тематикой и составляет основное направление данной диссертационной работы.

1.3. Выводы по первой главе

В первой главе выполнен обзор литературных источников и произведен анализ основных направлений решения проблемы обеспечения безопасности судовождения и снижение аварийности судов, в результате которого было выявлено, что основными направлениями решения данной проблемы являются разработка безопасных методов расхождения, совершенствование методов управления судном при плавании в стесненных районах обеспечение точности контроля места судна.

Обоснованы основные направления диссертационного исследования, которые посвящены проблеме безопасного расхождения группы судов с использованием принципа внешнего управления.

Объектом исследования является процесс предупреждения столкновений судов, а предметом исследования являются методы выбора безопасной стратегии расхождения судна.

ГЛАВА 2

МЕТОДОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Выбор темы научного исследования

Как было показано в предыдущей главе, основным аспектом обеспечения безопасности судовождения является предупреждение столкновений судов при плавании в стесненных районах плавания, где характерны ситуации опасного сближения судна с несколькими целями при наличии мешающих судов. Особенно это актуально в районах контроля СУДС при возможности совместного управления судов, реализуя принцип внешнего управленца.

В таких ситуациях опасного сближения группы судов целесообразно матрицу ситуационного возмущения обращать в нулевую матрицу путем синтеза общего маневра расхождения изменением курсов нескольких сближающихся судов с помощью использования областей опасных курсов пары судов.

Реализация предлагаемого метода формирования безопасной стратегии расхождения судов требует, во-первых, разработки процедуры отображения области опасных курсов пары судов на расширенной плоскости их курсов. Во-вторых, следует разработать процедуру выбора безопасного маневра расхождения нескольких судов изменением их курсов, избегая попадания курсов в соответствующие области опасных курсов.

Следовательно, проблема разработки метода выбора оптимального маневра расхождения группы судов изменением курсов с помощью использования областей опасных курсов является актуальной и перспективной, и это позволяет произвести выбор темы диссертации, которая формулируется следующим образом: «Совершенствование методов

предупреждения столкновений судов с использованием областей опасных курсов».

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

- Методами системного подхода произвести декомпозицию главной задачи диссертационного исследования на несколько составных независимых задач.

- Разработать процедуру формализации области опасных курсов пары судов и отображения ее на расширенной плоскости их курсов.

- Сформировать способ выбора безопасного маневра расхождения нескольких опасно сближающихся судов изменением их курсов, используя область опасных курсов.

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

Научную новизну исследования может составить разработка процедуры построения области опасных курсов, ее отображения на расширенной плоскости курсов пары судов и процедура выбора безопасного маневра расхождения с помощью областей опасных курсов пары судов.

Возможная экономическая эффективность может быть достигнута за счет сокращения убытков от снижения уровня аварийности по причине предотвращения столкновений судов.

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

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 рисунке 2.1 представлена технологическая карта методологического обеспечения исследования по теме диссертации, представляющая схему применения методов системного подхода для решения главной задачи диссертационной работы.

Современными запросами практики являются необходимость повышения уровня безопасности судоходства и разработки метода расхождения судов с помощью областей опасных курсов.

Целью диссертационного исследования является обеспечение безопасности судоходства путем разработки метода выбора стратегии расхождения с помощью областей опасных курсов судов.

Принята гипотеза о существовании возможности внешним управлением производить выбор маневра расхождения группы судов изменением курсов с помощью областей опасных курсов.

Главная задача исследования заключается в разработке алгоритма выбора маневра расхождения при внешнем управлении с помощью областей опасных курсов судов.

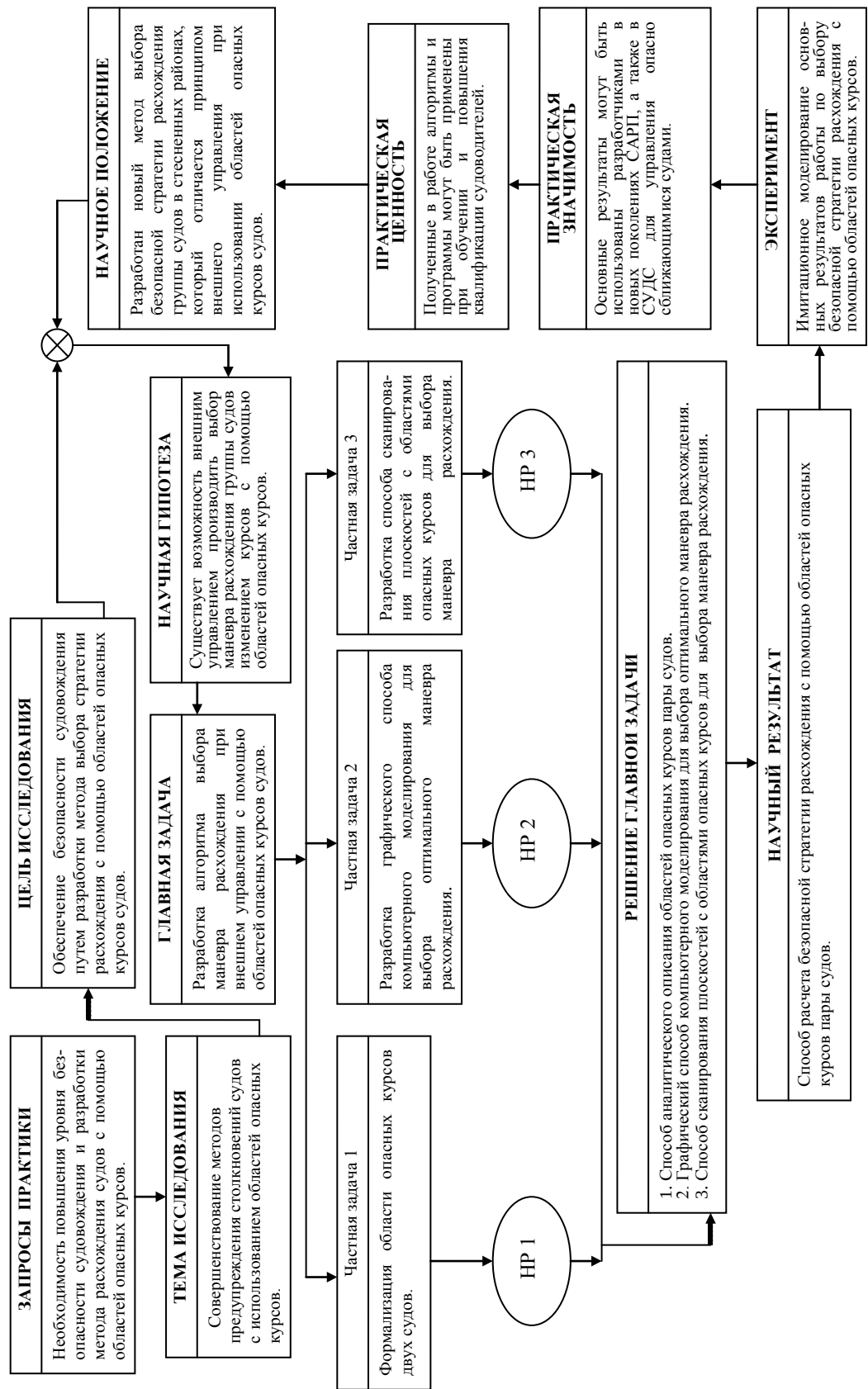


Рисунок 2.1. Технологическая карта диссертации

Главная задача диссертации была решена с помощью декомпозиции на частные составные задачи, полученных в соответствии с методами теории исследования операций.

Как показал проведенный анализ, целесообразно разделение главной задачи диссертационного исследования на следующие три частные составные задачи:

1. Формализация области опасных курсов двух судов.
2. Разработка графического способа компьютерного моделирования для выбора оптимального маневра расхождения.
3. Разработка способа сканирования плоскостей с областями опасных курсов для выбора маневра расхождения.

Рассмотрение первой частной составной задачи требует, прежде всего, формализации группы судов, которые опасно сближаются.

Предварительный анализ показал, что для формализации целесообразно использовать методы теории много управляемых динамических систем. Для характеристики группы взаимодействующих судов с позиций опасности сближения следует использовать матрицу ситуационного возмущения, элементы которой в зависимости от угрозы столкновения могут принимать определенные нормированные значения.

Для анализа управляемости группы опасно сближающихся судов следует исследовать влияние параметров движения пары судов на изменение относительного курса и дистанции кратчайшего сближения.

Оценка опасности сближения пары судов может быть произведена с помощью области их опасных курсов, которая ограничена линией на расширенной плоскости курсов, причем при заданной позиции и неизменных скоростях рассматриваемой пары судов каждая точка границы области соответствует значениям курсов судов, при которых дистанция кратчайшего сближения равна предельно допустимой дистанции. Следовательно, для всех точек внутри этой границы дистанция кратчайшего сближения меньше

предельно допустимой дистанции и сочетание курсов, соответствующее таким точкам, является опасным.

Таким образом, в зависимости от скоростей судов и их относительной позиции необходимо разработать аналитическую процедуру описания границы области опасных курсов пары судов и отображения самой области на расширенную плоскость курсов судов.

Разработка графического способа компьютерного моделирования для выбора оптимального маневра расхождения является второй частной составной задачей.

Прежде всего, необходимо разработать графический способ выбора безопасного маневра расхождения изменением курсов пары судов. В ситуациях, когда группа опасно сближающихся судов содержит более двух судов, требуются оперировать одновременно несколькими областями опасных курсов. Поэтому разрабатываемый графический способ может использовать либо одновременный вывод на экран монитора нескольких расширенных плоскостей с областями опасных курсов, или использованием последовательного вывода отдельных областей опасных курсов рассматриваемых пар судов. При одновременных выводах областей опасных курсов в случае сближения группы из трех судов необходимо выводить на экран монитора три области опасных курсов, а в случае группы из четырех судов на экран одновременно следует выводить шесть областей опасных курсов на шести расширенных плоскостях.

Разрабатываемый способ должен предусмотреть изменение курсов судов и их отображение на расширенной плоскости и области опасных курсов.

Для проведения указанных исследований необходимо разработать компьютерную имитационную программу.

Решение третьей частной составной задачи предусматривает разработку способа сканирования плоскостей с областями опасных курсов для выбора маневра расхождения.

Для решения указанной задачи вначале следует рассмотреть алгоритм оптимизационной процедуры по поиску оптимального маневра расхождения изменением курса судов. Причем в данной оптимизационной задаче надлежит учесть две особенности, во-первых, в качестве критерия оптимальности выбрана сумма квадратов отклонений курса судов от программного значения, а, во-вторых, предпочитаются маневры расхождения с меньшим числом маневрирующих судов.

В рассматриваемом способе сканируются все точки, соответствующие курсам сближающихся судов, например, в ситуации сближения трех судов каждому маневру соответствует точка трехмерного пространства, осями которого являются значения курсов трех сближающихся судов. При сканировании для каждой точки, как маневра судов, определяется, является ли маневр безопасным, и если это так, то рассчитывается значение критерия оптимальности. В процессе сканирования в качестве оптимального выбирается маневр с минимальным значением критерия оптимальности.

Для выбора безопасной стратегии расхождения необходимо разработать компьютерную программу отображения областей опасных курсов судов и выбора курсов судов, которая должна содержать следующие три модуля:

- Модуль моделирование исходной ситуации, включая число судов, их параметров движения и относительного положения. В данном модуле должен содержаться индикатор опасности, который предназначен для отображения матрицы ситуационного возмущения. С помощью индикатора ситуации обеспечивается возможность синтеза произвольной начальной ситуации с заданной матрицей ситуационного возмущения. Модуль должен произвести моделирование начальных ситуаций для числа судов от двух до пяти включительно.

- Модуль отображение опасных областей курсов для пары судов и выбора безопасных курсов пары опасно сближающихся судов. В случае ситуаций сближения более двух судов необходимо обеспечить возможность

работы с несколькими областями опасных курсов различных пар судов ситуации.

- Модуль проигрывания выбранного маневра, который должен подтверждать корректность предлагаемого способа выбора безопасного маневра расхождения изменением курсов сближающихся судов. При этом помимо отображения процесса расхождения судов должны выводиться текущие значения расстояний между парами судов.

Решением каждой из составных независимых задач является соответствующий научный результат (НР1, НР2 и НР3):

- научным результатом первой составной задачи НР1 является способ аналитического описания областей опасных курсов пары судов;

- графический способ компьютерного моделирования для выбора оптимального маневра расхождения является научным результатом НР2 второй составной задачи;

- способ сканирования плоскостей с областями опасных курсов для выбора маневра расхождения, представляет собой научный результат НР3 третьей составной задачи.

В работе следует произвести имитационное моделирование основных результатов диссертационного исследования в части разработки метода выбора безопасной стратегии расхождения с помощью областей опасных курсов пары судов.

Полученные в диссертационной работе теоретические результаты и имитационное моделирование подтвердили принятую научную гипотезу о существовании возможности внешним управлением производить выбор маневра расхождения группы судов изменением курсов с помощью областей опасных курсов.

Практическая значимость проведенного диссертационного исследования заключается в том, что полученные в диссертации основные результаты

могут быть использованы разработчиками в новых поколениях САРП, а также в СУДС для управления опасно сближающимися судами.

Результаты диссертационной работы имеют практическую ценность, которая определяется тем, что полученные в работе алгоритмы и программы могут быть применены при обучении и повышения квалификации судоводителей.

Полученные в диссертационном исследовании научные результаты и результаты проведенного имитационного моделирования определяют научное положение диссертационной работы, которое формулируется следующим образом:

Разработан новый метод выбора безопасной стратегии расхождения группы судов в стесненных районах, который отличается принципом внешнего управления при использовании областей опасных курсов судов.

2.3. Методика проведения исследования по теме диссертационной работы.

Приведем краткое изложение методики проведения исследования по теме диссертационной работы и методов, которые для этого необходимы.

Анализ основных подходов решения проблемы безопасности судовождения требует применения методов дедукции. Результатами анализа является возможность выбора основного направления и темы диссертационного исследования.

В дальнейшем необходимо произвести декомпозицию главной задачи диссертации на три независимые составные задачи, используя методы исследования операций, при этом осуществляется методологическое обеспечение диссертационного исследования.

С помощью методов аналитической геометрии необходимо произвести формализацию области опасных курсов и ее отображение на расширенную

плоскость курсов сближающихся судов, учитывая, что граница области характеризует равенство дистанции кратчайшего сближения и предельно допустимой дистанции.

Затем необходимо разработать графический способ выбора безопасного маневра расхождения изменением курсов пары судов. Для группы опасно сближающихся судов, состоящей из более двух судов, требуются оперировать одновременно несколькими областями опасных курсов разных пар судов. Поэтому разрабатываемый графический способ должен использовать одновременный вывод на экран монитора нескольких расширенных плоскостей с областями опасных курсов, или предусмотреть последовательный вывод отдельных областей опасных курсов рассматриваемых пар судов.

Разрабатываемый способ должен предусмотреть изменение курсов судов и их отображение на расширенной плоскости и области опасных курсов.

Очередным этапом диссертационного исследования является разработка способа сканирования плоскостей с областями опасных курсов для выбора маневра расхождения.

Решение данной задачи требует создания алгоритма оптимизационной процедуры по поиску оптимального маневра расхождения изменением курса судов. В рассматриваемом способе сканируются все точки, соответствующие курсам сближающихся судов. При сканировании для каждой точки, как маневра судов, определяется безопасность маневра, и если маневр безопасный, то для него рассчитывается значение критерия оптимальности. В процессе сканирования в качестве оптимального выбирается маневр с минимальным значением критерия оптимальности.

Для выбора безопасной стратегии расхождения необходимо разработать компьютерную программу отображения областей опасных курсов судов и выбора их курсов.

2.4. Выводы по второй главе

В анализируемой второй главе диссертации представлены выбор темы диссертационного исследования и его основные направления.

Методологическая структура диссертационного исследования отражена в технологической карте, с помощью которой произведено методологическое обеспечение диссертационной работы.

В технологической карте представлены цель диссертационного исследования и его главная задача, которая разделена на три независимые составные задачи.

Показано, что полученные научные результаты диссертационной работы являются решениями независимых составных задач, причем предложена и подтверждена рабочая гипотеза научного исследования.

В данной главе показаны практическая ценность и значимость диссертационного исследования, сформулировано его основное научное положение, а также приведено содержание экспериментальной части.

Во второй главе также приведена основная методика решения поставленных в работе задач, в которой определены основные этапы научного исследования по теме диссертации, которые представляют собой обобщенный алгоритм реализации диссертационного исследования, включающий разработку теоретических моделей и проведение имитационного моделирования.

ГЛАВА 3.

ФОРМАЛИЗАЦИЯ СИТУАЦИИ ОПАСНОГО СБЛИЖЕНИЯ ГРУППЫ СУДОВ

3.1. Определение взаимодействующей группы судов в ситуации возникновения угрозы столкновения.

Совокупность судов, находящихся в районе управления СУДС, целесообразно рассматривать с системных позиций, характеризуя ее как управляемую динамическую систему Σ_n с внешним управлением, которое в зависимости от текущего состояния системы s_Σ формирует вектор управления U_Σ с числом составляющих, максимально равным числу судов, составляющих систему. Управление должно обеспечить пребывание системы в области допустимых безопасных состояний.

Допустим, в локальном районе, который контролируется СУДС, имеется n судов, которые составляют управляемую динамическую систему Σ_n . Определим основные характеристики системы Σ_n . Прежде всего, исходными характеристиками являются позиционная характеристика и характеристика параметров движения. Позиционная характеристика определяется вектором координат судов Φ , каждая компонента которого является координатами отдельного судна, т. е. $\varphi_i = (x_i, y_i)$, причем координаты x_i и y_i определяются широтой и долготой соответствующего судна.

Характеристикой параметров движения системы Σ_n является вектор скоростей судов системы $\bar{V}$, каждая компонента которой содержит направление (курс) и модуль скорости каждого из судов $\bar{v}_i = (K_i, V_i)$.

Системные особенности Σ_n отражают относительные характеристики, которые определяют совокупность парных отношений компонентов системы.

Относительной позиционной характеристикой системы Σ_n является матрица относительных позиций S , элементами которой являются позиционные характеристики пары судов системы Σ_n , - дистанция D_{ij} и пеленг α_{ij} , т.е. $s_{ij} = (D_{ij}, \alpha_{ij})$. Очевидно, позиционную матрицу удобно представить двумя матрицами: матрицей дистанций $D = (D_{ij})$ и матрицей пеленгов $A = (\alpha_{ij})$.

В паре судов c_i и c_j оперирующим будем называть судно, с которого задается пеленг, а судно, на которое измеряется пеленг, - целью. Тогда в позиционных матрицах D и A столбцы формируются по оперирующим судам, а строки – по целям.

Произведем анализ матриц D и A . Матрица D является квадратной и симметричной, диагональ которой содержит нули, при этом $D_{ij} = D_{ji}$. Для квадратной матрицы A диагональ не определена и диагональные моменты выражаются курсами судов, т.е. $\alpha_{ii} = K_i$, а для недиагональных элементов справедливо соотношение $\alpha_{ij} = \pi + \alpha_{ji}$.

Взаимное перемещение судов системы Σ_n характеризуется матрицей относительных скоростей V_{ot} , элементом которой является относительная скорость V_{otij} пары судов, причем в относительном перемещении будем принимать движение оперирующего судна относительно неподвижной цели.

Матрица V_{ot} является квадратной и симметричной с нулевой диагональю, в которой справедливо соотношение $V_{otij} = V_{otji}$. Второй матрицей, характеризующей относительное перемещение, является матрица относительных курсов K_{ot} , которая определяет направление относительного

движения оперирующего судна по отношению к цели. Ее элементом является K_{otij} .

Отметим, что диагональ матрицы не определена, а симметричные относительно диагонали элементы матрицы соотносятся следующим образом

$$K_{otij} = \pi + K_{otji}.$$

Направление относительного движения пары судов не несет информации о характере их сближения или удаления, что существенно для оценки возможной опасности их относительного перемещения. Поэтому целесообразно ввести характеристику изменения дистанции между судами системы. Мерой такой характеристики для системы является матрица изменения дистанций Δ , а ее элементом является δ_{ij} , значение которого определяется знаком первой производной дистанции D_{ij} по времени, причем если суда сближаются, то $\delta_{ij} = 1$, если удаляются - $\delta_{ij} = -1$, а если суда являются сателлитами, то $\delta_{ij} = 0$. Поэтому δ_{ij} может принимать только три значения и справедливо соотношение:

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{при } \dot{D}_{ij} < 0; \\ 0, & \text{при } \dot{D}_{ij} = 0; \\ -1, & \text{при } \dot{D}_{ij} > 0. \end{cases}$$

Как показано в работах [12, 52], возможность изменять относительный курс пары сближающих судов зависит от соотношения их скоростей $\rho_{ij} = \frac{V_i}{V_j}$. Если скорость оперирующего судна V_i превосходит скорость цели V_j , то оперирующее судно может реализовать любое значение относительного

курса. Если же имеет место неравенство $\rho_{ij} \leq 1$, то оперирующее судно c_i может изменять относительный курс на величину $\Delta K_{otij} = 2 \arcsin \rho_{ij}$.

Следовательно, в качестве характеристики системы Σ_n необходимо использовать матрицу P , элементом которой является ρ_{ij} .

Таким образом, управляемую динамическую систему Σ_n характеризуют матрицы D , A , K_{ot} , V_{ot} , Δ и P .

Следует отметить, что для судов системы Σ_n , у которых $\delta_{ij} = 1$, т.е. они сближаются, может возникать угроза столкновения. Поэтому для оценки уровня безопасного функционирования системы Σ_n , т.е. возможного столкновения ее судов, необходимо ввести соответствующую характеристику.

Очевидно, что такая характеристика должна отражать вероятность возможного столкновения каждой пары сближающихся судов, поэтому в качестве такой характеристики целесообразно использовать матрицу оценки безопасности системы, которую обозначим P_d . Элементом этой матрицы является вероятность p_{dij} столкновения пары сближающихся судов. Рассматриваемая матрица является симметричной ($p_{dij} = p_{dji}$) с нулевой диагональю. С помощью матрицы оценки безопасности системы P_d можно выразить интегральные оценки безопасности системы Σ_n : вероятность возникновения столкновения в системе P_C или среднее значение возможных столкновений N_C за определенный интервал времени. Очевидно, указанные величины являются критериями, которые определяют качество управления системы, причем вектор управления U_Σ выбирается таким образом, чтобы обеспечить минимально- допустимую величину вероятности P_C .

Если рассматривается группа судов, находящаяся вне зоны контроля и управления СУДС, то существенными являются еще и характеристики координации и взаимодействия опасно сближающихся пары судов.

В настоящее время, в ситуациях, где отсутствует внешнее управление судами, используется статусно - позиционный принцип бинарной координации пары судов, которых реализован в МППСС-72 в части маневрирования судов на виду друг у друга для предупреждения столкновения. Упомянутый принцип в общем случае определяет взаимно согласованный маневр, в котором опасно сближающимся судам предписываются определенные типы поведения, предусматривающие одно из судов предпринимать маневр для расхождения (активное судно) и пассивное судно, сохраняющее свои параметры движения. Существуют ситуации, когда оба судна обязаны быть активными. При этом активному судну предписывается разрешенная область изменения курсов. Например, для судов опасно сближающихся на противоположных курсах предписывается изменение курса каждого из судов вправо.

Принцип называют статусно–позиционным из-за того, что признак активного и пассивного судов определяется их относительной позицией и статусами сближающихся судов.

Поэтому для характеристики предупреждения опасных состояний системы следует рассмотреть координационную матрицу системы C_{Σ} , а по ее значению определить матрицу взаимодействия судов B_{Σ} .

Координационная матрица C_{Σ} определяется принципом координации, а ее элементом $c_{\Sigma ij}$ является характеристика активности судна при расхождении, причем $c_{\Sigma ij}$ может принимать значения 1, 0 или -1 в зависимости от принадлежности оперирующего судна c_i к подмножеству активных $M_{\Sigma a}$, пассивных $M_{\Sigma p}$ или нейтральных $M_{\Sigma n}$ судов системы согласно следующему соотношению:

$$c_{zij} = \begin{cases} 1, \text{ при } c_i \in M_{\Sigma a}; \\ 0, \text{ при } c_i \in M_{\Sigma n}; \\ -1, \text{ при } c_i \in M_{\Sigma p}; \end{cases}$$

Нейтральным судном называется судно, которому согласно принципу координации, например МППСС-72, не предписывается определенного поведения. Так, это имеет место для судов одного статуса, кроме судов с механическим двигателем и парусных судов или в случае, когда пассивное судно при бездействии активного может предпринимать действия по предупреждению столкновения, т.е. оно одновременно является активным и пассивным.

Требование определенной стороны уклонения судна можно формализовать матрицей стороны уклонения C_α , элемент которой $c_{\alpha ij}$ может принимать значения 0 для пассивного судна, 1 при требовании уклонения вправо, 2 при уклонении влево, 3 при возможности уклонения в любую сторону и 4 при требовании избегать пересечения курса партнера по носу.

Матрицы C_Σ и C_α во многом определяют типы взаимодействия пар судов в процессе расхождения, которые целесообразно формализовать с помощью матрицы взаимодействия судов B_Σ . Этот вопрос предстоит исследовать в дальнейшем.

Динамическая n -управляемая система Σ_n , как показано в работе [12], может находиться в нескольких системных состояниях, а наличие и степень опасности столкновения пары судов формализуется понятием ситуационного возмущения ω_{ij} , природа которого заключена в прогнозируемом попадании судов в область недопустимых позиций. Взаимодействия всего множества судов характеризуется матрицей ситуационного возмущения D_{bn} , элементом которой является характеристика ситуационного возмущения ω_{ij} .

По большому счету ситуационное возмущение переводит динамическую систему Σ_n из первого невозмущенного системного состояния в более высокие, являющиеся возмущенными. Общая стратегия компенсации ситуационного возмущения предусматривает перевод динамической системы Σ_n в начальное невозмущенное состояние путем уничтожения в структуре системы связей взаимодействия между судами.

Принципиально важным аспектом управления динамической системой Σ_n является полнота управления, которая может быть реализована следующими двумя подходами.

Одним из них является локально-независимое управление, суть которого заключается в контроле отдельным судном текущего состояния динамической системы по строке матрицы D_{bn} , в которой оно находится, а при наличии ситуационного возмущения его компенсация производится независимо от других строк матрицы возмущения в лучшем случае силами пар взаимодействующих судов. При этом оперирующее судно не учитывает возможные взаимодействия цели с другими судами. Такой тип управления является достаточно близоруким и может эффективно использоваться только при низкой интенсивности движения судов.

Качественно другим является полное управление внешним управленцем, распоряжающимся стратегиями всех судов системы, который наблюдает матрицу D_{bn} и, при наличии ситуационного возмущения, переводит динамическую систему в невозмущенное состояние общей стратегией, включающей необходимое минимальное число управлений судами матрицы. Таким управленцем может быть, как СУДС, так и, что принципиально важно, судовая информационная система, с теми же возможностями, установленная на каждом из судов, решающая задачу коллективной компенсации ситуационного возмущения и реализующая полученную в результате решения индивидуальную стратегию.

Именно высокая эффективность полного управления при большой интенсивности судопотока обусловила появление и стремительное развитие СУДС. Очевидно, развитие принципов полного управления динамической системой Σ_n является одним из наиболее перспективных направлений снижения аварийности в стесненных условиях плавания.

Реализация принципов полного управления требует разработки ряда вопросов, одним из которых является определение группы взаимодействующих судов в ситуациях опасного сближения. Рассматриваемая задача формулируется следующим образом.

Допустим, в стесненном районе плавания имеется некоторое конечное множество судов Mn_o , из которого необходимо сформировать динамическую систему Σ_n , число судов которой равно или меньше числу судов исходного множества Mn_o , т.е. $\Sigma_n \subseteq Mn_o$.

Учитывая, что суда множества Mn_o перемещаются, и их относительные позиции изменяются, можно утверждать, что структура динамической системы Σ_n и матрица D_{bn} ситуационного возмущения соотносятся с некоторым моментом времени t , т.е. $\Sigma_n(t)$ и $D_{bn}(t)$. Так, как структура динамической системы Σ_n , изменчива во времени, то управление системой Σ_n предполагает наблюдение ее состояния (структуры и матрицы D_{bn}) в некоторый момент наблюдения t_n и прогноз состояния на некоторый интервал времени Δt_n , полагая, что все характеристики системы, не зависящие от времени, остаются неизменными в течении интервала Δt_n .

Поэтому предполагается, что группа судов, составляющая динамическую систему Σ_n , в момент времени наблюдения t_n , сохраняется в течение интервала времени Δt_n , а в очередной момент времени наблюдения $t_n + \Delta t_n$ осуществляется контроль структуры системы Σ_n и матрицы ситуационного возмущения D_{bn} .

Так, в случае, когда внешним управленцем является СУДС, основным принципом выделения группы взаимодействующих судов является учет их близости к СУДС. Так как СУДС располагаются в непосредственной близости от стесненных районов с интенсивным движением, то им предписывается некоторый район контроля и управления движущимися судами, который обозначим S_c . Поэтому группой взаимодействующих судов являются суда, которые находятся в районе контроля и управления S_c , причем их количество ограничено в зависимости от пропускной способности СУДС.

В этом случае размерность матрицы ситуационного возмущения D_{bn} определяется числом судов, находящихся в районе S_c , а элементы матрицы, т.е. парные ситуационные возмущения судов, находятся по их относительным позициям и параметрам движения. Если судно покидает район S_c , то оно исключается из группы взаимодействующих судов, а если, наоборот, входит в район S_c , то оно включается в динамическую много управляемую систему взаимодействующих судов Σ_n .

3.2. Влияние параметров движения пары судов на изменение относительного курса и дистанции кратчайшего сближения.

Ситуационное возмущение ω_{ij} возникает в том случае, когда прогнозируемая дистанция кратчайшего сближения $\min D_{ij}$ судов меньше предельно-допустимой дистанции d_d , т.е. $\min D_{ij} < d_d$, и суда сближаются опасно. В свою очередь, прогнозируемая дистанция кратчайшего сближения $\min D_{ij}$ определяется выражением:

$$\min D_{ij} = \Delta_{ij} D_{ij} \sin(\alpha_{ij} - K_{otij}),$$

$$\text{где } \operatorname{tg} K_{\text{otij}} = \frac{V_i \sin K_i - V_j \sin K_j}{V_i \cos K_i - V_j \cos K_j};$$

$$\Delta_{ij} = -1, \text{ при } \sin(\alpha_{ij} - K_{\text{otij}}) < 0.$$

Из приведенного выражения следует, что в случае возникновения ситуационного возмущения, его компенсация возможна увеличением значения $\min D_{ij}$, которое зависит от относительного курса K_{otij} , зависящего от параметров движения судна и цели. Поэтому СУДС, осуществляющей управление судами, необходимо найти такие значения курсов судов K_i и K_j или их скоростей V_i и V_j , при которых их дистанции кратчайшего сближения будут больше предельно- допустимой дистанции d_d .

В связи с этим следует найти зависимость относительного курса K_{otij} от курсов судна и цели K_i и K_j , а также от их скоростей V_i и V_j .

Найдем выражение для производной относительного курса K_{ot} по курсу судна K_1 , считая неизменными скорости судна и цели V_1 , V_2 .

Из работы [12] используем выражение для относительного курса K_{ot} :

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

где $V_{\text{ot}} = [V_1^2 + V_2^2 - 2 V_1 V_2 \cos(K_1 - K_2)]^{1/2}$ - относительная скорость.

Как показано в работе [159], частная производная $\frac{\partial K_{\text{ot}}}{\partial K_1}$ относительного курса K_{ot} по курсу судна K_1 имеет следующий вид:

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

Найдем смешанную производную по курсу K_2 второго судна:

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

Производя дифференцирование, получим:

$$\frac{\partial^2 K_{ot}}{\partial K_1 \partial K_2} = \frac{V_1 V_2 \sin(K_1 - K_2) V_{ot}^2 - [V_1^2 - V_1 V_2 \cos(K_1 - K_2)] \frac{\partial V_{ot}^2}{\partial K_2}}{V_{ot}^4}.$$

Найдем производную $\frac{\partial V_{ot}^2}{\partial K_2}$, учитывая, что выражение для квадрата

относительной скорости имеет вид $V_{ot}^2 = [V_2^2 + V_1^2 - 2 V_2 V_1 \cos(K_2 - K_1)]$:

$$\frac{\partial V_{ot}^2}{\partial K_2} = 2 V_2 V_1 \sin(K_2 - K_1), \text{ поэтому}$$

$$\frac{\partial^2 K_{ot}}{\partial K_1 \partial K_2} = \frac{V_1 V_2 \sin(K_1 - K_2) V_{ot}^2 - [V_1^2 - V_1 V_2 \cos(K_1 - K_2)] 2 V_2 V_1 \sin(K_2 - K_1)}{V_{ot}^4} =$$

$$= \frac{V_1 V_2 \sin(K_1 - K_2) \{V_{ot}^2 - 2[V_1^2 - V_1 V_2 \cos(K_1 - K_2)]\}}{V_{ot}^4}.$$

Подставляя значение V_{ot}^2 , получим:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 K_{ot}}{\partial K_1 \partial K_2} = & \frac{V_1 V_2 \sin(K_1 - K_2) [V_2^2 + V_1^2 - 2 V_2 V_1 \cos(K_2 - K_1)] -}{V_{ot}^4} \\ & \frac{- 2 V_1^2 + V_1 V_2 \cos(K_1 - K_2)]}{V_{ot}^4}. \end{aligned}$$

После элементарных преобразований числителя последнего выражения окончательно получим выражение для скорости изменения относительного курса при одновременном изменении курсов судов с одинаковой угловой скоростью:

$$\frac{\partial^2 K_{ot}}{\partial K_1 \partial K_2} = \frac{V_1 V_2 \sin(K_1 - K_2)(V_2^2 - V_1^2)}{V_{ot}^4}.$$

Если обозначить разность скоростей судов $V_2 - V_1 = \Delta V$, а разность их курсов $K_1 - K_2 = \Delta K$, то изменение относительного курса принимает вид:

$$\frac{\partial^2 K_{ot}}{\partial K_1 \partial K_2} = \frac{V_1 V_2 (V_1 + V_2)}{V_{ot}^4} \Delta V \sin \Delta K.$$

Анализ полученного выражения показывает, что изменение относительного курса является функцией разности курсов судов ΔK и разности скоростей ΔV . При одинаковых угловых скоростях поворота судов изменение относительного курса отсутствует, если их линейные скорости одинаковые. При прочих равных условиях изменение относительного курса линейно зависит от разности скоростей судов и имеет полукруговую зависимость от разности их курсов.

Исследуем влияние изменения скорости одного из судов на величину относительного курса. Для поиска первой производной относительного курса

K_{ot} по скорости судна V_1 , т.е. $\frac{\partial K_{ot}}{\partial V_1}$, воспользуемся выражением работы

[12]:

$$\operatorname{tg} K_{ot} = \frac{V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2}{V_1 \cos K_1 - V_2 \cos K_2}.$$

Это выражение преобразуем к следующему виду:

$$\operatorname{tg} K_{\text{от}} (V_1 \cos K_1 - V_2 \cos K_2) = V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2.$$

После группировки подобных членов получим:

$$V_1 (\operatorname{tg} K_{\text{от}} \cos K_1 - \sin K_1) = V_2 (\operatorname{tg} K_{\text{от}} \cos K_2 - \sin K_2).$$

Или окончательно:

$$V_1 = V_2 \frac{\operatorname{tg} K_{\text{от}} \cos K_2 - \sin K_2}{\operatorname{tg} K_{\text{от}} \cos K_1 - \sin K_1}. \quad (3.1)$$

Числитель и знаменатель данного выражения преобразуем, используя операцию приведения к амплитуде и фазе. Вначале произведем амплитудно-фазовое преобразование выражения в числителе:

$$\operatorname{tg} K_{\text{от}} \cos K_2 - \sin K_2 = A \left(\frac{\operatorname{tg} K_{\text{от}}}{A} \cos K_2 - \frac{1}{A} \sin K_2 \right).$$

Амплитуду A выбираем, равной выражению:

$$A = \sqrt{\operatorname{tg} K_{\text{от}} + 1},$$

в этом случае справедливы соотношения $\frac{\operatorname{tg} K_{\text{от}}}{A} = \sin \psi$, $\frac{1}{A} = \cos \psi$ и можно записать равенство:

$$\operatorname{tg} K_{\text{от}} \cos K_2 - \sin K_2 = -A \sin(K_2 - \psi),$$

где $\psi = \arctg(\operatorname{tg} K_{\text{от}}) = K_{\text{от}}$.

Аналогично получаем преобразование выражения знаменателя (3.1):

$$\operatorname{tg} K_{\text{от}} \cos K_1 - \sin K_1 = -A \sin(K_1 - \psi),$$

Поэтому уравнение (3.1) можно записать в следующем виде:

$$V_1 = V_2 \frac{A \sin(K_2 - \psi)}{A \sin(K_1 - \psi)},$$

или

$$V_1 = V_2 \frac{\sin(K_2 - K_{\text{от}})}{\sin(K_1 - K_{\text{от}})}.$$

Из последнего выражения следует равенство:

$$V_1 \sin(K_1 - K_{\text{от}}) = V_2 \sin(K_2 - K_{\text{от}}).$$

Найдем производную по переменной V_1 :

$$\frac{\partial}{\partial V_1} [V_1 \sin(K_1 - K_{\text{от}})] = \frac{\partial}{\partial V_1} [V_2 \sin(K_2 - K_{\text{от}})].$$

Обращаем внимание на следующее соотношение:

$$\sin(K_1 - K_{\text{от}}) - V_1 \cos(K_1 - K_{\text{от}}) \frac{\partial K_{\text{от}}}{\partial V_1} = -V_2 \cos(K_2 - K_{\text{от}}) \frac{\partial K_{\text{от}}}{\partial V_1}, \quad \text{или}$$

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

Последнее уравнение позволяет найти $\frac{\partial K_{ot}}{\partial V_1}$:

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

Элементарное преобразование тригонометрических функций позволяет получить следующее равенство:

$$\frac{\partial K_{ot}}{\partial V_1} = \frac{\sin K_1 \cos K_{ot} - \cos K_1 \sin K_{ot}}{V_1 (\cos K_1 \cos K_{ot} + \sin K_1 \sin K_{ot}) - V_2 (\cos K_2 \cos K_{ot} + \sin K_2 \sin K_{ot})}. \quad (3.2)$$

В полученное уравнение подставляем выражения $\sin K_{ot}$ и $\cos K_{ot}$. Для числителя справедливо следующее выражение:

$$\sin K_1 \cos K_{ot} - \cos K_1 \sin K_{ot} =$$

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

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

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

Знаменатель выражения (3.2) принимает следующий вид:

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

$$\begin{aligned}
& V_1[\cos K_1(V_1 \cos K_1 - V_2 \cos K_2) + \sin K_1(V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2)] - \\
& - V_2[\cos K_2(V_1 \cos K_1 - V_2 \cos K_2) + \sin K_2(V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2)] = \\
& V_1^2 \cos^2 K_1 - V_1 V_2 \cos K_1 \cos K_2 + V_1^2 \sin^2 K_1 - V_1 V_2 \sin K_1 \sin K_2 - \\
& - V_1 V_2 \cos K_2 \cos K_1 + V_2^2 \cos^2 K_2 - V_1 V_2 \sin K_1 \sin K_2 + V_2^2 \sin^2 K_2].
\end{aligned}$$

После группирования членов последнее выражение принимает вид:

$$V_1^2 - 2V_1 V_2 \cos K_1 \cos K_2 - 2V_1 V_2 \sin K_1 \sin K_2 + V_2^2.$$

В итоге искомая производная $\frac{\partial K_{\text{от}}}{\partial V_1}$ принимает следующий вид:

$$\frac{\partial K_{\text{от}}}{\partial V_1} = \frac{-V_2 \sin(K_1 - K_2)}{V_1^2 + V_2^2 - 2V_1 V_2 \cos(K_1 - K_2)}.$$

Окончательно производная $\frac{\partial K_{\text{от}}}{\partial V_1}$, с учетом обозначения $\Delta K = K_2 - K_1$,

выражается следующим образом:

$$\frac{\partial K_{\text{от}}}{\partial V_1} = \frac{V_2 \sin \Delta K}{V_1^2 + V_2^2 - 2V_1 V_2 \cos \Delta K}. \quad (3.3)$$

Как показывает анализ полученного выражения, относительный курс постоянен при изменении скорости судов, если их разность курсов равна 0° или 180° .

В случае, когда оба судна изменяют скорости, изменение относительного курса выражается смешанной производной $\frac{\partial K_{ot}}{\partial V_1 \partial V_2}$, для получения формулы которой воспользуемся выражением (3.3), с учетом равенства $V_1^2 + V_2^2 - 2V_1 V_2 \cos \Delta K = V_{ot}^2$:

$$\frac{\partial K_{ot}}{\partial V_1 \partial V_2} = \frac{\sin \Delta K V_{ot}^2 - V_2 \sin \Delta K (2V_2 - 2V_1 \cos \Delta K)}{V_{ot}^4}, \text{ или}$$

$$\frac{\partial K_{ot}}{\partial V_1 \partial V_2} = \frac{\sin \Delta K}{V_{ot}^2} \left(1 - 2V_2 \frac{V_2 - V_1 \cos \Delta K}{V_{ot}^2} \right).$$

Изменение относительного курса K_{ot} ведет к изменению дистанции кратчайшего сближения $\min D$, что дает возможность увеличить значение $\min D$ до величин, необходимых для безопасного расхождения.

Поэтому, используя подход, предложенный в работе [104], найдем зависимость изменения дистанции кратчайшего сближения от изменения курса судна $\frac{\partial \min D}{\partial K_1}$, для чего используем выражение для расстояния D между судном и целью:

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

где X_1, Y_1 и X_2, Y_2 - координаты соответственно судна и цели.

Первая производная расстояния D выражается следующим образом:

$$\dot{D} = \frac{1}{2} \frac{2(X_2 - X_1)(\dot{X}_2 - \dot{X}_1) + 2(Y_2 - Y_1)(\dot{Y}_2 - \dot{Y}_1)}{D} \text{ или}$$

$$\dot{D} = \frac{(X_2 - X_1)(\dot{X}_2 - \dot{X}_1) + (Y_2 - Y_1)(\dot{Y}_2 - \dot{Y}_1)}{D}. \quad (3.4)$$

С учетом равенств $X_2 = X_1 + D \sin \alpha$ и $Y_2 = Y_1 + D \cos \alpha$, а также соотношений $\dot{X}_1 = V_1 \sin K_1$, $\dot{Y}_1 = V_1 \cos K_1$, $\dot{X}_2 = V_2 \sin K_2$ и $\dot{Y}_2 = V_2 \cos K_2$, выражение (3.4) можно записать в следующем виде:

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

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

Окончательно выражение для изменения дистанции $\dot{D}$ принимает вид:

$$\dot{D} = V_2 \cos(K_2 - \alpha) - V_1 \cos(K_1 - \alpha). \quad (3.5)$$

Дистанцию кратчайшего сближения $\min D$ при выполнении условия (3.5) можно рассчитать с помощью выражения [12]:

$$\min D = \frac{D}{V_0} \text{Abs}[(V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2) \cos \alpha - (V_1 \cos K_1 - V_2 \cos K_2) \sin \alpha], \quad (3.6)$$

$$\text{где } V_0 = \sqrt{V_1^2 + V_2^2 - 2V_1V_2 \cos(K_1 - K_2)}.$$

Для определения производной дистанции кратчайшего сближения $\min D$ по курсу судна K_1 введем обозначение:

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

При этом выражение (3.6) принимает вид: $\min D = \frac{D}{V_o} u$ и искомая производная, учитывая, что V_o зависит от курса K_1 , приобретает вид:

$$\frac{\partial \min D}{\partial K_1} = D \frac{\frac{\partial u}{\partial K_1} V_o - \frac{\partial V_o}{\partial K_1} u}{V_o^2}. \quad (3.7)$$

Найдем выражение для производной $\frac{\partial u}{\partial K_1}$:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial K_1} &= (V_1 \cos K_1 - V_2 \sin K_2) \cos \alpha - (-V_1 \sin K_1 - V_2 \cos K_2) \sin \alpha = \\ &= V_1 (\cos K_1 \cos \alpha + \sin K_1 \sin \alpha) + V_2 (\cos K_2 \sin \alpha - \sin K_2 \cos \alpha), \quad \text{или} \\ \frac{\partial u}{\partial K_1} &= V_2 \sin(\alpha - K_2) + V_1 \cos(\alpha - K_1). \end{aligned}$$

Производная относительной скорости $\frac{\partial V_o}{\partial K_1}$ имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_o}{\partial K_1} &= \frac{\partial}{\partial K_1} [\sqrt{V_1^2 + V_2^2 - 2V_1 V_2 \cos(K_1 - K_2)}] = \frac{1}{2} \frac{2V_1 V_2 \sin(K_1 - K_2)}{V_o}, \quad \text{или} \\ \frac{\partial V_o}{\partial K_1} &= \frac{V_1 V_2 \sin(K_1 - K_2)}{V_o}. \end{aligned}$$

Поэтому:

$$\frac{\partial \min D}{\partial K_1} = \frac{D}{V_o^2} \left\{ \frac{\partial u}{\partial K_1} V_o - u \frac{\partial V_o}{\partial K_1} \right\} \frac{V_o}{V_o} = \frac{D}{V_o^3} \left\{ \frac{\partial u}{\partial K_1} V_o^2 - u \frac{\partial V_o}{\partial K_1} V_o \right\}. \quad (3.8)$$

Подставляя выражения для производных $\frac{\partial u}{\partial K_1}$ и $\frac{\partial V_o}{\partial K_1}$, получим:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \min D}{\partial K_1} = \frac{D}{V_o^3} \{ [V_2 \sin(\alpha - K_2) + V_1 \cos(\alpha - K_1)] [V_1^2 + V_2^2 - 2V_1 V_2 \cos(K_1 - K_2)] - \\ - [(V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2) \cos \alpha - (V_1 \cos K_1 - V_2 \cos K_2) \sin \alpha] [V_1 V_2 \sin(K_1 - K_2)] \}. \end{aligned}$$

Запишем данное выражение в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \min D}{\partial K_1} = \frac{D}{V_o^3} \{ [V_2 (\sin \alpha \cos K_2 - \cos \alpha \sin K_2) + V_1 (\cos \alpha \cos K_1 - \sin \alpha \sin K_1)] \times \\ \times [V_1^2 + V_2^2 - 2V_1 V_2 \cos(K_1 - K_2)] - [V_1 \cos \alpha \sin K_1 - V_2 \cos \alpha \sin K_2 - V_1 \sin \alpha \cos K_1 + \\ + V_2 \sin \alpha \cos K_2] [V_1 V_2 \sin(K_1 - K_2)] \}, \end{aligned}$$

или, группируя подобные члены, получим:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \min D}{\partial K_1} = \frac{D}{V_o^3} \{ [(V_1 \cos K_1 - V_2 \sin K_2) \cos \alpha - (V_1 \sin K_1 - V_2 \cos K_2) \sin \alpha] \times \\ [V_1^2 + V_2^2 - 2V_1 V_2 \cos(K_1 - K_2)] - [(V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2) \cos \alpha + [(V_2 \cos K_2 - V_1 \cos K_1) \sin \alpha] \times \\ \times [V_1 V_2 \sin(K_1 - K_2)] \}. \end{aligned}$$

После преобразований получим зависимость изменения дистанции кратчайшего сближения $\min D$ от изменения курса судна K_1 в следующем виде:

$$\frac{\partial \min D}{\partial K_1} = \frac{DV_1}{V_o^3} [V_2 \cos(K_2 - \alpha) - V_1 \cos(K_1 - \alpha)] [V_1 - V_2 \cos(K_1 - K_2)]. \quad (3.9)$$

Так как дистанция кратчайшего сближения $\min D$ принимает только положительные значения, то для корректной формулы ее производной выражение (3.9) следует умножить на знак выражения

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

Если 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 производной $\frac{\partial \min D}{\partial K_1}$ принимает вид:

$$\frac{\partial \min D}{\partial K_1} = G_s \frac{DV_1}{V_o^3} [V_2 \cos(K_2 - \alpha) - V_1 \cos(K_1 - \alpha)] [V_1 - V_2 \cos(K_1 - K_2)]. \quad (3.10)$$

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

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

Исследуем более подробно полученное выражение (3.10).

Смена знака производной $\frac{\partial \min D}{\partial K_1}$ происходит при значениях курса

судна K_1 , в которых достигается равенство $\frac{\partial \min D}{\partial K_1} = 0$, поэтому найдем

выражения для курса K_1 , при котором $\frac{\partial \min D}{\partial K_1}$ 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:

$$V_2 \cos(K_2 - \alpha) - V_1 \cos(K_1 - \alpha) = 0, \quad (3.11)$$

$$V_1 - V_2 \cos(K_1 - K_2) = 0. \quad (3.12)$$

Учитывая фиксированное значение курса цели K_2 и неизменные значения скоростей судна V_1 и цели V_2 , уравнение (3.11) возможно в тех случаях, если выполняется неравенство:

$$V_1 \geq V_2 \cos(K_2 - \alpha). \quad (3.13)$$

В свою очередь, справедливость равенства (3.12) возможна при выполнении условия:

$$V_1 \leq V_2. \quad (3.14)$$

Допустим неравенство (3.13) выполняется, и из уравнения (3.11) 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:

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

$$K_{12} = \alpha - \arccos[\rho^{-1} \cos(K_2 - \alpha)], \quad (3.15)$$

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 (3.14), найдем корни уравнения (3.12):

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

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

Из последнего уравнения находим:

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

$$K_{14} = K_2 - \arccos \rho. \quad (3.16)$$

Изменение знака производной также происходит при смене знака величина G_s , а это происходит в том случае, когда сама величина G_s 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 и получим:

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

Решая последнее равенство, получим:

$$\begin{aligned} V_1 \sin(K_1 - \alpha) &= V_2 \sin(K_2 - \alpha), \text{ или} \\ \sin(K_1 - \alpha) &= \rho^{-1} \sin(K_2 - \alpha). \end{aligned}$$

Из последнего равенства относительно курса судна K_1 , находим два корня:

$$\begin{aligned} K_{15} &= \alpha + \arcsin[\rho^{-1} \sin(K_2 - \alpha)], \\ K_{16} &= \alpha + \pi - \arcsin[\rho^{-1} \sin(K_2 - \alpha)]. \end{aligned} \quad (3.17)$$

Подводя итоги вышеизложенному, отмечаем, что производная $\frac{\partial \min D}{\partial K_1}$ в общем случае обращается в нуль при шести значениях курса судна $K_{11} \dots K_{16}$, из которых существенными являются только те, которые принадлежат к подмножеству курсов сближения.

Так как бинарные взаимодействия предусматривают изменение курса обоими судами, то необходимо найти зависимость изменения дистанции кратчайшего сближения $\min D$ от изменения курсов, как судна, так и цели. Для этого необходимо найти производную выражения (3.10) по курсу цели K_2 , для чего выражение (3.10) представим в виде:

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

Введем обозначения:

$$\begin{aligned} S_1 &= \frac{DV_1}{V_0}; & S_3 &= \frac{[V_1 - V_2 \cos(K_1 - K_2)]}{V_0^2}; \\ S_2 &= [V_2 \cos(K_2 - \alpha) - V_1 \cos(K_1 - \alpha)]. \end{aligned} \quad (3.18)$$

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

$$\frac{\partial \min D}{\partial K_1} = G_s S_1 S_2 S_3. \quad (3.19)$$

Найдем производную формулы (3.19) по курсу цели K_2 , которая характеризует изменение дистанции кратчайшего сближения $\min D$ от изменения курса судна K_1 и курса цели K_2 :

$$\frac{\partial \min D}{\partial K_1 \partial K_2} = \frac{\partial}{\partial K_2} \{G_s S_1 S_2 S_3\} = G_s \left\{ \left[\frac{\partial S_1}{\partial K_2} S_3 + S_1 \frac{\partial S_3}{\partial K_2} \right] S_2 + S_1 S_3 \frac{\partial S_2}{\partial K_2} \right\}. \quad (3.20)$$

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:

$$\frac{\partial S_1}{\partial K_2} = \frac{\partial}{\partial K_2} \left\{ \frac{DV_1}{V_0} \right\} = DV_1 \frac{\partial}{\partial K_2} (V_0^{-1}) = DV_1 \left\{ -\frac{\frac{\partial}{\partial K_2} [\sqrt{V_1^2 + V_2^2 - 2V_1 V_2 \cos(K_1 - K_2)}]}{V_0^2} \right\} =$$

$$= \frac{DV_1}{V_0^2} \left[\mp \frac{2V_1 V_2 \sin(K_1 - K_2)}{2V_0} \right] = \frac{DV_1}{V_0^2} \left[\mp \frac{V_1 V_2 \sin(K_1 - K_2)}{V_0} \right].$$

Поэтому окончательно получим:

$$\frac{\partial S_1}{\partial K_2} = \mp \frac{DV_1}{V_0^3} V_1 V_2 \sin(K_1 - K_2). \quad (3.21)$$

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

$$\frac{\partial S_2}{\partial K_2} = \frac{\partial}{\partial K_2} [V_2 \cos(K_2 - \alpha) - V_1 \cos(K_1 - \alpha)] = -V_2 \sin(K_2 - \alpha). \quad (3.22)$$

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:

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

$$\frac{\partial S_3}{\partial K_2} = \frac{\mp V_2 \sin(K_1 - K_2) \{V_0^2 - 2 V_1 [V_1 - V_2 \cos(K_1 - K_2)]\}}{V_0^4}. \quad (3.23)$$

Подставим выражения (3.21) .. (3.23) в формулу (3.20):

$$\begin{aligned} \frac{\partial \min D}{\partial K_1 \partial K_2} = G_s \{ & \left\{ \left[\mp \frac{DV_1}{V_0^3} V_1 V_2 \sin(K_1 - K_2) \right] \frac{[V_1 - V_2 \cos(K_1 - K_2)]}{V_0^2} + \right. \\ & + \frac{DV_1}{V_0} \times \frac{\mp V_2 \sin(K_1 - K_2) \{V_0^2 - 2 V_1 [V_1 - V_2 \cos(K_1 - K_2)]\}}{V_0^4} \} [V_2 \cos(K_2 - \alpha) - V_1 \cos(K_1 - \alpha)] + \\ & \left. + \frac{DV_1}{V_0} \frac{[V_1 - V_2 \cos(K_1 - K_2)]}{V_0^2} [-V_2 \sin(K_2 - \alpha)] \right\}. \quad (3.24) \end{aligned}$$

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 (3.24) исследовалось изменение дистанции кратчайшего сближения $\frac{\partial \min D}{\partial K_1 \partial K_2}$.

В диссертационной работе производилось имитационное моделирование изменения дистанции кратчайшего сближения с помощью компьютерной программы, написанной на языке Delphi, результаты которого подробно представлены в главе 5.

Рассматривались три ситуации сближения судов с разным соотношением скоростей судна и цели ($V_1 = V_2$, $V_1 > V_2$ и $V_1 < V_2$), при изменении курсов судна и цели в одну и в противоположную стороны.

Результаты имитационного моделирования приведены в табл. 3.1, в которой для различных значений разности курсов судна и цели ΔK указаны участки роста и уменьшения $\min D$.

Таблица 3.1

Результаты имитационного моделирования изменения $\min D$

$\dot{K}_1$ и $\dot{K}_2$ одного знака ($V_1 > V_2$)			$\dot{K}_1$ и $\dot{K}_2$ разного знака ($V_1 > V_2$)	
ΔK	$\frac{\partial \min D}{\partial K_1 \partial K_2} > 0$	$\frac{\partial \min D}{\partial K_1 \partial K_2} < 0$	$\frac{\partial \min D}{\partial K_1 \partial K_2} > 0$	$\frac{\partial \min D}{\partial K_1 \partial K_2} < 0$
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
$\dot{K}_1$ и $\dot{K}_2$ одного знака ($V_1 < V_2$)			$\dot{K}_1$ и $\dot{K}_2$ разного знака ($V_1 < V_2$)	
ΔK	$\frac{\partial \min D}{\partial K_1 \partial K_2} > 0$	$\frac{\partial \min D}{\partial K_1 \partial K_2} < 0$	$\frac{\partial \min D}{\partial K_1 \partial K_2} > 0$	$\frac{\partial \min D}{\partial K_1 \partial K_2} < 0$
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
$\dot{K}_1$ и $\dot{K}_2$ одного знака ($V_1 = V_2$)				
ΔK	$\frac{\partial \min D}{\partial K_1 \partial K_2} > 0$	$\frac{\partial \min D}{\partial K_1 \partial K_2} < 0$		
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		

Закономерности изменения относительного курса K_{ot} и дистанции кратчайшего сближения $\min D$ в зависимости от параметров движения судна и цели представлены в сводной таблице (табл. 3.2).

Таблица 3.2.

Зависимости изменения K_{ot} и $\min D$ от параметров движения судна и цели

	Изменения относительного курса K_{ot}
1.	$\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_1} = \frac{V_1[V_1 - V_2 \cos(K_1 - K_2)]}{V_{ot}^2}$
2.	$\frac{\partial^2 K_{ot}}{\partial K_1 \partial K_2} = \frac{V_1 V_2 (V_1 + V_2)}{V_{ot}^4} \Delta V \sin \Delta K$
3.	$\frac{\partial K_{ot}}{\partial V_1} = \frac{V_2 \sin \Delta K}{V_1^2 + V_2^2 - 2V_1 V_2 \cos \Delta K}$
4.	$\frac{\partial K_{ot}}{\partial V_1 \partial V_2} = \frac{\sin \Delta K}{V_{ot}^2} \left(1 - 2V_2 \frac{V_2 - V_1 \cos \Delta K}{V_{ot}^2} \right)$
	Изменения дистанции кратчайшего сближения $\min D$
5.	$\frac{\partial \min D}{\partial K_1} = G_s \frac{DV_1}{V_o^3} [V_2 \cos(K_2 - \alpha) - V_1 \cos(K_1 - \alpha)] [V_1 - V_2 \cos(K_1 - K_2)]$
6.	$\frac{\partial \min D}{\partial K_1 \partial K_2} = G_s \left\{ \left[\mp \frac{DV_1}{V_o^3} V_1 V_2 \sin(K_1 - K_2) \right] \frac{[V_1 - V_2 \cos(K_1 - K_2)]}{V_o^2} + \right.$ $+ \frac{DV_1}{V_o} \times \frac{\mp V_2 \sin(K_1 - K_2) \{ V_o^2 - 2V_1 [V_1 - V_2 \cos(K_1 - K_2)] \}}{V_o^4} \left. \right\} [V_2 \cos(K_2 - \alpha) - V_1 \cos(K_1 - \alpha)] +$ $+ \frac{DV_1}{V_o} \frac{[V_1 - V_2 \cos(K_1 - K_2)]}{V_o^2} [-V_2 \sin(K_2 - \alpha)] \}.$

3.3. Использование недопустимой области курсов двух судов для выбора безопасного маневра расхождения изменением курсов.

В данном подразделе рассмотрим процедуру расчета совместного маневра изменением курса пары судов с различным отношением скоростей для предупреждения их столкновения.

Допустим, в районе контроля станции управления движением судов находятся два судна, которые опасно сближаются. В начальный момент времени их взаимное положение характеризуется пеленгом α_{ij} и дистанцией D_{ij} , а взаимное перемещение - относительным курсом K_{otij} и скоростью V_{otij} . Дистанция кратчайшего сближения $\min D_{ij}$ судов меньше предельно-допустимой дистанции d_d , т.е. $\min D_{ij} < d_d$, и суда сближаются опасно.

СУДС, осуществляющей управление судами, необходимо найти курсы судов K_i и K_j , при которых их дистанции кратчайшего сближения будут больше предельно- допустимой дистанции d_d .

Аналитически это выражается следующим образом. Из работы [12] используем выражение для $\min D_{ij}$ и получим:

$$\min D_{ij} = \Delta_{ij} D_{ij} \sin(\alpha_{ij} - K_{otij}) \geq d_d \quad (3.25)$$

где $\Delta_{ij} = -1$, при $\sin(\alpha_{ij} - K_{otij}) < 0$, в противном случае $\Delta_{ij} = 1$.

Дистанцию кратчайшего сближения $\min D_{ij}$ можно увеличить изменением относительного курса K_{otij} , т.е. курсов судов K_i и K_j . Найдём значения курсов судов, обеспечивающих выполнение условия (3.25).

Неравенство (3.25) можно представить в следующем виде:

$$\operatorname{tg} K_{otij} \leq \operatorname{tg} [\alpha_{ij} - \arcsin(\frac{d_d}{\Delta_{ij} D_{ij}})]. \quad (3.26)$$

Обозначая $\gamma_{ij} = \alpha_{ij} - \arcsin\left(\frac{d_d}{\Delta_{ij}D_{ij}}\right)$ и учитывая, что согласно [12]:

$$\operatorname{tg}K_{otij} = \frac{V_i \sin K_i - V_j \sin K_j}{V_i \cos K_i - V_j \cos K_j},$$

выражение (3.26) принимает следующий вид:

$$(\sin K_i \cos \gamma_{ij} - \cos K_i \sin \gamma_{ij}) \leq \rho_{ij} (\sin K_j \cos \gamma_{ij} - \cos K_j \sin \gamma_{ij}), \quad (3.27)$$

где $\rho_{ij} = V_j/V_i$.

Рассмотрим вначале соответствующее равенство:

$$(\sin K_i \cos \gamma_{ij} - \cos K_i \sin \gamma_{ij}) = \rho_{ij} (\sin K_j \cos \gamma_{ij} - \cos K_j \sin \gamma_{ij}) \quad \text{или}$$

$$\sin(K_i - \gamma_{ij}) = \rho_{ij} [\sin(K_j - \gamma_{ij})],$$

которое представляет аналитическое выражения границы опасной области S_{Dij} , ограждающей недопустимые сочетания значений пар соответствующих курсов K_i и K_j , причем полученное уравнение имеет два корня, т. е. справедливы следующие аналитические зависимости:

$$K_i - \gamma_{ij} = \arcsin\{\rho_{ij}[\sin(K_j - \gamma_{ij})]\},$$

$$K_i - \gamma_{ij} = \pi - \arcsin\{\rho_{ij}[\sin(K_j - \gamma_{ij})]\}.$$

Как показало проведенное исследование, первый из двух корней уравнения соответствует ситуации сближения судов, а второй – ситуации их удаления. Так как опасность столкновения возникает при сближении судов,

то уравнения границ опасных областей при сближении судов определяется уравнением:

$$K_i = \gamma_{ij} + \arcsin\{\rho_{ij}[\sin(K_j - \gamma_{ij})]\}. \quad (3.28)$$

Полученное выражение (3.28) характеризует границу между опасной и допустимой областями курсов K_i и K_j .

Если $V_i > V_j$, т. е. $\rho_{ij} > 1$, то в выражении (3.28) должно соблюдаться условие $\rho_{ij}[\sin(K_j - \gamma_{ij})] \leq 1$, или $\sin(K_j - \gamma_{ij}) \leq \rho_{ij}^{-1}$. Следовательно, граничные значения курса K_j равны:

$$K_{j1} = \gamma_{ij} + \arcsin(\rho_{ij}^{-1});$$

$$K_{j2} = \gamma_{ij} + \pi - \arcsin(\rho_{ij}^{-1});$$

$$K_{j3} = \gamma_{ij} + \pi + \arcsin(\rho_{ij}^{-1});$$

$$K_{j4} = \gamma_{ij} + 2\pi - \arcsin(\rho_{ij}^{-1}),$$

а область значений переменной K_j определяется выражением:

$$K_j \in \{S_1 \cup S_2\}.$$

В последнем выражении области S_1 и S_2 возможных значений курса K_j аналитически определяются следующим образом:

$$S_1 = [\gamma_{ij} + 2\pi - \arcsin(\rho_{ij}^{-1}), \gamma_{ij} + \arcsin(\rho_{ij}^{-1})],$$

$$S_2 = [\gamma_{ij} + \pi - \arcsin(\rho_{ij}^{-1}), \gamma_{ij} + \pi + \arcsin(\rho_{ij}^{-1})].$$

Области S_1 и S_2 возможных значений курса K_j , удовлетворяющих определяющему неравенству $\sin(K_j - \gamma_{ij}) \leq \rho_{ij}^{-1}$, представлены на рисунке 3.1.

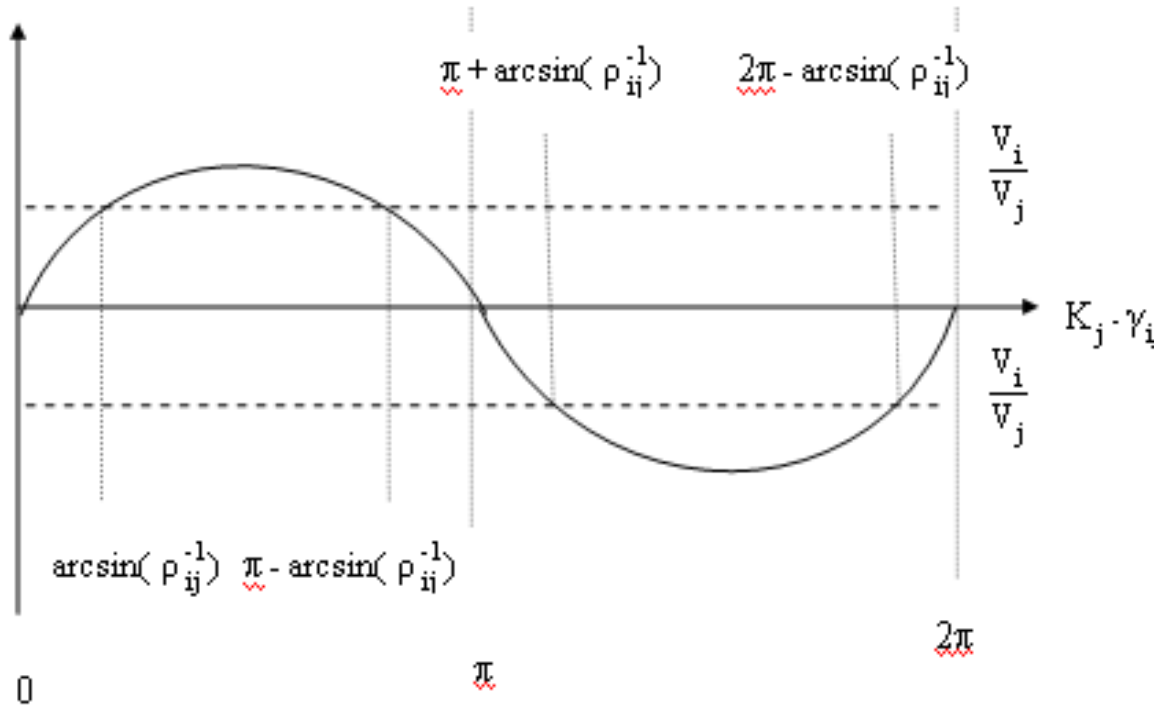


Рисунок 3.1. Определение областей S_1 и S_2

Для графического отображения границы между опасной и допустимой областями курсов K_i и K_j была разработана имитационная компьютерная программа.

Опасная область S_{Dij} курсов K_i и K_j , в которой $\min D_{ij} < d_d$, для ситуации с параметрами $\alpha=75^\circ$, $D=3$ мили, $d_d=1$ миля, $V_i=15$ уз, $V_j=20$ уз, представлена на рисунке 3.2.

В случае $V_i = V_j$ следует:

$$K_i - \gamma_{ij} = \arcsin\{\sin(K_j - \gamma_{ij})\},$$

$$K_i - \gamma_{ij} = \pi - \arcsin\{\sin(K_j - \gamma_{ij})\},$$

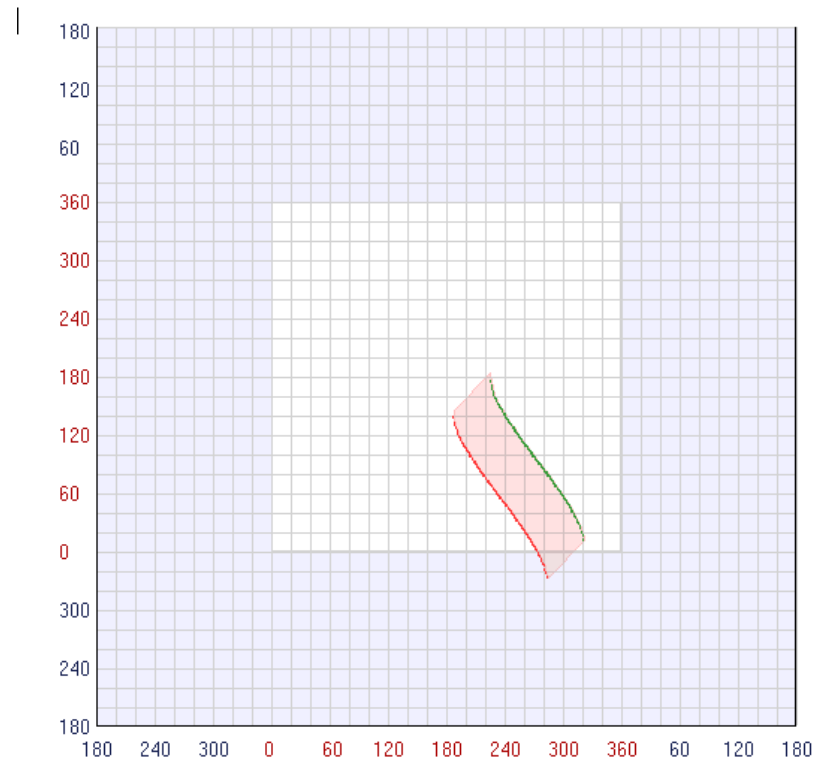


Рисунок 3.2. Опасная область S_{Dij} курсов K_i и K_j при $V_i > V_j$

Условию сближения соответствует зависимость $K_i = \pi + 2\gamma_{ij} - K_j$, которая показана на рисунке 3.3.

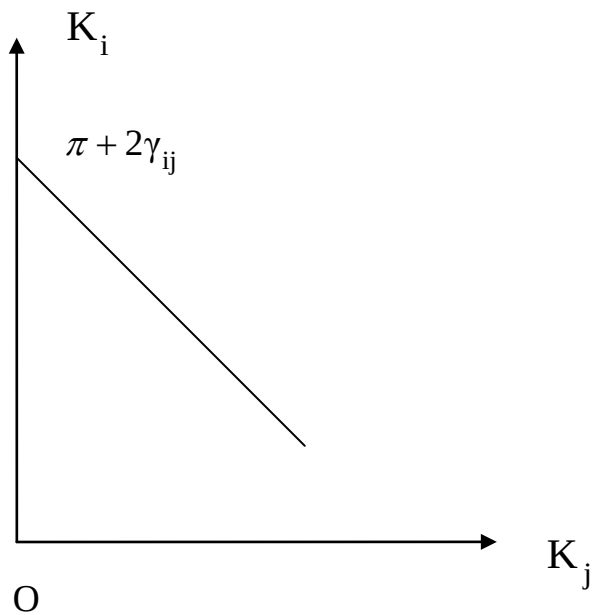


Рисунок 3.3. Зависимость курса K_i от K_j

На рисунке 3.4 показана опасная область S_{Dij} курсов K_i и K_j для той же ситуации, но с $V_i=15$ уз, $V_j=15$ уз.

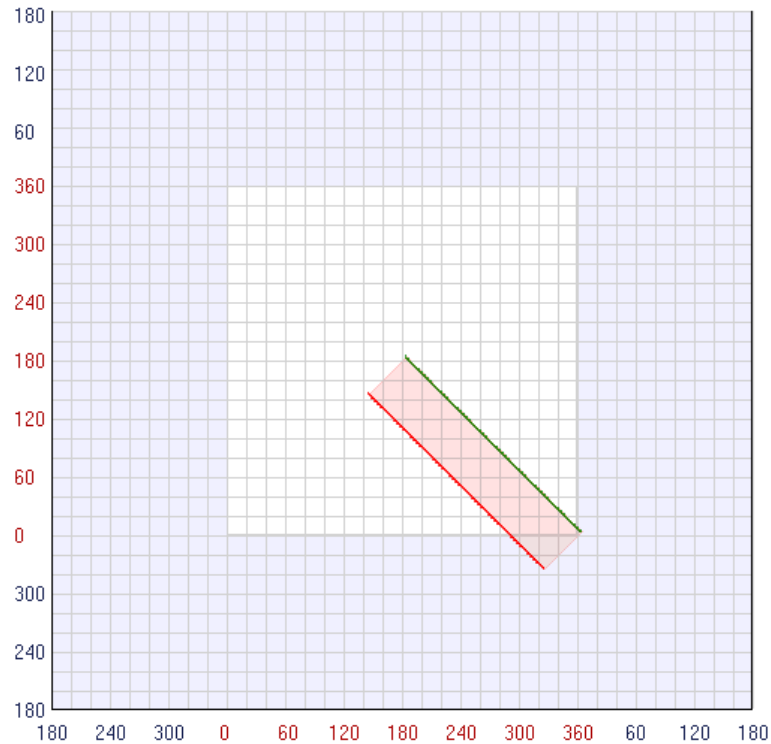


Рисунок 3.4. Опасная область S_{Dij} курсов K_i и K_j при $V_i = V_j$

Если $V_i < V_j$, т. е. $\rho_{ij} < 1$, то зависимость между курсами судов K_i и K_j для случая сближения выражается следующим образом:

$$K_i = \gamma_{ij} + \arcsin\{\rho_{ij}[\sin(K_j - \gamma_{ij})]\}.$$

Так как $\rho_{ij} < 1$, то курс K_j принимает все значения от 0 до 2π .

На рисунке 3.5. приведена опасная область S_{Dij} курсов K_i и K_j для $V_i=20$ уз, $V_j=15$ уз.

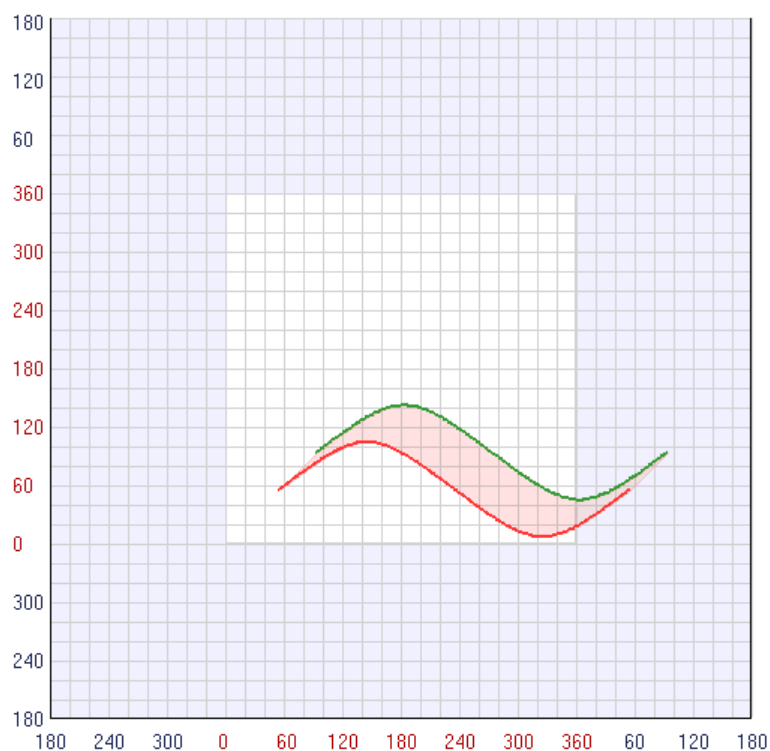


Рисунок 3.5. Опасная область S_{Dij} курсов K_i и K_j при $V_i < V_j$

Таким образом, располагая опасной областью S_{Dij} курсов двух судов можно выбрать их безопасные курсы уклонения, обеспечивающие их расхождения на расстоянии, которое больше величины предельно-допустимой дистанции.

3.4. Выводы по третьей главе.

В третьей главе рассмотрена группа судов, опасно сближающихся в районе, который контролируется СУДС. Произведено формальное описание группы судов, как много управляемой динамической системы, контроль движения которой производится внешним управленцем СУДС.

Описаны основные свойства и признаки такой много управляемой динамической системы взаимодействующих судов.

Предложен принцип формирования взаимодействующей группы судов в ситуации возникновения угрозы столкновения, являющейся управляемой

динамической системой. Структура системы определяется районом контроля СУДС и ее пропускной способностью.

Для синтеза безопасной стратегии расхождения группы судов исследовано влияние параметров движения пары судов на изменение относительного курса и дистанции кратчайшего сближения. Причем рассмотрены случаи, как маневрирования одного судна, так и совместный маневр судна вместе с целью. Получены аналитические выражения для расчета изменения относительного курса при изменении курса одного судна, также получена производная относительного курса по скорости судна. Приводятся выражения изменения относительного курса при одновременном изменении курсов судов, а также в случае одновременного изменения их скоростей.

Также приведены выражения для изменения дистанции кратчайшего сближения при изменении курса только одного судна и в случае изменения курсов, как судна, так и цели. Представлены результаты имитационного моделирования изменения дистанции кратчайшего сближения при изменении курсов судна и цели.

Предложена процедура построения недопустимой области курсов двух судов и использования ее для выбора безопасного маневра расхождения изменением курсов.

Показано, что форма недопустимой области на плоскости курсов судов зависит от соотношения их скоростей и начальной позиции.

Получены аналитические выражения границ опасной области курсов двух сближающихся судов, с помощью которой возможен выбор курсов судов, обеспечивающих их безопасное расхождение на заданном расстоянии.

Приведены результаты имитационного моделирования, позволяющие формирование опасных областей курсов двух судов в графическом виде.

В главе получены необходимые материалы, позволяющие разработку метода формирования стратегии безопасного расхождения группы судов.

ГЛАВА 4.

УПРАВЛЕНИЕ ГРУППОЙ СУДОВ В СИТУАЦИИ ОПАСНОГО СБЛИЖЕНИЯ

4.1. Принцип выбора стратегии расхождения группы судов.

Множество судов, которые опасно сближаются, целесообразно описать, как динамическую n -управляемую систему Σ_{ns} [12]. Наличие и степень опасности столкновения пары судов формализуется понятием ситуационного возмущения ω_{ij} , природа которого заключена в прогнозируемом попадании судов в область недопустимых позиций. Взаимодействия всего множества судов характеризуется матрицей ситуационного возмущения W_{bn} , элементом которой является характеристика ситуационного возмущения ω_{ij} .

Ситуационное возмущение переводит динамическую систему Σ_{ns} из невозмущенного системного состояния в состояния, являющиеся возмущенными. Общая стратегия компенсации ситуационного возмущения предусматривает перевод динамической системы Σ_{ns} в начальное невозмущенное состояние путем уничтожения в структуре системы связей взаимодействия между судами, возникающими в результате опасного сближения.

Будем рассматривать управление динамической системы Σ_{ns} внешним управленцем Ξ (полное управление), который наблюдает матрицу W_{bn} и, при наличии ситуационного возмущения, переводит динамическую систему в невозмущенное состояние общей стратегией, включающей необходимое минимальное число управлений судами матрицы. Таким управленцем может быть СУДС, которая по матрице ситуационного возмущения W_{bn} определяет общую стратегию расхождения $G_n = \{g_1, g_2, \dots, g_i, \dots, g_n\}$ (компенсации

ситуационного возмущения), состоящей из стратегий g_i судов динамической системы Σ_{ns} , а затем каждому из взаимодействующих судов сообщается его частная стратегия, как компонента общей. Все взаимодействующие суда реализуют предписанные частные стратегии g_i , в результате чего опасность столкновения между судами системы исчезает.

Очевидно, развитие принципов полного управления динамической системой Σ_{ns} внешним управленцем Ξ является одним из наиболее перспективных направлений снижения аварийности в стесненных условиях плавания.

Предположим, в стесненном районе плавания имеется некоторое конечное множество судов Mn_o , из которого необходимо сформировать динамическую систему Σ_{ns} , число судов которой равно или меньше числа судов исходного множества Mn_o , т.е. $\Sigma_{ns} \subseteq Mn_o$.

Так, как суда множества Mn_o перемещаются, и их относительные позиции изменяются, то структура динамической системы Σ_{ns} и матрица ситуационного возмущения W_{bn} являются функцией времени t , т.е. $\Sigma_{ns}(t)$ и $W_{bn}(t)$. С учетом того, что структура динамической системы Σ_{ns} , изменяется во времени, то управление системой Σ_{ns} требует наблюдения ее состояния (структуры и матрицы W_{bn}) в некоторый момент наблюдения t_n и прогноз состояния на некоторый интервал времени Δt_n , полагая, что все характеристики системы, не зависящие от времени, остаются неизменными в течение интервала времени Δt_n .

Поэтому предполагается, что группа судов, составляющая динамическую систему Σ_{ns} , в момент времени наблюдения t_n , сохраняется в течение интервала времени Δt_n , а в очередной момент времени

наблюдения $t_n + \Delta t_n$ осуществляется контроль структуры системы Σ_{ns} и матрицы ситуационного возмущения.

Если внешним управленцем является СУДС, то основным принципом выделения группы взаимодействующих судов является учет их близости к СУДС, которым предписывается некоторый район S_c контроля и управления движущихся судов. Группой взаимодействующих судов являются суда, которые находятся в районе контроля и управления S_c , и опасно сближаются с другими судами системы Σ_{ns} .

В этом случае размерность матрицы ситуационного возмущения W_{bn} определяется числом судов, находящихся в районе S_c , а элементы матрицы, т.е. парные ситуационные возмущения судов, находятся по их относительным позициям и параметрам движения. Если судно покидает район S_c , то оно исключается из группы взаимодействующих судов, а если, наоборот, входит в район S_c , то оно включается в динамическую систему Σ_{ns} .

Относительное положение каждой пары судов и их параметры движения характеризуют ситуацию S_i , возникающую для пары судов.

Для декомпозиции подмножества ситуаций опасного сближения S_ω целесообразно применить Правило 17 МППСС-72 и разбить подмножество S_ω на три области $S_{\omega 1}$, $S_{\omega 2}$ и $S_{\omega 3}$, которые называются областями взаимных обязанностей. Причем ситуационные возмущения характеризуют принадлежность ситуации в начальный момент обнаружения опасного сближения к одной из областей $S_{\omega i}$.

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

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

где S_s - подмножество безопасных ситуаций.

Если в матрице ситуационного возмущения W_{bn} имеются элементы ω_{ij} отличные от нуля, то для соответствующей пары судов c_i и c_j существует угроза столкновения. Ее предотвращение (компенсация ситуационного возмущения) требует выбора стратегии расхождения $g_{ij} = \{g_i, g_j\}$. В общем случае парная стратегия расхождения g_{ij} предусматривает маневры каждого из взаимодействующих судов g_i и g_j , однако ситуационное возмущение может быть компенсировано маневром одного из судов при неизменных параметрах движения второго, т. е. (g_i, g_{j0}) или (g_{i0}, g_j) .

Таким образом, стратегия расхождения пары судов g_{ij} может быть реализована одной из трех составных стратегий. Следовательно, $g_{ij} = \{(g_i, g_j) \wedge (g_i, g_{j0}) \wedge (g_{i0}, g_j)\}$.

Если в матрице ситуационного возмущения W_{bn} имеются ненулевые элементы ω_{ij} в одной строке или в одном столбце, то это значит, что одно из судов одновременно опасно сближается с несколькими другими судами.

Допустим, матрица W_{bn} содержит элементы ω_{ij} , ω_{ik} и ω_{is} . Это означает, что судно c_i опасно сближается с судами c_j , c_k и c_s , причем $\omega_{jk} = 0$, $\omega_{js} = 0$ и $\omega_{ks} = 0$. Поэтому компенсация ситуационных возмущений ω_{ij} , ω_{ik}

и ω_{is} возможна стратегиями $g_{ij} = \{(g_i, g_j) \wedge (g_i^{(j)}, g_{j0}) \wedge (g_{i0}, g_j)\}$,

$g_{ik} = \{(g_i, g_k) \wedge (g_i^{(k)}, g_{k0}) \wedge (g_{i0}, g_k)\}$ и $g_{is} = \{(g_i, g_s) \wedge (g_i^{(s)}, g_{s0}) \wedge (g_{i0}, g_s)\}$.

Обращаем внимание, что в каждой из стратегий имеется составная стратегия самостоятельной компенсации ситуационного возмущения, таким образом,

стратегиями $(g_i^{(j)}, g_{jo})$, $(g_i^{(k)}, g_{ko})$ и $(g_i^{(s)}, g_{so})$ судно c_i может самостоятельно безопасно разойтись со всеми тремя судами, сохраняющими свои параметры движения. Если пересечение всех трех стратегий уклонения $g_i^{(j)}$, $g_i^{(k)}$ и $g_i^{(s)}$ существует, т. е. $g_i^{(\Sigma\Sigma)} = \{g_i^{(j)} \cap g_i^{(k)} \cap g_i^{(s)}\} \neq \emptyset$, то одной стратегий уклонения $g_i^{(\Sigma\Sigma)}$ судно c_i может компенсировать ситуационные возмущения ω_{ij} , ω_{ik} и ω_{is} . Если же стратегия уклонения $g_i^{(\Sigma\Sigma)}$ не существует ($g_i^{(\Sigma\Sigma)} = \emptyset$), то следует аналогично проверить возможность компенсации ситуационных возмущений маневрами уклонения двух судов или, в крайнем случае, всех трех судов.

В таких ситуациях, когда судно опасно сближается с несколькими судами, то наиболее предпочтительным является вариант компенсации возникших ситуационных возмущений общей стратегией уклонения одного судна. С увеличением числа судов, маневрами которых компенсируется ситуационное возмущение, предпочтение стратегий уменьшается.

Если существует несколько стратегий расхождения маневрами одинакового числа судов, то более предпочтительной является стратегия, реализация которой требует меньшего уклонения маневрирующих судов от их программных траекторий движения [12].

При анализе матрицы ситуационного возмущения W_{bn} выявляются строки матрицы, содержащие элементы $\omega_{ij} \neq 0$. Если элементов несколько, то находим стратегию $g_{mini}^{(\Sigma)}$ их компенсации минимальным числом маневрирующих судов. Если в строке один ненулевой элемент ω_{ij} , то выбираем стратегию $g_i^{(V)}$ его компенсации маневром одного судна с большей скоростью.

После анализа всех строк матрицы W_{bn} общая стратегия расхождения $G_n = \bigcup_r g_{minr}^{(\Sigma\Sigma)} \cdot g_r^{(V)}$ содержит стратегии, позволяющие компенсировать

ситуационные возмущения матрицы W_{bn} минимальным количеством взаимодействующих судов.

4.2. Стратегия расхождения трех судов изменением их курсов

Допустим, в районе контроля станции управления движением судов находятся три судна, которые опасно сближаются. В начальный момент времени их взаимное положение характеризуется пеленгами α_{ij} и дистанциями D_{ij} ($i \neq j$), а взаимное перемещение - относительными курсами K_{otij} и скоростями V_{otij} . Дистанции кратчайшего сближения $\min D_{ij}$ каждой пары судов меньше предельно- допустимой дистанции d_d , т.е. $\min D_{ij} < d_d$, и все три судна сближаются опасно.

СУДС, осуществляющей управление судами, необходимо найти курсы судов K_i при неизменных скоростях V_i , при которых их дистанции кратчайшего сближения будут больше предельно- допустимой дистанции d_d .

Аналитически это выражается следующим образом. Из работы [12] используем выражение для $\min D_{ij}$ и получим:

$$\begin{cases} \min D_{12} = \Delta_{12} D_{12} \sin(\alpha_{12} - K_{ot12}) \geq d_d; \\ \min D_{13} = \Delta_{13} D_{13} \sin(\alpha_{13} - K_{ot13}) \geq d_d; \\ \min D_{23} = \Delta_{23} D_{23} \sin(\alpha_{23} - K_{ot23}) \geq d_d, \end{cases} \quad (4.1)$$

где $\Delta_{ij} = -1$, при $\sin(\alpha_{ij} - K_{otij}) < 0$, в противном случае $\Delta_{ij} = 1$.

Дистанцию кратчайшего сближения $\min D_{ij}$ можно увеличить изменением K_{otij} , т.е. курсов судов K_i . Найдем значения курсов судов, обеспечивающих выполнение условия (4.1).

Каждое из неравенств (4.1) можно представить в следующем виде:

$$\Delta_{ij} D_{ij} \sin(\alpha_{ij} - K_{otij}) \geq d_d, \text{ или } \alpha_{ij} - K_{otij} \geq \arcsin\left(\frac{d_d}{\Delta_{ij} D_{ij}}\right).$$

Из последнего неравенства можно записать:

$$\operatorname{tg} K_{otij} \leq \operatorname{tg}\left[\alpha_{ij} - \arcsin\left(\frac{d_d}{\Delta_{ij} D_{ij}}\right)\right]. \quad (4.2)$$

Правая часть неравенства (4.2) не зависит от искомых переменных K_i и ее

можно обозначить, как постоянную величину, $k_{ij} = \operatorname{tg}\left[\alpha_{ij} - \arcsin\left(\frac{d_d}{\Delta_{ij} D_{ij}}\right)\right]$.

Величина $\operatorname{tg} K_{otij}$ является функцией курсов судов K_i и K_j , и согласно [3]:

$$\operatorname{tg} K_{otij} = \frac{V_i \sin K_i - V_j \sin K_j}{V_i \cos K_i - V_j \cos K_j}.$$

С учетом приведенных результатов выражение (4.2) принимает вид:

$$\frac{V_i \sin K_i - V_j \sin K_j}{V_i \cos K_i - V_j \cos K_j} \leq k_{ij},$$

откуда получаем неравенство:

$$V_i \sin K_i - V_j \sin K_j \leq V_i k_{ij} \cos K_i - V_j k_{ij} \cos K_j, \quad \text{или}$$

$$V_i \sin K_i - V_i k_{ij} \cos K_i \leq V_j \sin K_j - V_j k_{ij} \cos K_j. \quad (4.3)$$

Если обозначим $\gamma_{ij} = \alpha_{ij} - \arcsin\left(\frac{d_d}{\Delta_{ij} D_{ij}}\right)$, то выражение (4.3) принимает

следующий вид:

$$V_i (\sin K_i - \operatorname{tg} \gamma_{ij} \cos K_i) \leq V_j (\sin K_j - \operatorname{tg} \gamma_{ij} \cos K_j).$$

Умножим обе части неравенства на величину $\frac{\cos\gamma_{ij}}{V_i}$ и получим:

$$(\sin K_i \cos \gamma_{ij} - \cos K_i \sin \gamma_{ij}) \leq \rho_{ij} (\sin K_j \cos \gamma_{ij} - \cos K_j \sin \gamma_{ij}), \quad (4.4)$$

где $\rho_{ij} = \frac{V_j}{V_i}$.

Используя уравнение (4.4), запишем систему неравенств для трех судов:

$$\begin{cases} (\sin K_1 \cos \gamma_{12} - \cos K_1 \sin \gamma_{12}) \leq \rho_{12} (\sin K_2 \cos \gamma_{12} - \cos K_2 \sin \gamma_{12}); \\ (\sin K_1 \cos \gamma_{13} - \cos K_1 \sin \gamma_{13}) \leq \rho_{13} (\sin K_3 \cos \gamma_{13} - \cos K_3 \sin \gamma_{13}); \\ (\sin K_2 \cos \gamma_{23} - \cos K_2 \sin \gamma_{23}) \leq \rho_{23} (\sin K_3 \cos \gamma_{23} - \cos K_3 \sin \gamma_{23}). \end{cases} \quad (4.5)$$

Приведенная система неравенств содержит три искомые переменные K_1 , K_2 и K_3 . Решая систему (4.5) относительно курсов судов, определим параметры совместного маневра изменения курсов судов, обеспечивающего их безопасное расхождение.

Для решения системы неравенств (4.5) вначале рассмотрим соответствующую систему равенств:

$$\begin{cases} (\sin K_1 \cos \gamma_{12} - \cos K_1 \sin \gamma_{12}) = \rho_{12} (\sin K_2 \cos \gamma_{12} - \cos K_2 \sin \gamma_{12}); \\ (\sin K_1 \cos \gamma_{13} - \cos K_1 \sin \gamma_{13}) = \rho_{13} (\sin K_3 \cos \gamma_{13} - \cos K_3 \sin \gamma_{13}); \\ (\sin K_2 \cos \gamma_{23} - \cos K_2 \sin \gamma_{23}) = \rho_{23} (\sin K_3 \cos \gamma_{23} - \cos K_3 \sin \gamma_{23}), \end{cases} \quad (4.6)$$

каждое уравнение которой представляет аналитическое выражения границы опасной области S_{Dij} , ограждающей недопустимые сочетания значений пар соответствующих курсов K_i и K_j . Получив из системы уравнений (4.6) опасные области S_{D12} , S_{D13} и S_{D23} , следует выбрать такие значения K_1 , K_2

и K_3 , парные сочетания которых не принадлежали бы соответствующим опасным областям, что аналитически выражается следующим образом:

$$(K_1, K_2) \notin S_{D12};$$

$$(K_1, K_3) \notin S_{D13};$$

$$(K_2, K_3) \notin S_{D23}.$$

Полученные значения курсов судов обеспечат их расхождение на расстояниях, превосходящих предельно-допустимую дистанцию сближения.

В случае опасного сближения трех судов следует определить опасные области каждой пары судов S_{D12} , S_{D13} и S_{D23} (рисунок 4.1) и безопасные курсы расхождения определяются точкой пространства $OK_1K_2K_3$, проекции которой не принадлежат ни одной опасной области, например точка М.

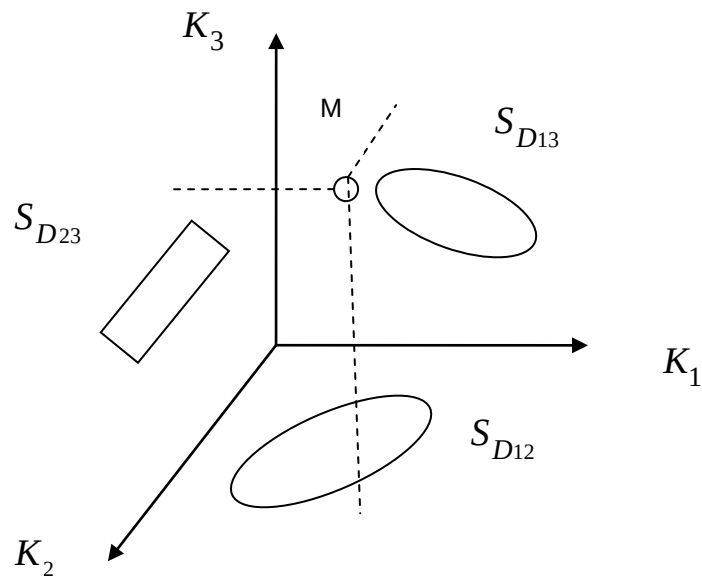


Рисунок 4.1. Геометрическая интерпретация безопасных курсов расхождения судов

В качестве примера рассмотрим ситуацию сближения трех судов с параметрами:

$$V_1 = 20, V_2 = 12, V_3 = 20, K_1 = 60, K_2 = 180, K_3 = 300, \alpha_{12} = 45, \\ \alpha_{13} = 75, \alpha_{32} = 315, D_{12} = 3,0, D_{13} = 3,5, D_{32} = 2,5.$$

Начальная ситуация показана на рисунке 4.2. Начальные позиции судов обозначены цифрами 1, 2 и 3. Направление и скорость движения судов показаны векторами V_1 , V_2 и V_3 .

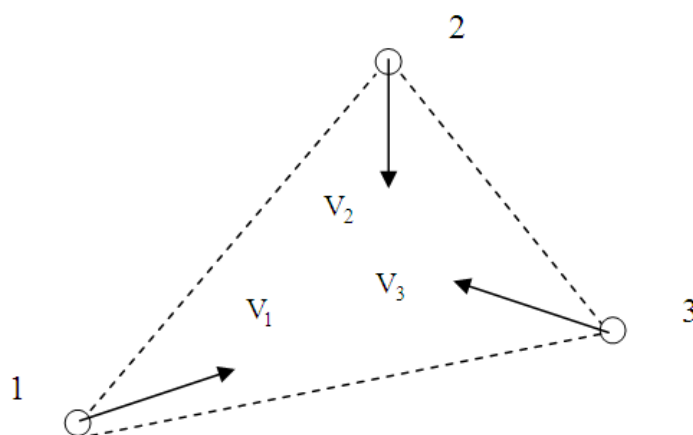


Рисунок 4.2. Начальная ситуация опасного сближения трех судов

Для каждой пары судов с помощью соотношений (4.5) на компьютере рассчитывались опасные области S_{D12} , S_{D13} и S_{D23} , которые представлены на рис. 2.

Как следует из рисунка 4.2, парные значения начальных курсов судов принадлежат опасным областям, соответственно это точки A_{12} , A_{23} и A_{13} . Следовательно, дистанции кратчайшего сближения каждой пары судов меньше предельно- допустимой дистанции.

Для безопасного расхождения необходимо изменить курсы не меньше, чем двух судов, так, чтобы парные курсы (K_i, K_j) не принадлежали опасным областям, т.е. выполнялось требование (4.6).

Выбор курсов уклонения для безопасного расхождения удобно производить графическим способом при наличии графического отображения опасных областей S_{Dij} , как показано на рисунке 4.3. Анализ положения

опасных областей показывает, что удобнее всего изменить курсы первого и третьего судов, причем их отклонение от начальных курсов будет минимальным. Для первого судна целесообразно изменить курс влево до значения 340° . В этом случае, как следует из рисунка 4.3, парные курсы (K_1, K_2) и (K_1, K_3) не попадают в соответствующие опасные области при минимальном изменении курса K_1 .

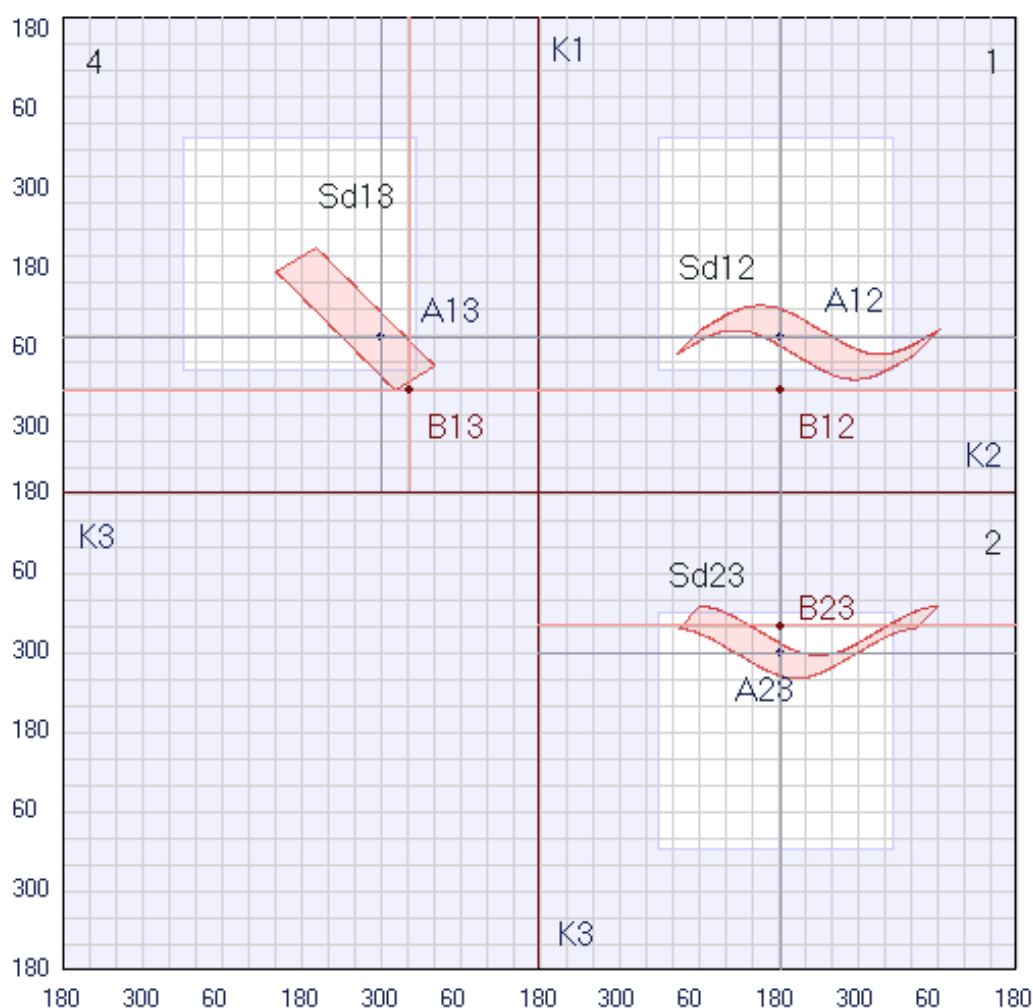


Рисунок 4.3. Опасные области S_{D12} , S_{D13} и S_{D23}

Аналогично, при минимальном изменении курса K_3 вправо на курс 340° парные значения курсов, которые показаны на рисунке 4.3 точками B12, B23 и B13 не попадают в области S_{D12} , S_{D13} и S_{D23} , и суда безопасно расходятся.

На рисунке 4.4 показана ситуация безопасного расхождения судов, причем второе судно не изменяет курс, первое судно уклоняется влево на курс $K_1 = 340^\circ$, а третье судно изменяет курс вправо до значения $K_3 = 340^\circ$.

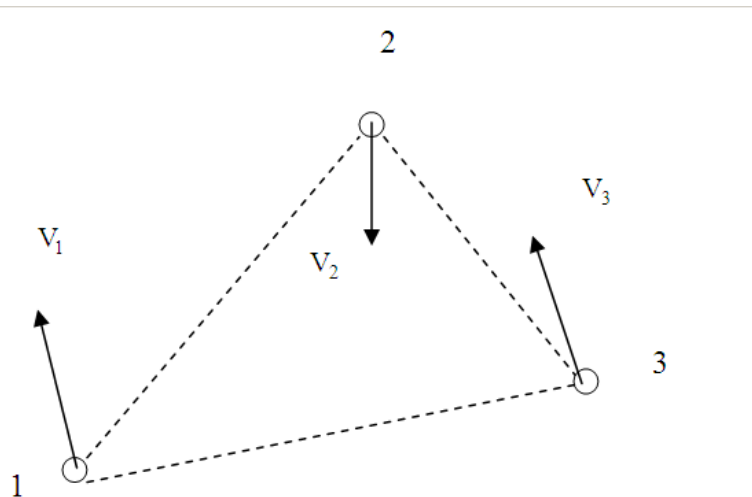


Рисунок 4.4. Ситуация безопасного расхождения изменением курсов K_1 и K_3

4.3. Формализация задачи определения оптимального вектора управления.

Рассмотрим ситуацию, когда в группе, состоящей из n взаимодействующих судов, возникает ситуационное возмущение, компенсация которого производится вектором управления $u = \{\Delta K_i\}$, где ΔK_i - изменение курсов каждого из судов. Значения ΔK_i выбираются таким образом, что дистанции кратчайшего сближения $\min D_{ij}$ каждой пары судов не меньше предельно-допустимой дистанции d_d ($\min D_{ij} \geq d_d$).

Множество значений управляющего вектора U , при которых для всех $\min D_{ij}$ выполняется условие $\min D_{ij} \geq d_d$, составляет его допустимую область U_d . Каждому значению вектора управления $u = \{\Delta K_i\} \in U_d$ соответствует критерий оптимальности $Q = \sum_{i=1}^n \Delta K_i^2$. Обращаем внимание, что критерий

оптимальности Q представляет собой квадрат расстояния в n – мерном пространстве $\Delta K_1 \times \Delta K_2 \times \dots \times \Delta K_i \times \dots \times \Delta K_{n-1} \times \Delta K_n$. Очевидно, что оптимальное значение вектора управления $u_0 = \{\Delta K_i\}$ достигается при минимуме критерия оптимальности Q , т.е. $\sum_{i=1}^n \Delta K_i^2 = \min$. Это означает, что при минимальном значении Q суда безопасно расходятся на кратчайших расстояниях $\min D_{ij} \geq d_d$ при минимальных отклонениях судов от их начальных курсов.

С учетом вышеизложенного задача выбора оптимального вектора управления формализуется следующим образом:

$$\begin{aligned} Q = \sum_{i=1}^n \Delta K_i^2 \rightarrow \min, \\ \min D_{ij} \geq d_d. \end{aligned} \quad (4.7)$$

Последнее условие, как показано раньше, можно записать следующим образом:

$$(K_i, K_j) \notin S_{Dij}.$$

Учитываем, что $K_k = K_{nk} + \Delta K_k$, где K_{nk} - начальное значение курса k -го судна, и получим:

$$(K_{ni} + \Delta K_i, K_{nj} + \Delta K_j) \notin S_{Dij}.$$

Поэтому выражение для исходной задачи (4.7) принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} Q = \sum_{i=1}^n \Delta K_i^2 \rightarrow \min, \\ (K_{ni} + \Delta K_i, K_{nj} + \Delta K_j) \notin S_{Dij}. \end{aligned} \quad (4.8)$$

Найдем значения изменений курсов каждого из судов ΔK_k , при которых достигается минимум критерия оптимальности Q , для чего найдем частные производные критерия оптимальности Q по каждой из переменных

ΔK_k и приравняем их к нулю, т.е. $\frac{\partial Q}{\partial \Delta K_k} = 0$. С учетом выражения для Q получим:

$$\frac{\partial}{\partial \Delta K_k} \left(\sum_{i=1}^n \Delta K_i^2 \right) = 2\Delta K_k = 0,$$

откуда следует, что минимальное значение критерия оптимальности Q достигается при стремлении к нулю изменений курсов каждого из судов ΔK_k . Так, как при опасном сближении пары судов точка (K_i, K_j) находится в опасной области S_{Dij} , то минимальное изменение курса достигается при значении курса уклонения, соответствующего границе опасной области. Если точки границы опасной области обозначить (K_i^*, K_j^*) , то минимальное допустимое значение изменение курса ΔK_k , обеспечивающее минимум критерия оптимальности Q , определяется выражением:

$$\begin{aligned} \Delta K_k &= 0, \text{ если } (K_{nk}, K_{nj}) \notin S_{Dij}; \\ \Delta K_k &= K_k^* - K_{nk}, \text{ если } (K_{nk}, K_{nj}) \in S_{Dij}. \end{aligned} \quad (4.9)$$

Если изменения курсов судов ΔK_k выбрать в соответствии с выражением (4.9), то будет реализован оптимальный вектор управления $u_0 = \{\Delta K_i\} \in U_d$, принадлежащий к допустимой области, который обеспечивает минимальное значение критерия оптимальности Q .

В зависимости от структуры матрицы ситуационного возмущения W_{bn} безопасное расхождение судов может потребовать изменения курса различного количества судов взаимодействующей группы (от одного до всех). Поэтому более предпочтительным является маневр расхождения, в котором изменяют курс меньшее количество судов. Другими словами, предпочтительней является управляющий вектор, у которого большее число компонент равно нулю. Однако для каждого значения управляющего вектора

U_m с заданным значением m ненулевых компонент ΔK_i определено граничное значение критерия оптимальности Q_m^* , которое регламентирует необходимость увеличения на единицу размерности управляющего вектора U_{m+1} .

Рассмотрим простейший случай опасного сближения двух судов. В этом случае возникает ситуационное возмущение $\omega_{12}=1$, которое может быть компенсировано изменением курса одного из судов при неизменном курсе другого судна.

Допустим, вначале изменяется курс первого судна K_1 на величину ΔK_1 , причем величина изменения курса ΔK_1 при минимальном значении должна обеспечить обращение ситуационного возмущения ω_{12} в ноль ($\omega_{12}=0$), при этом должно выполняться условие $G_2^{(1)}$ (нижний индекс указывает число в группе взаимодействия, а верхний – изменяемый курс):

$$\begin{aligned} \Delta K_1 &\rightarrow \min, \\ (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n2}) &\notin S_{D12}. \end{aligned} \quad (4.10)$$

При изменении курса второго судна K_2 на величину ΔK_2 также возможна компенсация ситуационного возмущения ω_{12} ($\omega_{12}=0$) с учетом условия $G_2^{(2)}$:

$$\begin{aligned} \Delta K_2 &\rightarrow \min, \\ (K_{n2} + \Delta K_2, K_{n3}) &\notin S_{D23}. \end{aligned} \quad (4.11)$$

Если оба маневра существуют, то выбирается тот маневр, для которого меньше изменение курса ΔK_1 или ΔK_2 . Если маневр изменением курса обозначить $M_i(\Delta K)$, то:

$$M_i(\Delta K) = \begin{cases} M_1(\Delta K_1), & \Delta K_1 < \Delta K_2, \\ M_2(\Delta K_2), & \Delta K_2 < \Delta K_1. \end{cases}$$

Если маневры $M_1(\Delta K_1)$ и $M_2(\Delta K_2)$ не существуют, то следует использовать маневр одновременного изменения курса обоими судами, при этом должно соблюдаться условие $G_2^{(1,2)}$:

$$Q_2^{(1,2)} = (\Delta K_1^2 + \Delta K_2^2) \rightarrow \min,$$

$$(K_{n1} + \Delta K_1, K_{n2} + \Delta K_2) \notin S_{D12}.$$

Рассмотрим зависимость алгоритма поиска оптимального значения управляющего вектора от структуры матрицы ситуационного возмущения W_{bn} для случая группы из трех взаимодействующих судов. В этом случае матрица ситуационного возмущения W_{b3} содержит три частных ситуационных возмущения ω_{12} , ω_{13} и ω_{23} , каждое из которых может принимать значения 1 или 0, за исключением $\omega_{12} = \omega_{13} = \omega_{23} = 0$. Управляющий вектор содержит три компоненты $U_3 = \{\Delta K_1, \Delta K_2, \Delta K_3\}$, а критерий оптимальности $Q_3 = \sum_{i=1}^3 \Delta K_i^2$. Структура матрицы ситуационного возмущения W_{b3} определяется числом ситуационных возмущений ω_{ij} равных 1. Так, если одно ситуационное возмущение равно 1, то в этом случае структура матрицы W_{b3} обозначается $St_3^{(1)}$ и включает 3 варианта ($\omega_{12}=1, \omega_{13}=0, \omega_{23}=0$), ($\omega_{12}=0, \omega_{13}=1, \omega_{23}=0$) и ($\omega_{12}=0, \omega_{13}=0, \omega_{23}=1$).

Рассмотрим один из вариантов $St_3^{(1)}(\omega_{23})$, где в скобках указывается ситуационное возмущение, равное 1, т. е. ($\omega_{12}=0, \omega_{13}=0, \omega_{23}=1$). В данном варианте ситуационное возмущение ω_{23} может быть компенсировано изменением ΔK_2 курса K_2 , предупреждая возникновение $\omega_{12}=1$. В этом случае точка (K_2, K_3) не должна принадлежать опасной области S_{D23} , аналогично точка (K_1, K_2) должна находиться вне области S_{D12} . Аналитически это условие $^{(1)}G_3^{(2)}$ записывается следующим образом:

$$\begin{aligned}
&\Delta K_2 \rightarrow \min, \\
&(K_{n2} + \Delta K_2, K_{n3}) \notin S_{D23}, \\
&(K_{n1}, K_{n2} + \Delta K_2) \notin S_{D12}.
\end{aligned} \tag{4.12}$$

Ситуационное возмущение ω_{23} также может быть компенсировано изменением ΔK_3 курса K_3 , предупреждая возникновение $\omega_{13}=1$. При этом определяющим является условие $^{(1)}G_3^{(3)}$, т. е.:

$$\begin{aligned}
&\Delta K_3 \rightarrow \min, \\
&(K_{n3} + \Delta K_3, K_{n2}) \notin S_{D23}, \\
&(K_{n1}, K_{n3} + \Delta K_3) \notin S_{D13}.
\end{aligned} \tag{4.13}$$

Получив значения ΔK_2 и ΔK_3 , выбирается меньший из них $\Delta K_s = \min(\Delta K_2, \Delta K_3)$ и изменяем соответствующий курс K_s на величину ΔK_s . При этом критерий оптимальности Q_3 достигает минимального значения.

Возможна ситуация, когда справедливо неравенство $D_{ij} > D_d$, однако разность $D_{ij} - D_d$ принимает небольшие значения, то в таком случае возможно, что значения ΔK_2 и ΔK_3 не определены или критерий оптимальности Q_3 превосходит граничное значение Q_m^* . При этом следует использовать совместный маневр изменения курсов двух судов K_2 и K_3 на величины ΔK_2 и ΔK_3 , причем должно соблюдаться условие $^{(1)}G_3^{(2,3)}$:

$$\begin{aligned}
&Q_3 = (\Delta K_2^2 + \Delta K_3^2) \rightarrow \min, \\
&(K_{n2} + \Delta K_2, K_{n3} + \Delta K_3) \notin S_{D23}, \\
&(K_{n1}, K_{n2} + \Delta K_2) \notin S_{D12}, \\
&(K_{n1}, K_{n3} + \Delta K_3) \notin S_{D13}.
\end{aligned} \tag{4.14}$$

Аналогично рассматриваются оставшиеся два варианта структуры $St_3^{(1)}$, т. е. $St_3^{(1)}(\omega_{12})$ и $St_3^{(1)}(\omega_{13})$.

Если два ситуационных возмущения из трех равны 1, то в этом случае структура матрицы W_{b3} обозначается $St_3^{(2)}$ и включает 3 варианта ($\omega_{12}=1, \omega_{13}=1, \omega_{23}=0$), ($\omega_{12}=1, \omega_{13}=0, \omega_{23}=1$) и ($\omega_{12}=0, \omega_{13}=1, \omega_{23}=1$).

Положим, реализуется один из вариантов ($\omega_{12}=0, \omega_{13}=1, \omega_{23}=1$).

Отметим, что изменением только курса K_1 или K_2 компенсировать одновременно ситуационные возмущения ω_{13} и ω_{23} невозможно, так как изменение курса K_1 не влияет на ω_{23} , а изменение курса K_2 не влияет на ситуационное возмущение ω_{13} .

Одновременная компенсация ситуационных возмущений ω_{13} и ω_{23} изменением только одного курса возможна при использовании лишь курса K_3 . При этом точки (K_i, K_j) должны находиться вне соответствующих опасных областей S_{Dij} . Выбор изменения ΔK_3 курса K_3 должен удовлетворять следующему условию $^{(2)}G_3^{(3)}$:

$$\begin{aligned} \Delta K_3 &\rightarrow \min, \\ (K_{n3} + \Delta K_3, K_{n2}) &\notin S_{D23}, \\ (K_{n1}, K_{n3} + \Delta K_3) &\notin S_{D13}. \end{aligned} \quad (4.15)$$

Если значение ΔK_3 не определено или критерий оптимальности Q_3 превосходит граничное значение Q_3^* , то необходимо использовать маневр изменения курса двух судов.

Если использовать пару курсов K_1 и K_3 , то оба курса влияют на ω_{13} , а курс K_3 влияет на ω_{23} . Изменение курсов ΔK_1 и ΔK_3 выбираются таким образом, чтобы соблюдалось условие $^{(2)}G_3^{(1,3)}$:

$$\begin{aligned}
Q_3^{(1,3)} &= (\Delta K_1^2 + \Delta K_3^2) \rightarrow \min, \\
(K_{n2}, K_{n3} + \Delta K_3) &\notin S_{D23}, \\
(K_{n1} + \Delta K_1, K_{n2}) &\notin S_{D12}, \\
(K_{n1} + \Delta K_1, K_{n3} + \Delta K_3) &\notin S_{D13}.
\end{aligned} \tag{4.16}$$

В случае изменения курсов K_1 и K_2 все три ситуационные возмущения претерпевают изменение. Приращение курсов ΔK_1 и ΔK_2 определяются из следующего условия $^{(2)}G_3^{(1,2)}$:

$$\begin{aligned}
Q_3^{(1,2)} &= (\Delta K_1^2 + \Delta K_2^2) \rightarrow \min, \\
(K_{n2} + \Delta K_2, K_{n3}) &\notin S_{D23}, \\
(K_{n1} + \Delta K_1, K_{n2} + \Delta K_2) &\notin S_{D12}, \\
(K_{n1} + \Delta K_1, K_{n3}) &\notin S_{D13}.
\end{aligned} \tag{4.17}$$

И, наконец, компенсация ситуационных возмущений ω_{13} и ω_{23} возможна изменением курсов K_2 и K_3 соответственно на величины ΔK_2 и ΔK_3 , величина которых выбирается с помощью соотношения $^{(2)}G_3^{(2,3)}$:

$$\begin{aligned}
Q_3^{(2,3)} &= (\Delta K_2^2 + \Delta K_3^2) \rightarrow \min, \\
(K_{n2} + \Delta K_2, K_{n3} + \Delta K_3) &\notin S_{D23}, \\
(K_{n1}, K_{n2} + \Delta K_2) &\notin S_{D12}, \\
(K_{n1}, K_{n3} + \Delta K_3) &\notin S_{D13}.
\end{aligned} \tag{4.18}$$

Полученные значения критерия оптимальности $Q_3^{(1,2)}$, $Q_3^{(1,3)}$ и $Q_3^{(2,3)}$ сравниваем между собой, находя с минимальной величиной $Q_{3\min}$, т.е. $Q_{3\min} = \min(Q_3^{(1,2)}, Q_3^{(1,3)}, Q_3^{(2,3)})$, и по его верхним индексам определяем пару

курсов и их приращения, которые являются оптимальными. Если величина $Q_{3\min}$ превосходит пороговое значение Q_3^* , то используется заключительный вариант компенсации ситуационных возмущений ω_{13} и ω_{23} изменением всех трех курсов K_1 , K_2 и K_3 соответственно на величины ΔK_1 , ΔK_2 и ΔK_3 , которые определяются из условия $^{(2)}G_3^{(1,2,3)}$:

$$\begin{aligned} Q_3^{(\Sigma)} &= (\Delta K_1^2 + \Delta K_2^2 + \Delta K_3^2) \rightarrow \min, \\ (K_{n2} + \Delta K_2, K_{n3} + \Delta K_3) &\notin S_{D23}, \\ (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n2} + \Delta K_2) &\notin S_{D12}, \\ (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n3} + \Delta K_3) &\notin S_{D13}. \end{aligned} \quad (4.19)$$

Структура матрицы возмущения $St_3^{(3)}$ реализуется, когда все три ситуационные возмущения равны 1, т.е. $\omega_{12}=1$, $\omega_{13}=1$ и $\omega_{23}=1$. В этом случае для компенсации всех трех ситуационных возмущений необходимо изменение не менее двух курсов, причем в общем случае рассматриваем три пары курсов с приращениями, которые определяются с помощью условий (10), (11) и (12). Затем аналогично находим оптимальный вектор управления u_0 с допустимым значением критерия оптимальности $Q_{3\min}$. Если же $Q_{3\min} > Q_3^*$, то как и в предыдущем случае приращения всех трех курсов находим из условия (13). При любой структуре $St_3^{(k)}$, если решение по поиску оптимального вектора отсутствует, то необходимо уменьшить педельно-допустимую дистанцию кратчайшего сближения d_d и повторить поиск значения оптимального вектора управления.

Для установления общего принципа поиска оптимального управляющего вектора при произвольном количестве судов во взаимодействующей группе рассмотрим группу судов, состоящую из четырех судов. В этом случае матрица ситуационного возмущения содержит 6 элементов, характеризующих наличие ситуационного возмущения между каждой парой

судов, ω_{12} , ω_{13} , ω_{14} , ω_{23} , ω_{24} и ω_{34} . Аналогично предыдущему случаю группы трех судов возможные разные структуры матрицы ситуационного возмущения в зависимости от числа ситуационных возмущений равных единице.

Очевидно, если только одно возмущение равно 1, а остальные равны 0, то реализуется структура матрицы $St_4^{(1)}$. Например, имеет место следующая структура $St_4^{(1)}(\omega_{12})$: $\omega_{12}=1$, $\omega_{13}=\omega_{14}=\omega_{23}=\omega_{24}=\omega_{34}=0$.

Данное ситуационное возмущение будет компенсировано при обращении элементарного ситуационного возмущения ω_{12} в 0, что в принципе возможно изменением одного из курсов K_1 или K_2 .

Если компенсация ситуационного возмущения ω_{12} производится курсом K_1 , то необходимо, чтобы все ситуационные возмущения, находящиеся в одной строке матрицы возмущения с ситуационным возмущением ω_{12} , т. е. ω_{1i} ($i > 1$), при изменении K_1 не приняли значения 1. Другими словами, должно выполняться условие $^{(1)}G_4^{(1)}$:

$$\begin{aligned} \Delta K_1 &\rightarrow \min, \\ (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n2}) &\notin S_{D12}, \\ (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n3}) &\notin S_{D13}, \\ (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n4}) &\notin S_{D14}. \end{aligned} \quad (4.20)$$

При компенсации ситуационного возмущения ω_{12} курсом K_2 одновременно с ω_{12} могут измениться ситуационные возмущения ω_{2i} ($i > 2$), которые находятся в одном столбце с ω_{12} в матрице ситуационного возмущения W_{bn} . Поэтому выбор изменения курса ΔK_2 производится с учетом условия $^{(1)}G_4^{(2)}$:

$$\begin{aligned}
& \Delta K_2 \rightarrow \min, \\
& (K_{n1}, K_{n2} + \Delta K_2) \notin S_{D12}, \\
& (K_{n2} + \Delta K_2, K_{n3}) \notin S_{D23}, \\
& (K_{n2} + \Delta K_2, K_{n4}) \notin S_{D24}.
\end{aligned} \tag{4.21}$$

Если компенсация ситуационного возмущения возможна изменением только курса K_1 или только курса K_2 , то выбираем маневр, у которого изменение курса меньше.

Если компенсация ω_{12} изменением одного курса невозможна, то следует изменять одновременно оба курса K_1 и K_2 . При этом, компенсируя ω_{12} , необходимо предупредить обращение в 1 всех ситуационных возмущений, содержащих в нижнем индексе 1 или 2, т. е. находящихся в одной строке и в одном столбце с ω_{12} в матрице ситуационного возмущения W_{bn} . В этом случае условие компенсации ситуационного возмущения $^{(1)}G_4^{(1,2)}$ имеет вид:

$$\begin{aligned}
& Q_3^{(1,2)} = (\Delta K_1^2 + \Delta K_2^2) \rightarrow \min, \\
& (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n2} + \Delta K_2) \notin S_{D12}, \\
& (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n3}) \notin S_{D13}, \\
& (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n4}) \notin S_{D14}, \\
& (K_{n2} + \Delta K_2, K_{n3}) \notin S_{D23}, \\
& (K_{n2} + \Delta K_2, K_{n4}) \notin S_{D24}
\end{aligned} \tag{4.22}$$

Аналогично рассматриваются другие варианты структуры $St_4^{(1)}(\omega_{ij})$ матрицы ситуационного возмущения.

В случае если два элементарных ситуационных возмущения равны 1, то имеет место структура $St_4^{(2)}$ матрицы ситуационного возмущения. Для изучения особенностей выбора оптимального вектора управления при возникновении такой структуры положим, что реализовался один из ее вариантов ($\omega_{12} = \omega_{13} = 1$, $\omega_{14} = \omega_{23} = \omega_{24} = \omega_{34} = 0$).

Компенсация ситуационных возмущений ω_{12} и ω_{13} изменением только одного курса возможна, если таким курсом является K_1 . Однако при этом ситуационное возмущение ω_{14} должно сохранять значение равно 0. На остальные ситуационные возмущения, значения которых равно 0, изменение курса K_1 не влияет. Поэтому условие $^{(2)}G_4^{(1)}$ обращения матрицы ситуационного возмущения W_{b4} в нулевую матрицу имеет вид:

$$\begin{aligned} \Delta K_1 &\rightarrow \min, \\ (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n2}) &\notin S_{D12}, \\ (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n3}) &\notin S_{D13}, \\ (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n4}) &\notin S_{D14}. \end{aligned} \quad (4.23)$$

Если данное условие $^{(2)}G_4^{(1)}$ изменением курса K_1 не выполняется, то для компенсации ситуационных возмущений ω_{12} и ω_{13} необходимо использовать изменение одновременно двух курсов. Очевидно, что в этом случае могут быть использованы пары курсов, индексы которых содержатся в индексах компенсируемых ситуационных возмущений. В рассматриваемом случае имеется три пары таких курсов (K_1, K_2) , (K_1, K_3) и (K_2, K_3) .

При изменении пары курсов (K_1, K_2) на величину ΔK_1 и ΔK_2 ситуационное возмущение ω_{12} зависит от обоих курсов, а на ситуационное возмущение ω_{13} влияет курс K_1 . При этом необходимо сохранить нулевые значения ситуационных возмущений ω_{14} , ω_{23} и ω_{24} , на которые влияют изменения рассматриваемой пары курсов.

Условие $^{(2)}G_4^{(1,2)}$ обращение матрицы ситуационного возмущения в нулевую матрицу выражается следующим образом:

$$\begin{aligned} Q_4^{(1,2)} &= (\Delta K_1^2 + \Delta K_2^2) \rightarrow \min, \\ (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n2} + \Delta K_2) &\notin S_{D12}, \\ (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n3}) &\notin S_{D13}, \end{aligned} \quad (4.24)$$

$$(K_{n1} + \Delta K_1, K_{n4}) \notin S_{D14},$$

$$(K_{n2} + \Delta K_2, K_{n3}) \notin S_{D23},$$

$$(K_{n2} + \Delta K_2, K_{n4}) \notin S_{D24}.$$

Если для обращения матрицы ситуационного возмущения в нулевую выбрать пару курсов (K_1, K_3) с изменениями ΔK_1 и ΔK_3 , то ситуационное возмущение ω_{12} зависит от курса K_1 , а на ситуационное возмущение ω_{13} влияют оба курса. Величины изменений ΔK_1 и ΔK_3 следует выбирать так, чтобы сохранить нулевые значения ситуационных возмущений ω_{14} , ω_{23} и ω_{34} , на которые влияют изменения курсов K_1 и K_3 . При этом условие $^{(2)}G_4^{(1,3)}$ обращения матрицы W_{b4} в нулевую матрицу формулируется следующим образом:

$$\begin{aligned} Q_4^{(1,3)} &= (\Delta K_1^2 + \Delta K_3^2) \rightarrow \min, \\ (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n2}) &\notin S_{D12}, \\ (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n3} + \Delta K_3) &\notin S_{D13}, \\ (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n4}) &\notin S_{D14}, \\ (K_{n2}, K_{n3} + \Delta K_3) &\notin S_{D23}, \\ (K_{n3} + \Delta K_3, K_{n4}) &\notin S_{D34}. \end{aligned} \tag{4.25}$$

В случае использования пары курсов (K_2, K_3) для компенсации ситуационных возмущений ω_{12} и ω_{13} величины изменений курсов ΔK_2 и ΔK_3 выбираются так, чтобы наряду с обращениями значений ω_{12} и ω_{13} в нулевые сохранялись нулевые значения ситуационных возмущений ω_{23} , ω_{24} и ω_{34} . Следовательно, условие $^{(2)}G_4^{(2,3)}$ обращения матрицы ситуационного возмущения W_{b4} в нулевую матрицу имеет вид:

$$\begin{aligned} Q_4^{(2,3)} &= (\Delta K_2^2 + \Delta K_3^2) \rightarrow \min, \\ (K_{n1}, K_{n2} + \Delta K_2) &\notin S_{D12}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
(K_{n1}, K_{n3} + \Delta K_3) &\notin S_{D13}, \\
(K_{n2} + \Delta K_2, K_{n3} + \Delta K_3) &\notin S_{D23}, \\
(K_{n2} + \Delta K_2, K_{n4}) &\notin S_{D24}, \\
(K_{n3} + \Delta K_3, K_{n4}) &\notin S_{D34}.
\end{aligned} \tag{4.26}$$

Окончательно для маневра выбирается та пара курсов, для которой критерий оптимальности $Q_4^{(i,j)}$ принимает минимальное значение.

Если же обращение матрицы ситуационного возмущения в нулевую одновременным изменением курсов двух судов невозможно, то используется маневр одновременного изменения курсов трех судов, причем выбираются те три курса, которые влияют на компенсируемые ситуационные возмущения. Очевидно, существует только один вариант таких курсов, к которому относятся курсы K_1 , K_2 и K_3 , индексы которых содержатся в индексах компенсируемых ситуационных возмущений.

Обращаем внимание, что ситуационное возмущение ω_{12} зависит от изменений курсов K_1 и K_2 , а ситуационное возмущение ω_{13} - от изменений курсов K_1 и K_3 . При обращении значений ω_{12} и ω_{13} в нулевые следует выбирать значения изменений курсов ΔK_1 , ΔK_2 и ΔK_3 , сохраняющих нулевые значения остальных ситуационных возмущений ω_{14} , ω_{23} , ω_{24} и ω_{34} .

С учетом указанного условие ${}^{(2)}G_4^{(1,2,3)}$ обращения матрицы W_{b4} в нулевую матрицу принимает вид:

$$\begin{aligned}
Q_4^{(\Sigma)} &= (\Delta K_1^2 + \Delta K_2^2 + \Delta K_3^2) \rightarrow \min, \\
(K_{n1} + \Delta K_1, K_{n2} + \Delta K_2) &\notin S_{D12}, \\
(K_{n1} + \Delta K_1, K_{n3} + \Delta K_3) &\notin S_{D13}, \\
(K_{n1} + \Delta K_1, K_{n4}) &\notin S_{D14}, \\
(K_{n2} + \Delta K_2, K_{n3} + \Delta K_3) &\notin S_{D23},
\end{aligned} \tag{4.27}$$

$$(K_{n2} + \Delta K_2, K_{n4}) \notin S_{D24},$$

$$(K_{n3} + \Delta K_3, K_{n4}) \notin S_{D34}.$$

Обращение матрицы ситуационного возмущения в нулевую матрицу изменением всех четырех курсов нецелесообразно, так как изменение курса K_4 не влияет на ситуационные возмущения ω_{12} и ω_{13} , которые надлежит компенсировать. Если ни одним из рассмотренных маневров невозможно обратить матрицу W_{b4} в нулевую, то следует уменьшить предельно-допустимую дистанцию кратчайшего сближения и произвести повторно поиск оптимального маневра компенсации ситуационного возмущения.

Для других вариантов структуры $St_4^{(2)}$ обращение матрицы W_{b4} в нулевую матрицу проводится аналогичным образом.

Рассмотрим структуру $St_4^{(3)}$ матрицы ситуационного возмущения, которая возникает, когда значения трех ситуационных возмущений из шести равны 1. Допустим, реализовался один из вариантов этой структуры, например, $(\omega_{12} = \omega_{13} = \omega_{14} = 1, \omega_{23} = 0, \omega_{24} = \omega_{34} = 0)$. Если во всех трех ситуационных возмущениях равных 1 имеется одинаковый индекс одного из курсов, то возможна компенсация всех трех возмущений курсом с таким индексом. В нашем примере все три ситуационных возмущения содержат индекс 1, поэтому с помощью курса K_1 можно компенсировать все три ситуационных возмущения. Если бы необходимо было компенсировать ситуационные возмущения ω_{12} , ω_{23} и ω_{34} , то одним курсом их компенсация невозможна.

Возвращаясь к приведенному примеру, отметим, что условие $G_4^{(1)}$ компенсации ситуационного возмущения определяется выражением (16). В случае, если компенсация ситуационного возмущения курсом K_1 невозможна, то следует выбрать маневр изменения курсов двух судов. Анализ приведенного варианта структуры $St_4^{(3)}$ показывает, что компенсация возможна тремя парами курсов: (K_1, K_2) , (K_1, K_3) и (K_1, K_4) .

Если применить пару курсов (K_1, K_2) , то ситуационное возмущение ω_{12} зависит от обоих курсов, а ситуационные возмущения ω_{23} и ω_{24} - от курса K_1 . При этом изменения курсов ΔK_1 и ΔK_2 должны сохранять нулевые значения ситуационных возмущений ω_{23} и ω_{24} .

Следовательно, условие ${}^{(3)}G_4^{(1,2)}$ обращения матрицы W_{b4} в нулевую выражается формулой (17). Аналогично при использовании пары курсов (K_1, K_3) условие ${}^{(3)}G_4^{(1,3)}$ определяется выражением (18).

В случае использования пары курсов (K_1, K_4) компенсация ситуационных возмущений со значением 1 изменениями курсов ΔK_1 и ΔK_4 должна сохранить нулевые значения возмущений ω_{24} и ω_{34} , а условие ${}^{(3)}G_4^{(1,4)}$ обращения матрицы W_{b4} в нулевую матрицу записывается в следующем виде:

$$\begin{aligned} Q_4^{(1,4)} &= (\Delta K_1^2 + \Delta K_4^2) \rightarrow \min, \\ (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n2}) &\notin S_{D12}, \\ (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n3}) &\notin S_{D13}, \\ (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n4} + \Delta K_4) &\notin S_{D14}, \\ (K_{n2}, K_{n4} + \Delta K_4) &\notin S_{D24}, \\ (K_{n3}, K_{n4} + \Delta K_4) &\notin S_{D34}. \end{aligned} \quad (4.28)$$

Как и в предыдущих случаях, для маневра выбирается та пара курсов, у которой значение критерия оптимальности ${}^{(3)}Q_4^{(i,j)}$ является минимальным. Если компенсация ситуационного возмущения изменением двух курсов оказалась невозможной, то следует использовать маневр одновременного изменения курсов трех судов. В рассматриваемом примере существует четыре варианта такого маневра изменения курса, а именно (K_1, K_2, K_3) , (K_1, K_2, K_4) , (K_1, K_3, K_4) , и (K_2, K_3, K_4) .

В случае применения варианта маневра (K_1, K_2, K_3) ситуационное возмущение ω_{12} компенсируется курсами K_1 и K_2 , возмущение ω_{13} - курсами K_1 и K_3 , а возмущение ω_{14} - только курсом K_1 . При этом необходимо, чтобы изменения курсов $\Delta K_1, \Delta K_2$ и ΔK_3 сохранили нулевые значения ситуационных возмущений ω_{23}, ω_{24} и ω_{34} . Поэтому условие $G_4^{(1,2,3)}$ выражается соотношением (20). При маневре курсами (K_1, K_2, K_4) возмущение ω_{12} компенсируется курсами K_1 и K_2 , возмущение ω_{13} - курсом K_1 , а возмущение ω_{14} - курсами K_1 и K_4 .

В этом случае условие ${}^{(3)}G_4^{(1,2,4)}$ обращения матрицы W_{b4} в нулевую матрицу принимает вид:

$$\begin{aligned}
 Q_4^{(\Sigma 1)} &= (\Delta K_1^2 + \Delta K_2^2 + \Delta K_4^2) \rightarrow \min \\
 (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n2} + \Delta K_2) &\notin S_{D12}, \\
 (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n3}) &\notin S_{D13}, \\
 (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n4} + \Delta K_4) &\notin S_{D14}, \\
 (K_{n2} + \Delta K_2, K_{n3}) &\notin S_{D23}, \\
 (K_{n2} + \Delta K_2, K_{n4} + \Delta K_4) &\notin S_{D24}, \\
 (K_{n3}, K_{n4} + \Delta K_4) &\notin S_{D34}.
 \end{aligned} \tag{4.29}$$

Если в качестве маневра выбраны изменения курсов (K_1, K_3, K_4) , то рассуждая аналогично, получим условие ${}^{(3)}G_4^{(1,3,4)}$ обращения матрицы W_{b4} в нулевую матрицу:

$$\begin{aligned}
 Q_4^{(\Sigma 2)} &= (\Delta K_1^2 + \Delta K_3^2 + \Delta K_4^2) \rightarrow \min \\
 (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n2}) &\notin S_{D12}, \\
 (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n3} + \Delta K_3) &\notin S_{D13}, \\
 (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n4} + \Delta K_4) &\notin S_{D14}, \\
 (K_{n2}, K_{n3} + \Delta K_3) &\notin S_{D23},
 \end{aligned} \tag{4.30}$$

$$(K_{n2}, K_{n4} + \Delta K_4) \notin S_{D24},$$

$$(K_{n3} + \Delta K_3, K_{n4} + \Delta K_4) \notin S_{D34}.$$

Рассмотрим заключительный вариант маневра изменением курсов трех судов (K_2, K_3, K_4) на величины $\Delta K_2, \Delta K_3$ и ΔK_4 . Условие $^{(3)}G_4^{(2,3,4)}$ обращения матрицы W_{b4} в нулевую матрицу в этом случае имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} Q_4^{(\Sigma 3)} &= (\Delta K_2^2 + \Delta K_3^2 + \Delta K_4^2) \rightarrow \min \\ (K_{n1}, K_{n2} + \Delta K_2) &\notin S_{D12}, \\ (K_{n1}, K_{n3} + \Delta K_3) &\notin S_{D13}, \\ (K_{n1}, K_{n4} + \Delta K_4) &\notin S_{D14}, \\ (K_{n2} + \Delta K_2, K_{n3} + \Delta K_3) &\notin S_{D23}, \\ (K_{n2} + \Delta K_2, K_{n4} + \Delta K_4) &\notin S_{D24}, \\ (K_{n3} + \Delta K_3, K_{n4} + \Delta K_4) &\notin S_{D34}. \end{aligned} \quad (4.31)$$

Из рассмотренных четырех вариантов маневра изменением курсов трех судов выбираем тот, при котором достигается минимум критерия оптимальности $Q_4^{(\Sigma i)}$.

Если компенсировать ситуационное возмущение маневром изменения трех курсов невозможно, то применяется маневр изменения курсов всех четырех судов. При этом ситуационное возмущение ω_{12} компенсируется курсами K_1 и K_2 , возмущение ω_{13} - курсами K_1 и K_3 , а возмущение ω_{14} - только курсами K_1 и K_4 . При этом необходимо, чтобы изменения курсов $\Delta K_1, \Delta K_2, \Delta K_3$ и ΔK_4 сохранили нулевые значения ситуационных возмущений ω_{23}, ω_{24} и ω_{34} . Условие $^{(3)}G_4^{(1,2,3,4)}$ обращения матрицы W_{b4} в нулевую матрицу в этом случае имеет следующий вид:

$$Q_4^{(\Sigma)} = (\Delta K_1^2 + \Delta K_2^2 + \Delta K_3^2 + \Delta K_4^2) \rightarrow \min$$

$$\begin{aligned}
(K_{n1} + \Delta K_1, K_{n2} + \Delta K_2) &\notin S_{D12}, \\
(K_{n1} + \Delta K_1, K_{n3} + \Delta K_3) &\notin S_{D13}, \\
(K_{n1} + \Delta K_1, K_{n4} + \Delta K_4) &\notin S_{D14}, \\
(K_{n2} + \Delta K_2, K_{n3} + \Delta K_3) &\notin S_{D23}, \\
(K_{n2} + \Delta K_2, K_{n4} + \Delta K_4) &\notin S_{D24}, \\
(K_{n3} + \Delta K_3, K_{n4} + \Delta K_4) &\notin S_{D34}.
\end{aligned} \tag{4.32}$$

Если обращение матрицы ситуационного возмущения W_{b4} в нулевую матрицу маневром изменения курсов всех судов невозможно следует уменьшить предельно-допустимую дистанцию кратчайшего сближения и снова выполнить поиск значения оптимального вектора управления.

Аналогично находится оптимальный вектор управления для других вариантов структуры $St_4^{(3)}$.

Структура $St_4^{(4)}$ матрицы W_{b4} возникает, когда значения четырех ситуационных возмущений из шести равны 1. В качестве примера рассмотрим один из возможных вариантов данной структуры ($\omega_{12} = \omega_{13} = \omega_{14} = \omega_{23} = 1, \omega_{24} = \omega_{34} = 0$).

Так как все четыре ситуационных возмущения не содержат одинаковый индекс одного из курсов, то обращение матрицы W_{b4} в нулевую матрицу изменением только одного из курсов (из четырех) невозможно. Поэтому рассмотрим возможность использовать для этой цели совместное изменение двух курсов. Так как изменение всех четырех ситуационных возмущений, равных 1, происходит при использовании пары курсов (K_1, K_2) и (K_1, K_3) , то рассмотрим условия обращения матрицы W_{b4} в нулевую матрицу при изменении этих пар курсов.

При изменении курсов K_1 и K_2 на величины ΔK_1 и ΔK_2 и компенсации ненулевых ω_{ij} , ситуационное возмущение ω_{24} должны сохранять ненулевые значения. Условие ${}^{(4)}G_4^{(1,2)}$ имеет вид:

$$\begin{aligned} Q_4^{(1,2)} &= (\Delta K_1^2 + \Delta K_2^2) \rightarrow \min, \\ (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n2} + \Delta K_2) &\notin S_{D12}, \\ (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n3}) &\notin S_{D13}, \\ (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n4}) &\notin S_{D14}, \\ (K_{n2} + \Delta K_2, K_{n3}) &\notin S_{D23}, \\ (K_{n2} + \Delta K_2, K_{n4}) &\notin S_{D24}. \end{aligned} \quad (4.33)$$

В случае, когда используются изменения курсов K_1 и K_3 на величины ΔK_1 и ΔK_3 при компенсации ситуационных возмущений ω_{ij} , значения которых равно 1, ситуационное возмущение ω_{34} должно сохранять нулевое значение. Следовательно, условие ${}^{(4)}G_4^{(1,3)}$ обращения матрицы W_{b4} в нулевую матрицу формализуется следующим образом:

$$\begin{aligned} Q_4^{(1,3)} &= (\Delta K_1^2 + \Delta K_3^2) \rightarrow \min, \\ (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n2}) &\notin S_{D12}, \\ (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n3} + \Delta K_3) &\notin S_{D13}, \\ (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n4}) &\notin S_{D14}, \\ (K_{n2}, K_{n3} + \Delta K_3) &\notin S_{D23}, \\ (K_{n3} + \Delta K_3, K_{n4}) &\notin S_{D34}. \end{aligned} \quad (4.34)$$

Если оба манера изменения двух курсов возможны, то выбирается тот маневр, критерий оптимальности которого меньше. В случае, когда указанные маневры невозможны, следует произвести маневр одновременного изменения курсов трех судов. При этом возможны 4 варианта такого маневра курсами, индексы которых имеются в индексах ситуационных возмущений

со значениями 1. Такими маневрами являются (K_1, K_2, K_3) , (K_1, K_2, K_4) , (K_1, K_3, K_4) и (K_2, K_3, K_4) .

В случае использования маневра (K_1, K_2, K_3) ситуационное возмущение ω_{12} компенсируется изменением курсов K_1 и K_2 , ситуационное возмущение ω_{13} - курсами K_1 и K_3 , ситуационное возмущение ω_{14} - курсом K_1 и ситуационное возмущение ω_{23} - курсами K_2 и K_3 . При этом изменения курсов ΔK_1 , ΔK_2 и ΔK_3 не должны изменить нулевые значения ситуационных возмущений ω_{24} и ω_{34} . Поэтому условие ${}^{(4)}G_4^{(1,2,3)}$ обращения матрицы W_{b4} в нулевую матрицу имеет вид:

$$\begin{aligned}
 Q_4^{(\Sigma 1)} &= (\Delta K_1^2 + \Delta K_2^2 + \Delta K_3^2) \rightarrow \min \\
 (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n2} + \Delta K_2) &\notin S_{D12}, \\
 (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n3} + \Delta K_3) &\notin S_{D13}, \\
 (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n4}) &\notin S_{D14}, \\
 (K_{n2} + \Delta K_2, K_{n3} + \Delta K_3) &\notin S_{D23}, \\
 (K_{n2} + \Delta K_2, K_{n4}) &\notin S_{D24}, \\
 (K_{n3} + \Delta K_3, K_{n4}) &\notin S_{D34}.
 \end{aligned} \tag{4.35}$$

В случае использования маневра (K_1, K_2, K_4) , условие ${}^{(4)}G_4^{(1,2,4)}$ обращения матрицы W_{b4} в нулевую матрицу выражается следующим образом:

$$\begin{aligned}
 Q_4^{(\Sigma 2)} &= (\Delta K_1^2 + \Delta K_2^2 + \Delta K_4^2) \rightarrow \min \\
 (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n2} + \Delta K_2) &\notin S_{D12}, \\
 (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n3}) &\notin S_{D13}, \\
 (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n4} + \Delta K_4) &\notin S_{D14}, \\
 (K_{n2} + \Delta K_2, K_{n3}) &\notin S_{D23}, \\
 (K_{n2} + \Delta K_2, K_{n4} + \Delta K_4) &\notin S_{D24}, \\
 (K_{n3}, K_{n4} + \Delta K_4) &\notin S_{D34}.
 \end{aligned} \tag{4.36}$$

Если использовать маневр (K_1, K_3, K_4) , то условие ${}^{(4)}G_4^{(1,3,4)}$ обращения матрицы W_{b4} в нулевую матрицу имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 Q_4^{(\Sigma 3)} &= (\Delta K_1^2 + \Delta K_3^2 + \Delta K_4^2) \rightarrow \min \\
 (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n2}) &\notin S_{D12}, \\
 (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n3} + \Delta K_3) &\notin S_{D13}, \\
 (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n4} + \Delta K_4) &\notin S_{D14}, \\
 (K_{n2}, K_{n3} + \Delta K_3) &\notin S_{D23}, \\
 (K_{n2}, K_{n4} + \Delta K_4) &\notin S_{D24}, \\
 (K_{n3} + \Delta K_3, K_{n4} + \Delta K_4) &\notin S_{D34}.
 \end{aligned} \tag{4.37}$$

При использовании заключительного маневра (K_2, K_3, K_4) реализуется условие ${}^{(4)}G_4^{(2,3,4)}$ обращения матрицы W_{b4} в нулевую матрицу:

$$\begin{aligned}
 Q_4^{(\Sigma 4)} &= (\Delta K_2^2 + \Delta K_3^2 + \Delta K_4^2) \rightarrow \min \\
 (K_{n1}, K_{n2} + \Delta K_2) &\notin S_{D12}, \\
 (K_{n1}, K_{n3} + \Delta K_3) &\notin S_{D13}, \\
 (K_{n1}, K_{n4} + \Delta K_4) &\notin S_{D14}, \\
 (K_{n2} + \Delta K_2, K_{n3} + \Delta K_3) &\notin S_{D23}, \\
 (K_{n2} + \Delta K_2, K_{n4} + \Delta K_4) &\notin S_{D24}, \\
 (K_{n3} + \Delta K_3, K_{n4} + \Delta K_4) &\notin S_{D34}.
 \end{aligned} \tag{4.38}$$

Из четырех рассмотренных маневров оптимальным является маневр с минимальным значением критерия оптимальности $Q_4^{(\Sigma i)}$. В случае, если ситуационные возмущения рассмотренными маневрами компенсировать невозможно, то используется маневр изменения курсов всех четырех судов с условием ${}^{(4)}G_4^{(1,2,3,4)}$ обращения матрицы W_{b4} в нулевую матрицу:

$$\begin{aligned}
Q_4^{(\Sigma)} &= (\Delta K_1^2 + \Delta K_2^2 + \Delta K_3^2 + \Delta K_4^2) \rightarrow \min \\
(K_{n1} + \Delta K_1, K_{n2} + \Delta K_2) &\notin S_{D12}, \\
(K_{n1} + \Delta K_1, K_{n3} + \Delta K_3) &\notin S_{D13}, \\
(K_{n1} + \Delta K_1, K_{n4} + \Delta K_4) &\notin S_{D14}, \\
(K_{n2} + \Delta K_2, K_{n3} + \Delta K_3) &\notin S_{D23}, \\
(K_{n2} + \Delta K_2, K_{n4} + \Delta K_4) &\notin S_{D24}, \\
(K_{n3} + \Delta K_3, K_{n4} + \Delta K_4) &\notin S_{D34}.
\end{aligned} \tag{4.39}$$

При невозможности обращения матрицы W_{b4} в нулевую матрицу с помощью рассмотренного маневра следует уменьшить значение предельно-допустимой дистанции и повторить определение оптимального маневра по описанному алгоритму.

В случае реализации структуры $St_4^{(5)}$ матрицы W_{b4} пять из шести ситуационных возмущений имеют значение равное 1. В качестве примера рассмотрим один из вариантов данной структуры ($\omega_{12} = \omega_{13} = \omega_{14} = \omega_{23} = \omega_{24} = 1$, $\omega_{34} = 0$). Очевидно, обращение матрицы W_{b4} в нулевую матрицу изменением только одного из курсов невозможно. Однако это возможно при изменении двух курсов (K_1 , K_2). При этом условие $^{(5)}G_4^{(1,2)}$ совпадает с условием $^{(4)}G_4^{(1,2)}$ и определяется выражением (4.33).

При использовании маневра изменения трех курсов возможны те же варианты, что и при структуре $St_4^{(4)}$, т.е. (K_1 , K_2 , K_3), (K_1 , K_2 , K_4), (K_1 , K_3 , K_4) и (K_2 , K_3 , K_4). Причем условия обращения матрицы W_{b4} в нулевую матрицу в данном случае $^{(5)}G_4^{(1,2,3)}$, $^{(5)}G_4^{(1,2,4)}$, $^{(5)}G_4^{(1,3,4)}$ и $^{(5)}G_4^{(2,3,4)}$ совпадают с соответствующими условиями структуры $St_4^{(4)}$ $^{(4)}G_4^{(1,2,3)}$, $^{(4)}G_4^{(1,2,4)}$, $^{(4)}G_4^{(1,3,4)}$, $^{(4)}G_4^{(2,3,4)}$ и определяются соответствующими выражениями (4.35) -(4.38).

В случае необходимости использования маневра изменения курсов всех четырех судов условие ${}^{(5)}G_4^{(1,2,3,4)}$ обращения матрицы W_{b4} в нулевую матрицу совпадает с условием ${}^{(4)}G_4^{(1,2,3,4)}$ и определяется выражением (4.39).

Если все шесть ситуационных возмущений равны 1, то реализуются структура $St_4^{(6)}$, причем обращение матрицы W_{b4} в нулевую матрицу возможно только используя варианты изменения трех или четырех курсов судов. Причем маневры такие же, как и при структуре $St_4^{(5)}$, а условия ${}^{(6)}G_4^{(1,2,3)}$, ${}^{(6)}G_4^{(1,2,4)}$, ${}^{(6)}G_4^{(1,3,4)}$, ${}^{(6)}G_4^{(2,3,4)}$ и ${}^{(6)}G_4^{(1,2,3,4)}$ обращения матрицы W_{b4} в нулевую матрицу определяются выражениями (4.35) - (4.39). Поиск оптимального маневра производится аналогично вышеизложенному алгоритму.

Если число взаимодействующих судов в группе больше четырех, то способ обращения матрицы W_{bi} ситуационного возмущения в нулевую матрицу строится на рассмотренной ранее процедуре при числе судов в группе до четырех. Обобщенный способ компенсации ситуационных возмущенных и определения оптимального вектора управления для произвольного числа судов в группе взаимодействия рассмотрим в следующей главе.

4.4. Определение параметров оптимального маневра расхождения с помощью графического способа компьютерного моделирования.

Обращаем внимание на то, что задача определения параметров оптимального маневра расхождения в первую очередь требует, чтобы точки, соответствующие парным курсам, (K_i, K_j) находились вне опасной области парных курсов S_{Dij} , что является условием принадлежности точки (K_i, K_j) области допустимых значений:

$$(K_i, K_j) \notin S_{Dij}.$$

Если ситуационное возмущение между судами с курсами K_i и K_j равно 1, т. е. они сближаются опасно, то точка (K_i, K_j) находится в опасной области S_{Dij} . Для безопасного расхождения, как указывалось выше, необходимо изменить курсы судов на величины ΔK_i , ΔK_j и вывести точку $(K_i + \Delta K_i, K_j + \Delta K_j)$ из опасной области S_{Dij} :

$$(K_i + \Delta K_i, K_j + \Delta K_j) \notin S_{Dij},$$

причем изменение одного из курсов может быть равным нулю.

Для оптимальности маневра расхождения при соблюдении последнего условия необходимо, чтобы приращения курсов ΔK_i и ΔK_j были минимальными и удовлетворяли соотношению $(\Delta K_i^2 + \Delta K_j^2) \rightarrow \min$.

Такая геометрическая наглядная интерпретация задачи выбора оптимальных курсов для расхождения позволяет предложить графический способ компьютерного моделирования для решения поставленной задачи, который заключается в следующем. Для пары опасно сближающихся судов на мониторе выводится изображение расширенной плоскости возможных сочетаний курсов $K_i \times K_j$, причем расширенная плоскость имеет размеры $720^\circ \times 720^\circ$, как показано на рис. 1. Использование расширенной плоскости необходимо для корректного отображения опасной области, границы которой рассчитываются с помощью уравнения:

$$(\sin K_i \cos \gamma_{ij} - \cos K_i \sin \gamma_{ij}) = \rho_{ij} (\sin K_j \cos \gamma_{ij} - \cos K_j \sin \gamma_{ij}),$$

где $\rho_{ij} = \frac{V_j}{V_i}$ и $\gamma_{ij} = \alpha_{ij} - \arcsin\left(\frac{d_d}{\Delta_{ij} D_{ij}}\right)$, которое определяется соотношениями

(6). С учетом величины ρ_{ij} на расширенной плоскости отображается опасная область парных курсов, граница которой соответствует равенству значения дистанции кратчайшего $\min D_{ij}$ значению предельно-допустимой дистанции

d_d , т. е. $\min D_{ij} = d_d$ (рисунок 4.5). Внутри опасной области для каждой точки (K_i, K_j) справедливо неравенство $\min D_{ij} < d_d$, а если точка (K_i, K_j) находится вне опасной области, то справедливо неравенство $\min D_{ij} > d_d$, что соответствует безопасному расхождению судов.

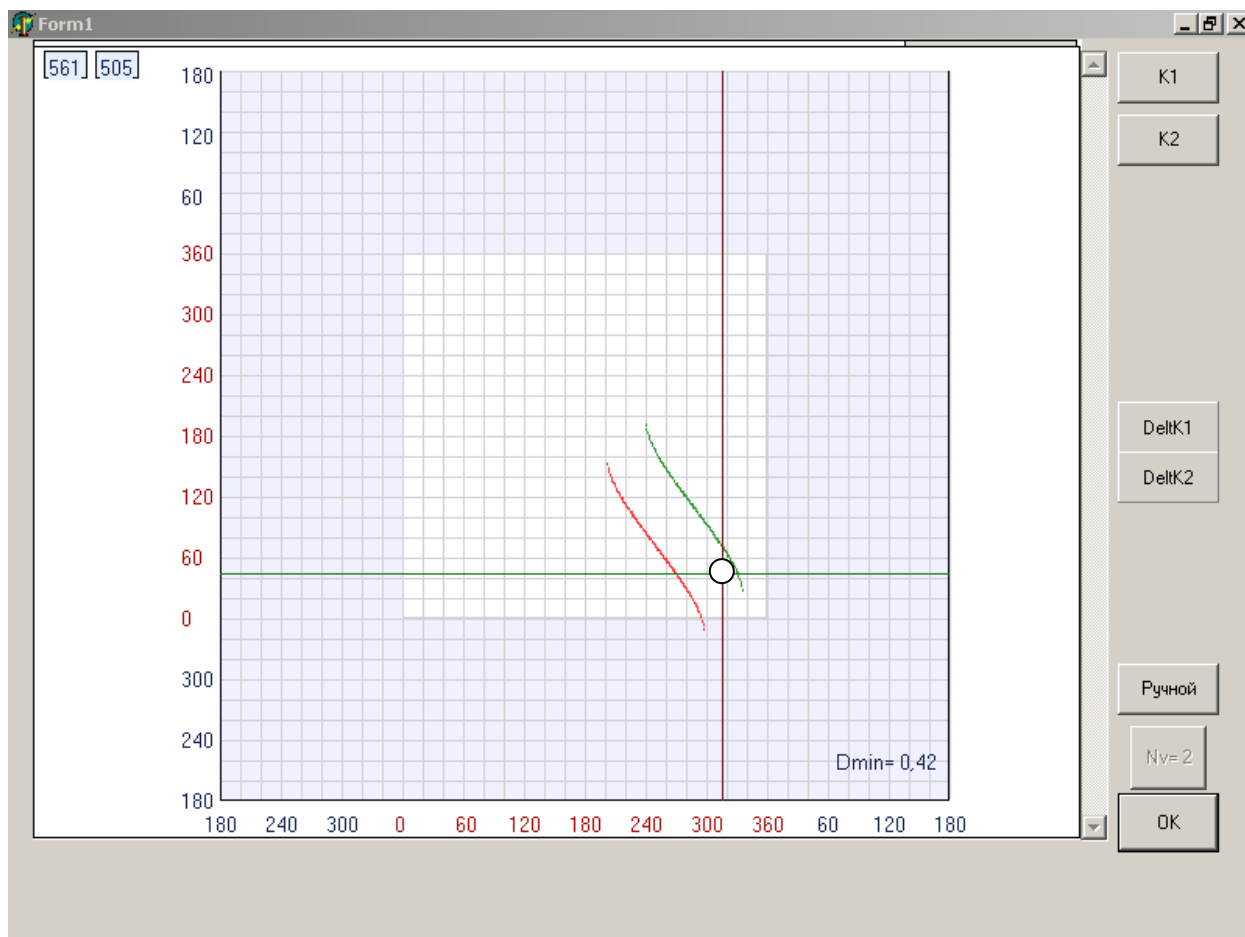


Рисунок 4.5. Отображение опасной области курсов двух судов S_{Dij}

На рисунке 4.5 показана опасная область S_{Dij} для следующих параметров:

$$\alpha_{ij}=90^\circ, D_{ij}=3.0 \text{ мили}, d_d=1,0 \text{ мили}, V_i=15 \text{ узлов}, V_j=20 \text{ узлов}.$$

Для начальных курсов $K_{ni}=45$, и $K_{nj}=315$ начальная точка находится в опасной области курсов (на рисунке 4.5 курс K_j откладывается по оси

ординат и отображается горизонтальной линией, а курс K_i откладывается по оси абсцисс и отображается вертикальной линией). Для данной точки $\min D_{ij}=0,42$ мили и необходимо изменять положение точки (K_i, K_j) , выводя ее из опасной области S_{Dij} . Отметим, что размер опасной области S_{Dij} зависит от соотношения d_d/D_{ij} , причем размер области S_{Dij} увеличивается с ростом отношения d_d/D_{ij} . Так, при уменьшении D_{ij} до 1,5 мили увеличенная область S_{Dij} показана на рисунке 4.6.

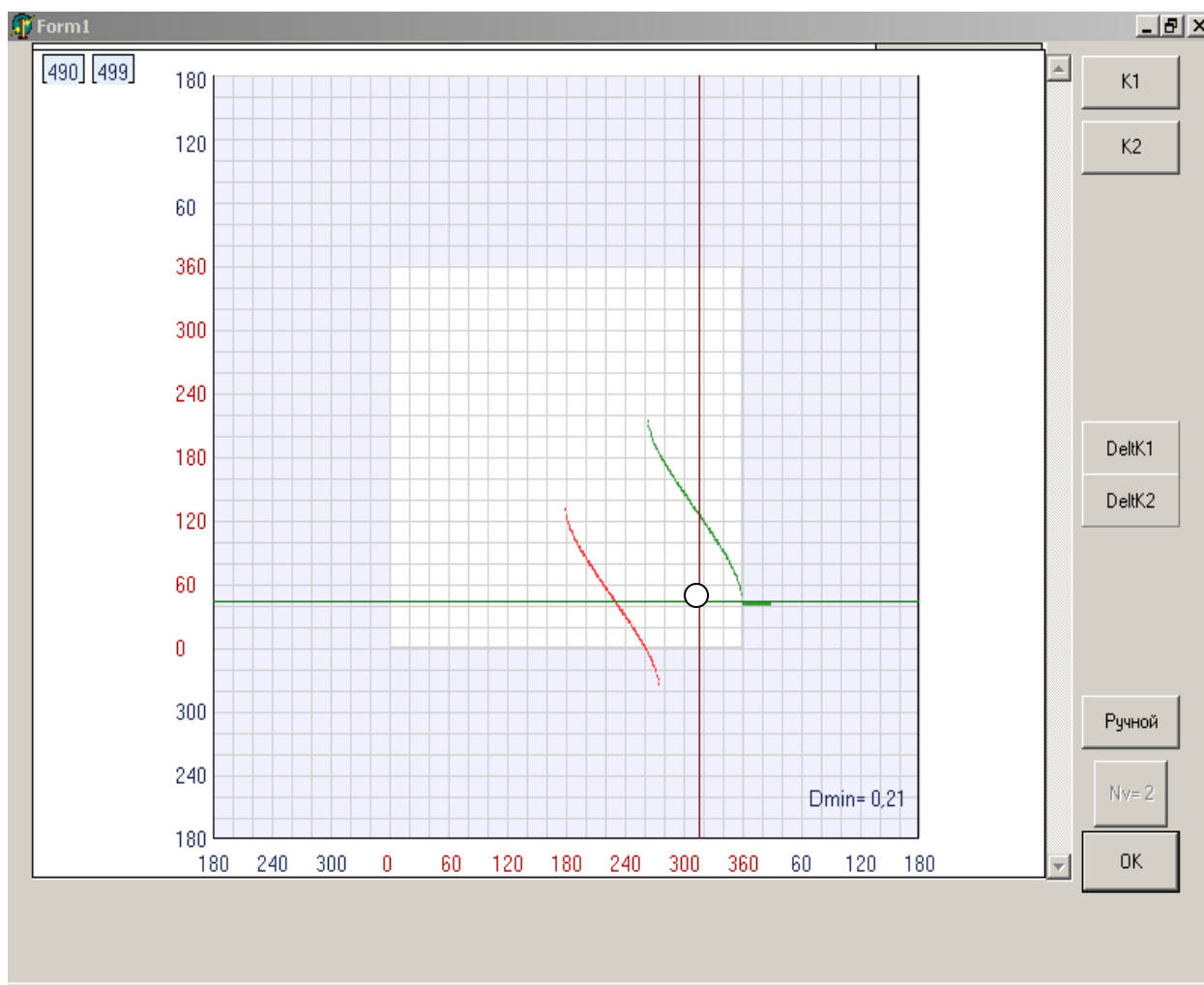


Рисунок 4.6. Увеличение опасной области S_{Dij} при уменьшении D_{ij}

В компьютерной программе, которая отображает расширенную плоскость $K_i \times K_j$ и область опасных курсов S_{Dij} , предусмотрено

имитационное моделирование изменение курсов K_i и K_j с помощью линейки прокрутки, причем выбор курсов K_i и K_j производится с помощью клавишей «K1» и «K2». После выбора курса соответствующей клавишей линейкой прокрутки изменяется выбранный курс и перемещается линия соответствующего курса, задавая новое положение точки (K_i, K_j) на расширенной плоскости. Поэтому оператор, используя линейку прокрутки, изменяет значения курсов K_i, K_j и выводит точку $(K_i + \Delta K_i, K_j + \Delta K_j)$ из опасной области S_{Dij} при минимальных значениях ΔK_i и ΔK_j . Очевидно, что в этом случае точка $(K_i + \Delta K_i, K_j + \Delta K_j)$ находится на границе опасной области на минимальном расстоянии относительно начального положения, как показано на рисунке 4.7.

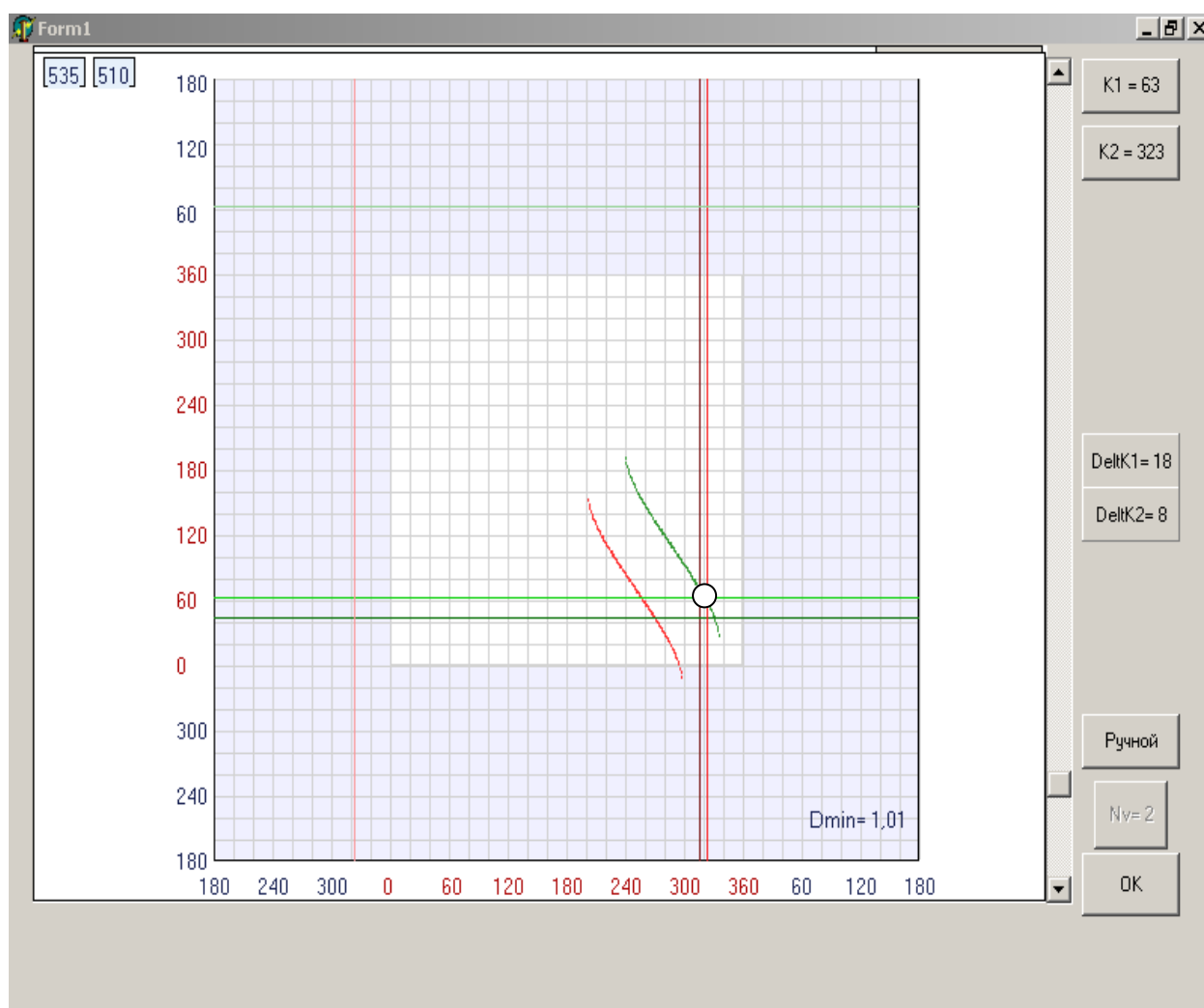


Рисунок 4.7. Определение оптимальных значений курсов K_i и K_j

Из рисунка 4.7 видно, что оптимальные значения курсов равны $K_i = 63^\circ$ и $K_j = 323^\circ$, при этом $\Delta K_i = 18^\circ$ и $\Delta K_j = 8^\circ$. При указанных курсах судов дистанция кратчайшего сближения $\min D_{ij} = 1,01$ мили.

В случае, когда группа состоит из трех судов на экран монитора выводятся три расширенные плоскости $K_1 \times K_2$, $K_1 \times K_3$ и $K_2 \times K_3$ с соответствующими опасными областями S_{D12} , S_{D13} и S_{D23} (рисунок 4.8).

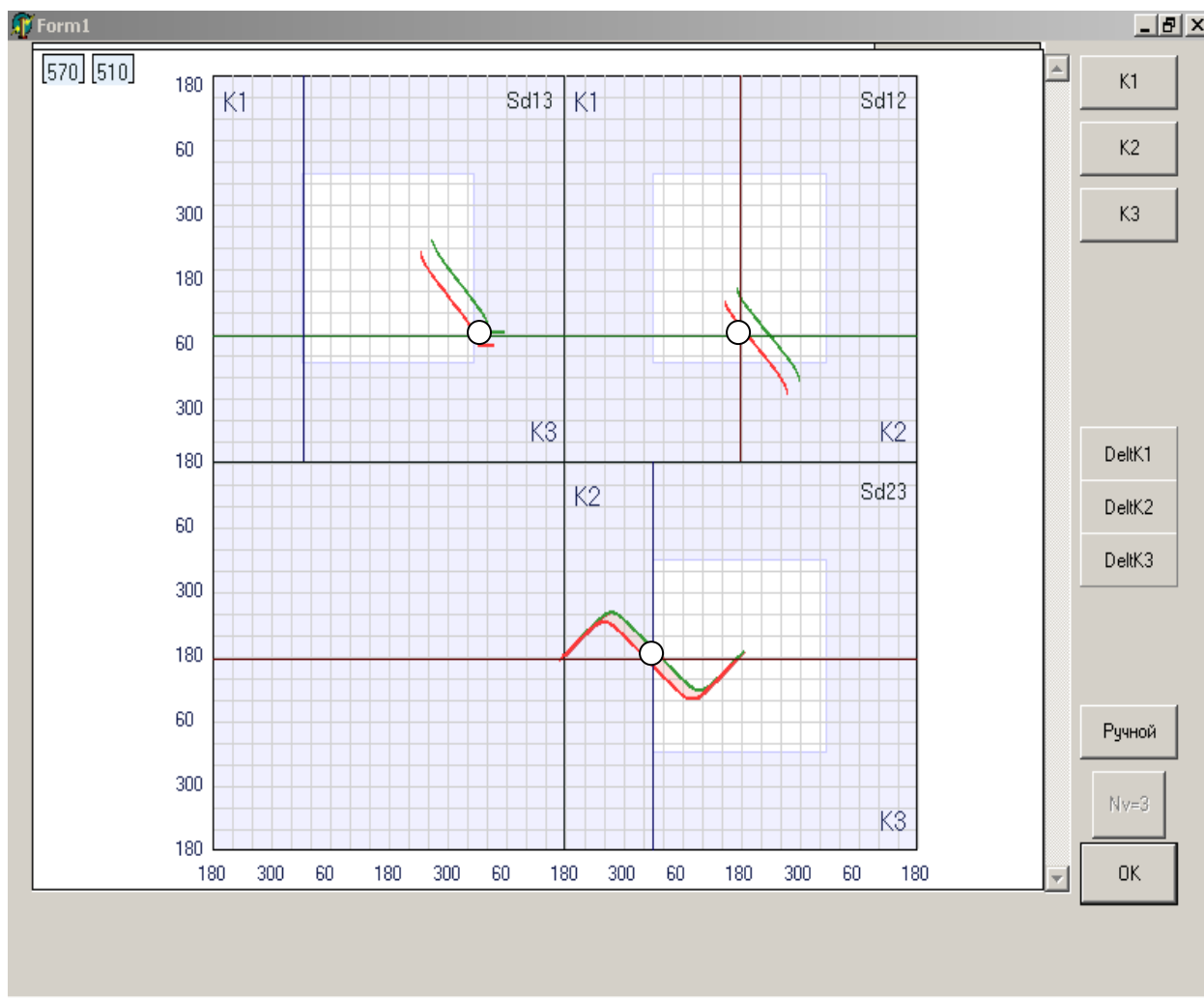


Рисунок 4.8. Опасные области трех судов

Опасные области S_{D12} , S_{D13} и S_{D23} , приведенные на рисунке 4.8, соответствуют ситуации со следующими параметрами:

$V_1 = 18$ узлов, $V_2 = 20$ узлов, $V_3 = 21$ узел, $\alpha_{12} = 45^\circ$, $D_{12} = 5.0$ мили, $\alpha_{13} = 135^\circ$, $D_{13} = 5.0$ мили, $\alpha_{23} = 18^\circ$, $D_{23} = 7.08$ мили, $d_d = 1.0$ мили, $\omega_{12} = 0$,

$\omega_{13}=1$, $\omega_{23}=1$. При начальных курсах $K_1=52^\circ$, $K_2=180^\circ$, $K_3=0^\circ$ дистанции кратчайшего сближения равны $\min D_{12}=1,7$, $\min D_{13}=0,8$, $\min D_{23}=0$ (рисунок 4.9).

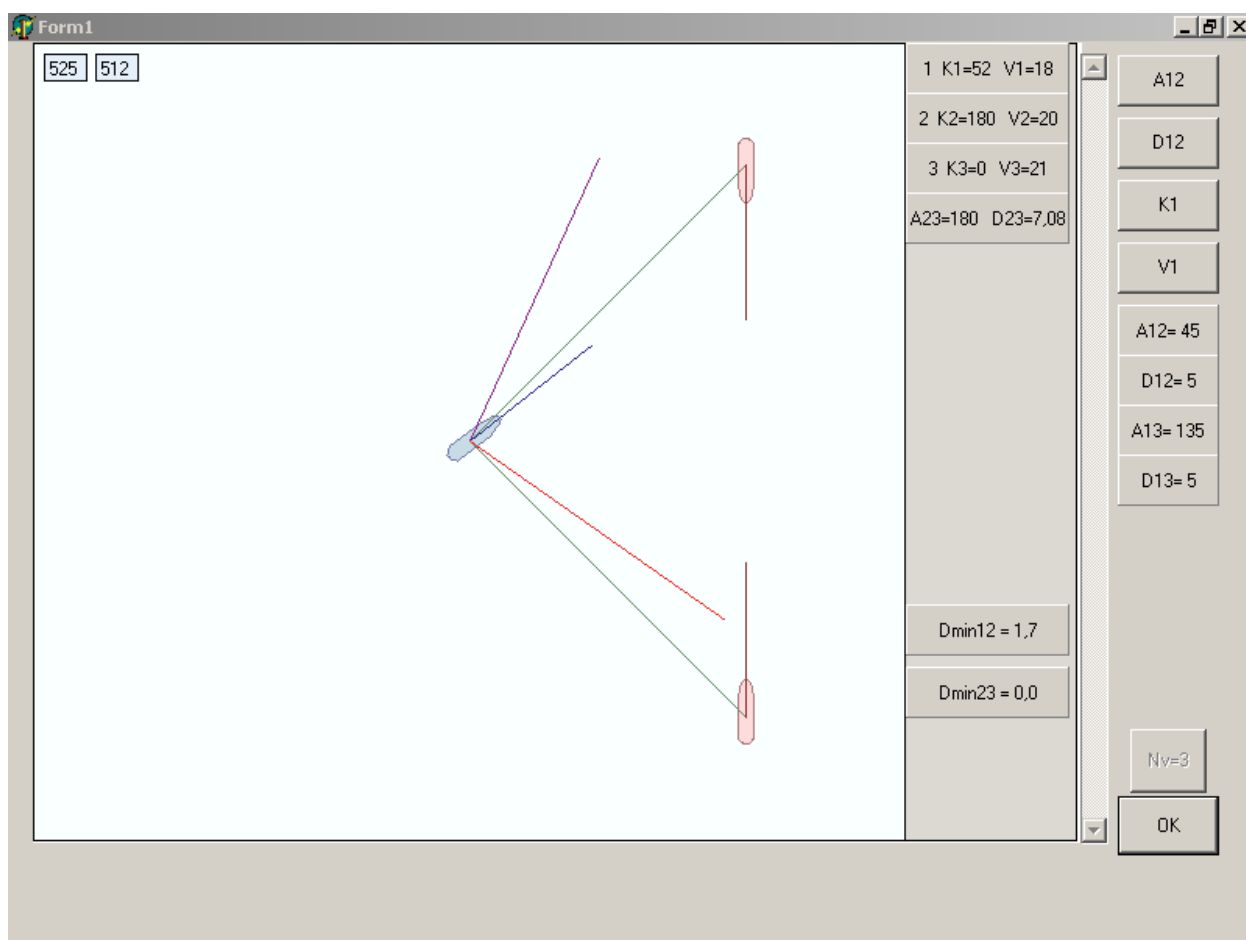


Рисунок 4.9. Начальная ситуация опасного сближения трех судов

Для компенсации ситуационных возмущений ω_{13} и ω_{23} с помощью линейки прокрутки, выбирая клавишами «K1», «K2» и «K3» значения соответствующих курсов, смещаются точки (K_1, K_2) , (K_1, K_3) и (K_2, K_3) с начальных положений, как показано на рис. 4.10. Как следует из рисунка 4.10, достаточно изменения двух курсов $K_1=125^\circ$ и $K_3=16^\circ$, при этом дистанции кратчайшего сближения становятся равными $\min D_{12}=1,01$, $\min D_{13}=2,39$ и $\min D_{23}=1,0$.

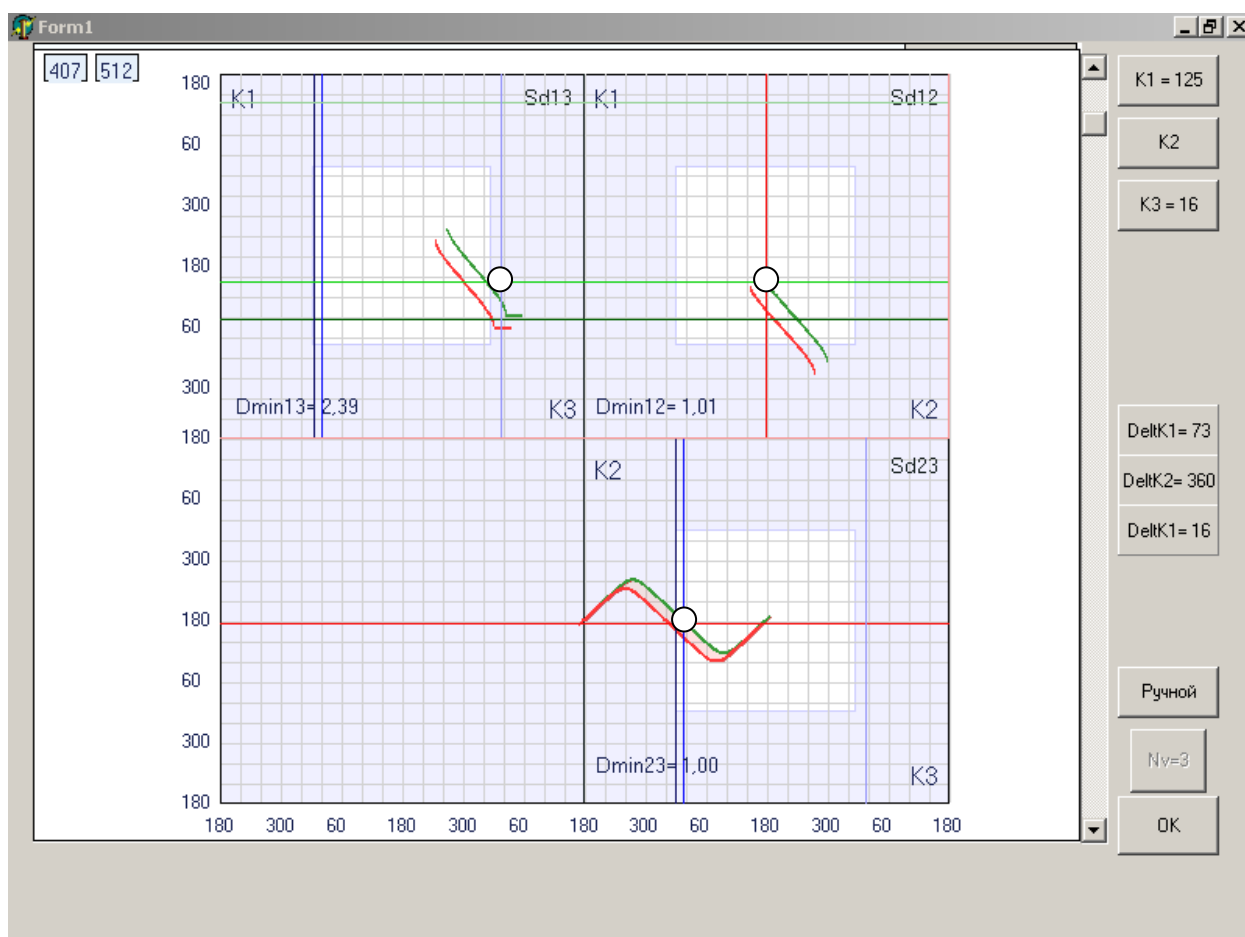


Рисунок 4.10. Компенсация ситуационных возмущений при опасном сближении трех судов

Таким образом, при минимальном изменении курсов судов $\Delta K_1 = 73^\circ$, $\Delta K_2 = 0^\circ$ и $\Delta K_3 = 16^\circ$ ситуационная матрица обращена в нулевую матрицу.

На рисунке 4.11 показано графическое отображение опасных областей в ситуации сближения четырех судов. На монитор выводятся шесть расширенных плоскостей $K_1 \times K_2$, $K_1 \times K_3$, $K_1 \times K_4$, $K_2 \times K_3$, $K_2 \times K_4$ и $K_3 \times K_4$, на которых отображаются области опасных курсов S_{D12} , S_{D13} , S_{D14} , S_{D23} , S_{D24} и S_{D34} , а также с помощью линий фиксируются текущие значения соответствующих парных курсов, причем их изменение возможно с помощью линейки прокрутки после использования клавиш «K1», «K2», «K3» и «K4».

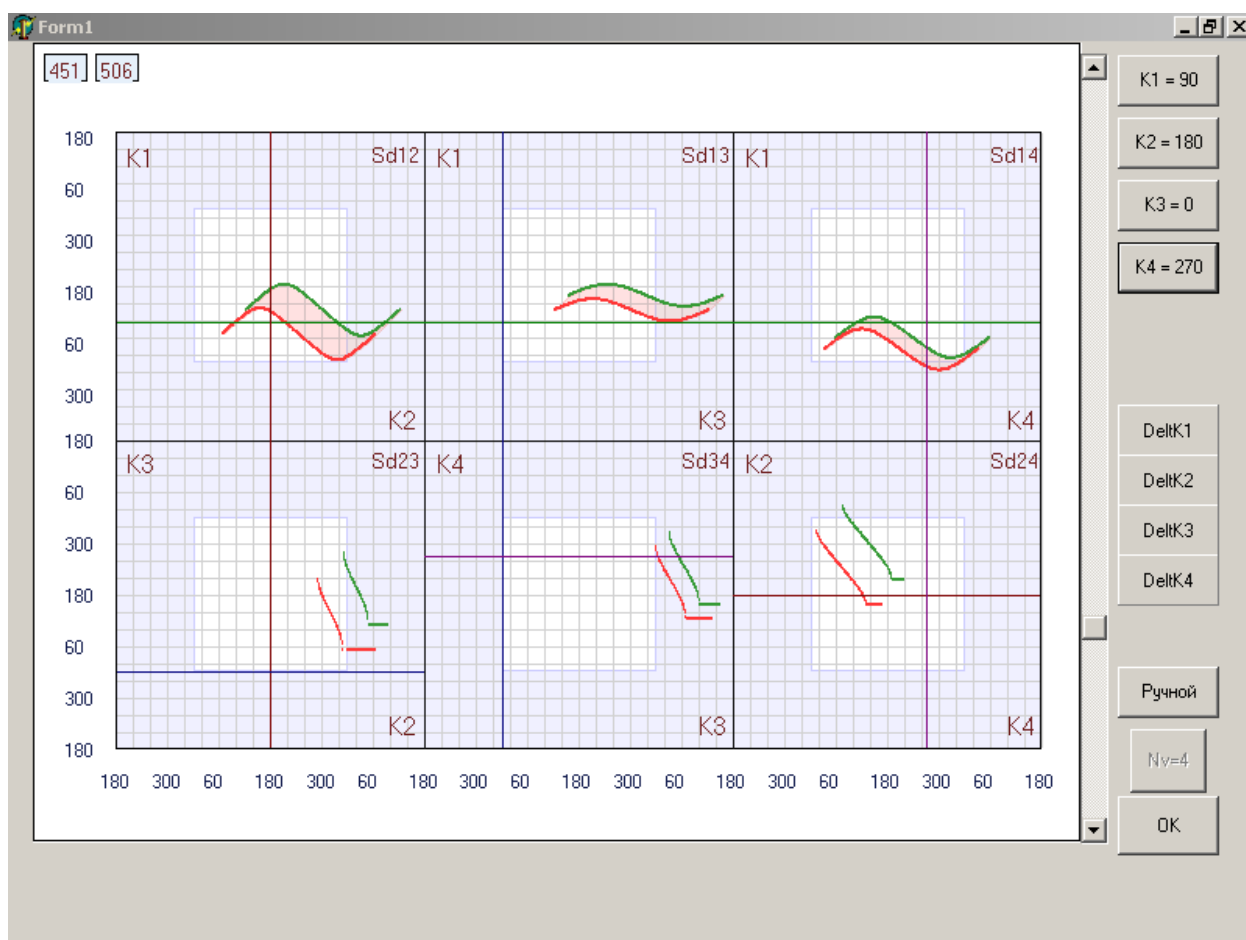


Рисунок 4.11. Области опасных курсов четырех судов

Отметим, что использование графического способа компьютерного моделирования для определения оператором параметров оптимального маневра расхождения группы судов возможно для числа судов в группе не превышающего пяти. Это обусловлено невозможностью одновременного отображения расширенных плоскостей и опасных областей курсов судов на мониторе компьютера.

При числе судов больше двух точность ручного выбора их оптимальных курсов снижается и ухудшается с ростом числа судов в группе. Этот недостаток преодолевается при использовании способа сканирования плоскостей с областями опасных курсов, который рассмотрен в следующей главе работы.

4.5. Выводы по четвертой главе.

В четвертой главе предложен принцип выбора стратегии расхождения группы судов, который базируется на использовании метода внешнего управления, а в качестве вектора управления применяются изменения курсов опасно сближающихся судов.

В качестве обобщенного примера рассмотрен способ выбора оптимальной стратегии расхождения трех судов с помощью изменения их курсов, который базируется на использовании областей опасных курсов каждой пары судов.

В главе произведена формализация задачи определения оптимального вектора управления группой опасно сближающихся судов, при этом сформулирована оптимизационная задача, выбран критерий оптимальности и показана процедура поиска параметров оптимального маневра.

Предложен графический способ компьютерного моделирования для определения параметров оптимального маневра расхождения группы судов численностью от двух до пяти.

ГЛАВА 5.

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СПОСОБА УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОЙ СУДОВ ПРИ ОПАСНОМ СБЛИЖЕНИИ

5.1. Выбор оптимального вектора управления способом компьютерного сканирования опасных областей парных маневров.

В предыдущем подразделе было получено условие выбора оптимального вектора управления, которое в частности для ситуации опасного сближения четырех судов при необходимости изменении курсов каждого из них, имеет вид:

$$Q_4^{(\Sigma)} = (\Delta K_1^2 + \Delta K_2^2 + \Delta K_3^2 + \Delta K_4^2) \rightarrow \min$$

$$(K_{n1} + \Delta K_1, K_{n2} + \Delta K_2) \notin S_{D12}, \quad (1)$$

$$(K_{n1} + \Delta K_1, K_{n3} + \Delta K_3) \notin S_{D13}, \quad (2)$$

$$(K_{n1} + \Delta K_1, K_{n4} + \Delta K_4) \notin S_{D14}, \quad (3)$$

$$(K_{n2} + \Delta K_2, K_{n3} + \Delta K_3) \notin S_{D23}, \quad (4)$$

$$(K_{n2} + \Delta K_2, K_{n4} + \Delta K_4) \notin S_{D24}, \quad (5)$$

$$(K_{n3} + \Delta K_3, K_{n4} + \Delta K_4) \notin S_{D34}. \quad (6)$$

Для поиска оптимальных значений приращений курса ΔK_1 , ΔK_2 , ΔK_3 и ΔK_4 можно поступить следующим образом. Отметим, что в приведенном условии шесть выражений вида $(K_{ni} + \Delta K_i, K_{nj} + \Delta K_j) \notin S_{Dij}$ эквивалентны условиям $\min D_{ij}(\Delta K_i, \Delta K_j) > D_d$. Учитывая, что в начальном состоянии для дистанций кратчайшего сближения между первым судном и остальными судами справедливы неравенства $\min D_{1j}(\Delta K_1, \Delta K_j) < D_d$ ($j > 1$), т. е. $(K_{n1} + \Delta K_1, K_{nj} + \Delta K_j) \in S_{D1j}$, увеличиваем значение приращения курса ΔK_1

на 1° , и рассчитываем значения $\min D_{1j}(\Delta K_1, \Delta K_j)$ ($j > 1$), сравнивая их с предельно допустимой дистанцией D_d . Увеличение приращения курса ΔK_1 производится до тех пор, пока для дистанций $\min D_{1j}(\Delta K_1, \Delta K_j)$ ($j > 1$) не наступит соотношение $\min D_{1j}(\Delta K_1, \Delta K_j) \geq D_d$ ($j > 1$).

В этом случае приращение курса ΔK_1 остается неизменным, а условия (1) – (3) являются истинными. Затем происходит пошаговое увеличение приращения курса ΔK_2 на 1° и производится расчет дистанций $\min D_{21}(\Delta K_2, \Delta K_1)$, $\min D_{23}(\Delta K_2, \Delta K_3)$ и $\min D_{24}(\Delta K_2, \Delta K_4)$, при этом следим, чтобы значение $\min D_{21}(\Delta K_2, \Delta K_1)$ не стало меньше предельно допустимой дистанции D_d . Увеличение приращения курса ΔK_2 прекращается, если достигаются соотношения:

$$\min D_{21}(\Delta K_2, \Delta K_1) \geq D_d,$$

$$\min D_{23}(\Delta K_2, \Delta K_3) \geq D_d,$$

$$\min D_{24}(\Delta K_2, \Delta K_4) \geq D_d.$$

В этом случае условия (1) – (5) являются истинными, и необходимо сделать истинным последнее условие (6):

$$\min D_{34}(\Delta K_3, \Delta K_4) \geq D_d.$$

Таким образом, при фиксированных приращениях курсов ΔK_1 и ΔK_2 производится сканирование плоскости $K_3 \times K_4$, т. е. для каждой точки плоскости рассчитывается дистанция кратчайшего сближения $\min D_{34}(\Delta K_3, \Delta K_4)$ и сопоставляется по величине с предельно допустимой дистанцией D_d . Если выполняется условие $\min D_{34}(\Delta K_3, \Delta K_4) \geq D_d$, то маневр с приращениями курсов ΔK_1 , ΔK_2 , ΔK_3 , ΔK_4 является безопасным и для этого маневра производится расчет критерия оптимальности

$Q_4^{(\Sigma)} = \Delta K_1^2 + \Delta K_2^2 + \Delta K_3^2 + \Delta K_4^2$. С ростом числа безопасных маневров отбирается маневр с минимальным значением критерия оптимальности и его параметры принимаются оптимальными. После окончания сканирования плоскости $K_3 \times K_4$ значение приращения курса ΔK_2 увеличивается на 1° и процедура сканирования плоскости $K_3 \times K_4$ повторяется с расчетом для каждой точки безопасного маневра критерия оптимальности с фиксацией оптимальных параметров маневра.

Произведя сканирования для всех значений приращения курса ΔK_2 через 1° , значение ΔK_2 принимает начальное значение, а приращения курса ΔK_1 увеличивается на 1° и для нового неизменного значения ΔK_1 производится увеличение ΔK_2 на 1° с последующим сканированием плоскости $K_3 \times K_4$, в процессе которого выявляются безопасные маневры и рассчитываются их критерии оптимальности, а также выбирается маневр с минимальным критерием оптимальности.

После очередного пошагового увеличения приращения курса ΔK_2 по всем возможным значениям со сканированием плоскости $K_3 \times K_4$ на каждом шаге и отборе оптимального маневра расхождения производится последовательное увеличение приращения курса ΔK_1 по всем возможным значениям. Исчерпав сканирование по всем значениям ΔK_1 , процесс выбора оптимального маневра завершается. Маневр с минимальным значением критерия оптимальности $Q_4^{(\Sigma)}$ выбирается в качестве оптимального маневра расхождения.

На рисунке 5.1 приведен алгоритм поиска оптимального маневра способом сканирования. В качестве примера рассматривалась ситуация опасного сближения трех судов. Согласно приведенному алгоритму была написана программа, с помощью которой производился поиск оптимального маневра расхождения.

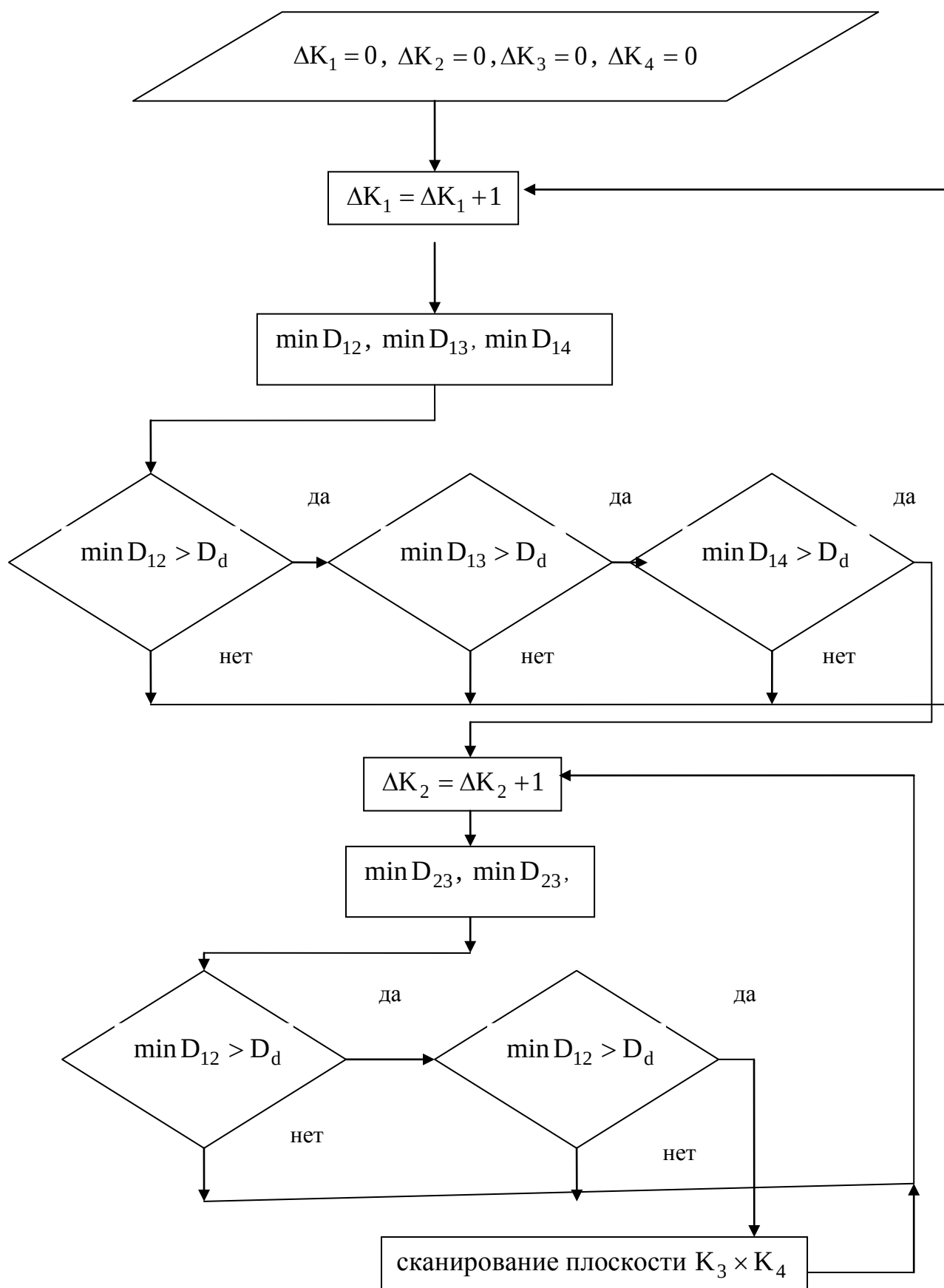


Рисунок 5.1. Алгоритм поиска оптимального вектора управления
способом сканирования

На рисунке 5.2. представлены результаты расчета оптимального маневра расхождения, которые показаны в виде точек на расширенных плоскостях $K_1 \times K_2$, $K_1 \times K_3$ и $K_2 \times K_3$. Каждая точка обозначена окружностью с небольшим радиусом. Обращаем внимание на то, что точки на всех трех расширенных плоскостях находятся вне областей опасных курсов, однако рядом с их границей.

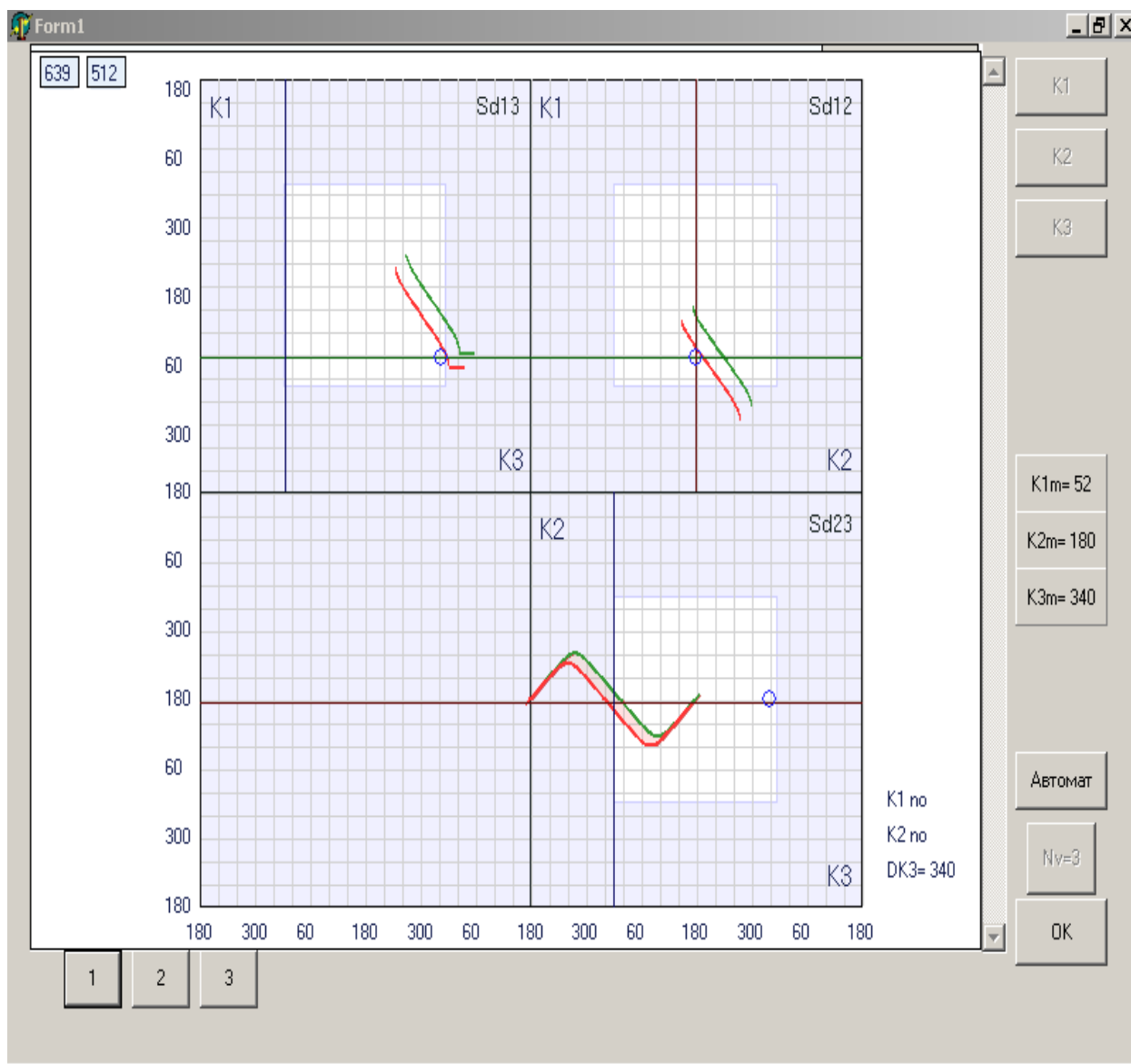


Рисунок 5.2. Результаты расчета маневра расхождения трех судов

Также рассматривалась ситуация сближения двух судов при наличии ситуационного возмущения. Так, на рисунке 5.3 представлено решение по

выбору оптимального маневра изменением курса одного из судов, представленного двумя точками.

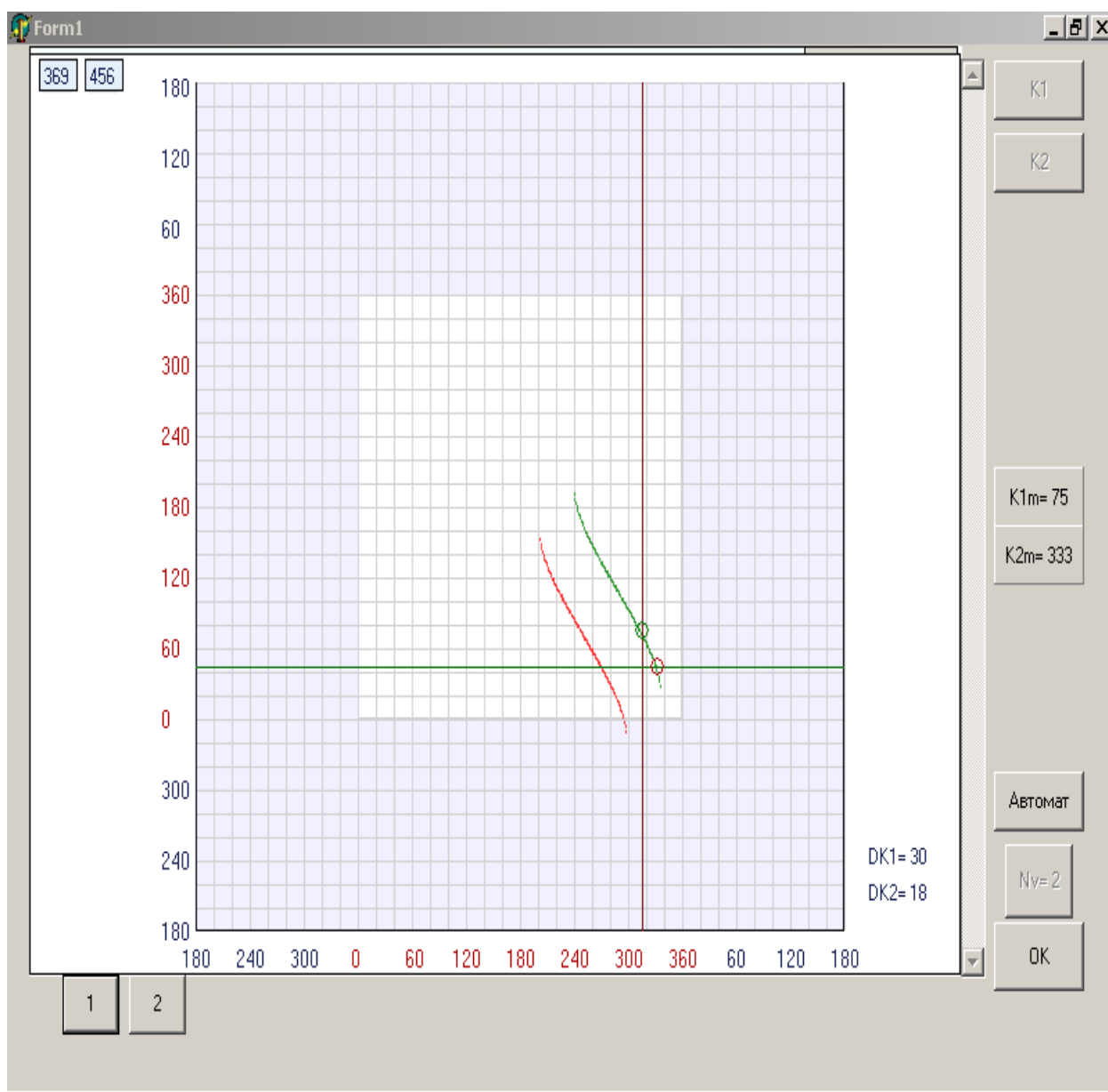


Рисунок 5.3. Расчет расхождения маневром одного судна

В свою очередь, если искать оптимальный маневр одновременным изменением курсов обоих судов, то, как показано на рисунке 5.4, решение представляется в виде точки на расширенной плоскости курсов судов.

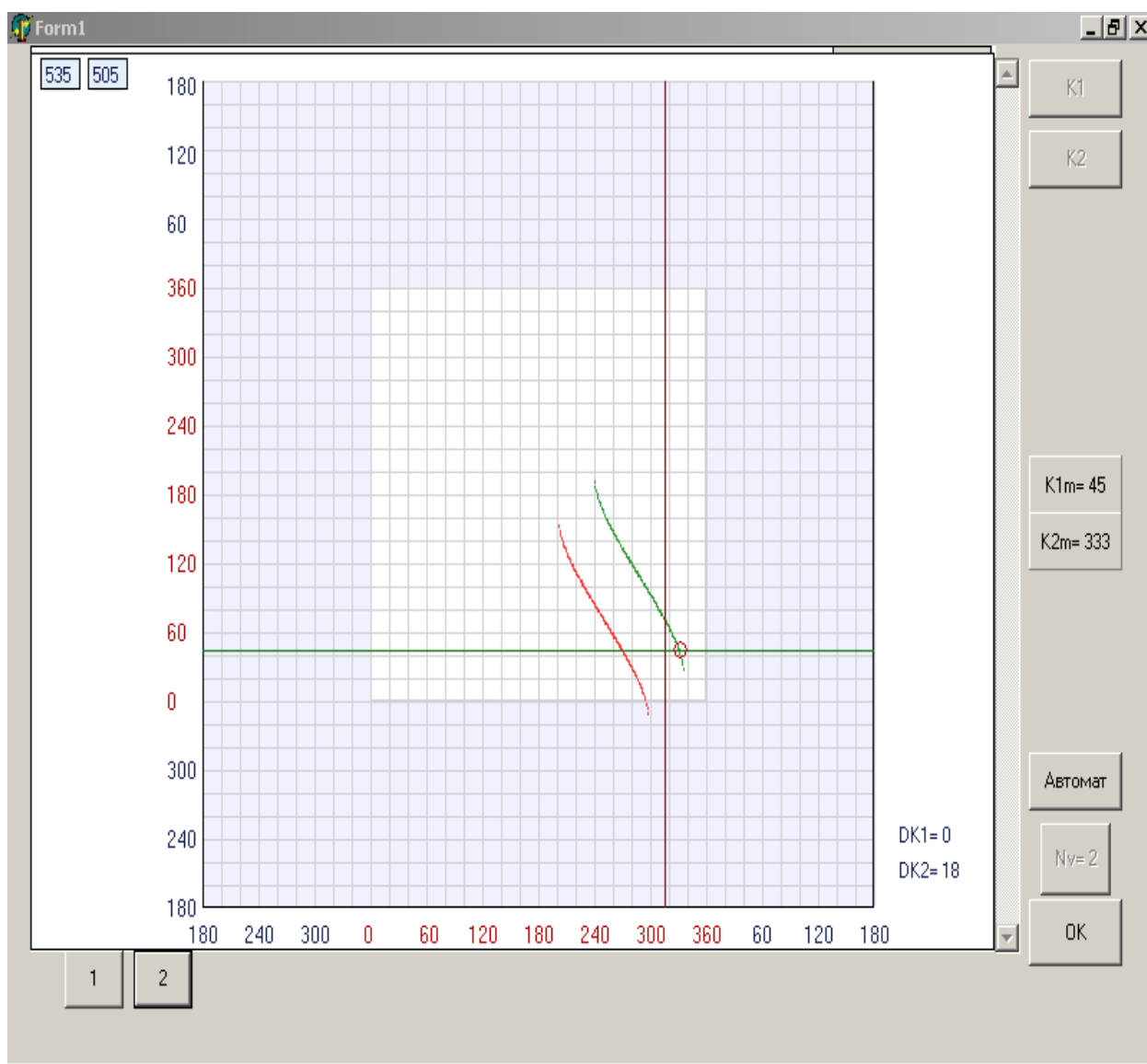


Рисунок 5.4. Расчет расхождения маневром обоих судов

5.2. Реализация графического способа определения оптимального маневра расхождения группы судов с помощью компьютерного моделирования.

В предыдущем подразделе было показано, что использование графического способа компьютерного моделирования для определения оператором параметров оптимального маневра расхождения группы судов существенно зависит от размеров отображения расширенных плоскостей и опасных областей курсов судов на мониторе компьютера. Наиболее точным является отображение опасных областей курсов для пары судов. Поэтому в

данном подразделе рассмотрен вариант программы имитационного моделирования для группы судов с использованием отображения опасных областей курсов для пары судов, причем рассматривается группа судов количеством до пяти включительно.

Программа состоит из трех модулей, первый из которых предусматривает моделирование исходной ситуации, включая число судов, их параметров движения и относительного положения. С помощью второго модуля производится отображение опасных областей курсов для пары судов и предусмотрена возможность выбора безопасных курсов пары опасно сближающихся судов. Третий модуль предусматривает проигрывание маневра расхождения группы судов. Имитационная программа разработана с помощью языка высокого уровня Delphi.

При запуске программы на экран монитора выводится ситуация сближения двух судов, как показано на рисунке 5.5. При этом активными являются клавиша «Nv=» для выбора числа судов моделируемой ситуации и функциональная клавиша «OK».

Для изменения параметров начальной ситуации следует использовать клавишу «OK». При этом активизируется линейка прокрутки и появляются клавиши «A12», «D12», «K1» и «V1», с помощью которых производится выбор вводимых параметров ситуации соответственно пеленг, дистанция и параметры движения судов. Также выводятся табло, на которых индицируются численные значения параметров ситуации, а также дистанция кратчайшего сближения (рисунок 5.6).

В левом нижнем углу экрана выводится индикатор опасности сближения, при наличии ситуационного возмущения соответствующие сегменты индикатора окрашиваются в красный цвет. Для обоих судов существуют ситуационные возмущения, поэтому оба сегмента индикатора окрашены в красный цвет.

Для примера были изменены параметры начальной ситуации, в частности курсы обоих судов изменены для первого судна из 45° на 130°, а

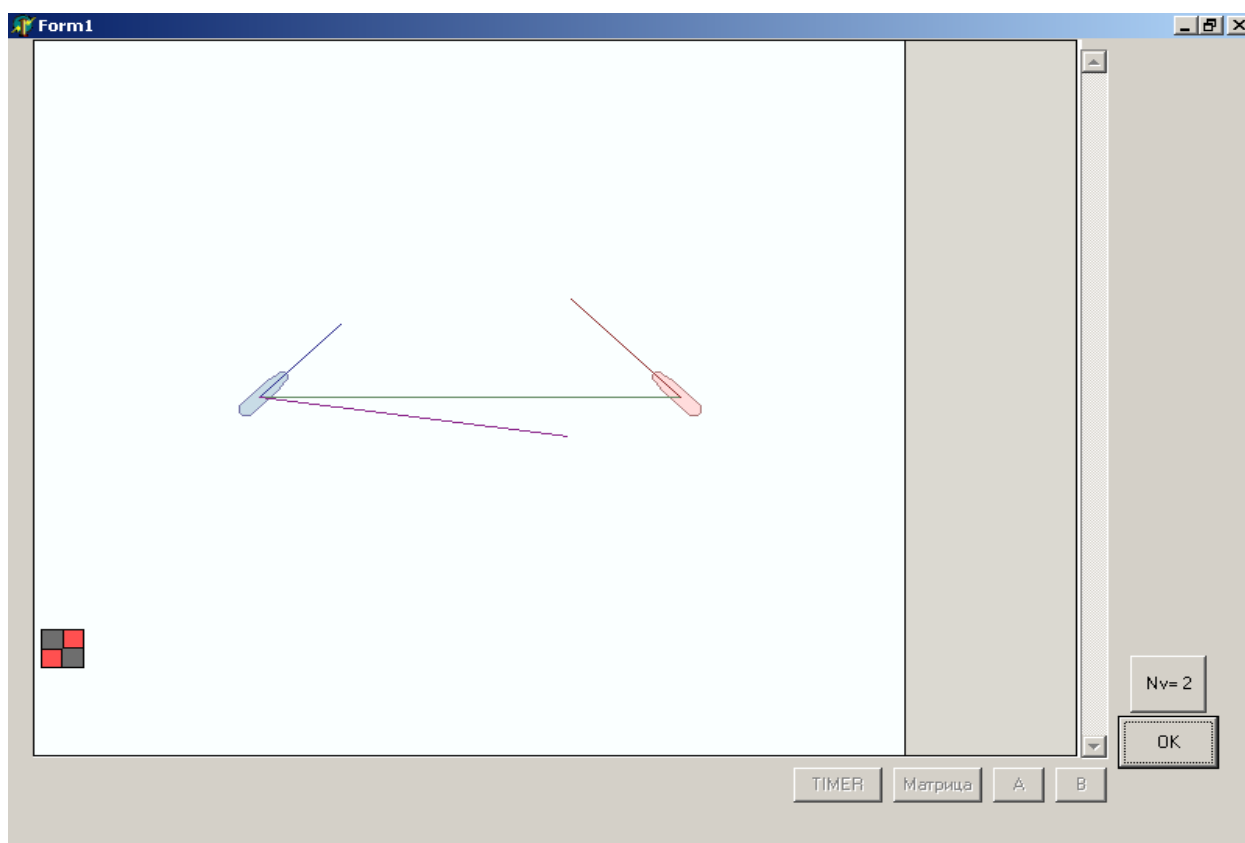


Рисунок 5.5. Начальный интерфейс имитационной программы

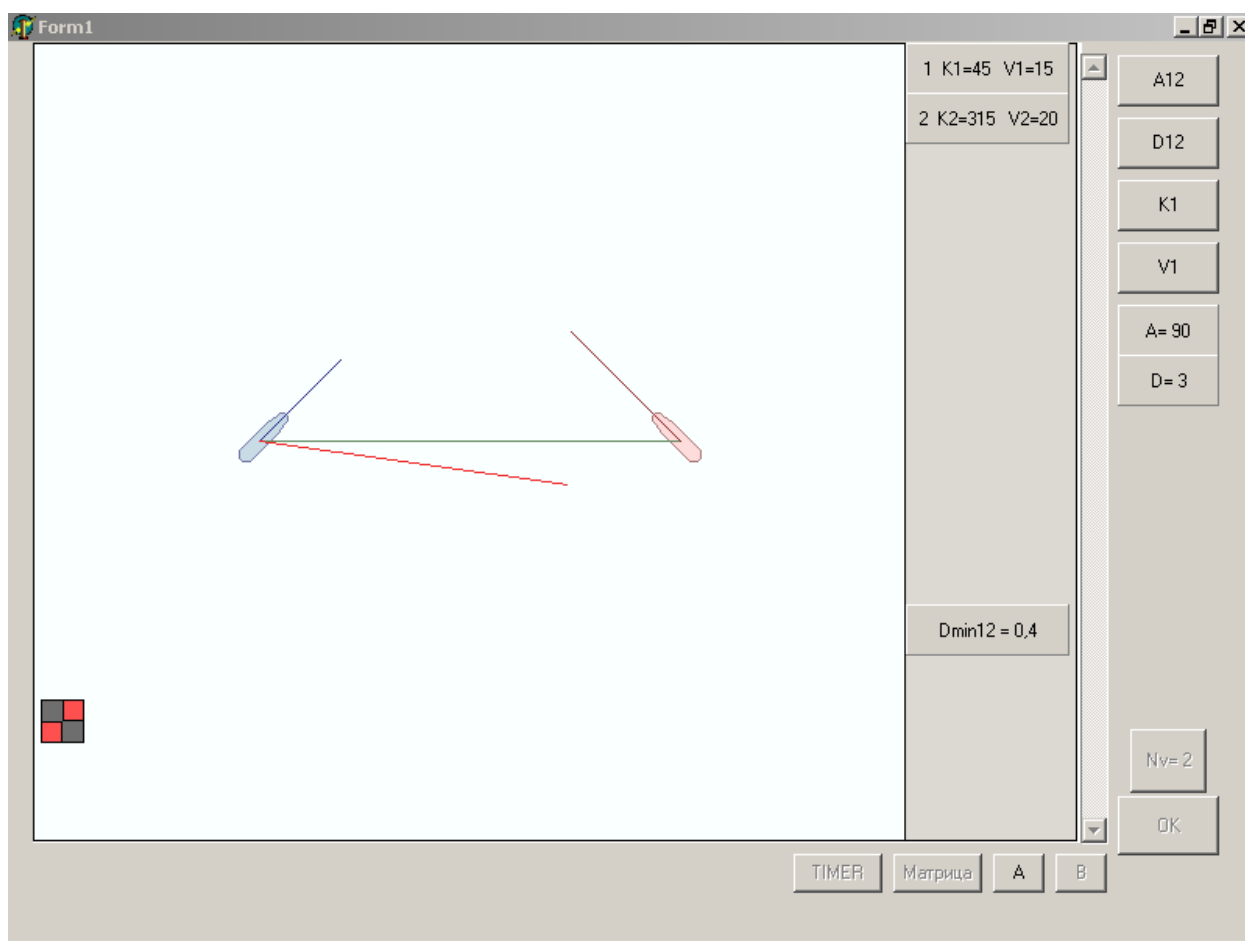


Рисунок 5.6. Параметры начальной ситуации

для второго – из 315° на 220° , как показано на рисунке 5.7.

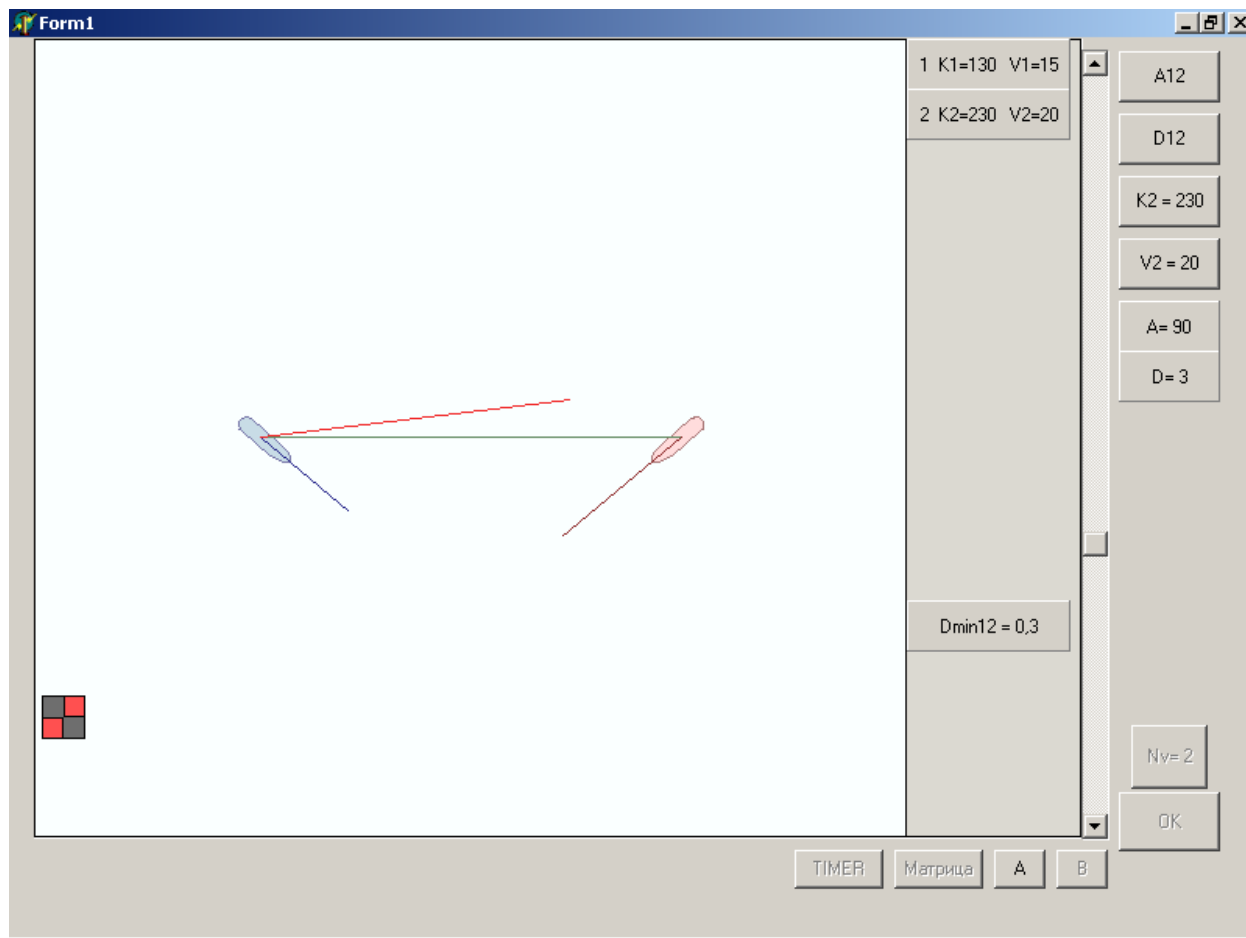


Рисунок 5.7. Изменение параметров начальной ситуации

При этом значения курсов судов введены линейкой прокрутки после использования клавиши «K1(2)», причем при изменении параметров начальной ситуации рассчитывается дистанция кратчайшего сближения, которая выводится на нижнем информационном табло и ее значение в данном случае равно $D_{min12}=0,3$.

В данной ситуации имеется ситуационное возмущение, что требует изменения курса судов для его компенсации. Используя клавишу «А», выводим на экран монитора область опасных курсов данной пары судов, которая отображена на рисунке 5.8. Если курсы судов пересекаются в точке, которая находится на границе области опасных курсов, то дистанция кратчайшего сближения равна предельно допустимой дистанции сближения. Если же точка принадлежит области, то дистанция кратчайшего сближения

меньше предельно допустимой дистанции сближения, и существует ситуационное возмущение.

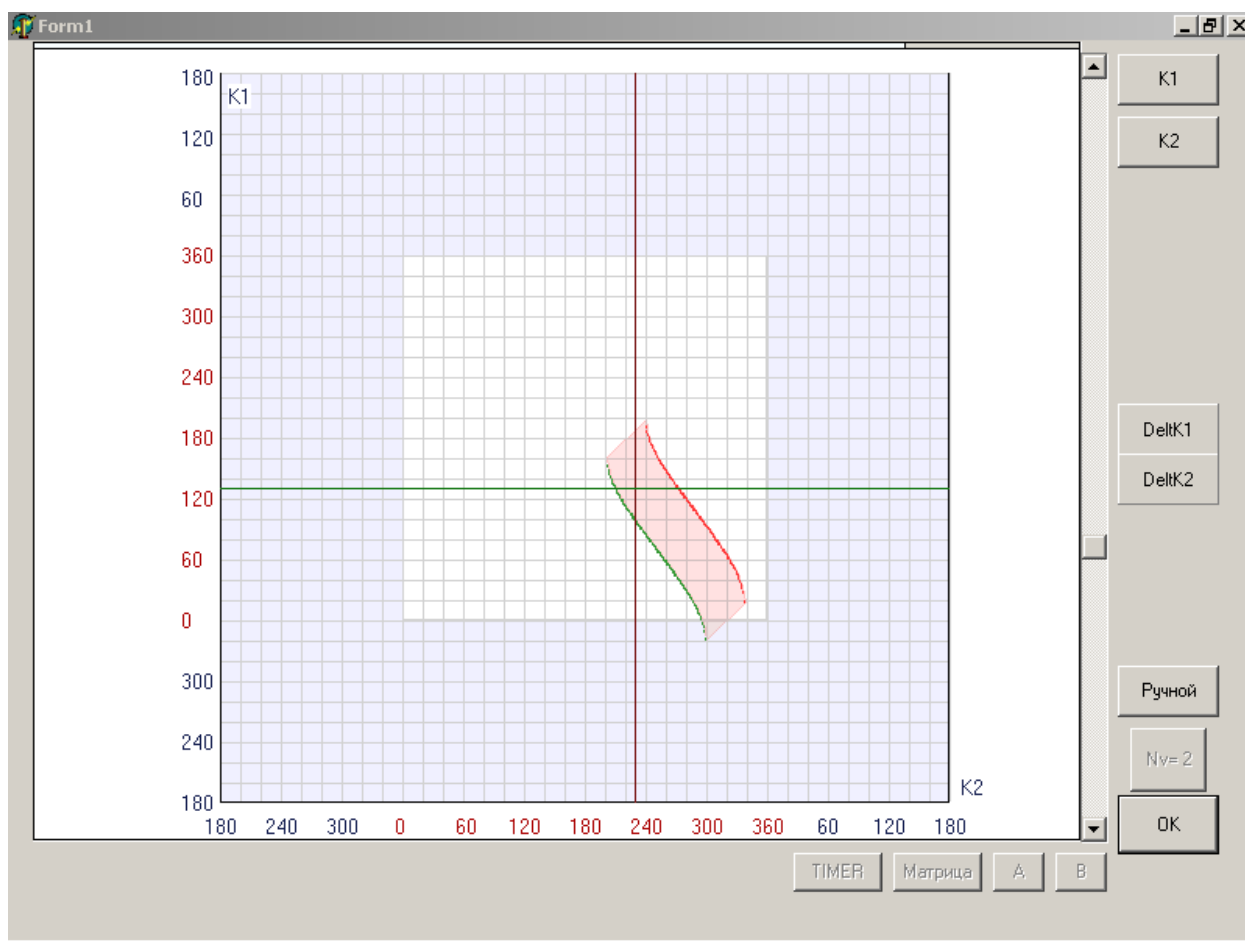


Рисунок 5.8. Область опасных курсов судов

На расширенной плоскости курсов пары судов их начальные курсы отображаются линиями, а их точка пересечения, как следует из рисунка 5.8, принадлежит области опасных курсов, из чего следует, что в данном случае существует ситуационное возмущение.

Для выбора безопасных курсов расхождения судов необходимо использовать клавиши «K1» или «K2», а изменение курса производится с помощью линейки прокрутки. При этом текущее значение изменяемого курса индицируется на соответствующей клавише и отображается более светлыми линиями (рисунок 5.9). Курс первого судна изменен на 19° , а второго – на 11° , т.е. до значений соответственно 111° и 219° . В этом случае точка пересечения текущих курсов находится на границе области опасных

курсов, и дистанция кратчайшего сближения 1,07 примерно равна предельно допустимой дистанции, заданное значение которой принято 1 миль. При этом оба сектора индикатора опасности сближения окрашиваются в светло зеленый цвет, а также активизируется клавиша «TIMER».

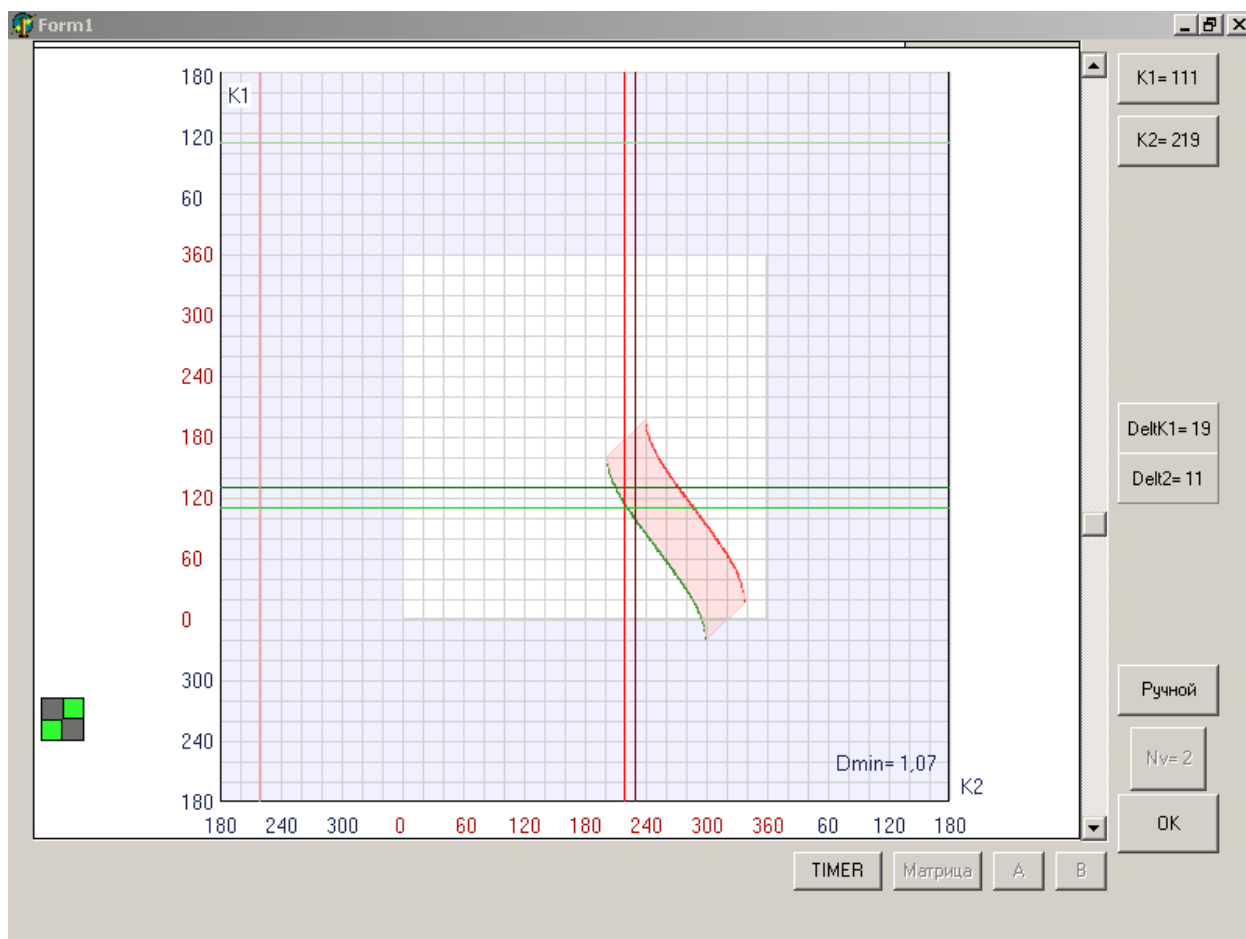


Рисунок 5.9. Выбор безопасных курсов уклонения судов

Для проверки корректности выбранных курсов уклонения судов с помощью клавиша «TIMER» производится проигрывание маневра расхождения судов с помощью третьего модуля имитационной программы.

При использовании клавиши «TIMER» на экран монитора выводится начальная позиция судов с выбранным курсами уклонения, причем на правой части монитора выводятся информационные панели, на которых индицируется текущее время маневра проигрывания, а также курсы судов. В

левом верхнем углу экрана приводится текущее значение дистанции между судами.

На рисунке 5.10 приведена ситуация расхождения судов на момент времени 5 с.

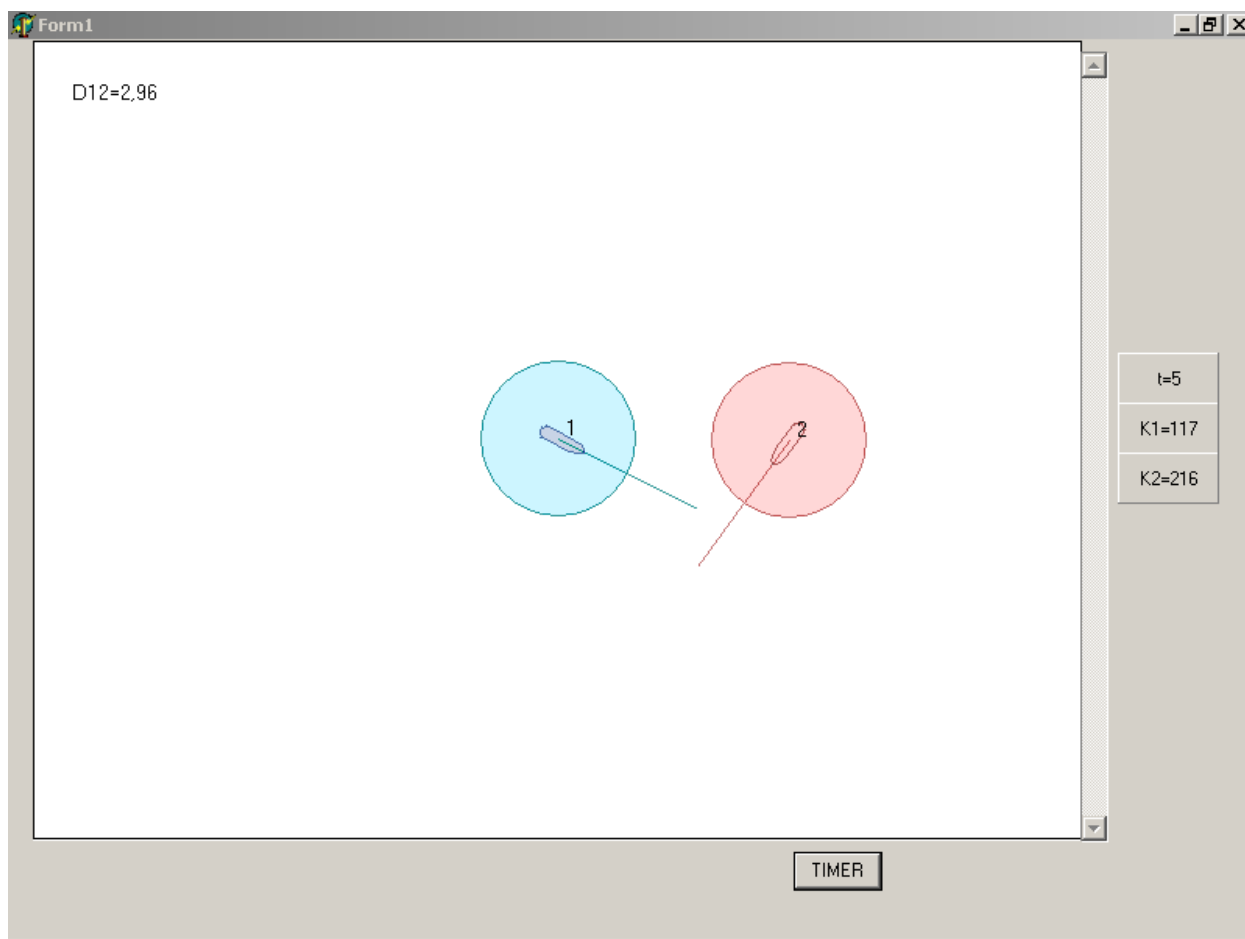


Рисунок 5.10. Начальная ситуация при проигрывании маневра

На рисунке 5.11 показана ситуация кратчайшего сближения судов в момент времени, равный 351 с, в котором дистанция кратчайшего сближения равна 1,06 мили, т.е. практически предельно допустимой дистанции.

Ситуация завершения проигрывания маневра показана на рисунке 5.12. Процесс проигрывания маневра можно останавливать и продолжать с помощью клавиши «TIMER».

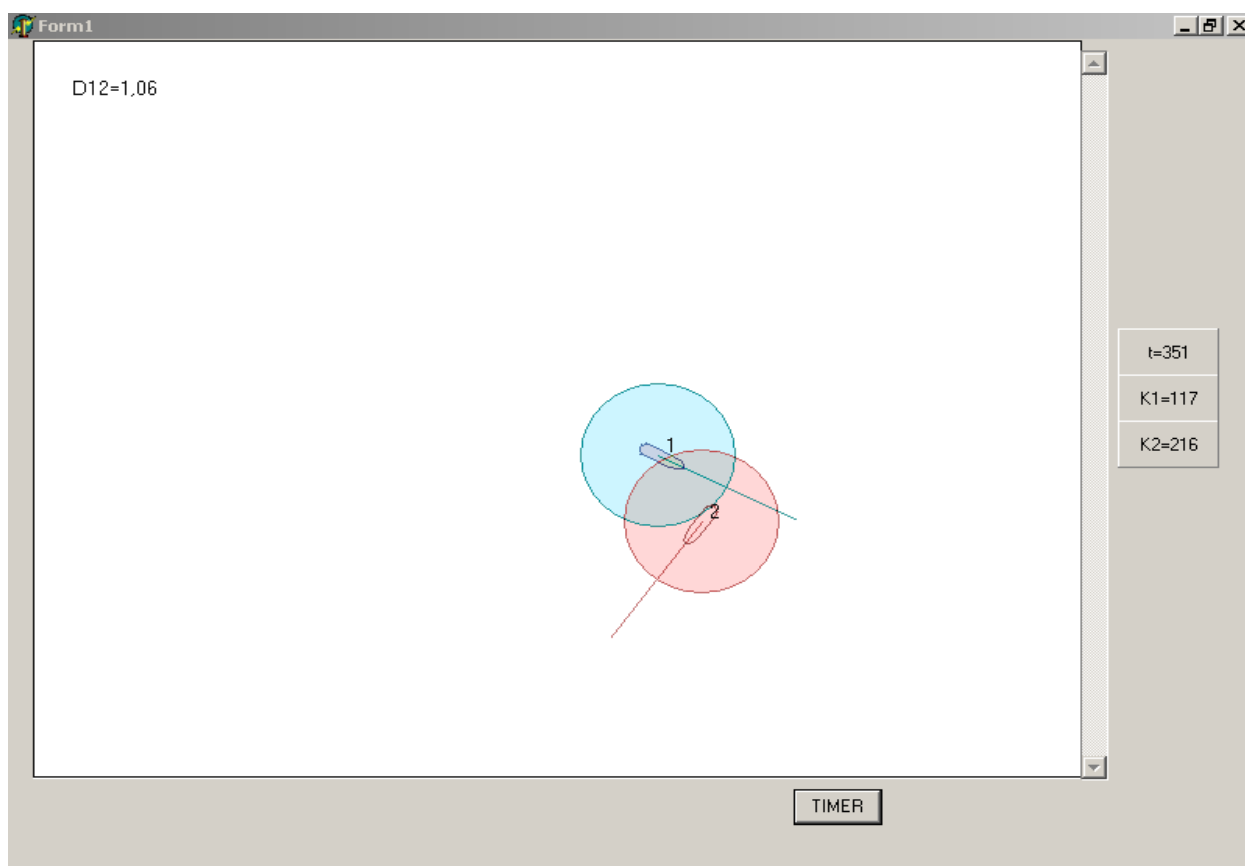


Рисунок 5.11. Ситуация кратчайшего сближения

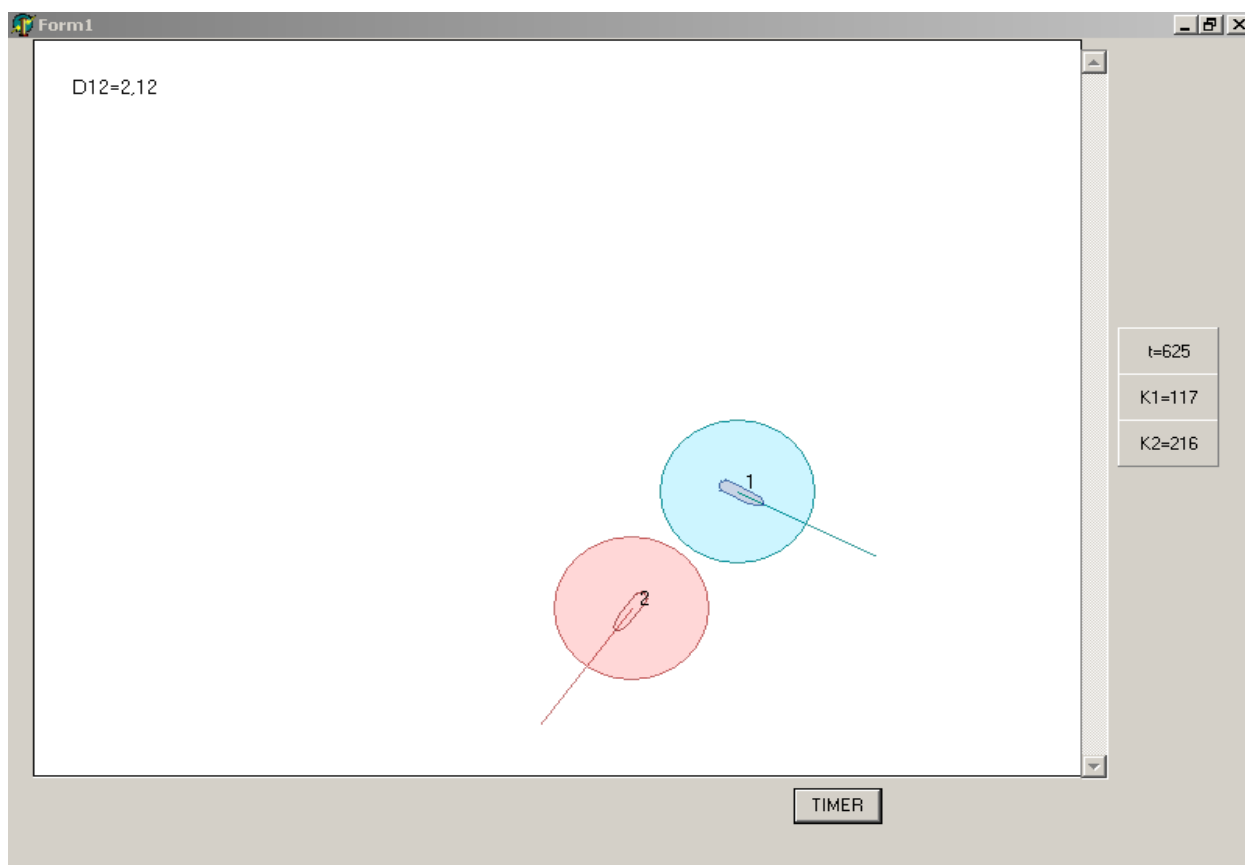


Рисунок 5.12. Завершение процесса проигрывания маневра

Для выбора ситуации сближения трех судов необходимо установить клавишей «Nv=» значение 3, при этом на экране монитора отображается начальная ситуация сближения, показанная на рисунке 5.13. Индикатор опасности показывает, что опасно сближаются второе и третье суда, для каждого из которых возникает ситуационное возмущение, о чем свидетельствует цвет соответствующих секторов индикатора.

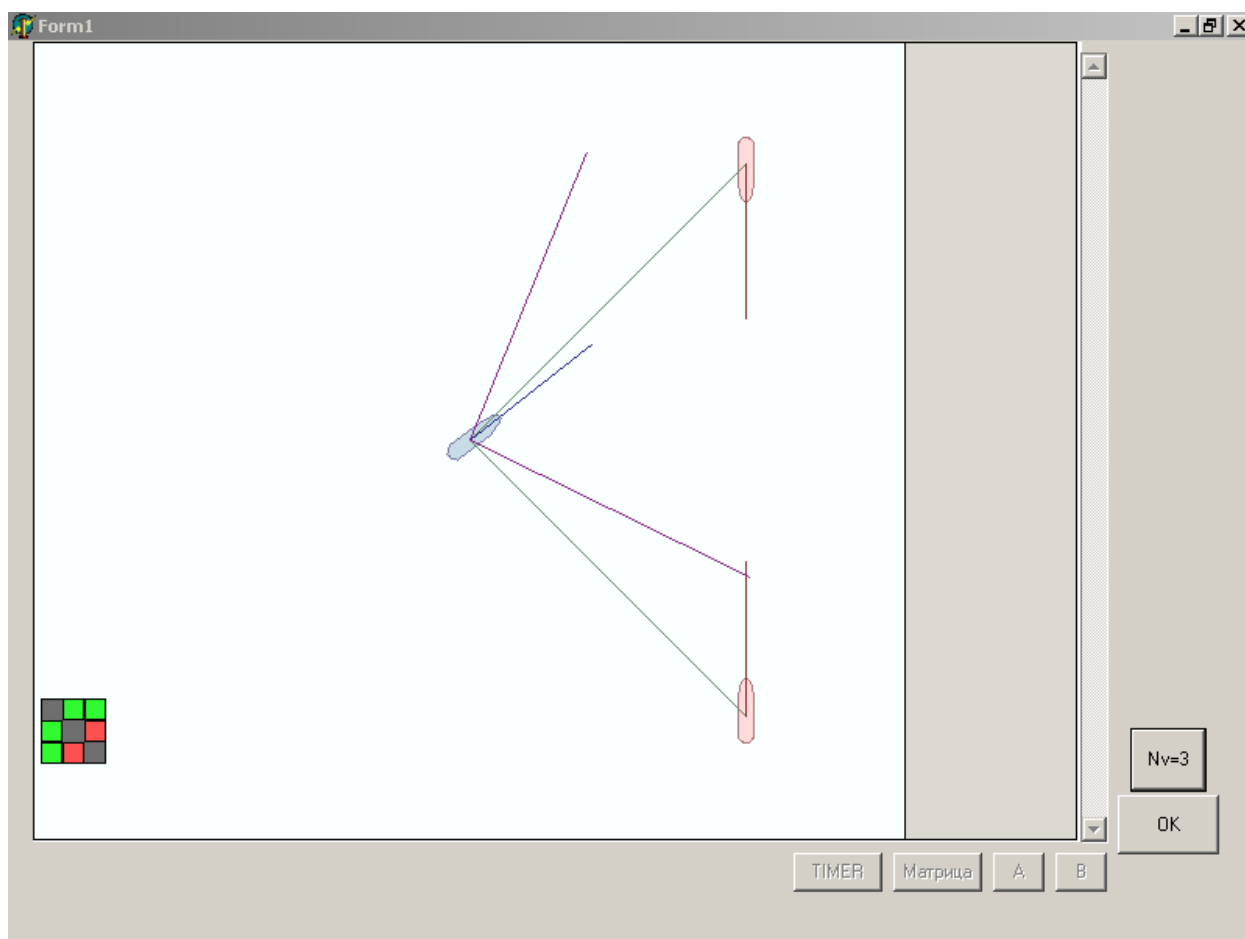


Рисунок 5.13. Начальная ситуация сближения трех судов

Для дальнейшей работы следует использовать клавишу «ОК», в результате чего появляются клавиши и панели для изменения и индикации значений параметров начальной ситуации (рисунок 5.14). После использования клавиши «Матрица» выводятся клавиши, характеризующие состояние ситуационной матрицы, как показано на рисунке 5.15. При этом на каждой клавише появляется индикатор о ситуационном возмущении каждой пары судов. Он окрашен в красный цвет при наличии ситуационного возму-

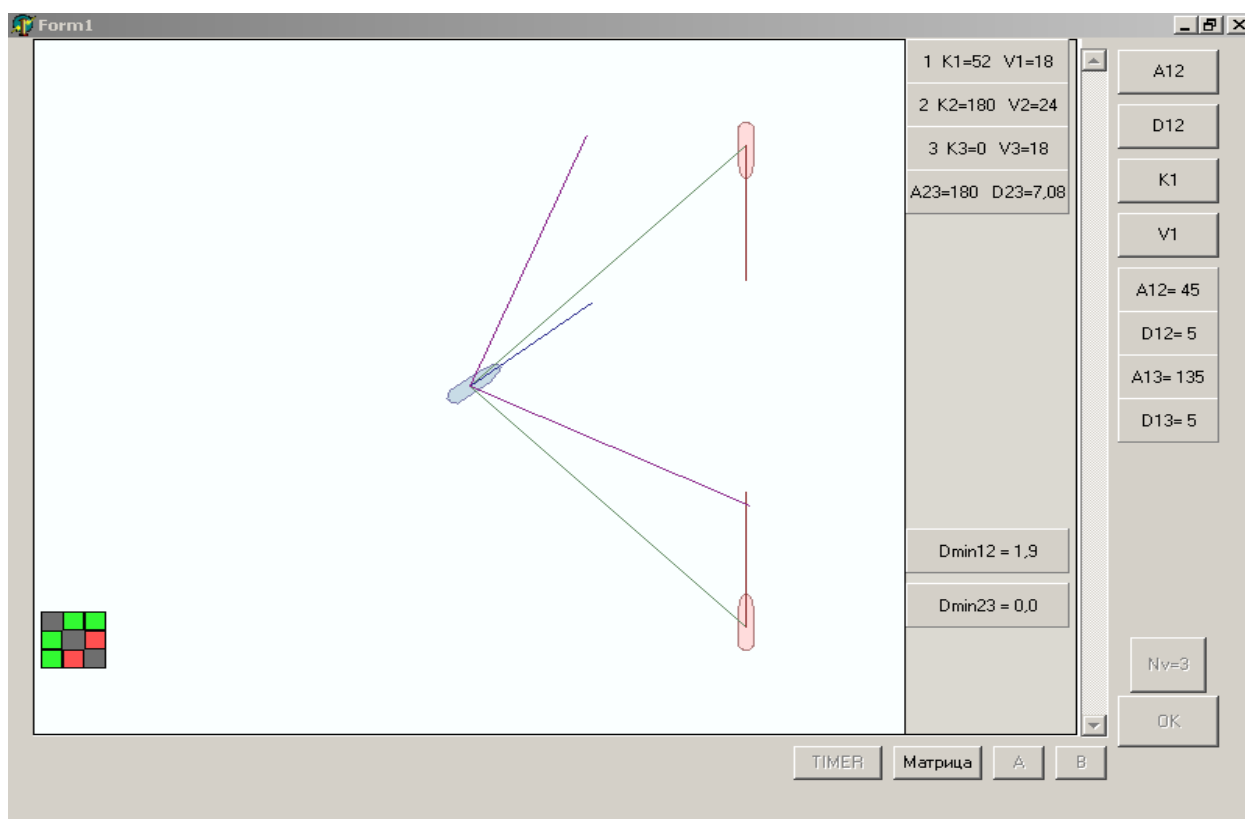


Рисунок 5.14. Параметры начальной ситуации

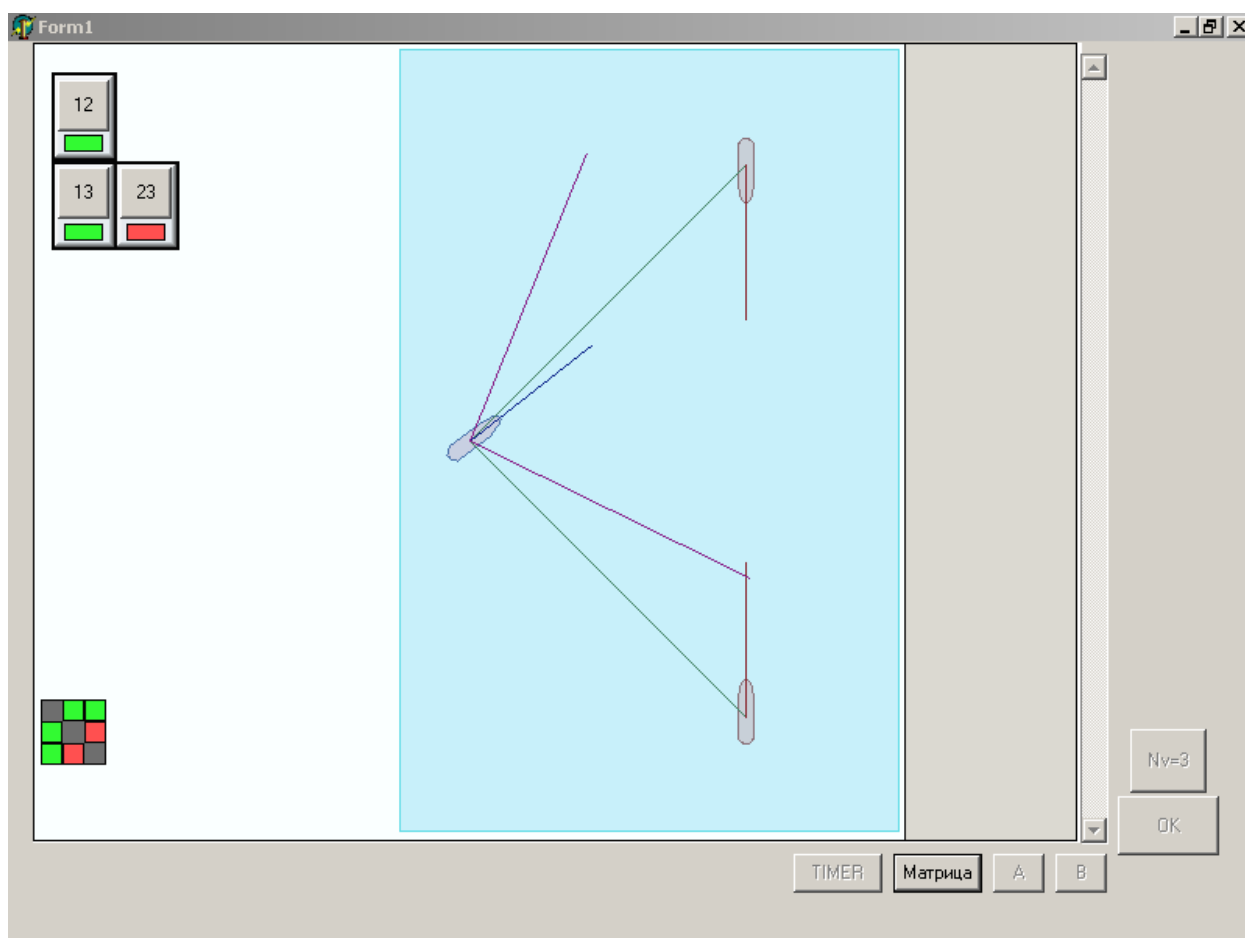


Рисунок 5.15. Вывод клавиш матрицы ситуационного возмущения

щения и в зеленый цвет – при его отсутствии. Если суда удаляются, то индикаторы окрашиваются в белый цвет.

Так как ситуационное возмущение существует только между вторым и третьим судами, то для его компенсации следует изменить курсы одно и/или второго судна. Поэтому следует рассмотреть расширенную плоскость и опасную область курсов второго и третьего судов.

С этой целью следует использовать клавишу «А», и на экране монитора отображается расширенная плоскость и опасная область курсов второго и третьего судов. Обращаем внимание на то, что значения курса К2 второго судна отображаются по вертикальной оси, а третьего судна – по горизонтальной, как показано на рисунке 5.15.

В ситуациях сближения более двух судов при выводе расширенной плоскости и опасной области курсов выбранной пары судов производится индикация начальных значений курсов всех судов ситуации. В данном случае в левой части экрана выводятся начальные курсы всех трех судов.

Обращаем внимание на то, что линии начальных курсов обоих судов пересекаются в опасной области, что подтверждает наличие ситуационного возмущения.

Используем клавишу «ОК» для возможности выбора безопасного курса уклонения. При этом в правой части экрана индицируются значения текущих курсов всех трех судов. В правой части экрана появляются клавиши «К2=» и «К3=» для выбора курса уклонения, причем происходит инициализация линейки прокрутки, с помощью которой производится выбор значения выбранного курса (рисунок 5.16). Также появляются информационные панели для вывода величины изменений курсов выбранной пары судов.

Предварительный анализ показал, что более предпочтительным является изменение курса вторым судном, потому что требует меньшего отклонения от программного курса. Если судно будет уклоняться вправо, то при выводе курса из опасной области появляется ситуационное возмущение с первым

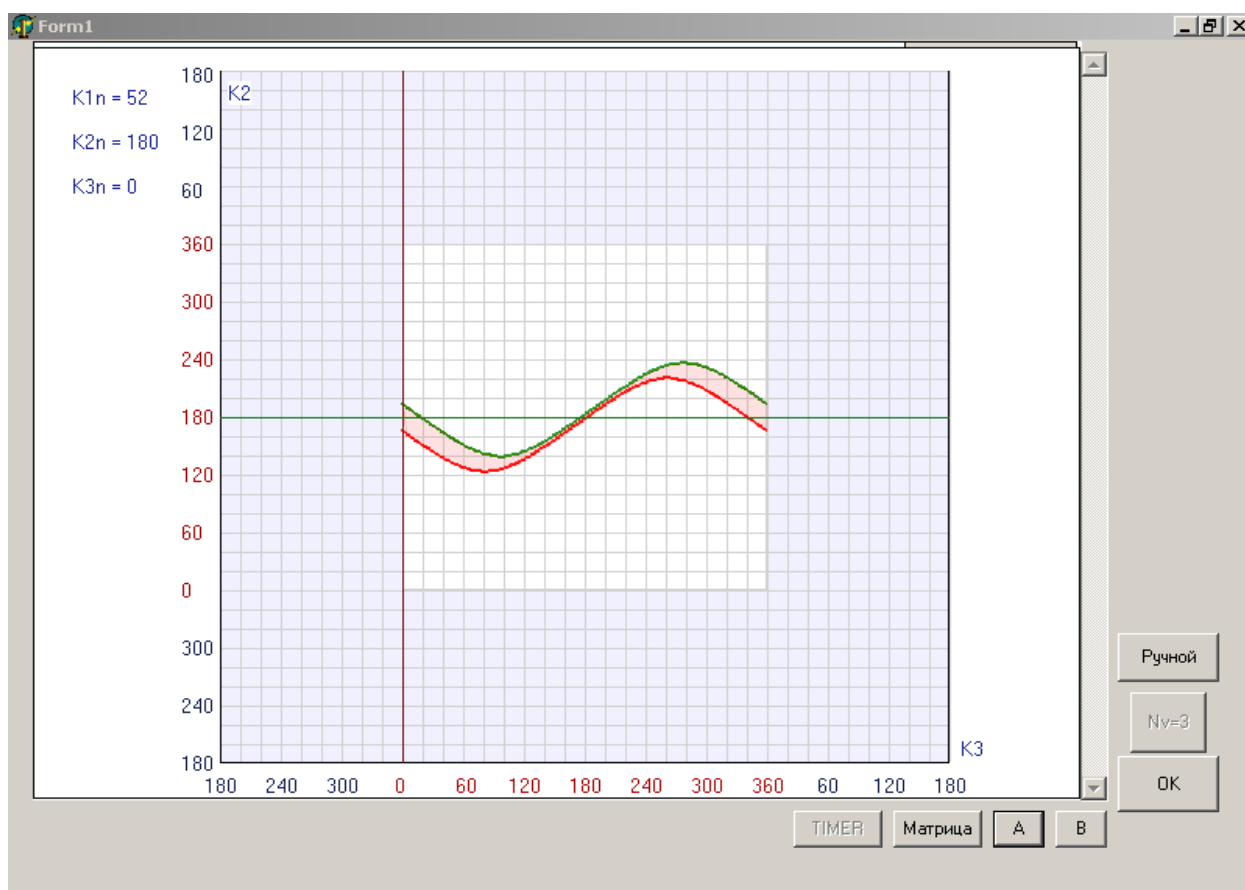


Рисунок 5.15. Область опасных курсов второго и третьего судов

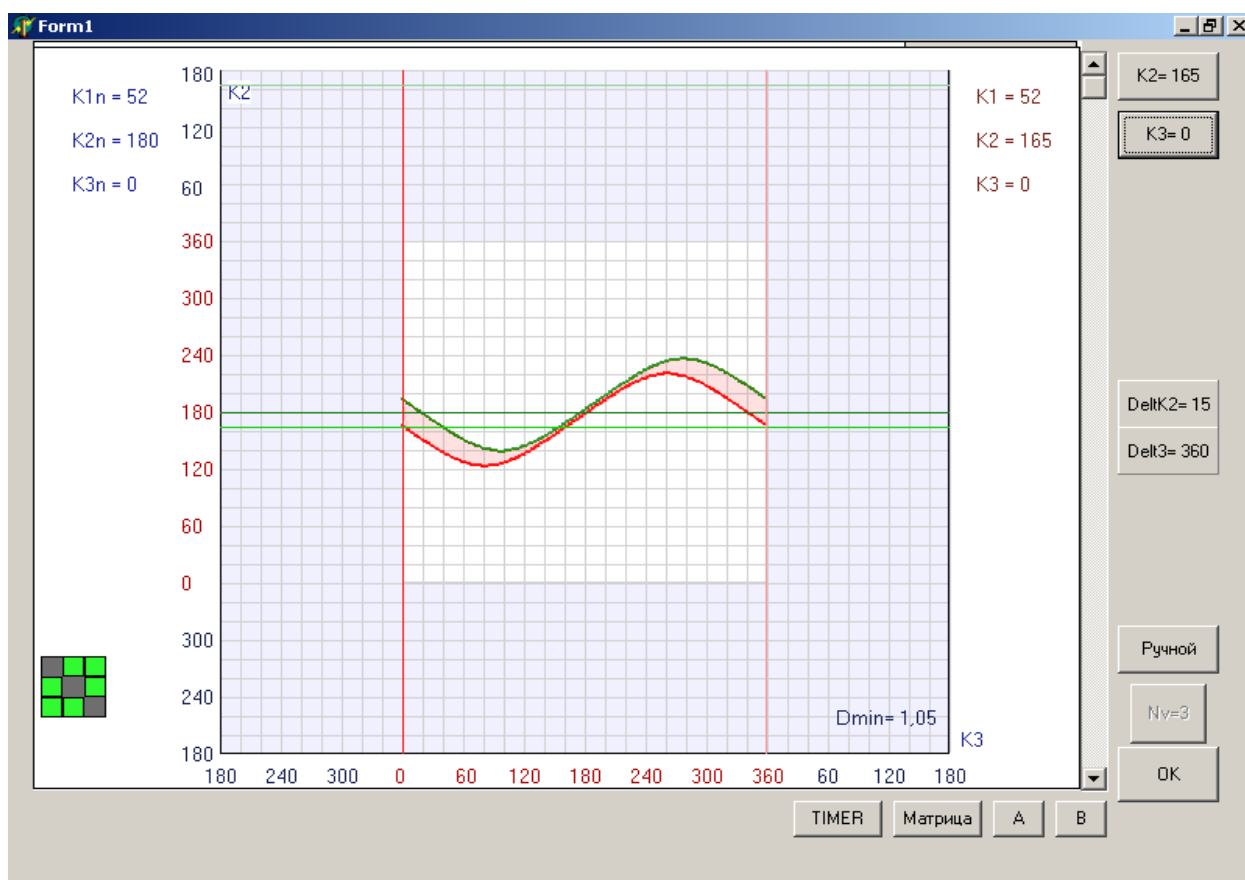


Рисунок 5.16. Выбор безопасного курса уклонения вторым судном

судном, поэтому следует производить изменение курса судна влево, хотя это сопряжено с большим отклонением от его программного значения.

На рисунке 5.16 показано, что безопасное расхождение судов на дистанции 1,05 мили происходит при уклонении второго судна на 15° влево, т.е. на курс 165° .

На рисунке 5.17 показана начальная часть маневра проигрывания, причем показана ситуация сближения трех судов на 31с времени. Ситуация кратчайшего сближения на 1,06 мили второго и третьего судов на 539с времени показана на рисунке 5.18.

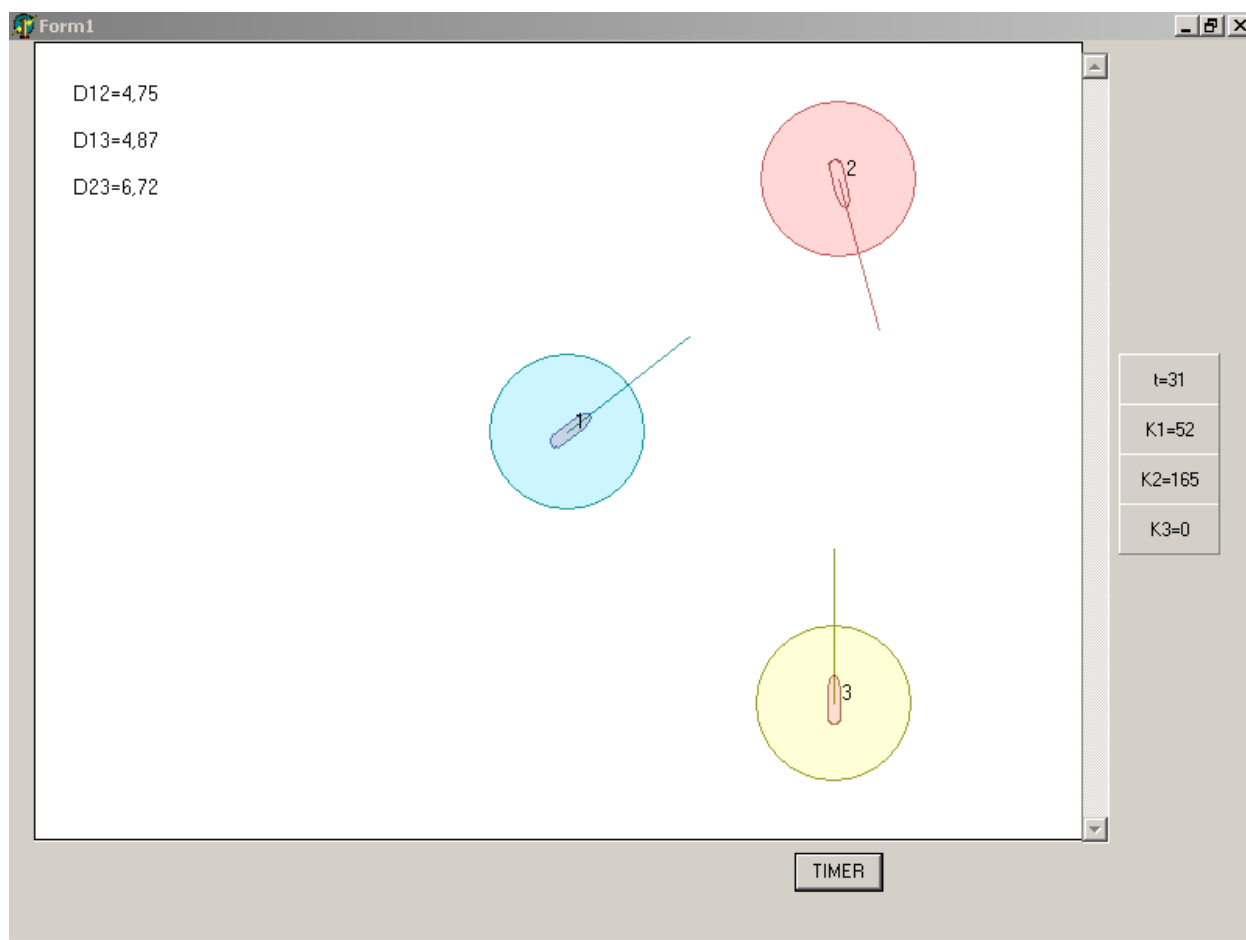


Рисунок 5.17. Начальная ситуация при проигрывании маневра

На рисунке 5.19 представлена ситуация кратчайшего сближения первого и третьего судов, которая происходит на 1181с процесса проигрывания маневра расхождения при дистанции между судами, равной 1,66 мили.

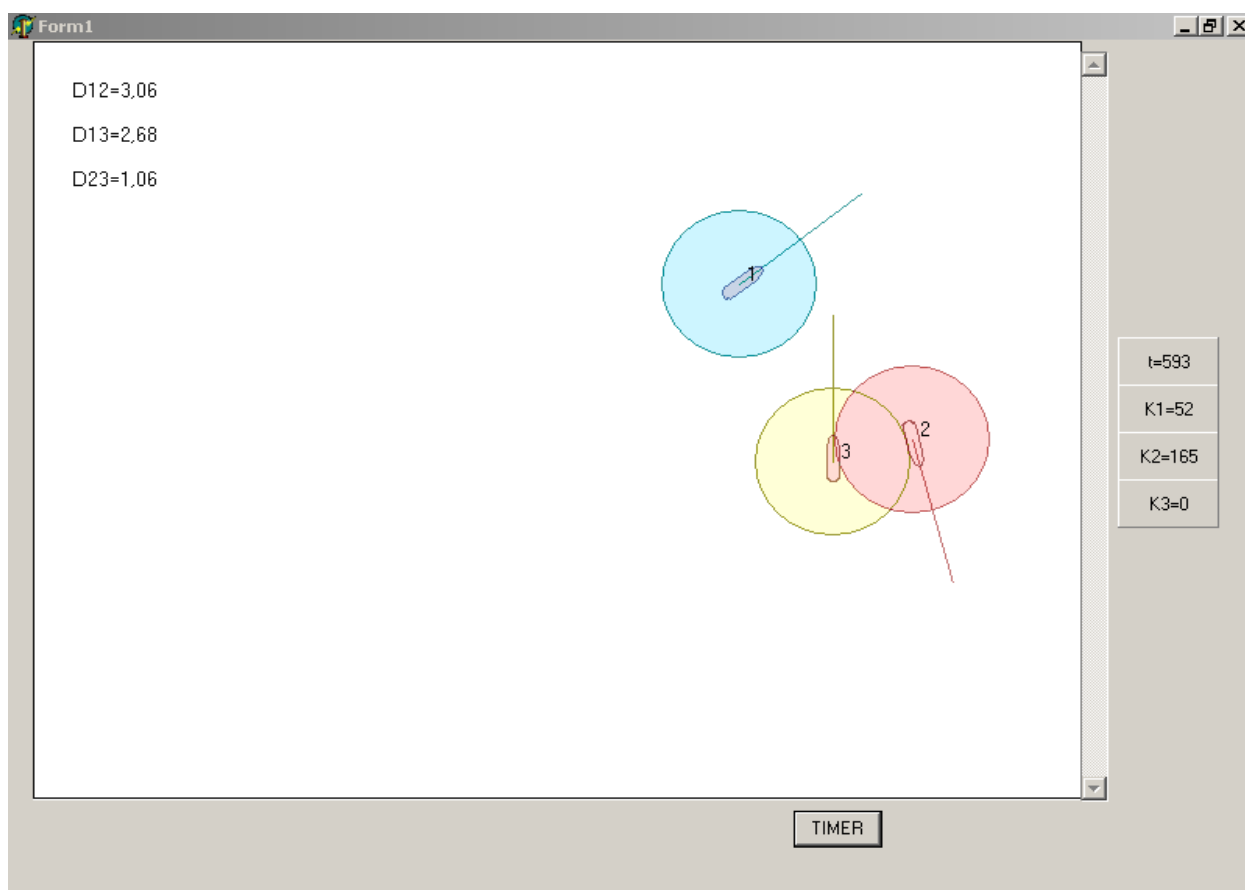


Рисунок 5.18. Ситуация кратчайшего сближения второго и третьего судов

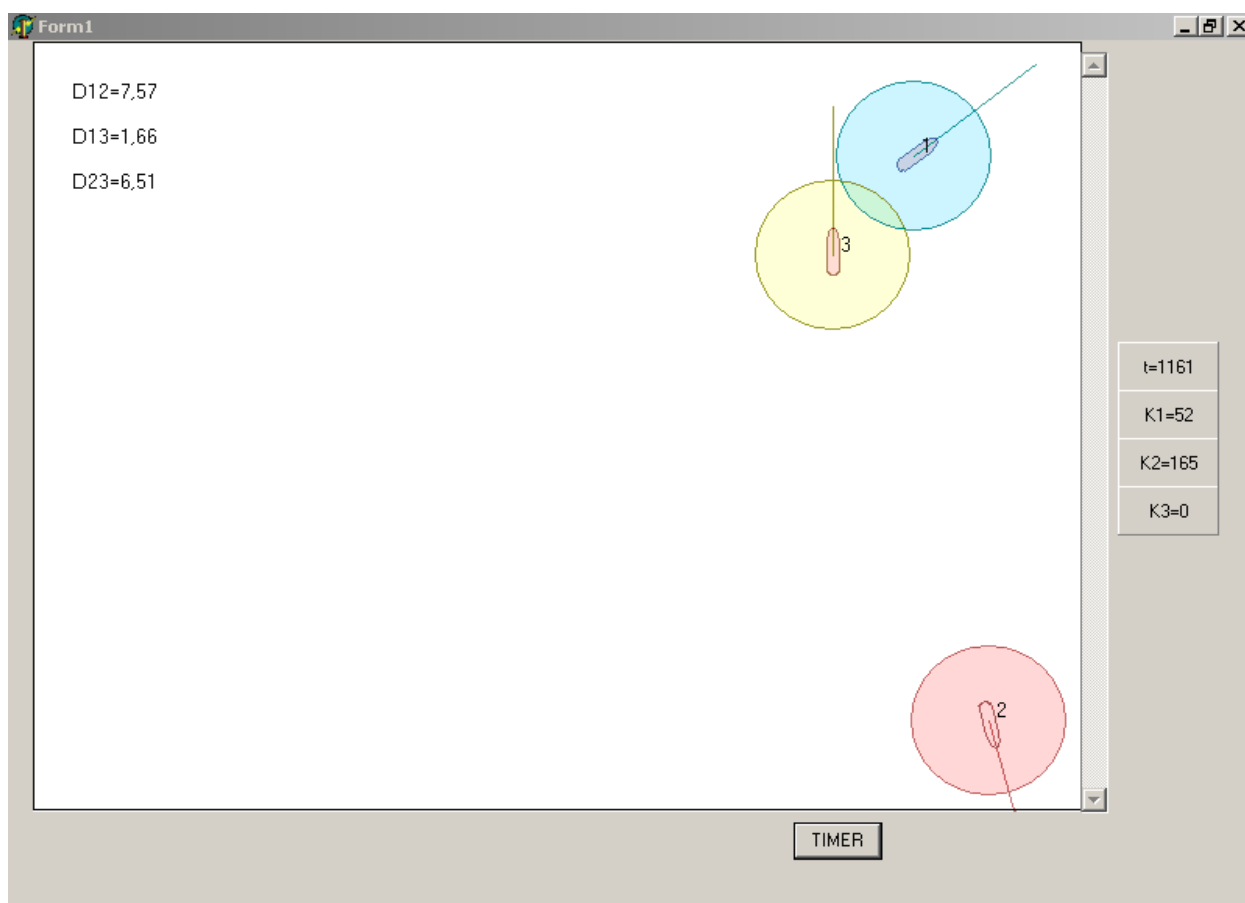


Рисунок 5.19. Ситуация кратчайшего сближения первого и третьего судов

Для выбора ситуации сближения четырех судов клавишу «Nv» необходимо «кликнуть» четыре раза, в результате чего на экране монитора отображается начальная ситуация сближения четырех судов. Согласно индикатору опасности сближение каждой пары судов является опасным – все сектора красного цвета (рисунок 5.20).

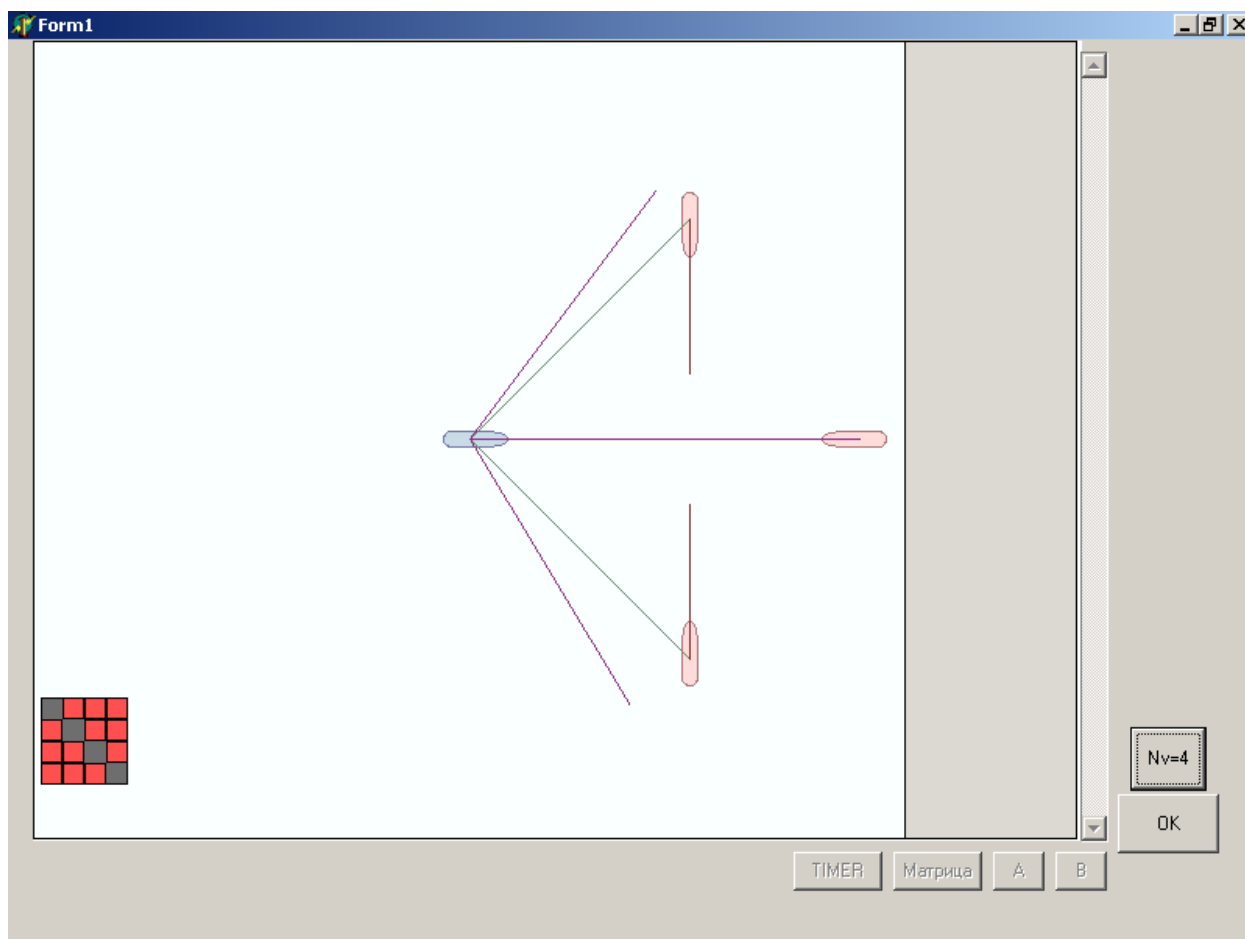


Рисунок 5.20. Начальная ситуация сближения четырех судов

После использования клавиши «OK», как показано на рисунке 5.21, индицируются параметры начальной ситуации и появляется возможность изменения начальной ситуации.

В результате «кликанья» активизировавшейся клавиши «Матрица» выводятся шесть клавиш, характеризующих состояние матрицы ситуационного возмущения, т.е. наличия опасности парных сближений всей группы судов. Индикаторы опасности всех клавиш окрашены в красный цвет, как показано на рисунке 5.22.

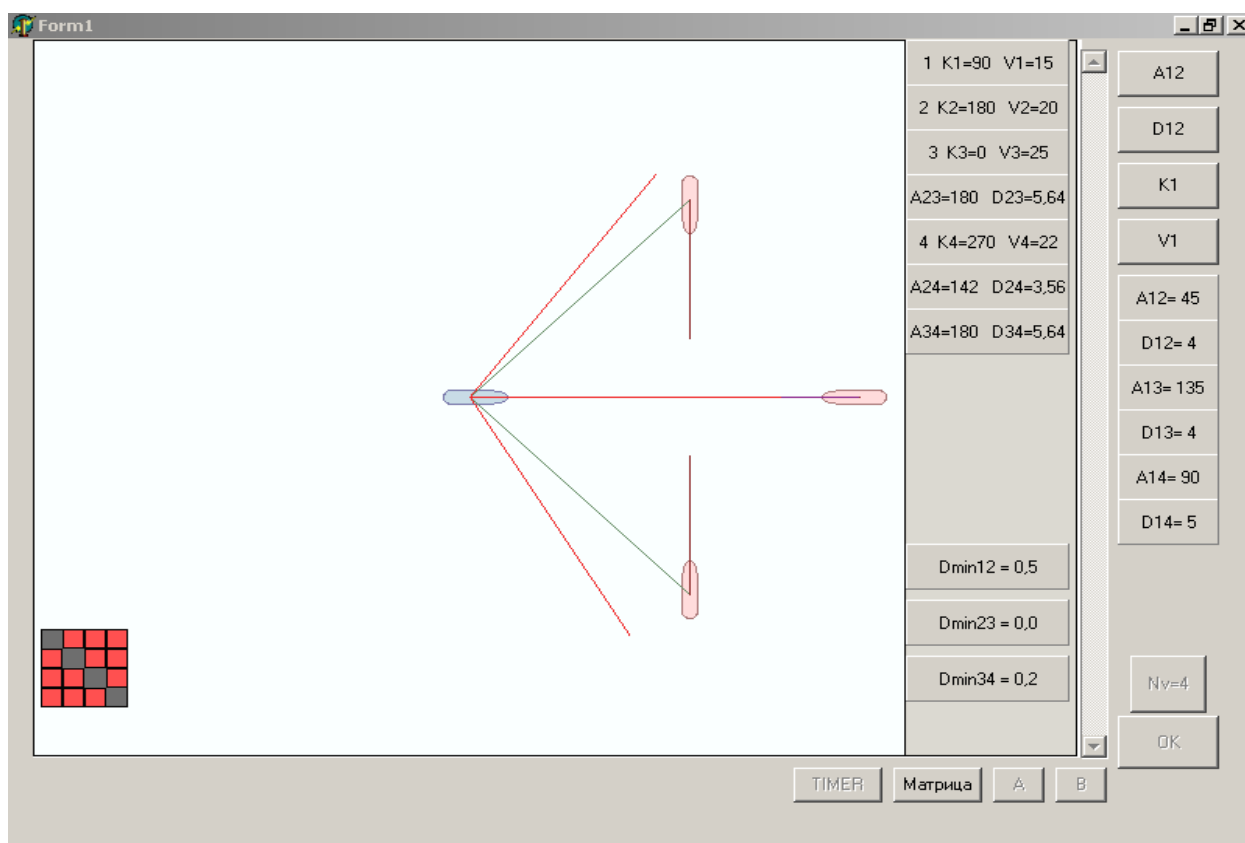


Рисунок 5.21. Возможность корректуры начальной ситуации

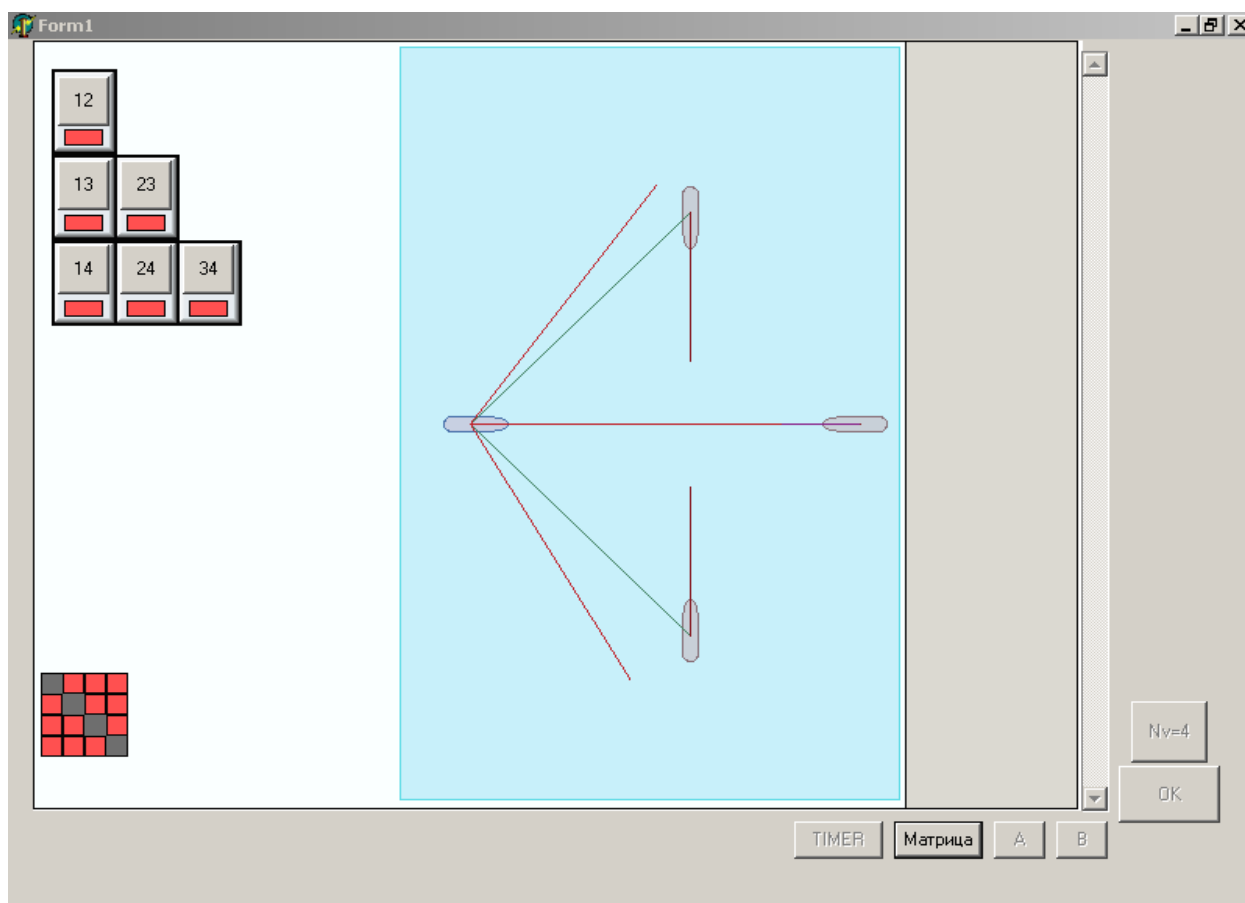


Рисунок 5.22. Вывод клавиш матрицы ситуационного возмущения

Анализ начальной ситуации сближения судов показывает, что для обращения матрицы ситуационного возмущения в нулевую матрицу необходимо изменение курсов не менее трех судов. Поэтому вначале рассмотрим выбор безопасных курсов первого и второго судов.

Для вывода расширенной плоскости и области опасных курсов первого и второго судов «кликаем» клавишу «12» в блоке клавиш матрицы ситуационного возмущения, после чего происходит отображение области (рисунок 5.23). Выбираем курс первого судна К1 и начинаем уменьшать его

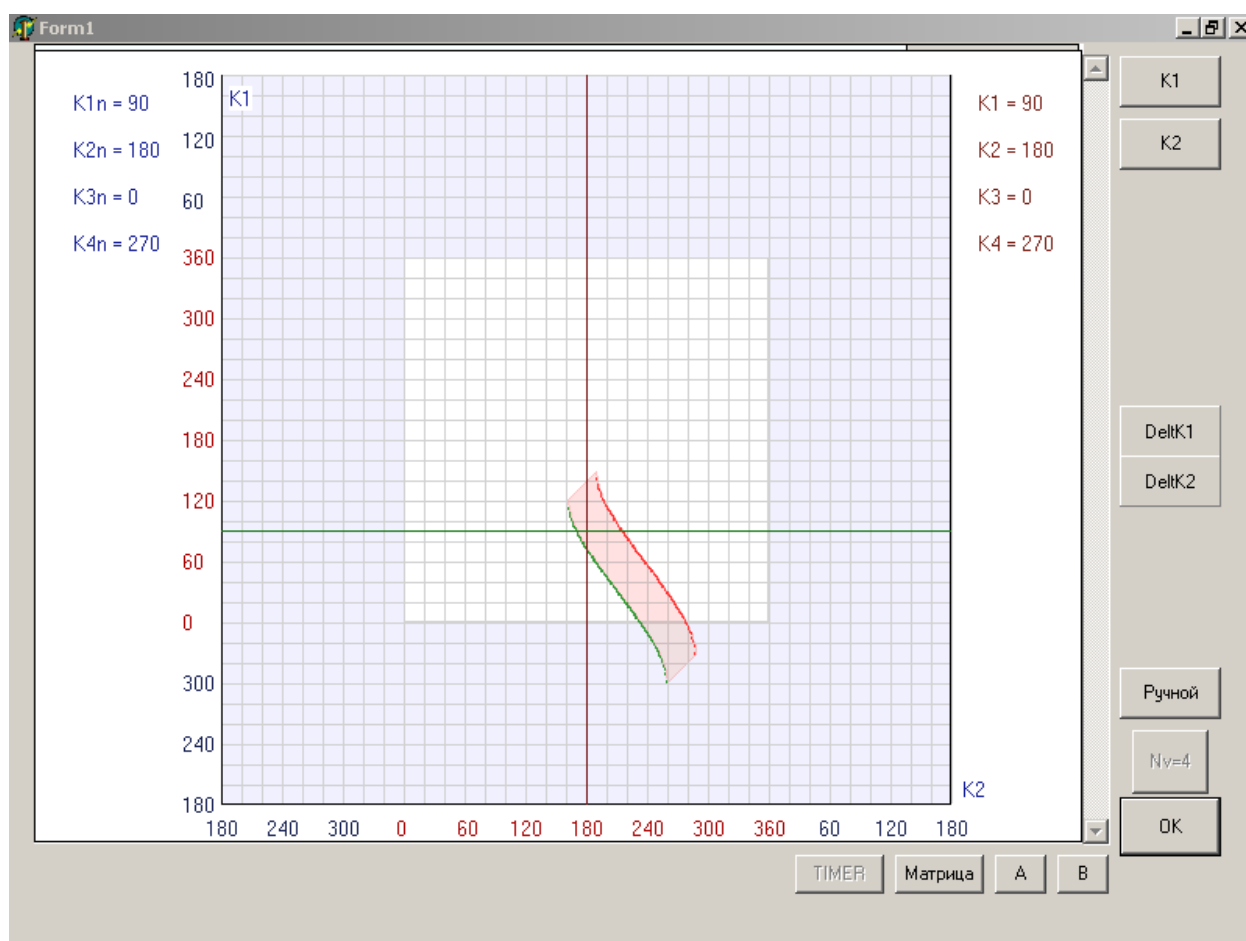


Рисунок 5.23. Область опасных курсов первого и второго судов

значение до обращения в ноль ситуационных возмущений ω_{12} , ω_{13} и ω_{14} , как показано на рисунке 5.24, причем соответствующие сектора индикатора опасности принимают зеленый цвет. Затем с помощью клавиши «K2» выбираем курс второго судна и увеличиваем его с помощью линейки прокрутки, как показано на рисунке 5.25, до обращения в нуль ситуационных

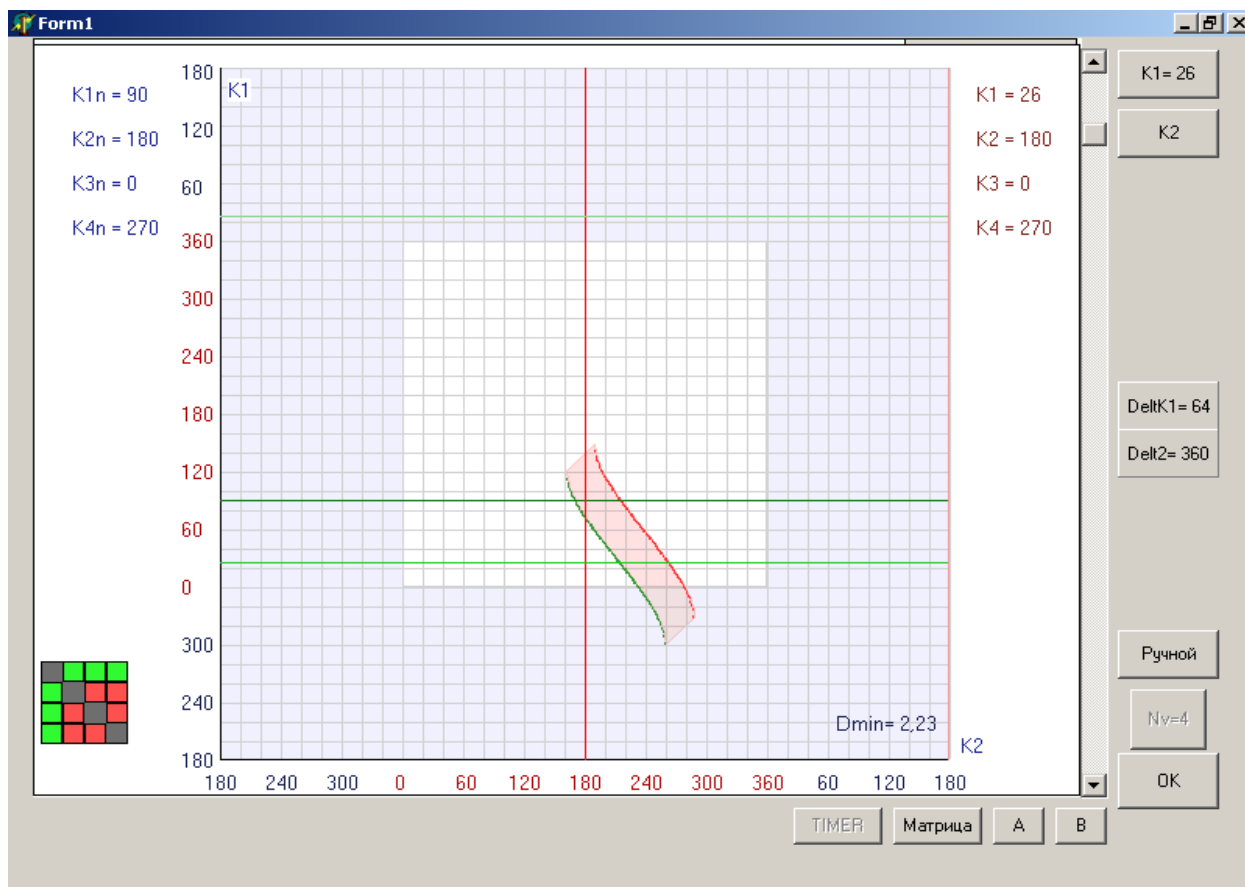


Рисунок 5.24. Выбор безопасного курса K1 первого судна

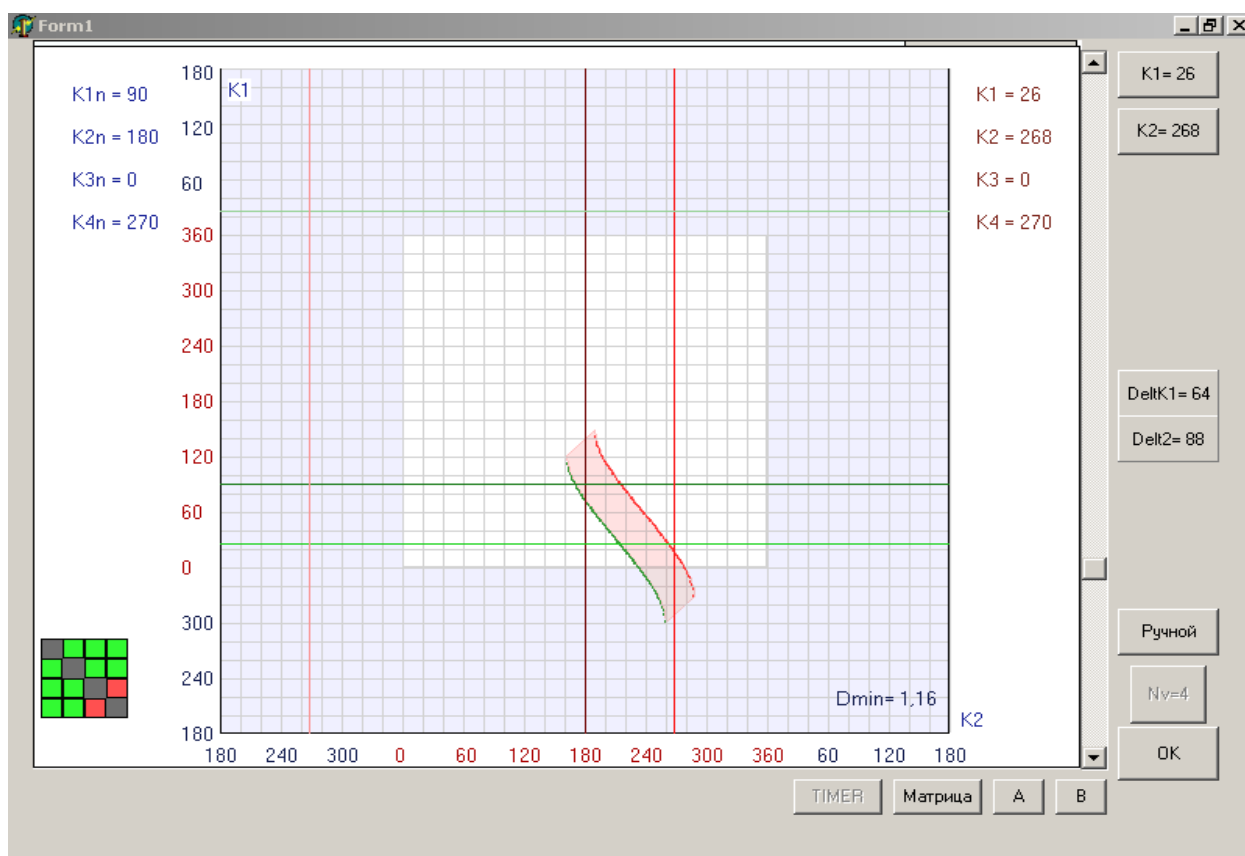


Рисунок 5.25. Выбор безопасного курса K2 второго судна

возмущений ω_{23} и ω_{24} , что видно из индикатора опасности, соответствующие сектора которого окрашены в зеленый цвет. Таким образом, пять ситуационных возмущений компенсированы изменением курса первого судна на 64° влево и курса второго судна вправо на 88° .

Однако осталось некомпенсированным ситуационное возмущение ω_{34} , для чего необходимо изменить курс третьего или четвертого судна. В любом случае, необходим вывод области опасных курсов третьего и четвертого судов. Для этого с помощью клавиши «Матрица» выводятся клавиши матрицы ситуационного возмущения, из которых только клавиша «34» с красным индикатором опасности, что показано на рисунке 5.26.

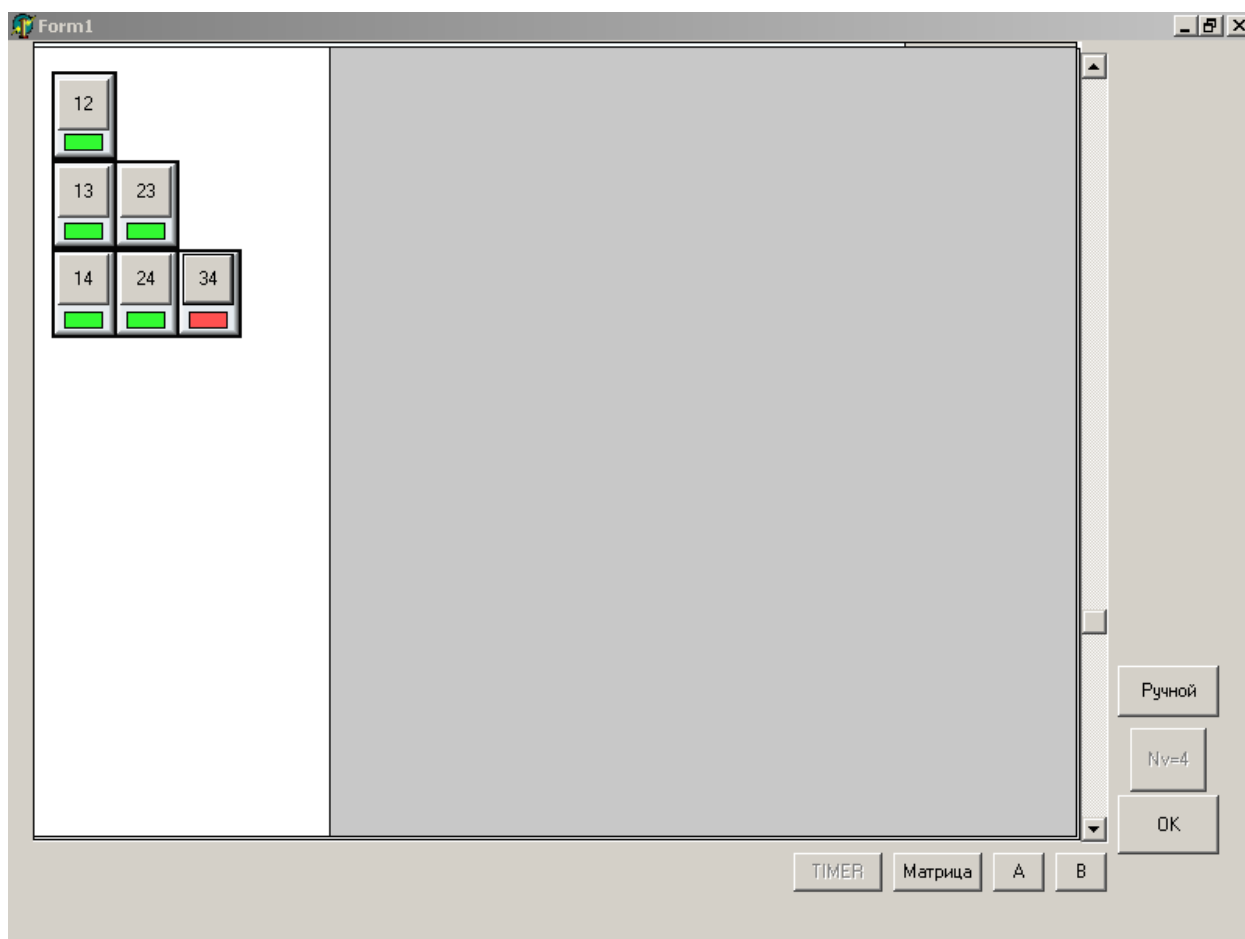


Рисунок 5.26. Вывод клавиш матрицы ситуационного возмущения

Используя указанную клавишу, а затем клавишу «А» выводим на экран расширенную плоскость курсов и область опасных курсов третьего и четвертого судов, как показано на рисунке 5.27.

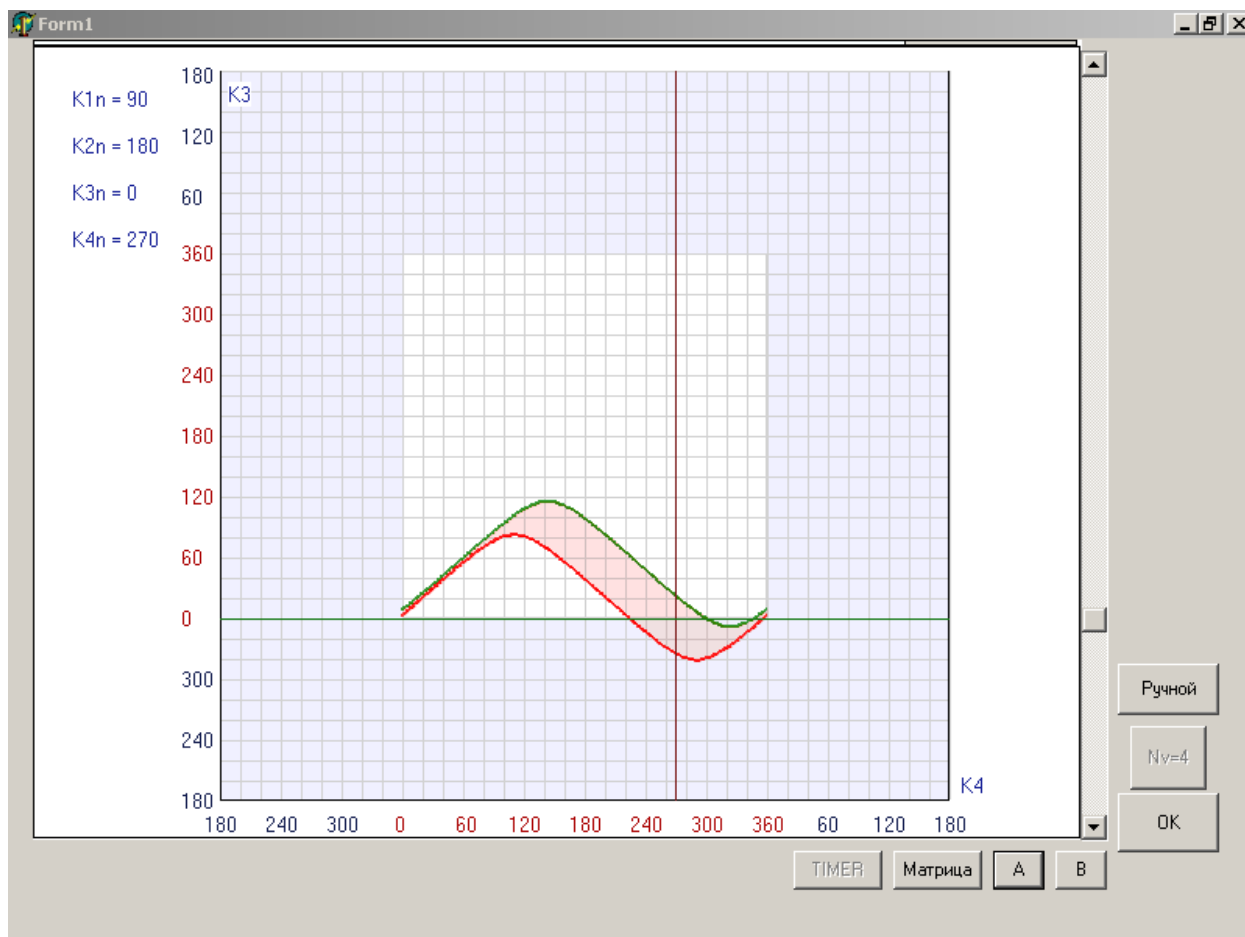


Рисунок 5.27. Область опасных курсов третьего и четвертого судов

Обращаем внимание на то обстоятельство, что точка пересечения начальных курсов судов принадлежит области опасных курсов. Для вывода точки пересечения курсов с области опасных курсов с минимальным изменением курса следует произвести отворот третьего судна вправо до границы области.

Как следует из рисунка 5.28, это происходит при повороте третьего судна на курс 24° , индикатор опасности показывает, что в этом случае матрица ситуационного возмущения обращается в нулевую матрицу, а дистанция кратчайшего сближения третьего и четвертого судов составит 1,03 мили.

Ситуация проигрывания маневра расхождения судов на 3с времени показана на рисунке 5.29, из которого видно, что первое, второе и третье суда изменили начальные курсы, а четвертое судно следует начальным курсом.

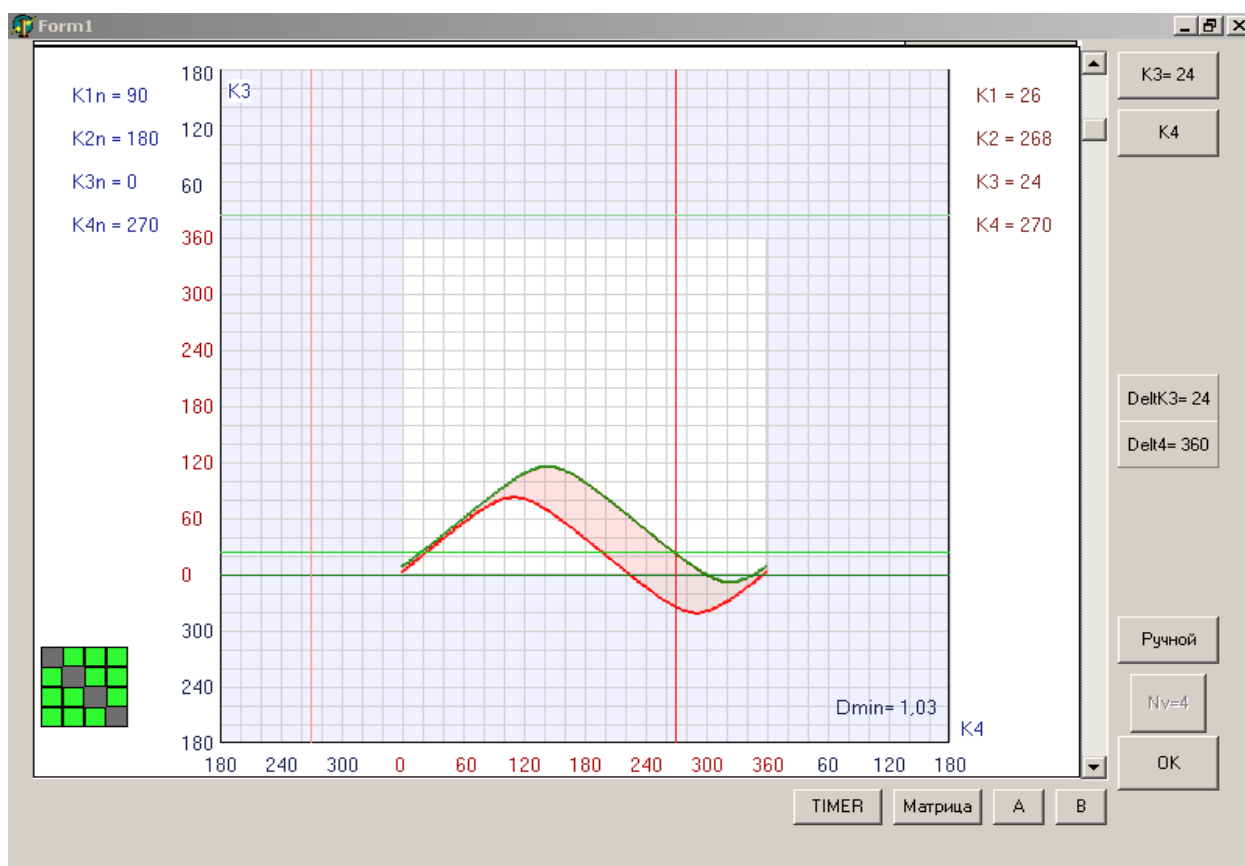


Рисунок 5.28. Выбор безопасного курса третьего судна

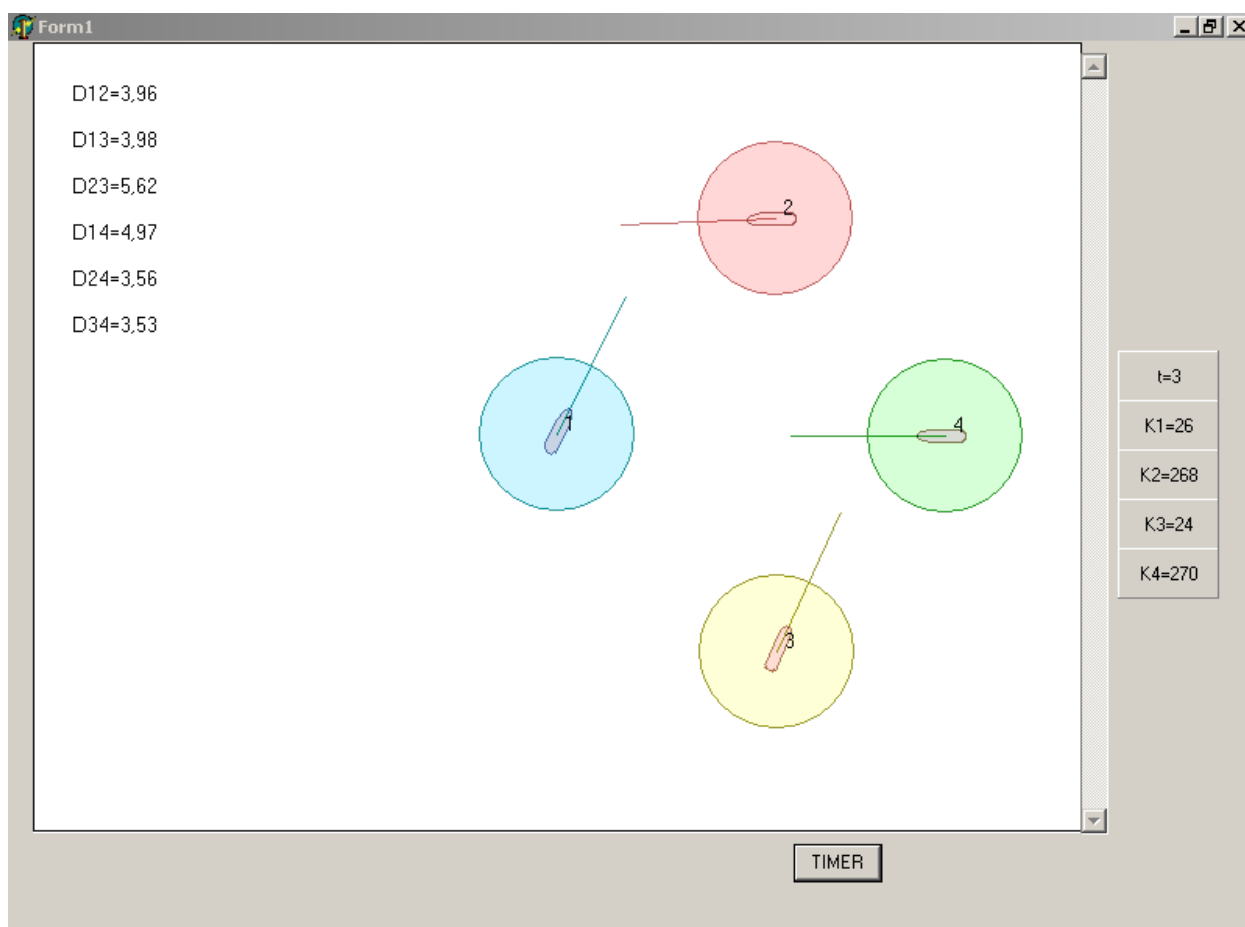


Рисунок 5.29. Ситуация процесса расхождения на 3с времени

Следует отметить, что выбранный вариант курсов расхождения судов является одним из возможных, и представлен здесь лишь для иллюстрации предлагаемого графического метода определения оптимального маневра расхождения группы судов с помощью компьютерного моделирования.

Первыми на кратчайшую дистанцию сближаются третье и четвертое суда (рисунок 5.30). Момент времени кратчайшего сближения этой пары судов равен 322с, причем сама дистанция кратчайшего сближения составляет 1,04 мили, что соответствует минимальной дистанции между судами при выборе безопасного курса третьего судна.

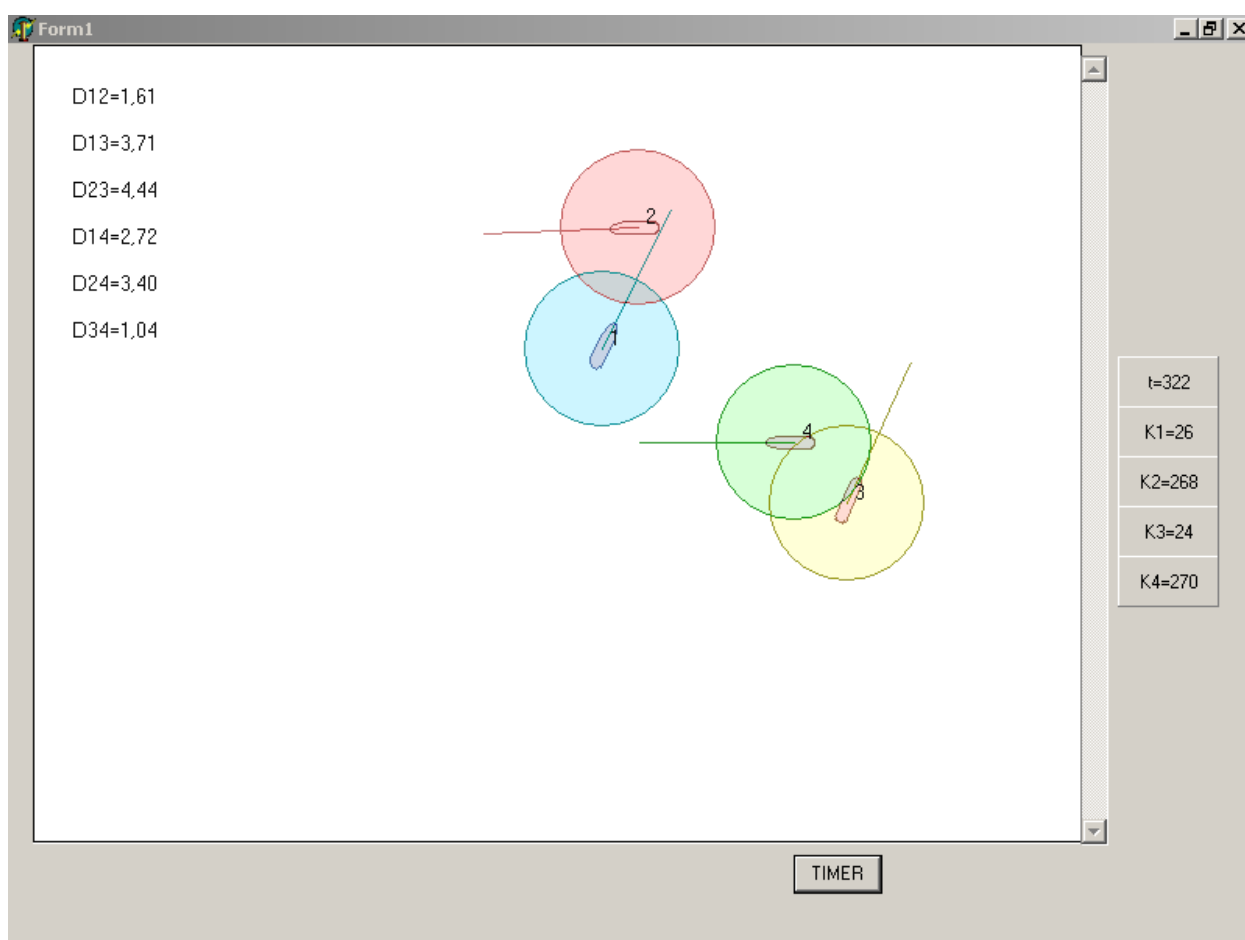


Рисунок 5.30. Ситуация кратчайшего сближения третьего и четвертого судов

В момент времени, равный 463с, дистанции кратчайшего сближения 1,18 мили достигают первое и второе суда, как показано на рисунке 5.31, а дистанция кратчайшего сближения между первым и четвертым судами значением 2,14 мили достигается на 534с времени (рисунок 5.32).

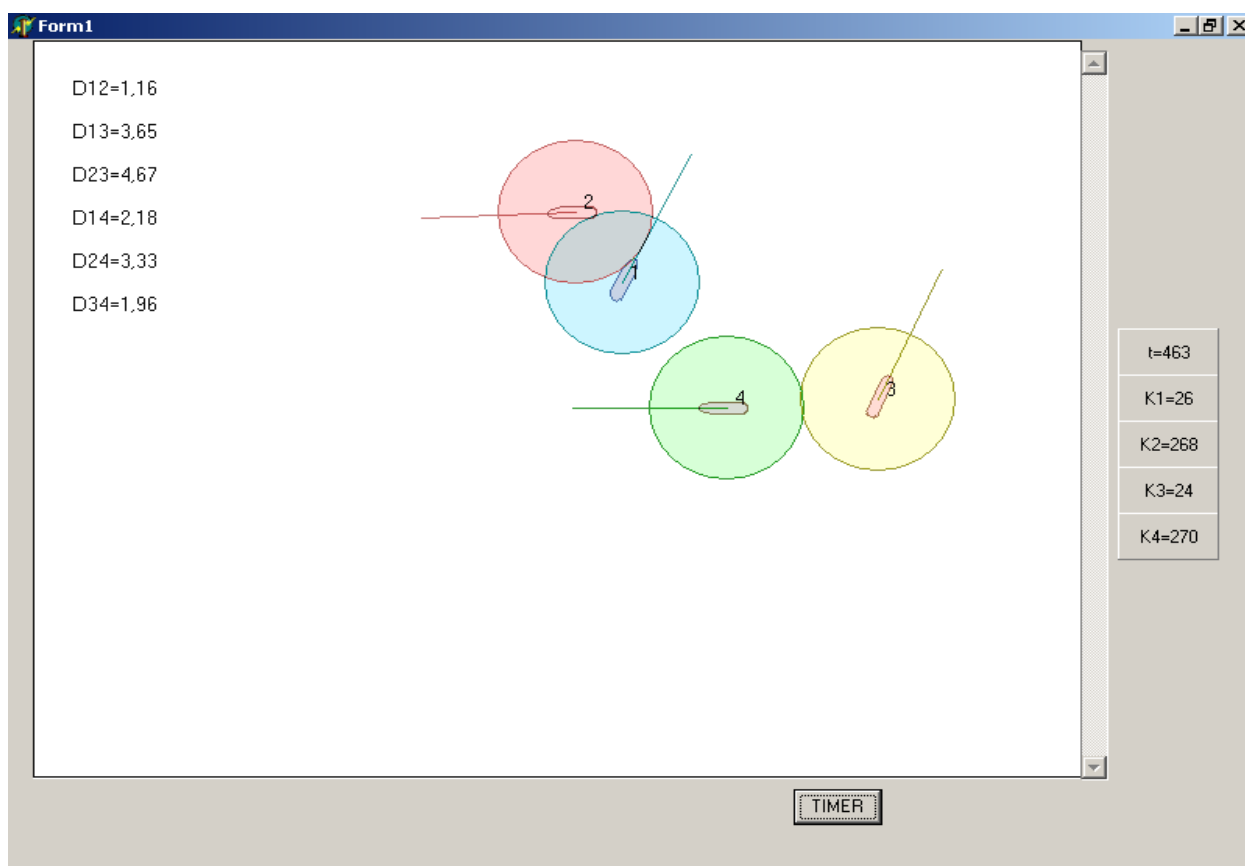


Рисунок 5.31. Ситуация кратчайшего сближения первого и второго судов

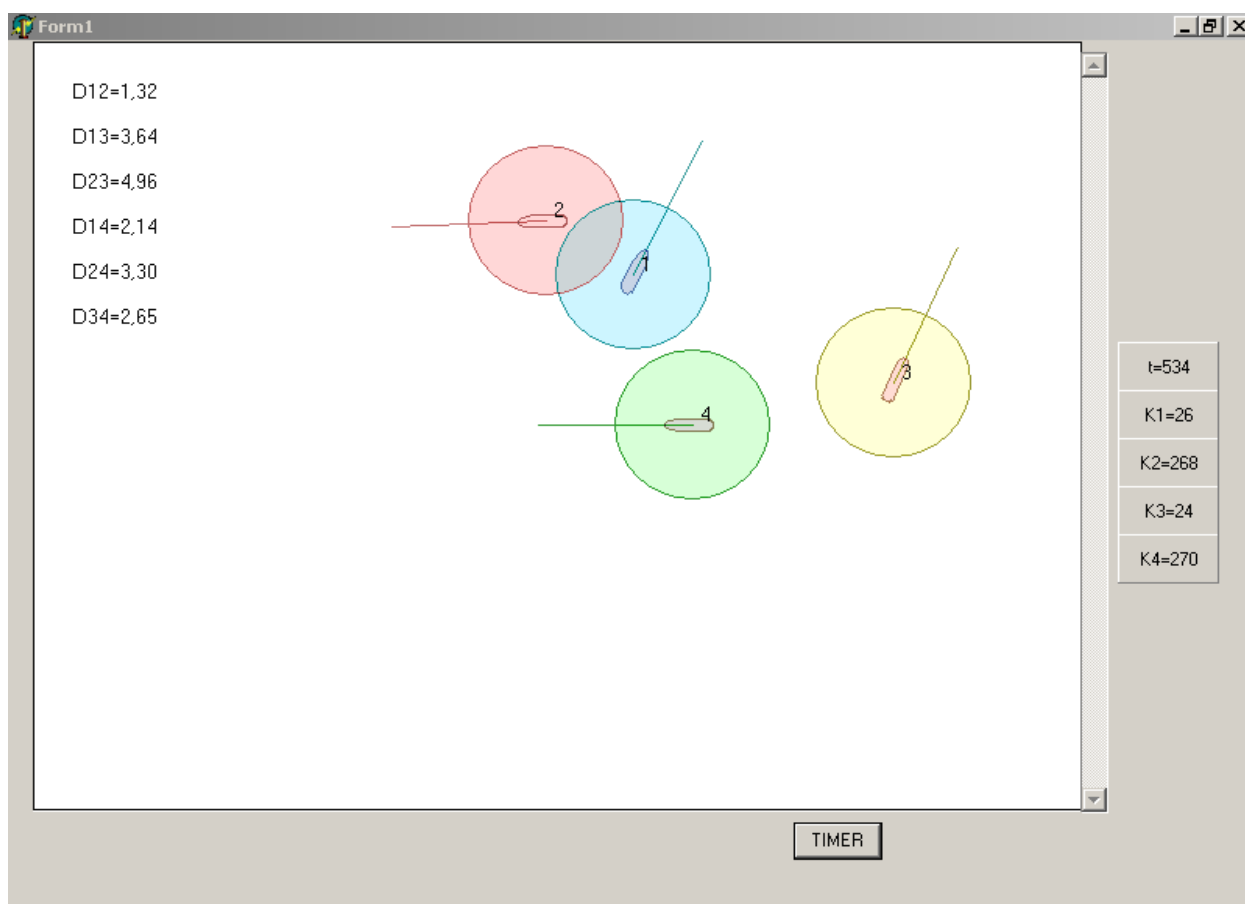


Рисунок 5.32. Ситуация кратчайшего сближения первого и четвертого судов

На рисунке 5.33 показана ситуация сближения группы судов, состоящей из пяти судов, причем, как следует из состояния индикатора опасности, первые четыре судна сближаются опасно, т.е. все их парные ситуационные возмущения существуют, а пятое судно свободно следует без опасного сближения с остальными судами.

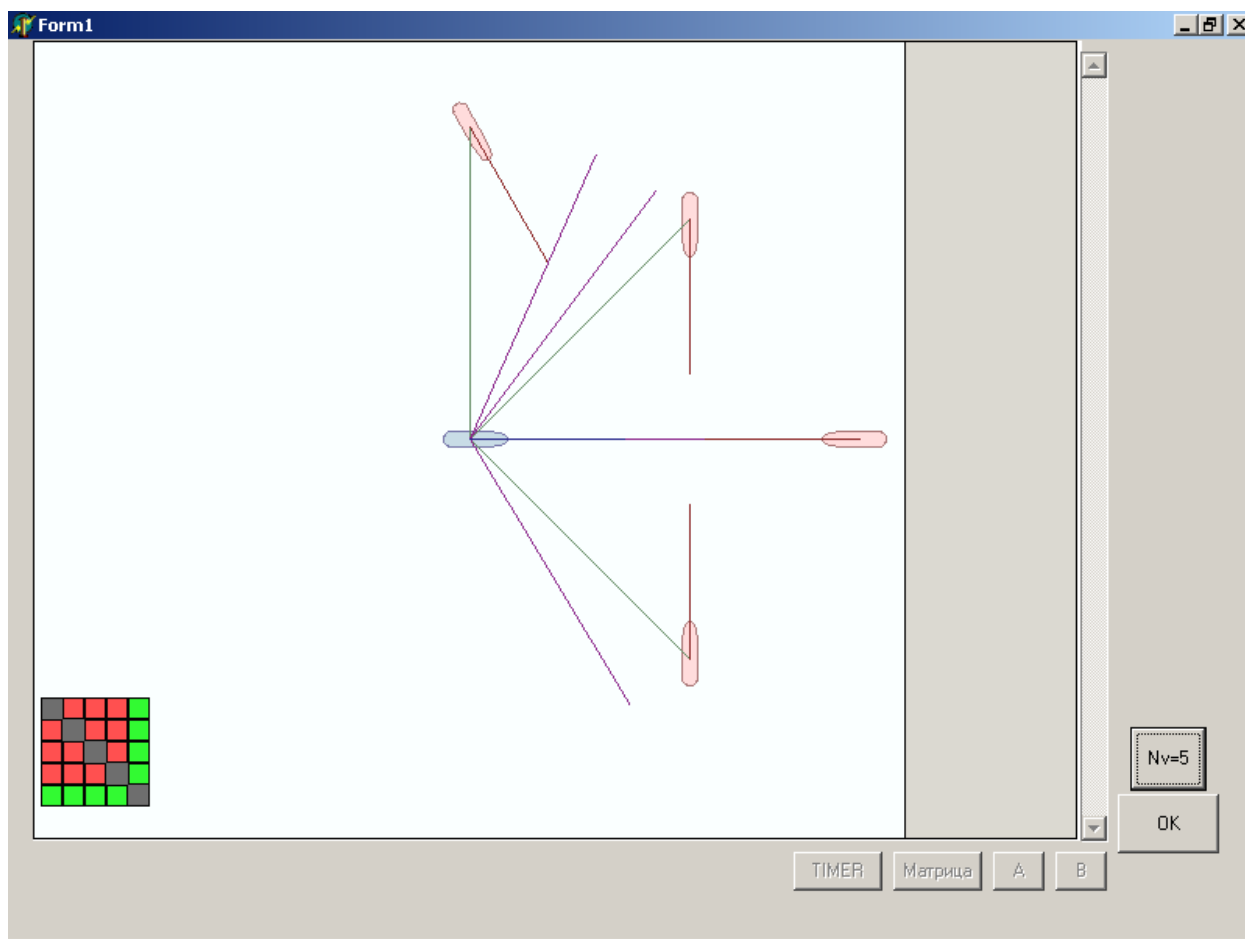


Рисунок 5.33. Начальная ситуация сближения группы из пяти судов

Для усложнения выбора безопасных курсов расхождения изменяем начальную ситуацию сближения, уменьшая курс пятого судна до 135° , что ведет к появлению ситуационного возмущения между пятым и третьим судами (рисунок 5.34), что следует из индикатора опасности.

После использования клавиши «Матрица» выводятся клавиши матрицы ситуационного возмущения, как показано на рисунке 5.35. Анализ ситуационной матрицы показывает, что второе и пятое суда, как и четвертое судно с пятым, сближаются безопасно, остальные сближения каждой пары

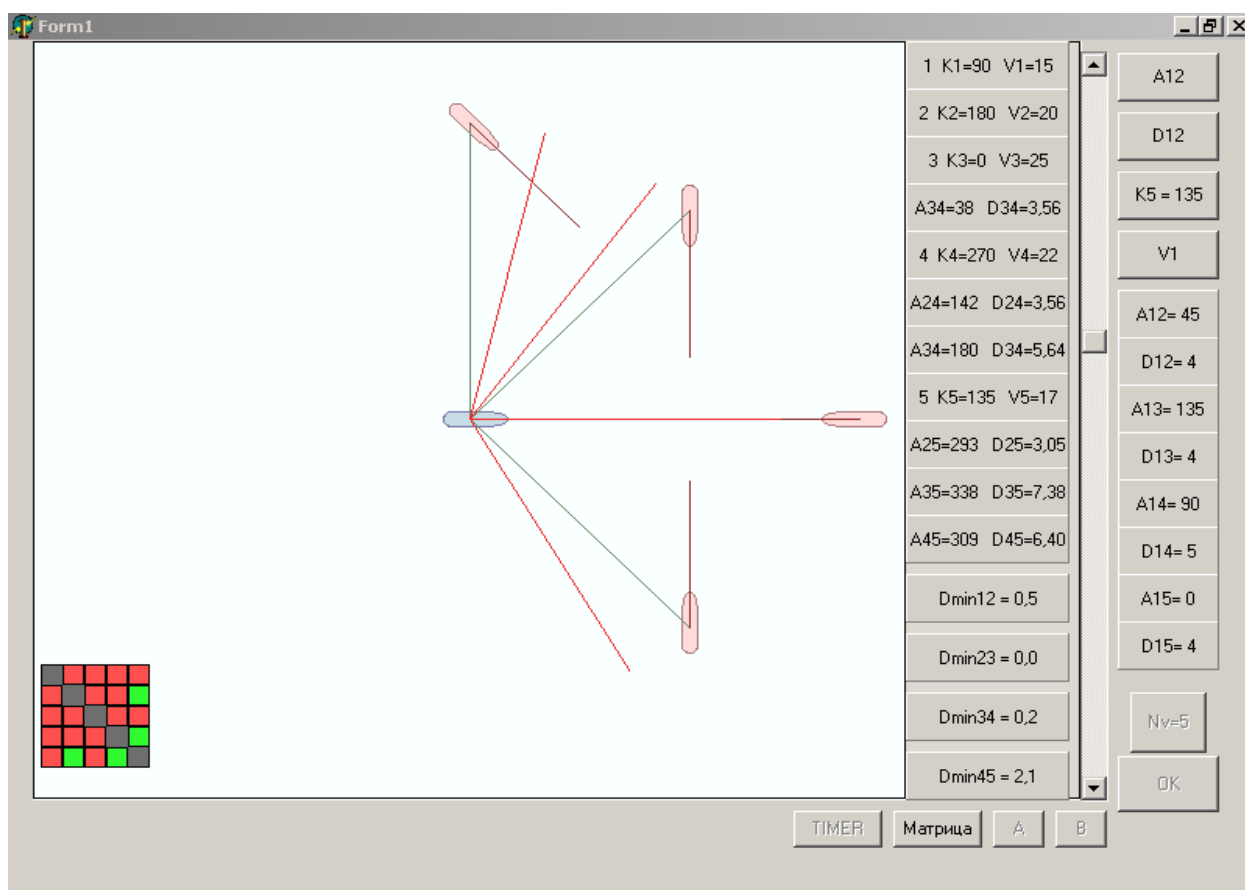


Рисунок 5.34. Изменение начальной ситуации сближения судов

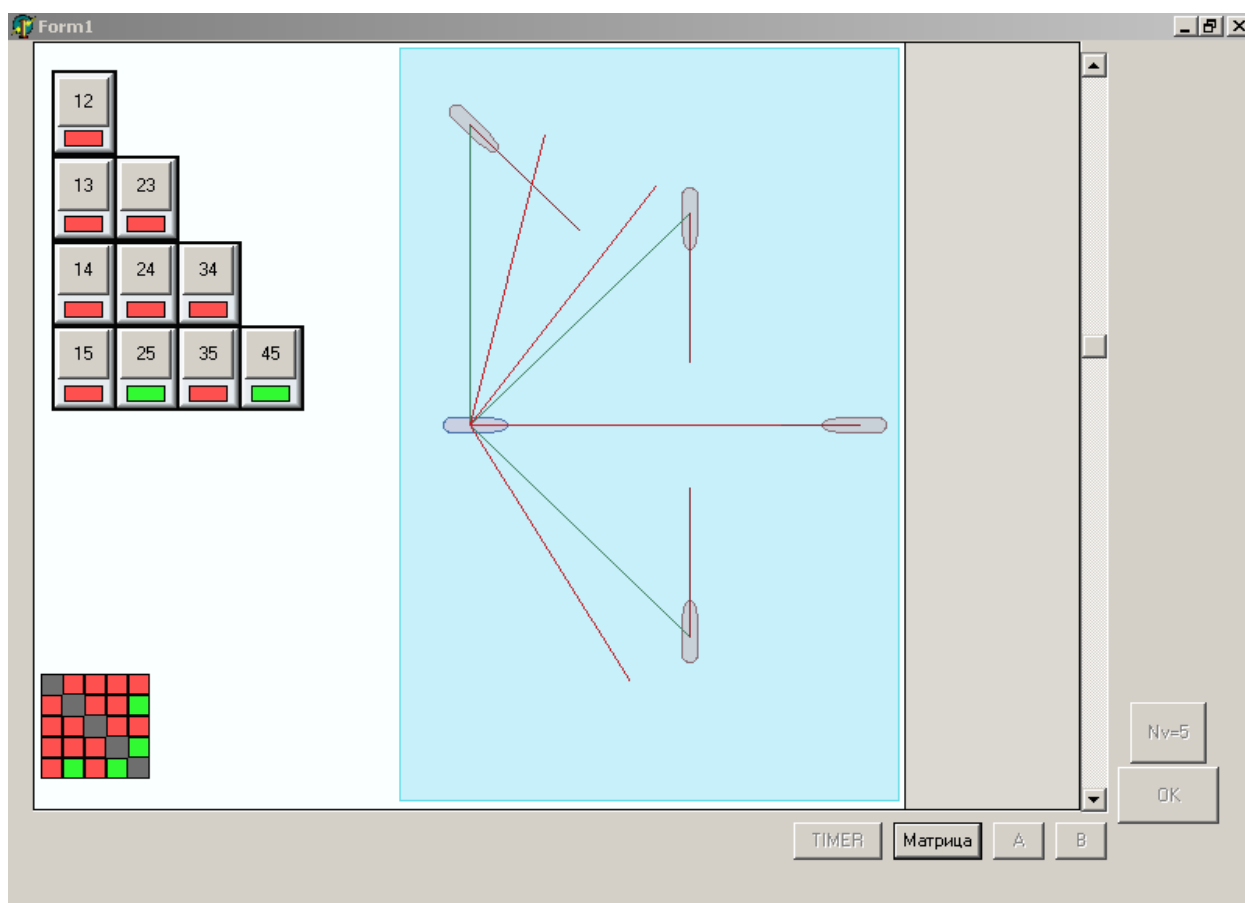


Рисунок 5.35. Вывод клавиш матрицы ситуационного возмущения

судов являются опасными, т.е. возникают ситуационные возмущения. Для компенсации ситуационного возмущения достаточно изменения курсов трех судов, причем наиболее эффективным является изменение курса первого судна. Поэтому с помощью клавиши «12» на экран монитора выводится расширенная плоскость курсов и область опасных курсов первого и второго судов, которые показаны на рисунке 5.36. Увеличивая курс первого судна до 132° , производится компенсация ситуационных возмущений ω_{13} , ω_{14} и ω_{15} .

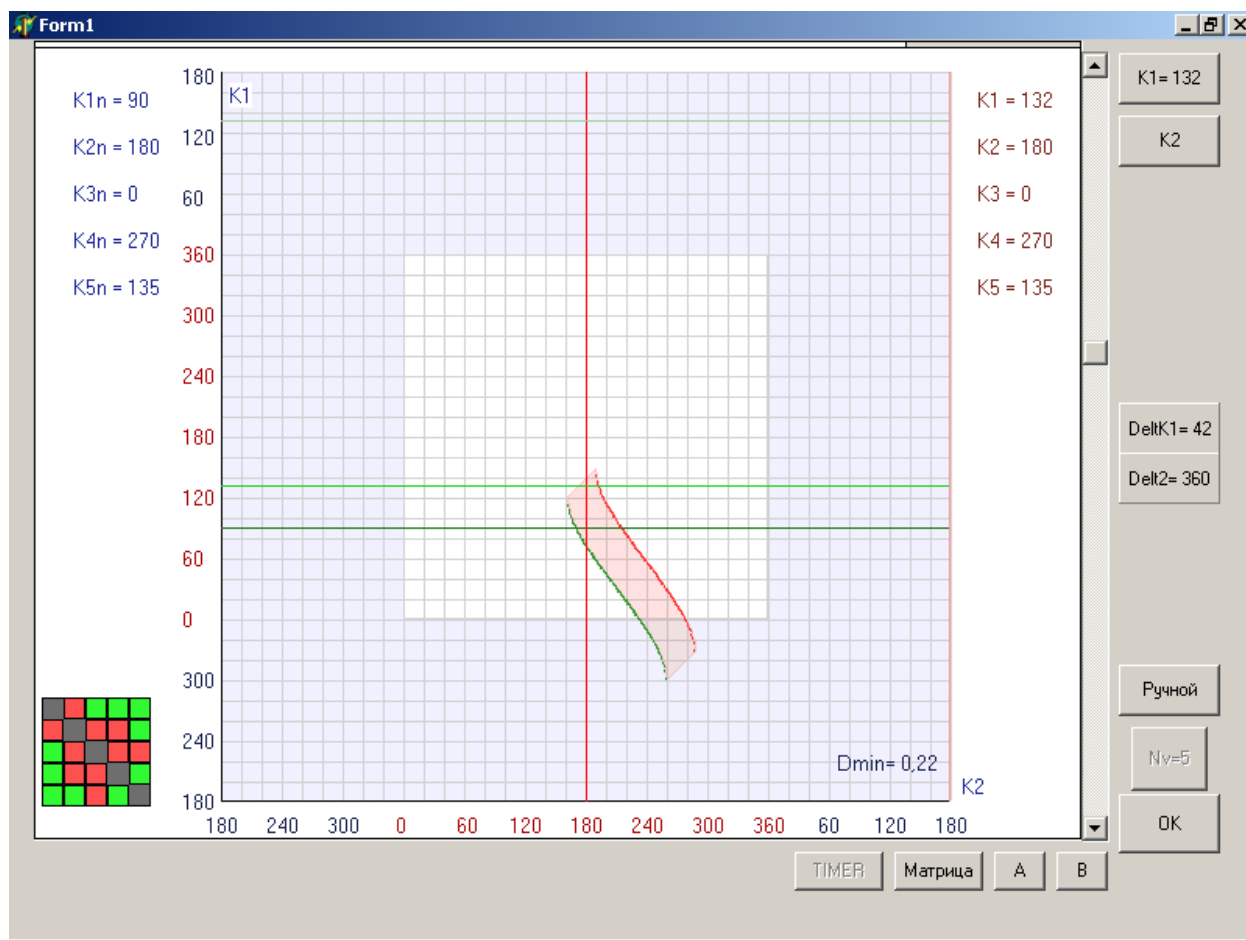


Рисунок 5.36. Область опасных курсов первого и второго судов

Уклонение второго судна влево на курс 156° ведет к компенсации ситуационных возмущений ω_{12} , ω_{23} и ω_{24} , как видно из рисунка 5.37. Остались некомпенсированными ситуационные возмущения, связанные с третьим судном, т. е. ω_{34} и ω_{35} , поэтому следует вначале использовать клавишу «Матрица» (рисунок 5.38) и использовать клавишу «34» для получения возможности изменения курса третьего судна.

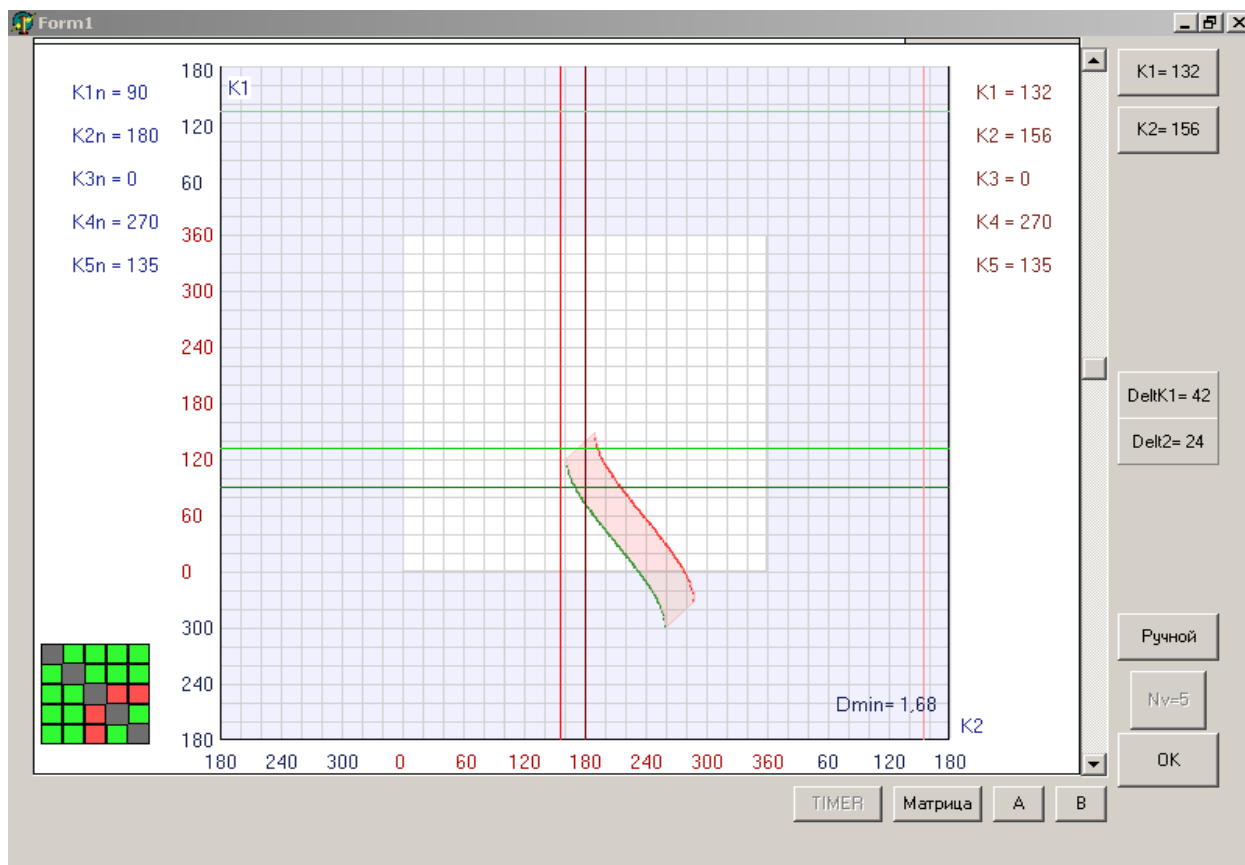


Рисунок 5.37. Выбор безопасного курса K2 второго судна

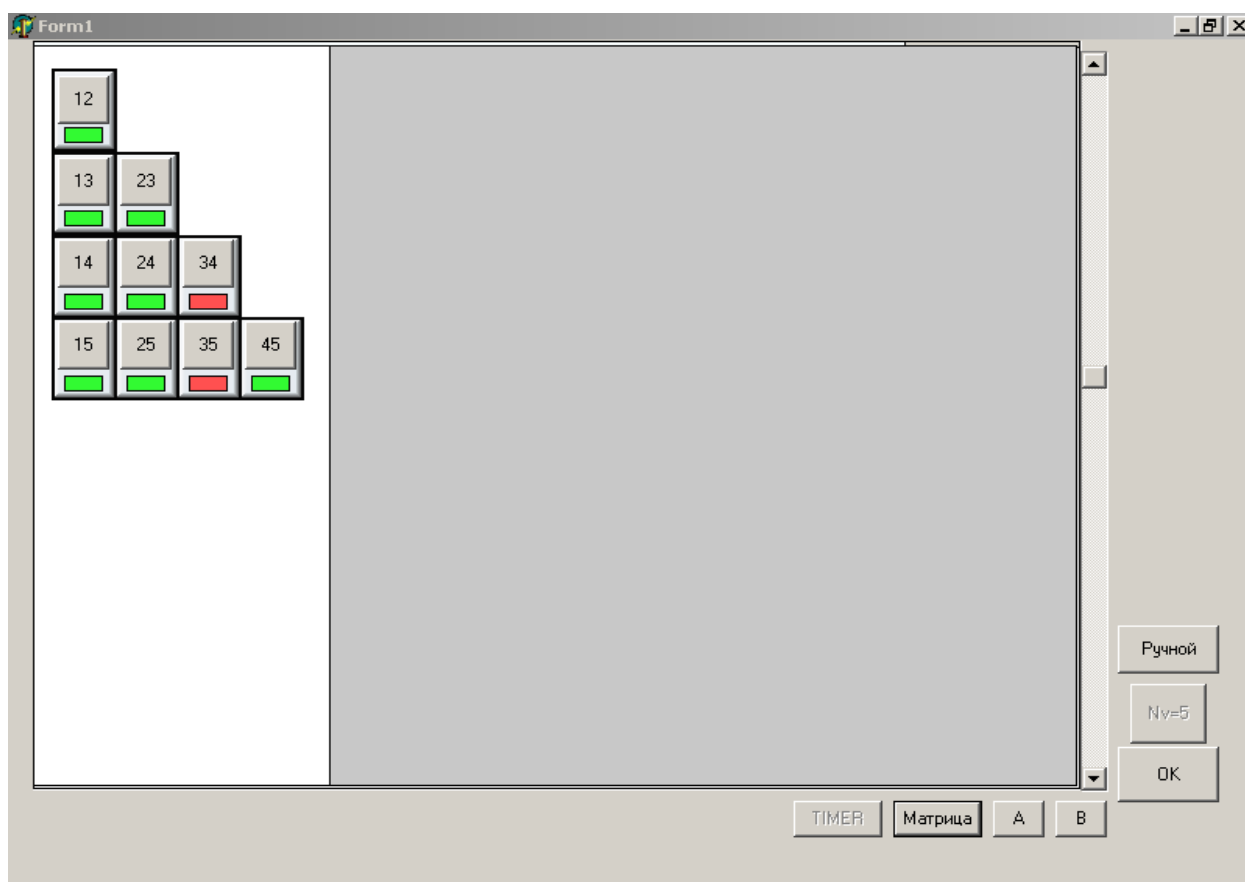


Рисунок 5.38. Вывод клавиш матрицы ситуационного возмущения

В результате этого выводится область опасных курсов третьего и четвертого судов. Используя клавишу «К3», с помощью линейки прокрутки изменяем курс К3 третьего судна на 37° вправо, в результате чего ситуационные возмущения ω_{34} и ω_{35} обращаются в ноль и матрица ситуационного возмущения становится нулевой, что следует из индикатора опасности (рисунок 5.39).

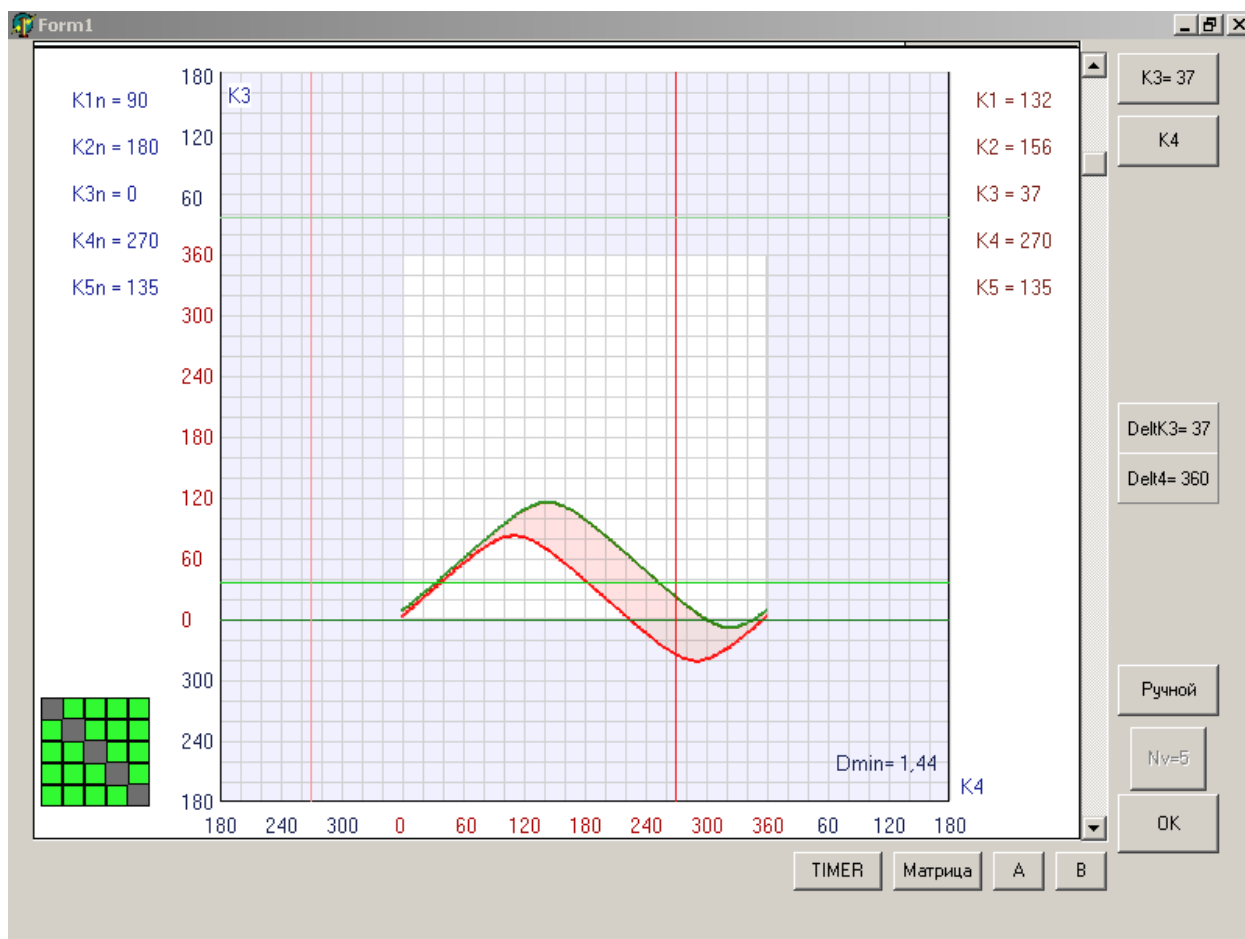


Рисунок 5.39. Выбор безопасного курса К3 третьего судна

На рисунке 5.40 показана начальная ситуация расхождения судов. Ситуация кратчайшего сближения третьего и четвертого судов на 252с времени показана на рисунке 5.41. Очередное кратчайшее сближение второго и четвертого судов происходит на 355с времени, как показано на рисунке 5.42. При этом дистанция кратчайшего сближения равна 1,29 мили. На 499с достигается кратчайшее сближение первого и четвертого судов на дистанцию 1,44 мили (рисунок 5.43).

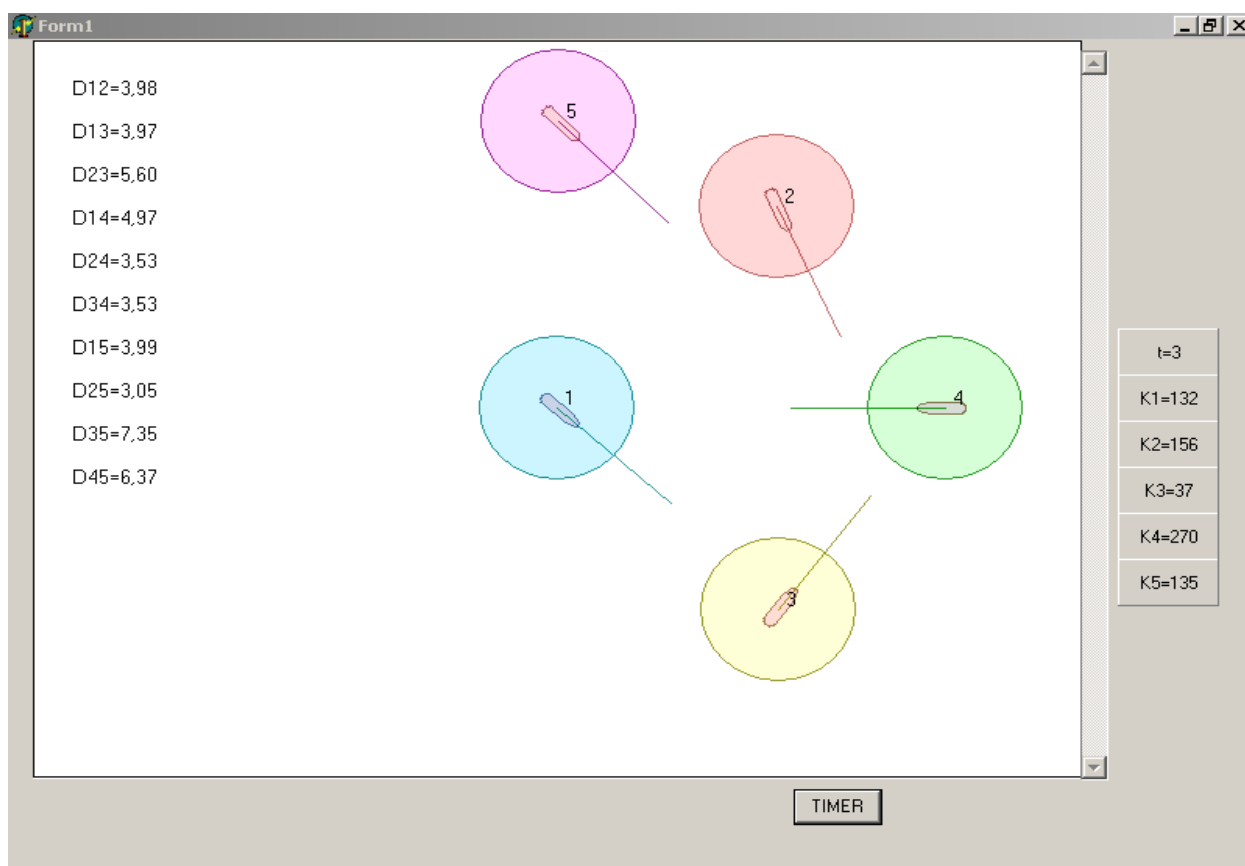


Рисунок 5.40. Начальная ситуация процесса расхождения

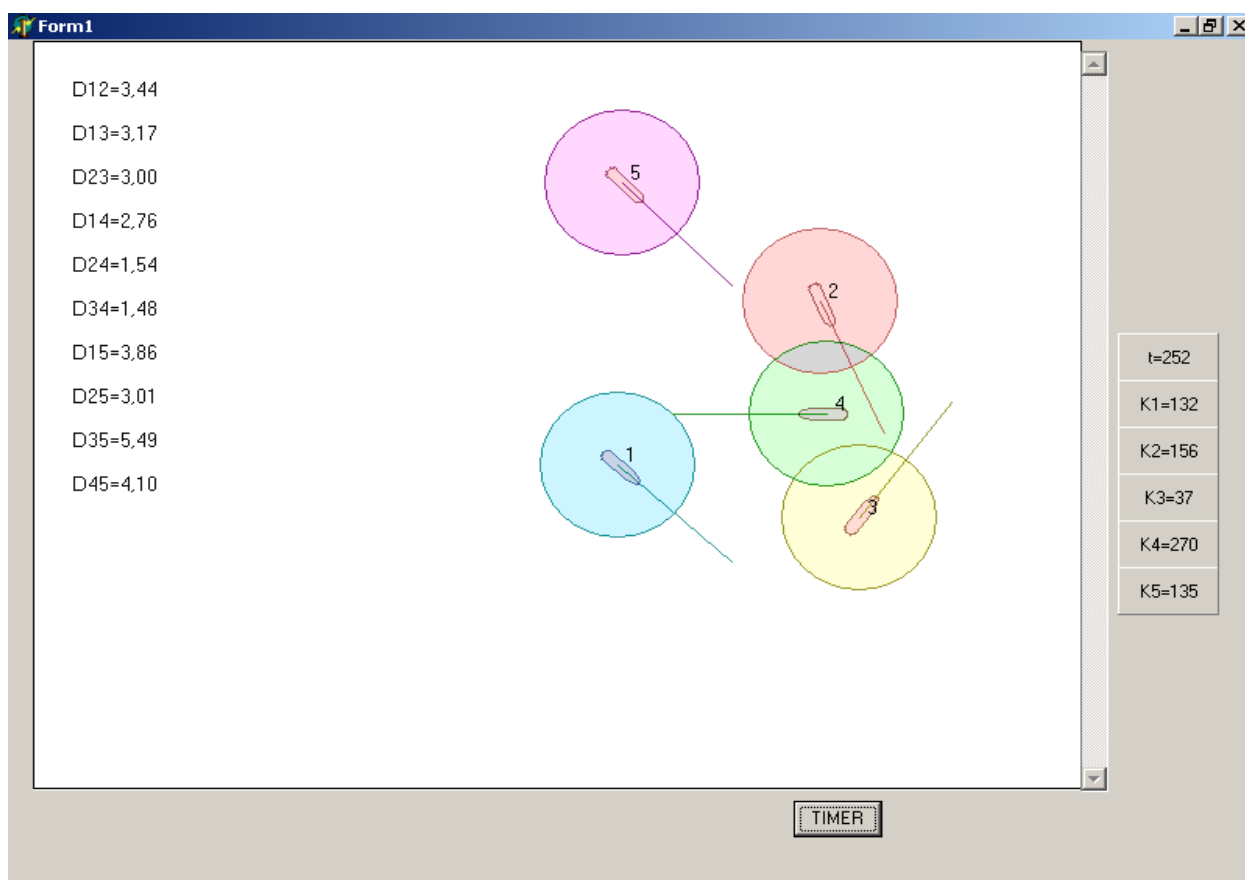


Рисунок 5.41. Ситуация кратчайшего сближения третьего и четвертого судов

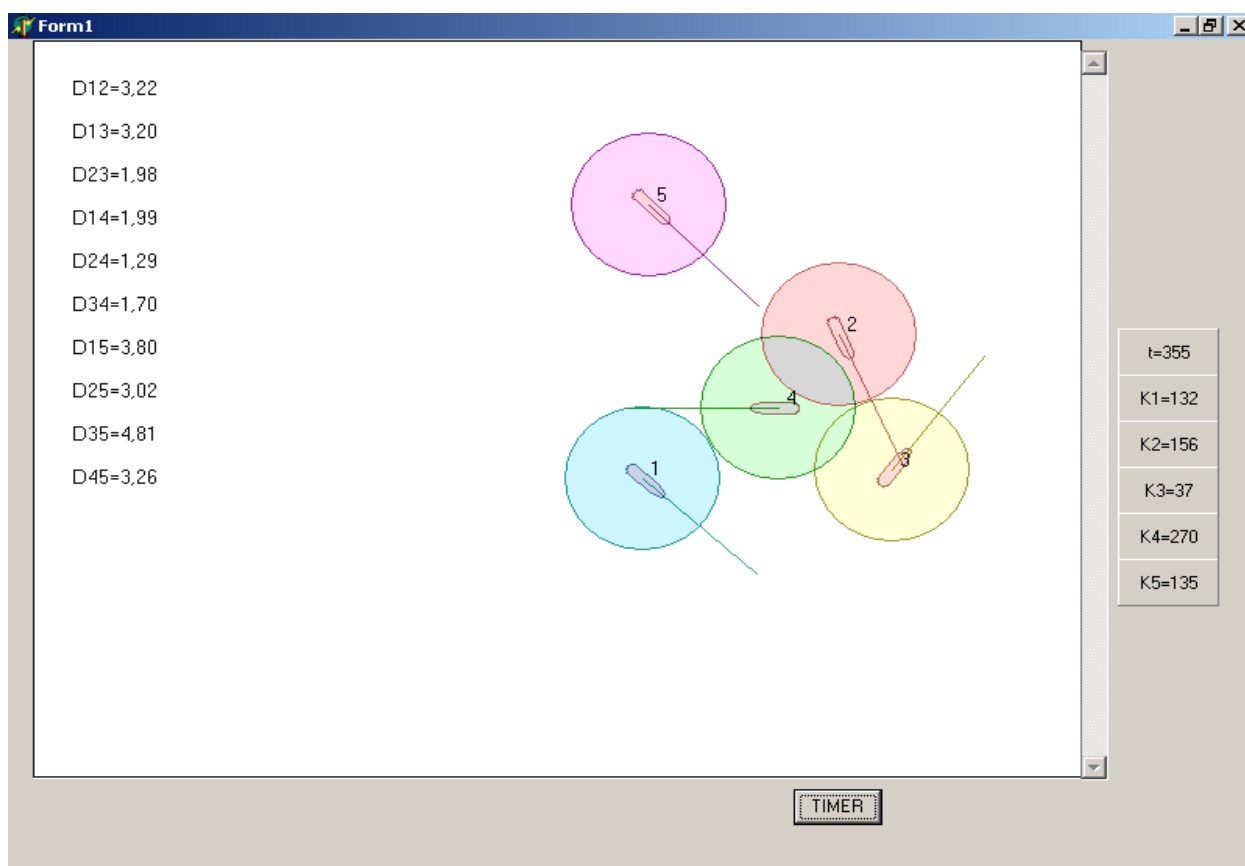


Рисунок 5.42. Ситуация кратчайшего сближения второго и четвертого судов

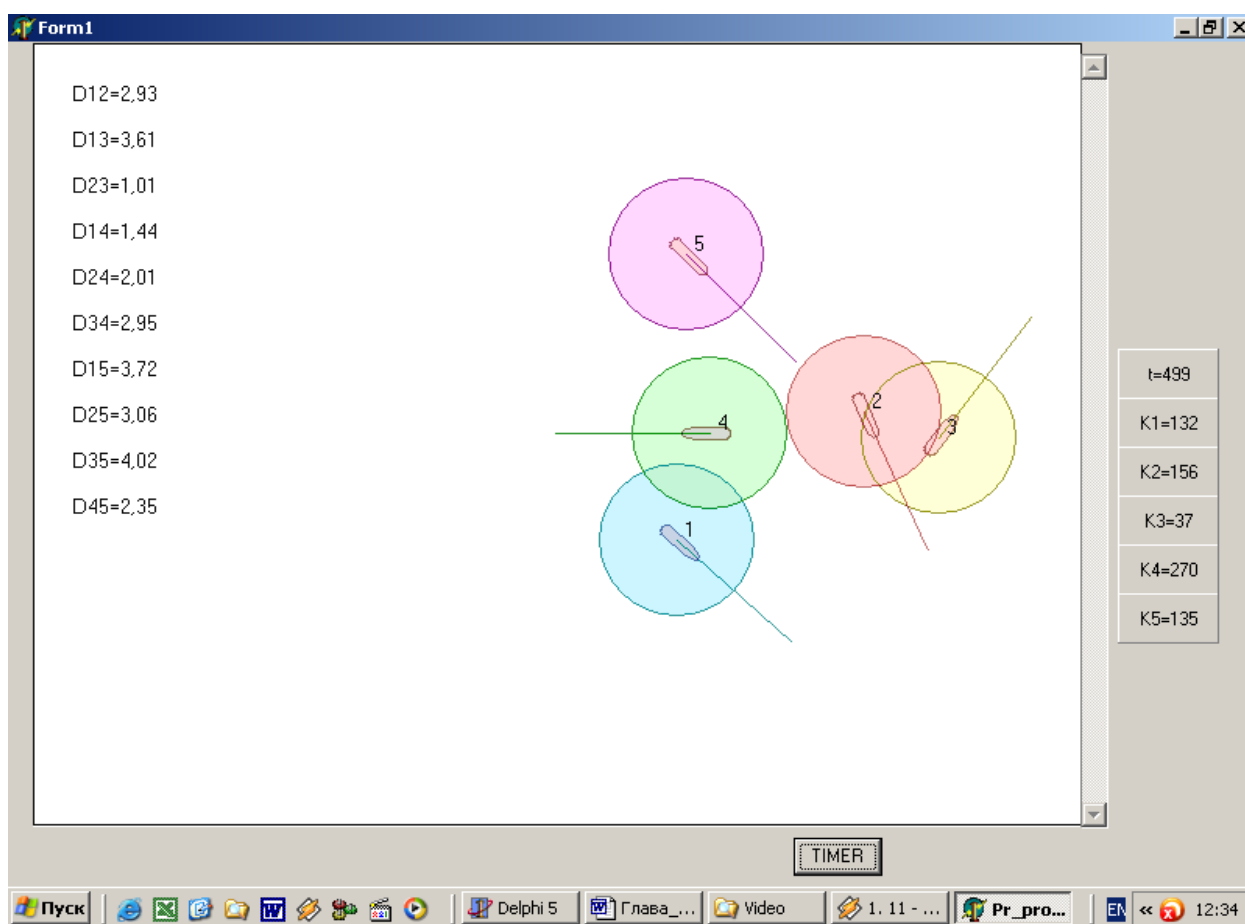


Рисунок 5.43. Ситуация кратчайшего сближения первого и четвертого судов

Кратчайшее сближение второго и третьего судов происходит на 522с времени, причем суда сближаются на 1,00 мили, как показано на рисунке 5.44.

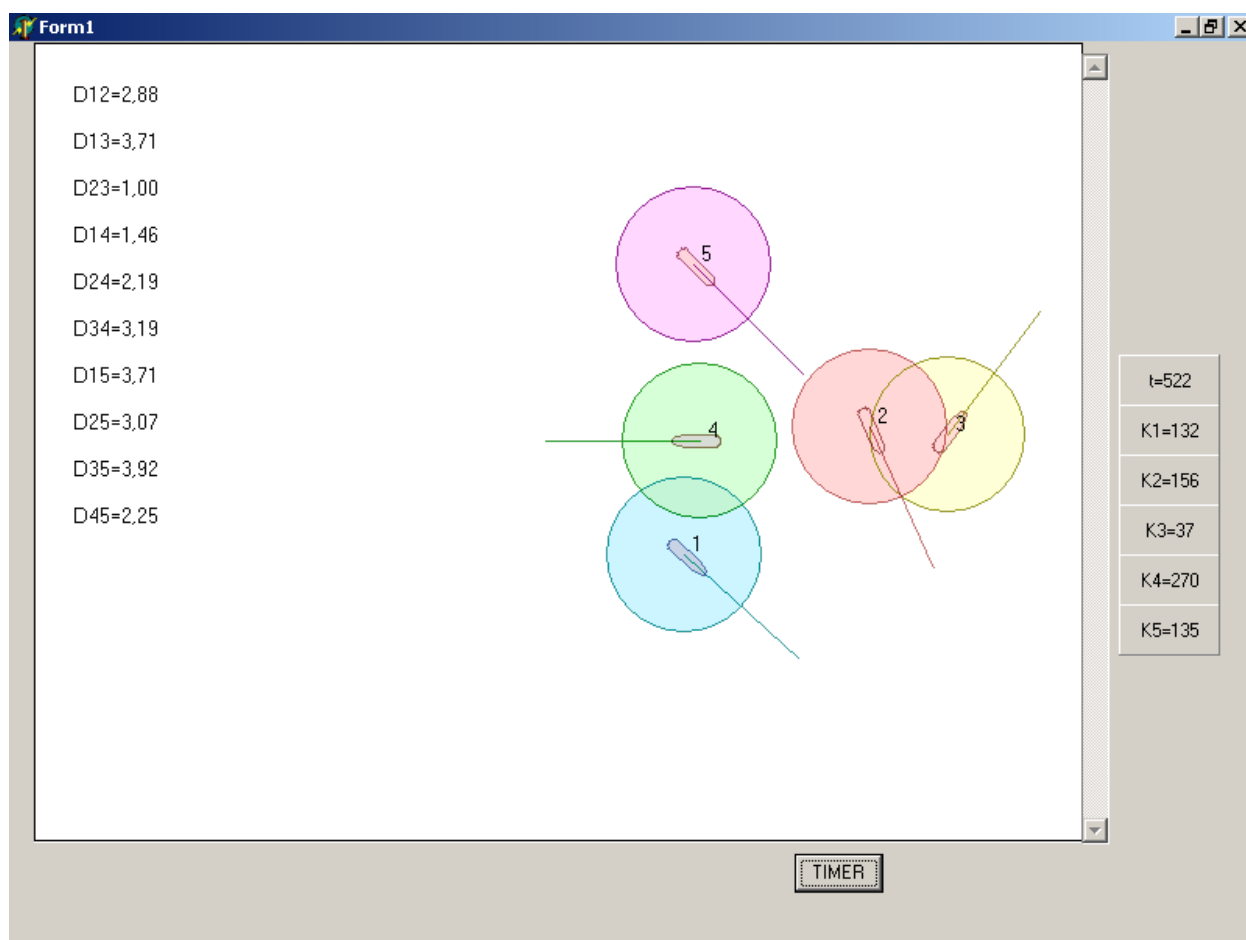


Рисунок 5.44. Ситуация кратчайшего сближения второго и третьего судов

Таким образом, изменением курсов трех судов происходит обращение матрицы ситуационного возмущения группы пяти сближающихся судов в нулевую матрицу.

5.3. Выводы по пятой главе.

В данной пятой главе рассмотрен выбор оптимального вектора управления способом компьютерного сканирования опасных областей парных маневров судов на примере опасного сближения группы четырех судов в ситуации существования ситуационного возмущения всех пар судов.

Приведены результаты программного расчета параметров оптимального маневра расхождения способом компьютерного сканирования для ситуаций сближения двух и трех судов. Рассмотрены варианты расчета маневра расхождения изменения курсов одного или нескольких судов.

Рассмотрена реализация графического способа определения оптимального маневра расхождения группы судов с помощью компьютерного моделирования. Произведено описание программы реализации указанного способа и рассмотрена процедура выбора безопасных маневров расхождения для различных ситуаций сближения группы судов, начиная от двух до четырех судов.

ВЫВОДЫ

1. Оценка состояния вопроса. Одной из важнейших является проблема обеспечение безопасности судовождения, - от ее успешного решения зависит уменьшение количества аварийных случаев и, как следствие, снижение вреда человеческой жизни, окружающей среде, имуществу и производственным процессам.

Интенсивное судоходство и навигационные опасности осложняют плавание морских судов в стесненных условиях и создают предпосылки для возникновения аварийных ситуаций. Стесненные воды являются сложнейшими по своим условиям районами плавания, в которых происходит свыше 80 % всех навигационных аварий, что свидетельствует не только о большой сложности условий плавания, но и о несовершенстве методов судовождения в таких районах, делая определяющими в обеспечении безопасности судовождения личные и профессиональные качества судоводителей.

В настоящее время стесненные районы плавания с особенно интенсивным движением оборудуются станциями управления движением судов (СУДС), которые предназначены для контроля процесса судовождения и управления движением опасно сближающихся судов. Поэтому разработка способов управления опасно сближающимися судами, чему посвящена данная работа, является актуальным и перспективным научным направлением.

2. Формулировка решенной научной задачи, ее значение для науки и практики. В результате решения главной научной задачи получен новый метод выбора безопасной стратегии расхождения группы судов в стесненных районах, который отличается принципом внешнего управления при использовании областей опасных курсов судов.

При решении главной задачи, в работе получены решения трех составных задач в виде научных результатов, содержащих научную новизну:

- впервые разработан способ аналитического описания области опасных курсов пары судов и отображение ее на расширенной плоскости их курсов;
- впервые создан графический способ компьютерного моделирования для выбора оптимального маневра расхождения группы судов изменением их курсов;
- получили дальнейшее развитие методы предупреждения столкновения судов разработкой способа сканирования плоскостей с областями опасных курсов для выбора маневра расхождения.

Практическая значимость работы определяется тем, что ее основные результаты могут быть использованы судоводителями в ситуациях сближения нескольких судов, разработчиками в новых поколениях САРП, имеющих функции системы поддержки решений при расхождении, алгоритмы исследования могут быть применены при создании современных морских тренажеров, а также в СУДС для управления опасно сближающимися судами

3. Выводы и рекомендации относительно научного и практического использования полученных результатов. Основные теоретические и практические результаты, полученные в диссертации, могут быть использованы при эксплуатации судов, а также в процессе обучения и повышения квалификации судоводителей.

4. Качественные и количественные показатели полученных результатов. Качественным показателем результатов диссертационной работы является возможность предупреждения столкновений судов в стесненных условиях при их сближении путем использования областей

опасных курсов. Как показало имитационное моделирование, предложенный метод имеет высокую эффективность.

5. Обоснование достоверности полученных результатов.

Имитационное моделирование, выполненное с помощью разработанных компьютерных программ и корректное применение математических моделей подтверждают достоверность результатов работы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сизов В.Г. Теория корабля / Сизов В.Г. – Одесса: Феникс, 2003. – 282 с.
2. Першиц Р.Я. Управляемость и управление судном / Першиц Р.Я. - Л.: Судостроение, 1983.- 272 с.
3. Воробьев Ю.Л. Гидродинамика судна в стесненном фарватере/ Воробьев Ю.Л. – С.Петербург: Судостроение, 1992. – 224 с.
4. Воробьев Ю.Л. Экспериментальное определение безопасных расстояний при расхождении судов / Воробьев Ю.Л., Кириллов В.Н. // Теория корабля и гидромеханика: Сб. научн. тр./ НКИ Николаев. – 1973. - № 74. - С. 61-65.
5. Демин С.И. Торможение судна / Демин С.И.– М.: Транспорт, 1975.– 81с.
6. Демин С.И. Аналитический метод определения элементов торможения судов / Демин С.И. // Экспресс-информация ЦБНТИ ММФ, серия «Судовождение и связь».– 1980. – № 3 (128). – С. 21-33.
7. Демин С.И. Приближенное аналитическое определение элементов циркуляции судов / Демин С.И. // Экспресс-информация ЦБНТИ ММФ, серия «Судовождение и связь».– 1983. – № 7 (628). – С. 14-19.
8. Демин С. И. Вопросы управления морскими судами / Демин С. И. – М.: Рекламинформбюро ММФ, 1975. – 75 с.
9. Кондрашихин В.Т. Справочник судоводителя по навигационной безопасности мореплавания / Кондрашихин В.Т., Бердинских Б.В., Мальцев А.С., Козырь Л.А. – Одесса: Маяк, 1990. – 168 с.
10. Вагущенко Л.Л. Системы автоматического управления движением судна/ Вагущенко Л.Л., Цымбал Н.Н. - Одесса: Латстар, 2002. - 310 с.
11. Мальцев А. С. Маневрирование судов при расхождении / Мальцев А.С. – Одесса: Морской тренажерный центр, 2002. – 208 с.
12. Цымбал Н.Н. Гибкие стратегии расхождения судов / Цымбал Н.Н., Бурмака И.А., Тюпиков Е.Е. – Одесса: КП ОГТ, 2007. – 424 с.

13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. Куликов А. М. Оптимальное управление расхождением судов / Куликов А. М., Поддубный В. В. // Судостроение. – 1984. - № 12. - С. 22-24.
17. Поддубный В. В. Метод возможных направлений в задачах безопасного расхождения судов. / Поддубный В. В., Куликов А. А. /ВИНИТИ. – М, 1987. – 21 с. – Рус. Деп. // Анот. в ж. «Водный транспорт», №2, 1987.
18. Фрейдзон И. Р. Моделирование корабельных систем управления / Фрейдзон И. Р. – Л.: Судостроение, 1975. - 232 с.
19. Кудряшов В. Е. Математическая модель процесса расхождения нескольких управляемых объектов / Кудряшов В. Е. // Известия ЛЭТИ. - 1976. - № 206. - С. 15-19.
20. Кудряшов В. Е. Синтез алгоритмов безопасного управления судном при расхождении с несколькими объектами / Кудряшов В. Е. // Судостроение. – 1978.- №5. – С. 35-40.
21. Кудряшов В. Е. Разработка и исследование алгоритма управления движением судов для предотвращения столкновений в процессе расхождения с несколькими опасными объектами. / Кудряшов В. Е. Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.22.16 /Лен. гос. мор. акад. – Л., 1976. –23 с.
22. Каплин С.И. О предупреждении столкновения судов / Каплин С.И., Леонтьев В.В. // Известия ЛЭТИ. – 1977. - № 215. – С. 45-49.

23. Иванов В. А. К вопросу построения систем предупреждения столкновений судов в море / Иванов В. А. // Известия ЛЭТИ. – 1975. - № 166. - С. 26-29.
24. Lisovski I. A Differential Game Model of Ship Control Process/ Lisovski I. //Link. Sei. and Appl. Automat. Contr. – Helsinky. – 1978, - Vol.2.- P.1557-1603.
25. Павлов В.В. Начала теории эргатических систем/ Павлов В.В. - Киев: Наукова думка, 1975. - 240 с.
26. Павлов В.В. Инвариантность и автономность нелинейных систем управления/ Павлов В.В. - Киев: Наукова думка, 1971. - 272 с.
27. 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.
28. 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.
29. Положенцев И.А. Двухступенчатая система предотвращения столкновения судов/ Положенцев И.А. // Автоматика. – 1981. - № 3. - С. 73-76.
30. Положенцев И.А. Эргатическая дифференциально-игровая система предупреждения столкновения судов/ Положенцев И.А. // Кибернетика и вычислительная техника. - 1980. - № 50. - С. 38-41.
31. 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.
32. 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.

33. Богачук Ю.П. Эргатическая система управления групповым движением судов/ Богачук Ю.П., Положенцев И.А. // Кибернетика и вычислительная техника. - 1984. - № 61. - С. 20-23.
34. Шепетуха Ю.М. Некоторые вопросы постановки задачи синтеза систем управления движением судна в условиях конфликта/ Шепетуха Ю.М. // Кибернетика и вычислительная техника. - 1984. - № 61. - С. 44-48.
35. Шепетуха Ю. М. К вопросу синтеза эргатической системы принятия решений о маневре безопасного расхождения судов / Шепетуха Ю. М. // Кибернетика и вычислительная техника. - 1989. - № 84. - С. 43-45.
36. Шепетуха Ю. М. Применение комбинированного маневра в эргатических системах разрешения навигационного конфликта / Шепетуха Ю. М. // Кибернетика и вычислительная техника. - 1985. - №68. - С. 45-48.
37. 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.
38. Вычислительная система «Антикон» для предотвращения столкновений судов. А. с. 1136I78. СССР. Ин-т кибернетики им. В. М. Глушкова. - 1985.
39. Павлов В.В. Экспериментальное исследование модели эргатической системы предотвращения столкновений судов / Павлов В.В., Шепетуха Ю. М.: Препр. /АН Украины. Ин-т кибернетики; № 52. – К.: 1985. - 24 с.
40. Вагущенко Л.Л. Расхождение с судами смещением на параллельную линию пути / Л.Л. Вагущенко. – Одесса: Фенікс, 2013. – 180 с.
41. Цымбал Н.Н. Основные направления обеспечения безаварийного плавания судов / Цымбал Н.Н. // Материалы международной научной конференции «Интеллектуальные системы принятия решений и прикладные аспекты информационных технологий (ISDMIT' 2006)». – Том 3. – Евпатория. –2006. - С. 49-52.
42. Степаненко В. В. Эффективность оценки параметров ситуации опас-

ного сближения судов / Степаненко В. В. // Судовождение. - 2000. - № 2. - С. 201 – 209.

43. Степаненко В. В. Формализация контроля текущей ситуации и принятия решений по управлению ею / Степаненко В. В. // Судовождение. - 2001. - № 3. - С. 177– 185.

44. Степаненко В.В. К вопросу отображения ситуации расхождения судов / Степаненко В.В. // Судовождение. - № 4. - 2002. – С. 101 – 106.

45. Степаненко В.В. Усовершенствование методов оценки ситуации расхождения судов: автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.22.16 «Судовождение»/ Степаненко В.В. – Одесса, 2004. – 24 с.

46. Сафин И.В. Анализ результатов имитационного моделирования процесса расхождения судов / Сафин И.В. // Судовождение. - №6 - 2003. – С. 122-129.

47. Сафин И. В. Условия существования безопасных маневров расхождения / Сафин И. В. // Судовождение. - 2001. - № 3. - С. 158 – 163.

48. Сафин И.В. Выбор оптимального маневра расхождения / Сафин И.В. // Автоматизация судовых технических средств. - №7. - 2002. - С. 115-120.

49. Сафин И.В. Расчет граничных значений параметров множества допустимых маневров расхождения / Сафин И.В. // Судовождение. - №4. - 2002. – С. 95 – 100.

50. 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.

51. Цымбал Н.Н. Метод формирования множества безопасных маневров расхождения судов / Цымбал Н.Н. // Тезисы докладов на III международной научно-технической конференции «Живучесть корабля и безопасность на море». – Севастополь. – 2005. - С. 91-94.

52. Цымбал Н.Н. Учет ограничений МППСС-72 при выборе маневра расхождения судов / Цымбал Н.Н., Бужбецкий Р.Ю. // Судовождение. – 2006. - № 11. – С.134 – 138.

53. Петриченко Е.А. Вывод условия существования множества допустимых маневров расхождения с учетом навигационных опасностей / Петриченко Е.А. // Судовождение. – 2003. – №6. – С. 103-107.
54. Петриченко Е.А. Учет линейной навигационной опасности при расхождении судов / Петриченко Е.А. // Автоматизация судовых технических средств. – 2003. – №8. – С. 72-76.
55. Петриченко Е.А. Описание навигационных опасностей в задаче расхождения судов / Петриченко Е.А. // Судовождение. - 2002. - №5. – С. 89-95.
56. Мальцев А. С. Учет маневренных характеристик для обеспечения безопасности плавания / Мальцев А. С. // Судостроение и ремонт. - 1989. - №5. – С. 29-31.
57. Мальцев А. С. Инверсный метод планирования траектории движения объектов управления /Мальцев А. С. //Судовождение: Сб. научн. трудов /ОНМА, вып. 13 – Одесса: «ИздатИнформ», 2007.- с. 124-130.
58. Сазонов А. Е. Автоматизация судовождения / Сазонов А. Е., Родионов А. А. - М.: Транспорт, 1977. 208 с.
59. Цымбал Н.Н.. Значение прогноза развития ситуации в задаче безопасного расхождения судов / Н.Н. Цымбал. // Судовождение. - 2001. –№ 3.- С. 193 – 197.
60. Бинай Кумар Синх. Выбор предельно-допустимой дистанции кратчайшего сближения / Бинай Кумар Синх // Судовождение. - 2001. - № 3. - С. 38 – 42.
61. Бинай Кумар Синх. Системная модель процесса судовождения / Бинай Кумар Синх // Судовождение. - 2000. - №1. - С. 105 – 118.
62. Бинай Кумар Синх. Области взаимных обязанностей судов / Бинай Кумар Синх // Судовож дение. - 2000. - № 2. - С. 121 – 125.
63. Бурмака И.А. Учет динамики судна при выборе маневра расхождения / Бурмака И.А. // Судовождение. – 2002. - №4. – С. 32- 36.

64. Бурмака И.А. Учет инерционности судна при расчете момента времени завершения маневра расхождения / Бурмака И.А. // Судовождение. - № 5. - 2002. – С. 13 – 21.
65. Бурмака И.А. Применение численных методов для расчета времени начала уклонения судна при расхождении / Бурмака И.А. // Судовождение. - 2003. - № 6. – С. 27-31.
66. Бурмака И.А. Расчет длительности поворота судна при расхождении / Бурмака И.А. // Автоматизация судовых технических средств. - 2002. - №7. - С. 3- 6.
67. Бурмака И.А. Расчет характеристик поворотливости судна по экспериментальным данным / Бурмака И.А. // Судовождение. - 2005. - № 9. - С. 7-13.
68. Бурмака И.А. Результаты имитационного моделирования процесса расхождения судов с учетом их динамики / Бурмака И.А. // Судовождение. – 2005. - №10. – С. 21 – 25.
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. Мальцев А.С. Выбор оптимального курса для расхождения судов при криволинейном движении / Мальцев А.С., Май Ба Линь // Судовождение. – №7. – 2004. – С. 47-57.
71. Kimura Masafumi. Nihon kokai gakkai ronbunshu / Kimura Masafumi, Suzuki Saburo // J. Jap. Inst. Navig. 2005. 112, p. 43-48.
72. Букатый В. М. Определение ситуации сближения судов, подпадающей под правило 14 МППСС-72 / Букатый В. М., Морозова С. Ю. // Управление безопасностью мореплавания и подготовка морских специалистов SSN/2007: Материалы 6 Международной конференции, Калининград, 9-11 окт., 2007. Калининград: БГАРФ. 2007, с. 43-52.
73. Северин В.В. Постановка задачи расхождения судна с несколькими целями / Северин В.В. // Судовождение. – 2003. – № 6. – С. 130-135.

74. Северин В.В. Выбор маневра расхождения с двумя целями / Северин В.В. // Автоматизация судовых технических средств.- 2005. - № 9. – С. 91 – 95.
75. Kao Sheng-Long. A fuzzy logic method for collision avoidance in vessel traffic service / Kao Sheng-Long, Lee Kuo-Tien, Chang Ki-Yin, Ko Min-Der// J. Navig. 2007. 60, № 1, p. 17-31.
76. Цымбал Н.Н. Перспективы использования современных технических средств для управления судами в стесненных условиях плавания / Цымбал Н.Н.// V Международная научно-техническая конференция «Гиротехнологии, навигация и управление движением». – Сборник докладов. – Киев. – 2005. – С. 301-304.
77. Liu Yu-hong. Zhongguo hanghai/. Liu Yu-hong //Navig. China. - 2004, № 4, p. 32-37.
78. Zhao Yuan-jin. Dalian haishi daxue xuebao /Zhao Yuan-jin, Sun Wen-qiang // J. Dalian Marit. Univ. 2006. 32, № 2, p. 27— 30.
79. Цымбал Н.Н. Перспективные системы предупреждения столкновений судов и принципы их разработки /Цымбал Н.Н.// Материалы I международной научно-практической конференции «Науковий потенціал світу 2004». – том 60. – Днепропетровск. – Наука і освіта, 2004. - С. 44-45.
80. Букатый В. М. Критерии нетрадиционного подхода к выяснению ситуации сближения судов /Букатый В. М., Морозова С. Ю. // Управление безопасностью мореплавания и подготовка морских специалистов SSN/2007: Материалы 6 Международной конференции, Калининград, 9-11 окт., 2007. Калининград: БГАРФ 2007, с. 33-43.
81. 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.
82. 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.

83. 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.
84. Wang Dangli. Wuhan ligong daxue xuebao. Jiaotong kexue yu qongcheng ban/ Wang Dangli, Huang Liwen // *J. Wuhan Univ. Technol. Transp. Sci. and Eng.* 2006 30, № 1, p. 136-139.
85. Lisowski J. Mathematical modeling of a safe ship optimal control process/ Lisowski J. // *Polish Journal of Environmental Studies*. – 2005. - Vol. 14. – P. 68-75.
86. L. Yongqing. Wuhan ligong daxue xuebao. Jiaotong kexue yu gongcheng ban/ L. Yongqing // *J. Wuhan Univ. Technol. Transp. Sci. and Eng.* 2004. 28, №5, p. 752-754.
87. Ma Li-xin. Dalian haishi daxue xuebao/ Ma Li-xin, Sun Wen-qiang // *I. Dalian Marit. Univ.* 2006. 32, № 3, p. 123-125.
88. Hung Iran Viet. Nihon kokai gakkai ronbunshu / Hung Iran Viet, Hagiwara Hideki, Tamaru Hitoi. // *J. Jap. Inst. Navig.* 2007. 117, c 35—42.
89. Statheros Thomas. Autonomous ship collision avoidance navigation concepts, technologies and techniques / Statheros Thomas, Howells Gareth, McDonald-Maier Klaus. // *J. Navig.* 2008. 61, № 1, p. 129-142.
90. Tsuji Keisuke. Nihon kokai gakkai ronbunshu / Tsuji Keisuke, Ito Takayuki. // *J. Jap. Inst. Navig.* 2007. 117, p. 67-73.
91. Takahashi Hiroko. Nihon kokax gakkai ronbunshu/ Takahashi Hiroko, Inoue Kinzo, Sera Wataru. // *J. Jap. Inst. Navig.* 2008. 118, p. 23-29.
92. Liu Yu-hong. Zhongguo hanghai/ Liu Yu-hong, Hu Shen-ping // *Navig. China.* 2005, №4, p. 40-45.
93. Yang Shen-hua. Zhongguo hanghai / Yang Shen-hua, Li Li-na, Suo Yong-feng // *Navig. China.* 2007, № 3, p. 29-32.
94. 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.

95. Inaishi Masaaki. Nihon kokai gakkai ronbunshu / Inaishi Masaaki, Kondo Hayato, Kondo Masaki, Kawaguchi Akira // Jap. Inst. Navig. 2005. 113, с 17-23.
96. Букатый В. М. Минимальная дистанция начала маневра на расхождение при применении правила 14 МППСС/ Букатый В. М. // Управление безопасностью мореплавания и подготовка морских специалистов SSN/2007: Материалы 6 Международной конференции, Калининград, 9-11 окт., 2007. Калининград: БГАРФ. 2007, с. 27-32.
97. Бурмака И.А. Определение параметров динамической модели поворотливости судна по натурным наблюдениям / Бурмака И.А., Бурмака А.И. // Судовождение: Сб. научн. трудов./ ОНМА, Вып. 19. – Одесса: Феникс, 2011 - С.
98. Бурмака А.И. Разработка стратегии расхождения судов в ситуации чрезмерного сближения / Бурмака А.И. // Судовождение: Сб. научн. трудов./ ОНМА, Вып. 20. – Одесса: «ИздатИнформ», 2012 – С.
99. Бурмака А.И. Учет угловой скорости судна при расчете параметров маневра расхождения в ситуации чрезмерного сближения/ Бурмака А.И. // Судовождение: Сб. научн. трудов./ ОНМА, Вып. 21. – Одесса: «ИздатИнформ», 2012 - С.
100. Алексишин В.Г. Формирование судовой безопасной зоны с учетом поворотливости судна / Алексишин В.Г., Алексишин А.В. // Судовождение. – 2007. - № 14. – С. 3- 8.
101. Алексишин А.В. Плавание в стесненных водах с учетом судовой безопасной зоны / Алексишин А.В. // Судовождение. – 2007. - № 13.– С. 3 – 8.
102. Волков А.Н. Отображение зоны безопасности судна на электронной карте // Судовождение: Сб. научн. трудов./ ОНМА, Вып. 23. – Одесса: «ИздатИнформ», 2013, – С 40 - 45.
103. Волков А.Н. Формирование безопасной области в судовых системах навигационной информации / Волков А.Н. // Проблеми техніки: Науково-виробничий журнал. - 2013. № 4. – С 52 - 56.

104. Бурмака И.А. Экстренная стратегия расхождения при чрезмерном сближении судов / Бурмака И.А., Бурмака А. И., Бужбецкий Р.Ю. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 202 с.
105. 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.
106. VTS-Lieferung nach China. //Schiff und Hafen: Seewirt., Kommandobrücke. - 2000. – 52.- № 9. – Р. 6.
107. Foxwell David. VTS takes on new roles in ports of world / Foxwell David. // Ports-strategy. – 2004. - Apr. – Р. 40-42.
108. Шахнов С. Ф. Высокоточная проводка судов с использованием подводного кабеля / Шахнов С. Ф. // Управление и информационные технологии на транспорте: Тезисы докладов международной научно-технической конференции "Транском - 99", Санкт-Петербург. 1999. - СПб: Изд-во СПбГУВК. – 1999.- С. 111-113.
109. Ince A.N. Modelling and simulation for safe and efficient navigation in narrow waterways / Ince A.N., Topuz E.J. // Navig.- 2004.- 57, № 1. – Р. 53-71.
110. Vessel Traffic System erhöht Schiffssicherheit // Schiff und Hafen: Seewirt., Kommandobrücke.- 1995.-47, №11. - Р. 99-100.
111. Лукомский Ю. А. Общие закономерности и специфические особенности в математических моделях морских подвижных объектов/ Лукомский Ю. А., Стариченков А. Л. // Гирокоспия и навигация. - 1997. - № 2. - С. 44-52.
112. Дмитриев С.П. Обоснование возможности использования линейно-квадратичного подхода при стабилизации судна на траектории/Дмитриев С.П., Пелевин А.Е. // Гирокоспия и навигация. - 1997. - № 4. - С. 65-82.
113. Саленек В. В. К определению связи между углом дрейфа и безразмерной угловой скоростью на установившейся циркуляции/

- Саленек В. В.// Новосиб. гос. акад. вод. трансп. Судовожд.: управляемость, упр., навигация. обуч. - Новосибирск. - 1999, с. 17-18.
114. Inaishi Masaaki. Nihon kokai gakkai ronbunshu/ Inaishi Masaaki, Kawaguchi Akira //J. Jap. Inst. Navig. - 2003. – 109. – P. 89-96.
115. Гуцма С.Ф. Моделирование движения судов в узкостях и при швартовках/ Гуцма С.Ф. // Сб. науч. тр. Балт. гос. акад. рыбопромысл. флота.- 1997.- № 16. - С. 85-91.
116. Чапчай Е.П. Экспериментальное исследование моделей поворотливости судна / Чапчай Е.П. // Судовождение. – 2006. - № 11. – С. 139 – 142.
117. Чапчай Е.П. Учет времени перекладки пера руля при повороте судна/ Чапчай Е.П. // Судовождение. – 2005. - № 9. – С. 110 – 113.
118. Вагущенко Л.Л. Судовые навигационно-информационные системы/ Вагущенко Л.Л. - Одесса: Феникс, 2004. - 302 с.
119. Вагущенко Л.Л. Бортовые автоматизированные системы контроля мореходности / Вагущенко Л.Л., Вагущенко А.Л., Заичко С.И - Одесса: Феникс, 2005. - 274 с.
120. Ростопшин Д. Я. О проблемах использования данных автоматической идентификационной системы в задачах управления движением судов / Ростопшин Д. Я., Антонова Д. А. // Мехатрон.- 2007, № 9, прил., с. 9-14.
121. Стпепахно Р. Г. Разработка способов идентификации математической модели судна с целью решения прикладных задач судовождения: автореф. дис. на со-иск. уч. степ. канд. техн. наук/ Стпепахно Р. Г. - Мурманск, 2005, 22 с.
122. Paulauskas V. External forces influence on ships steering in extreme conditions /Paulauskas V., Paulauskas D., Steenberg C. M. Transport Means 2006: Proceedings of the 10 International Conference, Kaunas, Oct. 19-20, 2006. Kaunas: Technologija. 2006, p. 158-160.
123. Грауэр Л. В. Синтез закона управления морским подвижным объектом для решения задачи динамического позиционирования / Грауэр Л. В., Лопарев А. В. Навигация и управление движением: Материалы 8-й

- Конференции молодых ученых: 1 этап, Санкт-Петербург, 11-16 марта, 2006; 2 этап, Санкт-Петербург (в Интернете), 1 июня-31 окт., 2006; 3 этап, Санкт-Петербург, 25-29 сент., 2006. СПб: ЦНИИ "Электроприбор". 2007, с. 137-143.
124. Laeki Toshio. Ninon kokai dakkar ronbunshu// Jap. Inst. Navig. 2005. 112, p. 301-306.
125. Шпекторов А. Г. Организация двухуровневой системы управления движением скоростного судна./ Шпекторов А. Г., Тхань, Тунг Ле.: Навигация и управление движением: Материалы 8 Конференции молодых ученых: 1 этап, Санкт-Петербург, 11-16 марта, 2006; 2 этап, Санкт-Петербург (в Интернете), 1 июня-31 окт., 2006; 3 этап, Санкт-Петербург, 25-29 сент., 2006 СПб: ЦНИИ "Электроприбор". 2007, с. 125-130.
126. Юдин Ю. И Маневренные характеристики судна как функции параметров его математической модели / Юдин Ю. И., Позняков С. И.// Вестн. МГТУ (Мурманск). 2006. 9, № 2, с. 234-240.
127. Глушков С. В. Использование нечеткой логики в системе автоматического управления курсом судна / Глушков С. В. // Приборы и системы: Упр., контроль, диагност. 2007, № 8, с. 28-32.
128. Попов А. В. О повышении управляемости судна при ветре посредством ввода интеллектуальной составляющей в алгоритм авторулевого/ Попов А. В. // Вести. ВГАВТ. 2005, № 14, с. 27-35.
129. Богданов В. П. Синергетика и нейросетевые системы управления курсом судна / Богданов В. П., Виткалов Я. Л., Глушков С. В., Потапов А. С. и др. - Питер. - 2006, 205 с.
130. Лентарёв А. А. Статистическое моделирование движения судов по фарватеру /Лентарёв А. А., У Льюков А. Ю. //Вестн. Мор. гос. ун-та. 2005, № 9, с. 78-83.
131. Оськин Д. А. Система управления морским судном с использованием нейросетевой идентификационной модели / Оськин Д. А. // Вестн. Мор. гос. ун-та. 2008, № 27, с. 3-12.

132. Козлов А. В. Интегрированные системы управления движением судна/ Козлов А. В., Туркин И. И.// Мор. биржа. 2006, № 3, с. 46-49.
133. Кондрашихин В.Т. О погрешностях измерений/ Кондрашихин В.Т. // Геодезия и картография.– 1977. – № 5. – С. 11-16.
134. Кондрашихин В.Т. Определение наиболее вероятного значения повторяющейся ошибки / Кондрашихин В.Т., Якшевич Е.В. // Судовождение и связь: Тр. ЦНИИМФ. – 1972. – Вып. 157. – С. 42-49.
135. Кондрашихин В.Т. Зависимость между точностью и надежностью навигации / Кондрашихин В.Т. // Судовождение и связь: Тр. ЦНИИМФ. – 1973. – Вып. 173. – С. 41-49.
136. Bober R. The DGPS system improve safety of navigation within the port of Szczecin / Bober R., Grodzicki P., Kozlowski Z., Wolski A. // 12 Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, St. Petersburg, 23-25 May, 2005. St. Petersburg: Elektropribor. 2005, с. 192-194.
137. Ткаченко А.С. Применение обобщенных пуассоновских распределений для описания навигационных погрешностей / Ткаченко А.С., Алексишин В.Г. // Судовождение. – 2008. - № 15. – С. 93 – 99.
138. Комаровский Ю. А. Проблемы оценки точности определения места судна приёмниками СРНС Навстар GPS / Комаровский Ю. А. // Науч. пробл. трансп. Сиб. и Дал. Вост. 2006, № 2, с. 100-107.
139. Иванов Б. Е. О влиянии неопределенности положения кромок фарватера на вероятность навигационной безопасности плавания / Иванов Б. Е., Батуев А. Н. // Навигация и гидрогр. 2004, № 19, с. 35-40.
140. Кондрашихин В.Т. Определение места судна / Кондрашихин В.Т. - М.: Транспорт, 1989. - 230с.
141. Monteiro Luis. What is the accuracy of DGPS? / Sardinia Monteiro Luis, Moore Terry, Hill Chris. // J. Navig. 2005. 58, № 2, p. 207-225.

142. Мельник Е.Ф. Обоснование выбора критерия навигационной безопасности судовождения / Мельник Е.Ф. // Судовождение. - 2002. – № 5. – С. 65 – 73.
143. Цымбал Н.Н. Определение группы взаимодействующих судов в ситуации опасного сближения/ Цымбал Н.Н., Булгаков М.А., Байрак В.В. // Судовождение. – 2009. - № 16. – С. 193-197.
144. Булгаков А.Ю. Расчет изменения относительного курса в автоматизированных системах принятия решений / Булгаков А.Ю. // Проблеми техніки: Науково-виробничий журнал. - 2013. № 4 . – С 111 - 114.
145. Булгаков А.Ю. Использование опасной области курсов двух судов для выбора допустимого маневра расхождения/ Булгаков А.Ю.// Водный транспорт. – 2014. №2 (20).– С. 12 – 17.
146. Булгаков А.Ю. Маневр расхождения трех судов с изменением их курсов / Булгаков А.Ю., Алексейчук Б.М.// Проблеми техніки: Науково-виробничий журнал. - 2014. №1 . – С. 75 - 81.
147. Булгаков А.Ю. Выбор маневра расхождения судов изменением курсов в системах управления движением судов/ Булгаков А.Ю., Пятаков Э.Н.// Проблеми техніки: Науково-виробничий журнал. - 2014. №4 . – С 153 - 164.
148. Бурмака И.А. Маневр расхождения трех судов изменением курсов/ Бурмака И.А, Булгаков А.Ю. // Автоматизация судовых технических средств. – 2014. – № – С. 18 – 23.
149. Бурмака И.А. Управление группы судов в ситуации опасного сближения / Бурмака И.А, Булгаков А.Ю. // Вестник Государственного университета морского и речного флота им.адмирала С. О. Макарова. Санкт-Петербург.– 2014. – выпуск 6 (28). – С. 9 - 13.
150. Булгаков А.Ю. Формализация основных характеристик управляемой динамической системы судов/ Булгаков А.Ю. // Судовождение. – 20013. - № 23. – С. 7-12.
151. Цымбал Н.Н. Формализация множества опасно сближающихся судов / Цымбал Н.Н., Булгаков А.Ю.// Эффективная и безопасная эксплуатация

морских судов и сооружений: Материалы Региональной научно-практической конференции, 23-25 сентября 2009 г.- Севастополь: СевНТУ, 2009.- С. 20-22.

152. Булгаков А.Ю. Определение характеристик управляемой динамической системы судов/ Булгаков А.Ю.// Эффективная и безопасная эксплуатация морских судов и сооружений: Материалы VI Всеукраинской научно-технической конференции, 2-4 октября 2013 г.- Севастополь: СевНТУ, 2013.- С. 126-129.

153. Бурмака И.А. Совершенствование технологии управления движением судов в районах контроля СУДС / Бурмака И.А, Булгаков А.Ю. // Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд: Матеріали Всеукраїнської наук.-тех. конф., 21-23 травня 2014 р. – Миколаїв : МУК, 2014. – С. 40–42.

154. Бурмака И.А. Маневр расхождения нескольких судов изменением курсов / Бурмака И.А, Булгаков А.Ю. // Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд: Матеріали Всеукраїнської наук.-тех. конф., 20-22 травня 2015 р. – Миколаїв : МУК, 2015. – С. 22–24.

155. Булгаков А.Ю. Влияние изменения курсов судов на относительный курс / Булгаков А.Ю. // Судноплавство: перевезення, технічні засоби, безпека: Матеріали наук.-техн. конф., 19-20 листоп. 2013 – Одеса : ОНМА, 2013. – С. 80–82.

156. Бурмака И.А. Маневр расхождения нескольких судов изменением курсов / Бурмака И.А., Булгаков А.Ю. // Морські перевезення та інформаційні технології в судноплавстві: Матеріали наук.-техн. конф., 18-19 листоп. 2014 – Одеса : ОНМА, 2014. – С. 107–111.

157. Булгаков А.Ю. Выбор допустимого маневра расхождения двух судов с помощью использования опасной области их курсов/ Булгаков А.Ю.// Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2014):

Матеріали VI Міжнародної наук.-практ. конф., 27-29 травня. 2014 – Херсон: ХДМА, 2014. – С. 103–106.

158. Бурмака И.А. Определение оптимального вектора управления судами для безопасного расхождения/ Бурмака И.А., Булгаков А.Ю. // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2015): Матеріали Міжнародної наук.-практ. конф., 26-28 травня. 2015 – Херсон: ХДМА, 2015. – С. 96–99.

159. 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.

160. Бурмака И.А. Выбор оптимального вектора управления судами изменением курсов для безопасного расхождения / Бурмака И.А, Булгаков А.Ю. // Автоматизация судовых технических средств. – 2015. – № – С. 29 – 33.

161. Бурмака И.А. Определение области курсов двух судов, обеспечивающих безопасное расхождение/ Бурмака И.А, Булгаков А.Ю. //Эксплуатация, безопасность и экономика водного транспорта. Вестник Государственного морского университета им.адмирала Ф. Ф. Ушакова. Новороссийск.– 2014. – выпуск 2 (7). – С. 17 - 20.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Фрагмент кода программы имитационного моделирования по выбору
оптимального маневра расхождения группы судов

```
unit Project_Un;

interface

uses
  Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs,
  ExtCtrls, StdCtrls;

type
  TForm1 = class(TForm)
    Image1: TImage;
    Timer1: TTimer;
    Button2: TButton;
    Button1: TButton;
    ScrollBar1: TScrollBar;
    Button3: TButton;
    Button4: TButton;
    Button5: TButton;
    Button6: TButton;
    Panel1: TPanel;
    Panel2: TPanel;
    Panel3: TPanel;
    Panel4: TPanel;
    Panel5: TPanel;
    Panel6: TPanel;
    Panel7: TPanel;
    Panel8: TPanel;
    Panel9: TPanel;
    Panel10: TPanel;
    Panel11: TPanel;
    Panel12: TPanel;
    Panel13: TPanel;
    Panel14: TPanel;
    Panel15: TPanel;
    Panel16: TPanel;
    Panel17: TPanel;
    Panel18: TPanel;
    Panel19: TPanel;
    Panel20: TPanel;
    Panel21: TPanel;
    Panel22: TPanel;
    Panel23: TPanel;
    Button7: TButton;
    Button8: TButton;
    Button9: TButton;
    Button10: TButton;
    Button11: TButton;
```

```

Button12: TButton;
Button13: TButton;
ButtonW45: TButton;
ButtonW35: TButton;
ButtonW25: TButton;
ButtonW15: TButton;
ButtonW34: TButton;
ButtonW24: TButton;
ButtonW23: TButton;
ButtonW12: TButton;
ButtonW14: TButton;
ButtonW13: TButton;
Button24: TButton;
Button25: TButton;
Button26: TButton;
Button14: TButton;
procedure FormCreate(Sender: TObject);
procedure FormDestroy(Sender: TObject);
procedure Image1MouseMove(Sender: TObject; Shift: TShiftState; X,
    Y: Integer);
procedure ScrollBar1Scroll(Sender: TObject; ScrollCode: TScrollCode;
    var ScrollPos: Integer);
procedure Image1Click(Sender: TObject);
procedure Button2Click(Sender: TObject);
procedure Button1Click(Sender: TObject);
procedure Button3Click(Sender: TObject);
procedure Button4Click(Sender: TObject);
procedure Button5Click(Sender: TObject);
procedure Button6Click(Sender: TObject);
procedure Button8Click(Sender: TObject);
procedure Timer1Timer(Sender: TObject);
procedure Button9Click(Sender: TObject);
procedure Button10Click(Sender: TObject);
procedure Panel20Click(Sender: TObject);
procedure Panel21Click(Sender: TObject);
procedure Panel22Click(Sender: TObject);
procedure Button7Click(Sender: TObject);
procedure Button26Click(Sender: TObject);
procedure ButtonW12Click(Sender: TObject);
procedure Button25Click(Sender: TObject);
procedure Button24Click(Sender: TObject);
procedure ButtonW13Click(Sender: TObject);
procedure ButtonW23Click(Sender: TObject);
procedure ButtonW14Click(Sender: TObject);
procedure ButtonW24Click(Sender: TObject);
procedure ButtonW34Click(Sender: TObject);
procedure ButtonW15Click(Sender: TObject);
procedure ButtonW25Click(Sender: TObject);
procedure ButtonW35Click(Sender: TObject);
procedure ButtonW45Click(Sender: TObject);
procedure Button14Click(Sender: TObject);
private

```

```

    { Private declarations }
public
    { Public declarations }
end;

type
Pt = array[0..360] of TPoint;
Pt1 = array[1..720] of TPoint;

PtC = array[0..120] of TPoint;
APt = array[0..30] of TPoint;

var
Form1: TForm1;
ShowBmp,CargoBmp : TBitmap;

Lh,Bh,Hh,Lp,Bp,Hp,B1,H1,B2,H2 : word;

IndCrt,Nbt,Nbto,Nbto,OkBtn,Okbtn1,OkTimer,IndAutom,IndVrt,IndManl,
IndWht,IndVol,IndVvod,OkOkVvod,IndX,IndY,IndZ,Indn : byte;
{ IndB,IndE,IndU,IndD : byte; }
Nbrng,Nrngmax,Ay,s,NvrBtn,NbtVvod,OkOk,OkWht,OkVol,OkVvod,OkScroll : byte;
IndK,IndV,IndA,IndD,IndDm : byte;
Yc,Yc1 : word;

CargoTyp,CargoCol : array[1..190] of byte;

CargOk,HorizOk,AutomOk,Ok,StrsOk,CorrOk,ShowOk,RangOk,TwoBtOk,
OkBtt1,OkBtt2 : byte;
AutomChen,LimPl,LimW,LimV : Integer;

OkLim,IndLim,NbtLim,PrLdLim,WhtLim,VolLim,Lim1,Lim2,Lim3 : byte;
Begdop,Bd1,Bd2,Whtdop,Wd1,Wd2,Bdo1,Bdo2 : word;
Enddop,Ed1,Ed2,Edo1,Edo2,Updop,Ud1,Ud2,Udo1,Udo2: word;
ClassCargoTyp,ColTyp,TypCargo : byte;

CargoName,CargoLab1,CargoLab2,CargoLab3 : string[20];
CargoWight : LongInt;
Npr,V1,V2,V3,V4,V5,V6,Nc,dN,Mnx,Mny : word;
Xcn,Ycn,K1,K2,K21,K3,K4,K5,K6,K1n,K2n,K3n,K4n,K5n,K6n,K1sc,K2sc,K3sc
Integer;
Kot,Kot1,Kot2,Vot,Lm,alf,D,Dd,alf12,alf13,alf14,alf15,alf16,alf23,alf24,
alf25,alf26,alf34,alf35,alf36,alf45,alf46,alf56: real;
Lm1,Lm2,Lm3,Lm4 : real;
D12,D13,D14,D15,D16,D23,D24,D25,D26,D34,D35,D36,D45,D46,D56 : real;

Nves,IndOK,IndVes,IndScroll,IndAB : byte;
Re,ReV{,Coordt,CoordAt} : PtC;
Re1 : APt;
Bv,L1,L2,Lv,IndTimer,IndCol,Nb,IndS,IndAv,IndKm1,IndKm2,IndKm3,IndCh : byte;
Xt,Yt,Xvs,Yvs, X1,Y1,X2,Y2,X3,Y3,X4,Y4,X5,Y5,X6,Y6,Xn,Yn : Integer;
X1r,Y1r,X2r,Y2r,X3r,Y3r,X4r,Y4r,X5r,Y5r : real;

```

```

Dmin12,Dmin13,Dmin14,Dmin15,Dmin23,Dmin24,Dmin25,Dmin34,Dmin35,Dmin45:real;
DK1,DK2,DK3,DKm,K1m,K2m,K3m,DKs,K3l,DK1m,DK2m,DK3m,Mn1x,Mn1y      :
word;
Msx,Msy,Mslx,Msly,Xmd1,Ymd1,Vs1,Vs2,t : word;
Ks1,Ks2,Ks1n,Ks2n : word;

w12,w13,w14,w15,w16,w23,w24,w25,w26,w34,w35,w36,w45,w46,w56,IndMat : byte;
IndRep,IndCls : byte;
StV1,StV2 : string[2];

{Kn : word;}

implementation

{$R *.DFM}

uses Unit_2D;

procedure MakeScale(Lh,Bh,Hh : word; var Lp,Bp,Hp : word; var Scale : real);
begin
  if Hh/Bh<0.4674 then
    begin
      if Lh/Bh>1.2383 then
        Scale:=387{310}/Lh
      else
        Scale:=313{251}/Bh;
      end
    else
      begin
        if Lh/Hh>2.5984 then
          Scale:=387{310}/Lh
        else
          Scale:=147{118}/Hh;
        end;
      Lp:=Round(Lh*Scale); Bp:=Round(Bh*Scale); Hp:=Round(Hh*Scale);
    end;

  procedure Coord(Lp,Bp,Hp : word; var Xn1,Yn1,Xk1,Yk1,Xn2,Yn2,Xk2,Yk2 : word);
  begin
    Xn1:=202{162}-Round(Lp/2); Yn1:=162{130}-Round(Bp/2);
    Xk1:=202{162}+Round(Lp/2); Yk1:=162{130}+Round(Bp/2);
    Xn2:=565{452}-Round(Bp/2); Yn2:=400{320}-Round(Hp/2);
    Xk2:=565{452}+Round(Bp/2); Yk2:=400{320}+Round(Hp/2);
  end;

  procedure BLn(Bmp : TBitMap; Img : TImage;
    X,Y : Integer; BmpInd : byte);
  var

```

```
i : byte;
```

```
begin
  for i:=1 to 17 do
    begin
      ColorLine(Bmp,Img,X-18,Y-17+i,X+19,Y-
17+i,RGB(170+5*i,100+6*i,80+7*i),1,BmpInd);
      ColorLine(Bmp,Img,X-18,Y+17-i,X+19,Y+17-
i,RGB(170+5*i,100+6*i,80+7*i),1,BmpInd);
    end;
  end;
```

```
procedure Pct1(Bmp : TBitMap; Img : TImage; BmpInd : byte);
```

```
var
  i,j : byte;
```

```
begin
  for i:=0 to 2 do
    begin
      ColorRect(Bmp,Img,727,9+48*i,787,53+48*i,RGB(70,80,110),BmpInd);
      for j:=1 to 13 do
        ColorLine(Bmp,Img,728,9+48*i+j,786,9+48*i+j,RGB(30+8*j,40+8*j,70+8*j),1,BmpInd);
        ColorRect(Bmp,Img,729,29+48*i,785,49+48*i,RGB(200,220,240),BmpInd);
      end;
      ColorRect(Bmp,Img,665,6,725,151,RGB(120,130,160),BmpInd);
      for i:=0 to 2 do
        begin
          ColorRect(Bmp,Img,665,9+48*i,725,53+48*i,RGB(70,80,110),BmpInd);
          for j:=1 to 13 do
            ColorLine(Bmp,Img,666,9+48*i+j,724,9+48*i+j,RGB(30+8*j,40+8*j,70+8*j),1,BmpInd);
            ColorRect(Bmp,Img,667,29+48*i,723,49+48*i,RGB(200,220,240),BmpInd);
          end;
        end;
      end;
```

```
procedure Treug(Img : TImage; Ind,IndCol : byte);
```

```
var
  CPnt : array[1..3] of TPoint;
```

```
begin
  with Img.Canvas do
    begin
      if IndCol=0 then
        begin
          Pen.Color:=TColor(RGB(100,100,100));
          Brush.Color:=TColor(RGB(170,170,170));
```

```

    end
else
    begin
        Pen.Color:=TColor(RGB(50,50,50));
        Brush.Color:=TColor(RGB(100,100,100));
    end;
if Ind=1 then
    begin
        CPnt[1].x:=769; CPnt[1].y:=502;
        CPnt[2].x:=789; CPnt[2].y:=502;
        CPnt[3].x:=779; CPnt[3].y:=487;
    end
else
    begin
        CPnt[1].x:=769; CPnt[1].y:=527;
        CPnt[2].x:=789; CPnt[2].y:=527;
        CPnt[3].x:=779; CPnt[3].y:=542;
    end;

    Polygon(CPnt);
end;
end;

procedure DPaint(Bmp : TBitMap; Img : TImage);
var

    i : byte;

begin
    with Img.Canvas do
        begin
            Pen.Color:=TColor(RGB(220,200,180));

            ColorRect(Bmp,Img,423+64*3,273,469+64*3,288,RGB(220,200,180),0);
            ColorRect(Bmp,Img,423+64*4,273,469+64*4,288,RGB(220,200,180),0);

            ColorRect(Bmp,Img,725,7,789,198,RGB(70,60,75),0);
            for i:=1 to 94 do
                ColorLine(Bmp,Img,726,7+2*i,788,7+2*i,RGB(20+2*i,20+2*i,25+2*i),1,0);

            ColorRect(Bmp,Img,419,206,716,266,RGB(70,60,75),0);
            for i:=1 to 29 do
                ColorLine(Bmp,Img,420,205+2*i,715,205+2*i,RGB(80+4*i,70+4*i,85+4*i),1,0);
            end;
        end;
    end;

procedure Buttn(Bmp : TBitMap; Image : TImage; X,Y,dX,dY : word;
                R,G,B : byte);
var
    i,dRu,dGu,dBu,dRd,dGd,dBd : byte;

```

```

begin
  ColorRect(Bmp,Image,X-1,Y-1,X+dX+1,Y+dY+1,RGB(20,20,20),0);
  ColorRect(Bmp,Image,X,Y,X+dX,Y+dY,RGB(R,G,B),0);
  dRu:=Round((255-R)/4); dGu:=Round((255-G)/4); dBu:=Round((255-B)/4);
  dRd:=Round((R-60)/4); dGd:=Round((G-60)/4); dBd:=Round((B-60)/4);

  for i:=1 to 4 do
    begin
      ColorLine(Bmp,Image,X+i,Y+i,X+dX-i,Y+i,RGB(255-dRu*i,255-dGu*i,255-
dBu*i),1,0);
      ColorLine(Bmp,Image,X+i,Y+i,X+i,Y+dY-i,RGB(255-dRu*i,255-dGu*i,255-
dBu*i),1,0);
      ColorLine(Bmp,Image,X+i,Y+dY-1-i,X+dX-i,Y+dY-1-
i,RGB(60+dRd*i,60+dGd*i,60+dBd*i),1,0);
      ColorLine(Bmp,Image,X+dX-1-i,Y+i,X+dX-1-i,Y+dY-1-
i,RGB(60+dRd*i,60+dGd*i,60+dBd*i),1,0);
    end;
  end;

function ArcSin (x:real) :real;
var
  Ast :real;

begin
  if Abs(x)>=0.99999999 then
    begin
      if x>0 then Ast:=90
      else Ast :=-90;
    end
  else
    Ast :=ArcTan(x/(Sqrt(1-Sqr(x))))*57.3;
    ArcSin :=Ast;
  end;

function ArcCos(x:real) :real;
var
  Ac :real;

begin
  if x<>0 then
    begin
      Ac :=ArcTan((Sqrt(1-Sqr(x)))/x)*57.3;
      if x>0 then ArcCos :=Ac
      else ArcCos :=180-Ac;
    end
  else ArcCos:=90;
end;

function Pelg(x,y:real):real;
var C1,Aor,Aol:real;

```

```

begin
if y<>0 then C1 :=ArcTan(x/y)*57.3
else
  begin
    if x>0 then C1:=90
    else C1:=270;
    end;
if y>=0 then Aor :=360 + C1
else Aor :=180 + C1;
if Aor >=360 then Aol :=Aor - 360
else Aol :=Aor;
Pelg :=Aol;
end;

function Cour(x : Integer) : {real}Integer;

begin
if x<0 then Cour:=360+x
else
  begin
    if x>=360 then Cour:=x-360
    else Cour:=x;
    end;
end;

function Distn(x,y:real):real;
var Ds :real;

begin
Ds :=Sqrt(Sqr(x)+Sqr(y));
Distn :=Ds;
end;

procedure KotVot(Kv,Kb: Integer; Vv,Vb : real; var Kot,Vot : real);
label 1;
var
dVx,dVy,psi : real;

begin
dVx:=Vv*sin(Kv/57.3)-Vb*sin(Kb/57.3);
dVy:=Vv*cos(Kv/57.3)-Vb*cos(Kb/57.3);

Vot:=Sqrt(Sqr(dVx)+Sqr(dVy));
if Vot=0 then
  begin
    Kot:=0;
    goto 1;

```

```

    end;
    psi:=ArcSin(dVx/Vot);
    if dVy>0 then
        begin
            if dVx>0 then Kot:=psi
            else Kot:=360+psi;
            end
        else
            begin
                Kot:=180-{}psi;
            end;
        1 :end;

```

```

procedure ColorRectBor(Bmp : TBitMap; Img : TImage; Xn,Yn,Xk,Yk : word;
    Color,Color1 : LongInt; BmpInd : Byte);
{label 1,2;}

```

```

begin
    if BmpInd=1 then
        begin
            with Bmp.Canvas do
                begin
                    Pen.Color:=TColor(Color1{5,5,5});
                    Brush.Color:=TColor(Color);
                    Rectangle(Xn,Yn,Xk,Yk);
                end;
            end
        else
            begin
                with Img.Canvas do
                    begin
                        Pen.Color:=TColor(Color1{5,5,5});
                        Brush.Color:=TColor(Color);
                        Rectangle(Xn,Yn,Xk,Yk);
                    end;
                end;
            end;
        end;
end;

```

```

procedure Region(Bmp : TBitMap; Image1 : TImage; V1,V2 : word;
    alf,D,Dd: real; Gr,Gr1 : Pt; Grs,Grs1 : Pt1);
{label 1,2;}
var
    Nb,Ne,Ncn,Ncn1,gam1,gam2,K2o,i,dN,K11o,K11,Ncno,No : word;
    Xmd,Ymd,Xmd1,Ymd1,Kn,Kk,Kn1,Kk1,K20,K1b,K1e : Integer;
    IndCls,IndRep1 : byte;

```

```

begin
    Xmd:=576; Ymd:=488; Xmd1:=120; Ymd1:=20; IndRep1:=1;

```

```

if V2>V1 then
    begin

```

```

gam1:=Cour(Round(alf+Arcsin(Dd/D)));
gam2:=Cour(Round(alf-Arcsin(Dd/D)));

Kn:=Cour(Round(gam2-Arcsin(V1/V2)));
Kk:=Cour(Round(gam2+Arcsin(V1/V2)));
Kn1:=Cour(Round(gam2+180-Arcsin(V1/V2)));
Kk1:=Cour(Round(gam2+180+Arcsin(V1/V2)));

if Kk>Kn then dN:=Kk-Kn
else dN:=Kk+(360-Kn);

Ncn:=0;
for i:=0 to dN do
  begin
    K20:=Kn+i;
    K2m:=Cour(K20);
    K11o:=Round(gam2+Arcsin((V2/V1)*sin((K2m-gam2)/57.3)));
    K11:=Cour(K11o);
    if IndRep1=1 then
      begin
        IndRep1:=0;
        KotVot(K11,K2m,V1,V2,Kot1,Vot);
        if cos((Kot1-alf)/57.3)>0 then IndCls:=1
        else IndCls:=0;
      end;
    if IndCls=1 then
      begin
        Ncn:=Ncn+1;
        Gr[i].x:=Round(237+K20*0.65);
        Gr[i].y:=Round(371-K11o*0.65);
        with Image1.Canvas do
          begin
            Pen.Color:=TColor(RGB(255,155,155));
            Pen.Color:=TColor(RGB(55,155,55));
            Ellipse(Gr[i].x-1,Gr[i].y-1,Gr[i].x+1,Gr[i].y+1);
            Grs[Ncn].x:=Gr[i].x;
            Grs[Ncn].y:=Gr[i].y;
          end;
        end;

        if i=0 then K1b:=K11;
        if i=dN then
          begin
            K1e:=K11; IndRep:=1; Ncn1:=Ncn;
          end;
        end;
      end;

    if Kk1>Kn1 then dN:=Kk1-Kn1
    else dN:=Kk1+(360-Kn1);

    for i:=0 to dN do

```



```

if IndRep1=1 then
  begin
    IndRep1:=0;
    KotVot(K11,K2m,V1,V2,Kot1,Vot);
    if cos((Kot1-alf)/57.3)>0 then IndCls:=1
    else IndCls:=0;
  end;
if IndCls=1 then
  begin
    Ncn:=Ncn1+dN+1-i;
    Gr[i].x:=Round(237+K20*0.65);
    Gr[i].y:=Round(371-K11o*0.65);
    with Image1.Canvas do
      begin
        Pen.Color:=TColor(RGB(255,155,155));
        Brush.Color:=TColor(RGB(255,255,255));
        Ellipse(Gr[i].x-1,Gr[i].y-1,Gr[i].x+1,Gr[i].y+1);
        Grs[Ncn].x:=Gr[i].x;
        Grs[Ncn].y:=Gr[i].y;
      end;
    end;

    if i=0 then K1b:=K11;
    if i=dN then
      begin
        K1e:=K11; IndRep:=1;
      end;
    end;

    if Kk1>Kn1 then dN:=Kk1-Kn1
    else dN:=Kk1+(360-Kn1);

    for i:=0 to dN do
      begin
        K20:=Kn1+i;
        K2m:=Cour(K20);
        K11o:=Round(gam1+Arcsin((V2/V1)*sin((K2m-gam1)/57.3)));
        K11:=Cour(K11o);
        if IndRep1=1 then
          begin
            IndRep1:=0;
            KotVot(K11,K2m,V1,V2,Kot1,Vot);
            if cos((Kot1-alf)/57.3)>0 then IndCls:=1
            else IndCls:=0;
          end;
        if IndCls=1 then
          begin
            Ncn:=Ncn1+dN+1-i;
            Gr[i].x:=Round(237+K20*0.65);
            Gr[i].y:=Round(371-K11o*0.65);
            with Image1.Canvas do
              begin

```

```

    Pen.Color:=TColor(RGB(255,155,155));
    Brush.Color:=TColor(RGB(255,255,255));
    Ellipse(Gr[i].x-1,Gr[i].y-1,Gr[i].x+1,Gr[i].y+1);
    Grs[Ncn].x:=Gr[i].x;
    Grs[Ncn].y:=Gr[i].y;
    end;
end;

if i=0 then K1b:=K11;
if i=dN then
    begin
        K1e:=K11;
        end;
end;

for i:=Ncn1+dN+1+1 to 721 do Grs[i]:=Grs[Ncn1+dN+1];

Mnx:=Grs[1].x; Mny:=Grs[1].y;
for i:=1 to 720 do
    begin
        if Mnx<Grs[i].x then Mnx:=Grs[i].x;
        if Mny<Grs[i].y then Mny:=Grs[i].y;
        end;

if Mnx>Xmd then
    begin
        for i:=1 to 720 do Grs1[i].x:=Grs[i].x-117;
        for i:=1 to 720 do Grs[i].x:=Grs1[i].x;
        end;

if Mny>Ymd then
    begin
        for i:=1 to 720 do Grs1[i].y:=Grs[i].y-117;
        for i:=1 to 720 do Grs[i].y:=Grs1[i].y;
        end;

with Image1.Canvas do
    begin
        Pen.Mode:=pmMask;

        Brush.Color:=TColor(RGB(255,225,225));
        Pen.Color:=TColor(RGB(255,195,195));
        Polygon(Grs);

        Pen.Mode:=pmCopy;
        end;

for i:=Ncn to 360 do Gr[i]:=Gr[Ncn];
for i:=Ncn to 360 do Gr1[i]:=Gr1[Ncn];
Mnx:=Gr[1].x; Mny:=Gr[1].y;
Mn1x:=Gr1[1].x; Mn1y:=Gr1[1].y;
for i:=1 to 360 do

```

```

begin
if Mnx>Gr[i].x then Mnx:=Gr[i].x;
if Mny>Gr[i].y then Mny:=Gr[i].y;
if Mn1x>Gr1[i].x then Mn1x:=Gr1[i].x;
if Mn1y>Gr1[i].y then Mn1y:=Gr1[i].y;
end;

if (Mnx>Xmd) or (Mn1x>Xmd) then
begin
for i:=1 to 360 do Grs[i].x:=Gr[i].x-117;
for i:=1 to 360 do Gr[i].x:=Grs[i].x;
for i:=1 to 360 do Grs1[i].x:=Gr1[i].x-117;
for i:=1 to 360 do Gr1[i].x:=Grs1[i].x;
end;

{if (Mny<Ymd) or (Mn1y<Ymd) then
begin
for i:=1 to 360 do Grs[i].y:=Gr[i].y+117;
for i:=1 to 360 do Gr[i].y:=Grs[i].y;
for i:=1 to 360 do Grs1[i].y:=Gr1[i].y+117;
for i:=1 to 360 do Gr1[i].y:=Grs1[i].y;
end;}}

{with Image1.Canvas do
begin
Pen.Color:=TColor(RGB(55,155,55));

for i:=1 to Ncn do
Ellipse(Gr[i].x-1,Gr[i].y-1,Gr[i].x+1,Gr[i].y+1);

Pen.Color:=TColor(RGB(255,55,55));

for i:=1 to Ncn do
Ellipse(Gr1[i].x-1,Gr1[i].y-1,Gr1[i].x+1,Gr1[i].y+1);
end;}}
end;

{!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!}

if V2=V1 then
begin
Ncn:=0;
gam1:=Round(alf+Arcsin(Dd/D)); gam2:=Round(alf -Arcsin(Dd/D));

for i:=0 to 360 do
begin
K2o:=Round(gam1+i);
K2:=Cour(K2o);
K11o:=Round(180+2*gam1-K2o);
K11:=Cour(K11o);
KotVot(K11,K2,V1,V2,Kot1,Vot);

```

```

if cos((Kot1-alf)/57.3)>0 then
  begin
    Ncn:=Ncn+1;
    Gr[i].x:=Round(237+K2o*0.65);
    Gr[i].y:=Round(371-K11o*0.65);
    with Image1.Canvas do
      begin
        Pen.Color:=TColor(RGB(55,155,55));
        Ellipse(Gr[i].x-1,Gr[i].y-1,Gr[i].x+1,Gr[i].y+1);
      end;
    Grs[Ncn].x:=Gr[i].x;
    Grs[Ncn].y:=Gr[i].y;
  end;

end;

Ncno:=0;

for i:=0 to 360 do
  begin
    K2o:=Round(gam2+i);
    K2:=Cour(K2o);
    K11o:=Round(180+2*gam2-K2o);
    K11:=Cour(K11o);
    KotVot(K11,K2,V1,V2,Kot1,Vot);
    if cos((Kot1-alf)/57.3)>0 then
      begin
        if i>0 then Ncno:=Ncno+1;
        Gr1[i].x:=Round(237+K2o*0.65);
        Gr1[i].y:=Round(371-K11o*0.65);
        with Image1.Canvas do
          begin
            Pen.Color:=TColor(RGB(255,55,55));
            Ellipse(Gr1[i].x-1,Gr1[i].y-1,Gr1[i].x+1,Gr1[i].y+1);
          end;

          Grs[2*Ncn+1-Ncno].x:=Gr1[i].x;
          Grs[2*Ncn+1-Ncno].y:=Gr1[i].y;
          No:=2*Ncn+1-Ncno;
        end;

      end;

    end;

for i:=2*Ncn+1 to 720 do Grs[i]:=Grs[2*Ncn];

Mnx:=Grs[1].x; Mny:=Grs[1].y;
for i:=1 to 720 do
  begin
    if Mnx<Grs[i].x then Mnx:=Grs[i].x;
    if Mny<Grs[i].y then Mny:=Grs[i].y;
  end;

```

```

end;

if Mnx>Xmd then
begin
for i:=1 to 720 do Grs1[i].x:=Grs[i].x-117;
for i:=1 to 720 do Grs[i].x:=Grs1[i].x;
end;

if Mny>Ymd then
begin
for i:=1 to 720 do Grs1[i].y:=Grs[i].y-117;
for i:=1 to 720 do Grs[i].y:=Grs1[i].y;
end;

with Image1.Canvas do
begin
Pen.Mode:=pmMask;

Brush.Color:=TColor(RGB(255,225,225));
Pen.Color:=TColor(RGB(255,195,195));
Polygon(Grs);

Pen.Mode:=pmCopy;
end;

for i:=Ncn to 360 do Gr[i]:=Gr[Ncn];
for i:=Ncn to 360 do Gr1[i]:=Gr1[Ncn];

Mnx:=Gr[1].x; Mny:=Gr[1].y;
Mn1x:=Gr1[1].x; Mn1y:=Gr1[1].y;
for i:=1 to 360 do
begin
if Mnx<Gr[i].x then Mnx:=Gr[i].x;
if Mny<Gr[i].y then Mny:=Gr[i].y;
if Mn1x<Gr1[i].x then Mn1x:=Gr1[i].x;
if Mn1y<Gr1[i].y then Mn1y:=Gr1[i].y;
end;

if (Mnx>Xmd) or (Mn1x>Xmd) then
begin
for i:=1 to 360 do Grs[i].x:=Gr[i].x-117;
for i:=1 to 360 do Gr[i].x:=Grs[i].x;
for i:=1 to 360 do Grs1[i].x:=Gr1[i].x-117;
for i:=1 to 360 do Gr1[i].x:=Grs1[i].x;
end;

if (Mny>Ymd) or (Mn1y>Ymd) then
begin
for i:=1 to 360 do Grs[i].y:=Gr[i].y-117;
for i:=1 to 360 do Gr[i].y:=Grs[i].y;
for i:=1 to 360 do Grs1[i].y:=Gr1[i].y-117;

```

```

for i:=1 to 360 do Gr1[i].y:=Grs1[i].y;
end;

with Image1.Canvas do
begin
Pen.Color:=TColor(RGB(55,155,55));

for i:=1 to Ncn do
Ellipse(Gr[i].x-1,Gr[i].y-1,Gr[i].x+1,Gr[i].y+1);

Pen.Color:=TColor(RGB(255,55,55));
for i:=1 to Ncno do
Ellipse(Gr1[i].x-1,Gr1[i].y-1,Gr1[i].x+1,Gr1[i].y+1);
end;
end;

{!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!}

if V2<V1 then
begin
Ncn:=0;
gam1:=Round(alf+Arcsin(Dd/D)); gam2:=Round(alf -Arcsin(Dd/D));

for i:=0 to 360 do
begin
K2o:=Round(gam1+i);
K2:=Cour(K2o);

K11o:=Round(gam1+Arcsin((V2/V1)*sin((K2-gam1)/57.3)));
K11:=Cour(K11o);
KotVot(K11,K2,V1,V2,Kot1,Vot);
if cos((Kot1-alf)/57.3)>0 then
begin
Ncn:=Ncn+1;
Gr[i].x:=Round(237+K2o*0.65);
Gr[i].y:=Round(371-K11o*0.65);
Grs[Ncn].x:=Gr[i].x;
Grs[Ncn].y:=Gr[i].y;
end;
end;

Grs[Ncn+1]:=Grs[Ncn];
Ncno:=0;

for i:=0 to 360 do
begin
K2o:=Round(gam2+i);
K2:=Cour(K2o);

K11o:=Round(gam2+Arcsin((V2/V1)*sin((K2-gam2)/57.3)));

```

```

K11:=Cour(K11o);
KotVot(K11,K2,V1,V2,Kot1,Vot);
if cos((Kot1-alf)/57.3)>0 then
  begin
    if i>0 then Ncno:=Ncno+1;
    Gr1[i].x:=Round(237+K2o*0.65);
    Gr1[i].y:=Round(371-K11o*0.65);
    Grs[2*Ncn+1-Ncno].x:=Gr1[i].x;
    Grs[2*Ncn+1-Ncno].y:=Gr1[i].y;
    No:=2*Ncn+1-Ncno;
  end;

end;

for i:=2*Ncn+1 to 720 do Grs[i]:=Grs[2*Ncn+1];

Mnx:=Grs[1].x; Mny:=Grs[1].y;
for i:=1 to 720 do
  begin
    if Mnx<Grs[i].x then Mnx:=Grs[i].x;
    if Mny<Grs[i].y then Mny:=Grs[i].y;
  end;

if Mnx>Xmd then
  begin
    for i:=1 to 720 do Grs1[i].x:=Grs[i].x-117;
    for i:=1 to 720 do Grs[i].x:=Grs1[i].x;
  end;

if Mny>Ymd then
  begin
    for i:=1 to 720 do Grs1[i].y:=Grs[i].y-117;
    for i:=1 to 720 do Grs[i].y:=Grs1[i].y;
  end;

with Image1.Canvas do
  begin
    Pen.Mode:=pmMask;

    Brush.Color:=TColor(RGB(255,225,225));
    Pen.Color:=TColor(RGB(255,195,195));
    Polygon(Grs);

    Pen.Mode:=pmCopy;
  end;

for i:=Ncn to 360 do Gr[i]:=Gr[Ncn];
for i:=Ncn to 360 do Gr1[i]:=Gr1[Ncn];

Mnx:=Gr[1].x; Mny:=Gr[1].y;
Mn1x:=Gr1[1].x; Mn1y:=Gr1[1].y;
for i:=1 to 360 do

```

```

begin
  if Mnx<Gr[i].x then Mnx:=Gr[i].x;
  if Mny<Gr[i].y then Mny:=Gr[i].y;
  if Mn1x<Gr1[i].x then Mn1x:=Gr1[i].x;
  if Mn1y<Gr1[i].y then Mn1y:=Gr1[i].y;
end;

if (Mnx>Xmd) or (Mn1x>Xmd) then
begin
  for i:=1 to 360 do Grs[i].x:=Gr[i].x-117;
  for i:=1 to 360 do Gr[i].x:=Grs[i].x;
  for i:=1 to 360 do Grs1[i].x:=Gr1[i].x-117;
  for i:=1 to 360 do Gr1[i].x:=Grs1[i].x;
end;

if (Mny>Ymd) or (Mn1y>Ymd) then
begin
  for i:=1 to 360 do Grs[i].y:=Gr[i].y-117;
  for i:=1 to 360 do Gr[i].y:=Grs[i].y;
  for i:=1 to 360 do Grs1[i].y:=Gr1[i].y-117;
  for i:=1 to 360 do Gr1[i].y:=Grs1[i].y;
end;

with Image1.Canvas do
begin
  Pen.Color:=TColor(RGB(55,155,55));
  for i:=1 to Ncn do
    Ellipse(Gr[i].x-1,Gr[i].y-1,Gr[i].x+1,Gr[i].y+1);

    Pen.Color:=TColor(RGB(255,55,55));
    for i:=1 to Ncno do
      Ellipse(Gr1[i].x-1,Gr1[i].y-1,Gr1[i].x+1,Gr1[i].y+1);
    end;
  end;
end;

end;

procedure Vsl(Bmp : TBitMap; Image : TImage; IndV,IndCol,Lv,Bv,L1,L2 : byte;
Xo,Yo,K : Integer; V : real; IndBmp : byte; var Xn,Yn,Xk,Yk,Xs,Ys: Integer);

var
  i,s,sv : byte;
  R,a : Integer;
  X,Y : real;

  L,Alf : array[0..120] of real;

begin
  Xn:=Xo; Yn:=Yo-Round((Lv-L1-L2)/2);

```

```

Xk:=Xo; Yk:=Yo+Round((Lv-L1-L2)/2);

a:=Round(Bv/2);

for i:=0 to 30 do
begin
R:=a;
Re1[i].x:=Round(Xk+R*cos((6*i)/57.3));
Re1[i].y:=Round(Yk+R*sin((6*i)/57.3));
end;

for i:=0 to 2*a do
begin
X:=i-a;
Y:=(L1*Sqrt(Sqr(a)-Sqr(X)))/a;
Re[i].x:=Round(Xn+X);
Re[i].y:=Round(Yn-Y);
s:=i;
end;

for i:=0 to s do ReV[i]:=Re[i];
for i:=s+1 to s+31 do ReV[i]:=Re1[i-s-1];
for i:=s+32 to 120 do ReV[i]:=ReV[s+31];
sv:=s+31;

for i:=0 to sv do
begin
L[i]:=Distn(Xo-ReV[i].x,Yo-ReV[i].y);
Alf[i]:=Pelg(ReV[i].x-Xo,Yo-ReV[i].y);
end;

for i:=0 to sv do
begin
ReV[i].x:=Round(Xo+L[i]*sin((Alf[i]+K)/57.3));
ReV[i].y:=Round(Yo-L[i]*cos((Alf[i]+K)/57.3));
end;

for i:=sv+1 to 120 do ReV[i]:=ReV[sv];

L[1]:=Distn(Xo-Xn,Yo-Yn);
Alf[1]:=Pelg(Xn-Xo,Yo-Yn);
Xn:=Round(Xo+L[1]*sin((Alf[1]+K)/57.3));
Yn:=Round(Yo-L[1]*cos((Alf[1]+K)/57.3));

L[2]:=Distn(Xo-Xk,Yo-Yk);
Alf[2]:=Pelg(Xk-Xo,Yo-Yk);
Xk:=Round(Xo+L[2]*sin((Alf[2]+K)/57.3));
Yk:=Round(Yo-L[2]*cos((Alf[2]+K)/57.3));

Xs:=ReV[36].x; Ys:=ReV[36].y;

```

```

if IndBmp=0 then
begin
with Image.Canvas do
begin
if IndV=0 then
begin
if IndCol=0 then
begin
Pen.Color:=TColor(RGB(170,120,120));
Brush.Color:=TColor(RGB(255,220,220));
end
else
begin
Pen.Color:=TColor(RGB(110,80,80));
Brush.Color:=TColor(RGB(200,170,170));
end;
end
else
begin
if IndCol=0 then
begin
Pen.Color:=TColor(RGB(120,120,170));
Brush.Color:=TColor(RGB(200,220,230));
end
else
begin
Pen.Color:=TColor(RGB(100,100,150));
Brush.Color:=TColor(RGB(170,190,200));
end;
end;
end;

Polygon(ReV);
end;
end;

if IndBmp=1 then
begin
with Bmp.Canvas do
begin
if IndV=0 then
begin
if IndCol=0 then
begin
Pen.Color:=TColor(RGB(170,120,120));
Brush.Color:=TColor(RGB(250,220,220));
end
else
begin
Pen.Color:=TColor(RGB(150,100,100));
Brush.Color:=TColor(RGB(200,70,70));
end;
end;

```

```

        end
    else
        begin
            if IndCol=0 then
                begin
                    Pen.Color:=TColor(RGB(120,120,170));
                    Brush.Color:=TColor(RGB(200,220,230));
                end
            else
                begin
                    Pen.Color:=TColor(RGB(100,100,150));
                    Brush.Color:=TColor(RGB(70,90,200));
                end;
            end;
        end;

        Polygon(ReV);
        end;
    end;

end;

procedure ShipA(Bmp : TBitMap; Image : TImage; IndOk,IndLine,IndCol,Lv,Bv,L1,L2 :
byte; Xv,Yv,K1,Xc,Yc,K2 : Integer; V1,V2 : real; IndBmp : byte);

var
    i,s,sv : byte;
    Xn1,Yn1,Xk1,Yk1,Xs1,Ys1,Xn2,Yn2,Xk2,Yk2,Xs2,Ys2,Xk,Yk,Kotr : Integer;
    X,Y : real;

    L,Alf : array[0..120] of real;

begin
    if IndBmp=1 then Bmp.Canvas.Pen.Mode:=pmMask;

    {if IndOK=2 then
        begin}
        with Image.Canvas do
            begin

Vsl(Bmp,Image,1,IndCol{0},Lv,Bv,L1,L2,Xv,Yv,K1,V1,IndBmp,Xn1,Yn1,Xk1,Yk1,Xs1,Ys1);

Vsl(Bmp,Image,0,IndCol{0},Lv,Bv,L1,L2,Xc,Yc,K2,V2,IndBmp,Xn2,Yn2,Xk2,Yk2,Xs2,Ys2);
            end;
        {end;}

        if IndBmp=1 then Bmp.Canvas.Pen.Mode:=pmCopy;

        Image.Canvas.Pen.Mode:=pmCopy;

        Image.Canvas.Pen.Width:=1;

```

```

end;

procedure Ship3(Bmp : TBitMap; Image : TImage; IndCol,Lv,Bv,L1,L2 : byte;
X1,Y1,K1,X2,Y2,K2,X3,Y3,K3 : Integer; V1,V2,V3 : real; IndBmp : byte);

var
i,s,sv : byte;
Xn1,Yn1,Xk1,Yk1,Xs1,Ys1,Xn2,Yn2,Xk2,Yk2,Xs2,Ys2,Xk,Yk,Kotr : Integer;
X,Y : real;

L,Alf : array[0..120] of real;

begin

if IndBmp=1 then Bmp.Canvas.Pen.Mode:=pmMask;

{if IndOK=2 then
begin}
with Image.Canvas do
begin

Vsl(Bmp,Image,1,0,Lv,Bv,L1,L2,X1,Y1,K1,V1,IndBmp,Xn1,Yn1,Xk1,Yk1,Xs1,Ys1);

Vsl(Bmp,Image,0,0,Lv,Bv,L1,L2,X2,Y2,K2,V2,IndBmp,Xn2,Yn2,Xk2,Yk2,Xs2,Ys2);

Vsl(Bmp,Image,0,0,Lv,Bv,L1,L2,X3,Y3,K3,V3,IndBmp,Xn2,Yn2,Xk2,Yk2,Xs2,Ys2);
end;
{end;}

if IndBmp=1 then Bmp.Canvas.Pen.Mode:=pmCopy;

Image.Canvas.Pen.Mode:=pmCopy;

Image.Canvas.Pen.Width:=1;

end;

procedure Ship4(Bmp : TBitMap; Image : TImage; IndCol,Lv,Bv,L1,L2 : byte;
X1,Y1,K1,X2,Y2,K2,X3,Y3,K3,X4,Y4,K4 : Integer; V1,V2,V3,V4 : real; IndBmp : byte);

var
i,s,sv : byte;
Xn1,Yn1,Xk1,Yk1,Xs1,Ys1,Xn2,Yn2,Xk2,Yk2,Xs2,Ys2,Xk,Yk,Kotr : Integer;
X,Y : real;

L,Alf : array[0..120] of real;

begin

if IndBmp=1 then Bmp.Canvas.Pen.Mode:=pmMask;

```

```

    {if IndOK=2 then
      begin}
      with Image.Canvas do
        begin

Vsl(Bmp,Image,1,0,Lv,Bv,L1,L2,X1,Y1,K1,V1,IndBmp,Xn1,Yn1,Xk1,Yk1,Xs1,Ys1);

Vsl(Bmp,Image,0,0,Lv,Bv,L1,L2,X2,Y2,K2,V2,IndBmp,Xn2,Yn2,Xk2,Yk2,Xs2,Ys2);

Vsl(Bmp,Image,0,0,Lv,Bv,L1,L2,X3,Y3,K3,V3,IndBmp,Xn2,Yn2,Xk2,Yk2,Xs2,Ys2);

Vsl(Bmp,Image,0,0,Lv,Bv,L1,L2,X4,Y4,K4,V4,IndBmp,Xn2,Yn2,Xk2,Yk2,Xs2,Ys2);
      end;
    {end;}

    if IndBmp=1 then Bmp.Canvas.Pen.Mode:=pmCopy;

    Image.Canvas.Pen.Mode:=pmCopy;

    Image.Canvas.Pen.Width:=1;

    end;

procedure Ship5(Bmp : TBitMap; Image : TImage; IndCol,Lv,Bv,L1,L2 : byte;
X1,Y1,K1,X2,Y2,K2,X3,Y3,K3,X4,Y4,K4,X5,Y5,K5 : Integer;
V1,V2,V3,V4,V5 : real; IndBmp : byte);

var
i,s,sv : byte;
Xn1,Yn1,Xk1,Yk1,Xs1,Ys1,Xn2,Yn2,Xk2,Yk2,Xs2,Ys2,Xk,Yk,Kotr : Integer;
X,Y : real;

L,Alf : array[0..120] of real;

begin

if IndBmp=1 then Bmp.Canvas.Pen.Mode:=pmMask;

    {if IndOK=2 then
      begin}
      with Image.Canvas do
        begin

Vsl(Bmp,Image,1,0,Lv,Bv,L1,L2,X1,Y1,K1,V1,IndBmp,Xn1,Yn1,Xk1,Yk1,Xs1,Ys1);

Vsl(Bmp,Image,0,0,Lv,Bv,L1,L2,X2,Y2,K2,V2,IndBmp,Xn2,Yn2,Xk2,Yk2,Xs2,Ys2);

Vsl(Bmp,Image,0,0,Lv,Bv,L1,L2,X3,Y3,K3,V3,IndBmp,Xn2,Yn2,Xk2,Yk2,Xs2,Ys2);

```

```
Vsl(Bmp,Image,0,0,Lv,Bv,L1,L2,X4,Y4,K4,V4,IndBmp,Xn2,Yn2,Xk2,Yk2,Xs2,Ys2);
```

```
Vsl(Bmp,Image,0,0,Lv,Bv,L1,L2,X5,Y5,K5,V5,IndBmp,Xn2,Yn2,Xk2,Yk2,Xs2,Ys2);
```

```
end;  
{end;}
```

```
if IndBmp=1 then Bmp.Canvas.Pen.Mode:=pmCopy;
```

```
Image.Canvas.Pen.Mode:=pmCopy;
```

```
Image.Canvas.Pen.Width:=1;
```

```
end;
```

```
procedure Danger(Bmp : TBitMap; Image : TImage; Nves : byte; K1,K2,K3,K4,  
K5,K6 : Integer; V1,V2,V3,V4,V5,V6,alf12,alf13,alf14,alf15,alf16 : real;  
D12,D13,D14,D15,D16 : real; var w12,w13,w14,w15,w16,w23,w24,w25,w26,w34,  
w35,w36,w45,w46,w56 : byte);
```

```
var  
alf23,alf24,alf25,alf26,alf34,alf35,alf36,alf45,alf46,alf56: real;  
D23,D24,D25,D26,D34,D35,D36,D45,D46,D56 : real;  
CL,Rd,Grn,Bl : byte;  
X1,Y1,X2,Y2,X3,Y3,X4,Y4,X5,Y5,X6,Y6 : Integer;
```

```
begin  
case Nves of
```

```
2 : ColorRect(Bmp,Image,5,421,33,449,RGB(110,110,110),0);  
3 : ColorRect(Bmp,Image,5,421,47,463,RGB(110,110,110),0);  
4 : ColorRect(Bmp,Image,5,421,61,477,RGB(110,110,110),0);  
5 : ColorRect(Bmp,Image,5,421,75,491,RGB(110,110,110),0);  
6 : ColorRect(Bmp,Image,5,421,89,505,RGB(110,110,110),0);  
end;
```

```
KotVot(K1,K2,V1,V2,Kot,Vot);
```

```
if cos((alf12-Kot)/57.3)>0 then CL:=1  
else CL:=0;
```

```
if CL=0 then w12:=0{2}  
else  
begin  
if Abs(D12*sin((alf12-Kot)/57.3))>Dd then w12:=0  
else w12:=1;  
end;
```

```

if CL=0 then
  begin
    Rd:=255; Grn:=255; Bl:=255;
  end
else
  begin
    if w12=1 then
      begin
        Rd:=255; Grn:=80; Bl:=80;
      end
    else
      begin
        Rd:=50; Grn:=250; Bl:=50;
      end;
    end;
end;

ColorRect(Bmp,Image,19,421,33,435,RGB(Rd,Grn,Bl),0);
ColorRect(Bmp,Image,5,435,19,449,RGB(Rd,Grn,Bl),0);


if Nves>2 then
  begin
    KotVot(K1,K3,V1,V3,Kot,Vot);

    if cos((alf13-Kot)/57.3)>0 then CL:=1
    else CL:=0;

    if CL=0 then w13:=0{2}
    else
      begin
        if Abs(D13*sin((alf13-Kot)/57.3))>Dd then w13:=0
        else w13:=1;
      end;

    if CL=0 then
      begin
        Rd:=255; Grn:=255; Bl:=255;
      end
    else
      begin
        if w13=1 then
          begin
            Rd:=255; Grn:=80; Bl:=80;
          end
        else
          begin
            Rd:=50; Grn:=250; Bl:=50;
          end;
        end;
      end;

    ColorRect(Bmp,Image,33,421,47,435,RGB(Rd,Grn,Bl),0);

```

```
ColorRect(Bmp,Image,5,449,19,463,RGB(Rd,Grn,Bl),0);
```

```
KotVot(K2,K3,V2,V3,Kot,Vot);
```

```
X2:=280+Round(D12*50*sin(alf12/57.3));
```

```
Y2:=255-Round(D12*50*cos(alf12/57.3));
```

```
X3:=280+Round(D13*50*sin(alf13/57.3));
```

```
Y3:=255-Round(D13*50*cos(alf13/57.3));
```

```
alf23:=Pelg(X3-X2,Y2-Y3);
```

```
D23:=Distn((X2-280)/50-(X3-280)/50,(Y2-280)/50-(Y3-280)/50);
```

```
if cos((alf23-Kot)/57.3)>0 then CL:=1
```

```
else CL:=0;
```

```
if CL=0 then w23:=0{2}
```

```
else
```

```
begin
```

```
if Abs(D23*sin((alf23-Kot)/57.3))>Dd then w23:=0
```

```
else w23:=1;
```

```
end;
```

```
if CL=0 then
```

```
begin
```

```
Rd:=255; Grn:=255; Bl:=255;
```

```
end
```

```
else
```

```
begin
```

```
if w23=1 then
```

```
begin
```

```
Rd:=255; Grn:=80; Bl:=80;
```

```
end
```

```
else
```

```
begin
```

```
Rd:=50; Grn:=250; Bl:=50;
```

```
end;
```

```
end;
```

```
ColorRect(Bmp,Image,33,435,47,449,RGB(Rd,Grn,Bl),0);
```

```
ColorRect(Bmp,Image,19,449,33,463,RGB(Rd,Grn,Bl),0);
```

```
end;
```

```
if Nves>3 then
```

```
begin
```

```
KotVot(K1,K4,V1,V4,Kot,Vot);
```

```
if cos((alf14-Kot)/57.3)>0 then CL:=1
```

```
else CL:=0;
```

```
if CL=0 then w14:=0{2}
```

```
else
```

```
begin
```

```

if Abs(D14*sin((alf14-Kot)/57.3))>Dd then w14:=0
else w14:=1;
end;

if CL=0 then
begin
Rd:=255; Grn:=255; Bl:=255;
end
else
begin
if w14=1 then
begin
Rd:=255; Grn:=80; Bl:=80;
end
else
begin
Rd:=50; Grn:=250; Bl:=50;
end;
end;

ColorRect(Bmp,Image,47,421,61,435,RGB(Rd,Grn,Bl),0);
ColorRect(Bmp,Image,5,463,19,477,RGB(Rd,Grn,Bl),0);

X2:=280+Round(D12*50*sin(alf12/57.3));
Y2:=255-Round(D12*50*cos(alf12/57.3));
X4:=280+Round(D14*50*sin(alf14/57.3));
Y4:=255-Round(D14*50*cos(alf14/57.3));

alf24:=Pelg(X4-X2,Y2-Y4);
D24:=Distn((X2-280)/50-(X4-280)/50,(Y2-280)/50-(Y4-280)/50);

KotVot(K2,K4,V2,V4,Kot,Vot);

if cos((alf24-Kot)/57.3)>0 then CL:=1
else CL:=0;

if CL=0 then w24:=0{2}
else
begin
if Abs(D24*sin((alf24-Kot)/57.3))>Dd then w24:=0
else w24:=1;
end;

if CL=0 then
begin
Rd:=255; Grn:=255; Bl:=255;
end
else
begin
if w24=1 then
begin
Rd:=255; Grn:=80; Bl:=80;

```

```

    end
  else
    begin
      Rd:=50; Grn:=250; Bl:=50;
    end;
  end;

ColorRect(Bmp,Image,47,435,61,449,RGB(Rd,Grn,Bl),0);
ColorRect(Bmp,Image,19,463,33,477,RGB(Rd,Grn,Bl),0);

X3:=280+Round(D13*50*sin(alf13/57.3));
Y3:=255-Round(D13*50*cos(alf13/57.3));
X4:=280+Round(D14*50*sin(alf14/57.3));
Y4:=255-Round(D14*50*cos(alf14/57.3));
alf34:=Pelg(X4-X3,Y3-Y4);
D34:=Distn((X3-280)/50-(X4-280)/50,(Y3-280)/50-(Y4-280)/50);

KotVot(K3,K4,V3,V4,Kot,Vot);

if cos((alf34-Kot)/57.3)>0 then CL:=1
else CL:=0;

if CL=0 then w34:=0{2}
else
  begin
    if Abs(D34*sin((alf34-Kot)/57.3))>Dd then w34:=0
    else w34:=1;
  end;

if CL=0 then
  begin
    Rd:=255; Grn:=255; Bl:=255;
  end
else
  begin
    if w34=1 then
      begin
        Rd:=255; Grn:=80; Bl:=80;
      end
    else
      begin
        Rd:=50; Grn:=250; Bl:=50;
      end;
    end;

ColorRect(Bmp,Image,47,449,61,463,RGB(Rd,Grn,Bl),0);
ColorRect(Bmp,Image,33,463,47,477,RGB(Rd,Grn,Bl),0);
end;

if Nves>4 then
  begin

```

```

KotVot(K1,K5,V1,V5,Kot,Vot);

if cos((alf15-Kot)/57.3)>0 then CL:=1
else CL:=0;

if CL=0 then w15:=0{2}
else
  begin
    if Abs(D15*sin((alf15-Kot)/57.3))>Dd then w15:=0
    else w15:=1;
  end;

if CL=0 then
  begin
    Rd:=255; Grn:=255; Bl:=255;
  end
else
  begin
    if w15=1 then
      begin
        Rd:=255; Grn:=80; Bl:=80;
      end
    else
      begin
        Rd:=50; Grn:=250; Bl:=50;
      end;
  end;

ColorRect(Bmp,Image,61,421,75,435,RGB(Rd,Grn,Bl),0);
ColorRect(Bmp,Image,5,477,19,491,RGB(Rd,Grn,Bl),0);

X2:=280+Round(D12*50*sin(alf12/57.3));
Y2:=255-Round(D12*50*cos(alf12/57.3));
X5:=280+Round(D15*50*sin(alf15/57.3));
Y5:=255-Round(D15*50*cos(alf15/57.3));
alf25:=Pelg(X5-X2,Y2-Y5);
D25:=Distn((X2-280)/50-(X5-280)/50,(Y2-280)/50-(Y5-280)/50);

KotVot(K2,K5,V2,V5,Kot,Vot);

if cos((alf25-Kot)/57.3)>0 then CL:=1
else CL:=0;

if CL=0 then w25:=0{2}
else
  begin
    if Abs(D25*sin((alf25-Kot)/57.3))>Dd then w25:=0
    else w25:=1;
  end;

if CL=0 then
  begin

```

```

    Rd:=255; Grn:=255; Bl:=255;
  end
else
  begin
    if w25=1 then
      begin
        Rd:=255; Grn:=80; Bl:=80;
      end
    else
      begin
        Rd:=50; Grn:=250; Bl:=50;
      end;
    end;
  end;

  ColorRect(Bmp,Image,61,435,75,449,RGB(Rd,Grn,Bl),0);
  ColorRect(Bmp,Image,19,477,33,491,RGB(Rd,Grn,Bl),0);

  X3:=280+Round(D13*50*sin(alf13/57.3));
  Y3:=255-Round(D13*50*cos(alf13/57.3));
  alf35:=Pelg(X5-X3,Y3-Y5);
  D35:=Distn((X3-280)/50-(X5-280)/50,(Y3-280)/50-(Y5-280)/50);

  KotVot(K3,K5,V3,V5,Kot,Vot);

  if cos((alf35-Kot)/57.3)>0 then CL:=1
  else CL:=0;

  if CL=0 then w35:=0{2}
  else
    begin
      if Abs(D35*sin((alf35-Kot)/57.3))>Dd then w35:=0
      else w35:=1;
    end;

  if CL=0 then
    begin
      Rd:=255; Grn:=255; Bl:=255;
    end
  else
    begin
      if w35=1 then
        begin
          Rd:=255; Grn:=80; Bl:=80;
        end
      else
        begin
          Rd:=50; Grn:=250; Bl:=50;
        end;
      end;
    end;

  ColorRect(Bmp,Image,61,449,75,463,RGB(Rd,Grn,Bl),0);
  ColorRect(Bmp,Image,33,477,47,491,RGB(Rd,Grn,Bl),0);

```

```

X4:=280+Round(D14*50*sin(alf14/57.3));
Y4:=255-Round(D14*50*cos(alf14/57.3));
alf45:=Pelg(X5-X4,Y4-Y5);
D45:=Distn((X4-280)/50-(X5-280)/50,(Y4-280)/50-(Y5-280)/50);

```

```

KotVot(K4,K5,V4,V5,Kot,Vot);

```

```

if cos((alf45-Kot)/57.3)>0 then CL:=1
else CL:=0;

```

```

if CL=0 then w45:=0{2}
else
  begin
    if Abs(D45*sin((alf45-Kot)/57.3))>Dd then w45:=0
    else w45:=1;
  end;

```

```

if CL=0 then
  begin
    Rd:=255; Grn:=255; Bl:=255;
  end
else
  begin
    if w45=1 then
      begin
        Rd:=255; Grn:=80; Bl:=80;
      end
    else
      begin
        Rd:=50; Grn:=250; Bl:=50;
      end;
    end;
  end;

```

```

ColorRect(Bmp,Image,61,463,75,477,RGB(Rd,Grn,Bl),0);
ColorRect(Bmp,Image,47,477,61,491,RGB(Rd,Grn,Bl),0);
end;

```

```

if Nves>5 then
  begin
    KotVot(K1,K6,V1,V6,Kot,Vot);

```

```

if cos((alf16-Kot)/57.3)>0 then CL:=1
else CL:=0;

```

```

if CL=0 then w16:=0{2}
else
  begin
    if Abs(D16*sin((alf16-Kot)/57.3))>Dd then w16:=0
    else w16:=1;
  end;

```

```

if CL=0 then
  begin
    Rd:=255; Grn:=255; Bl:=255;
  end
else
  begin
    if w16=1 then
      begin
        Rd:=255; Grn:=80; Bl:=80;
      end
    else
      begin
        Rd:=50; Grn:=250; Bl:=50;
      end;
    end;
end;

ColorRect(Bmp,Image,75,421,89,435,RGB(Rd,Grn,Bl),0);
ColorRect(Bmp,Image,5,491,19,505,RGB(Rd,Grn,Bl),0);

X2:=280+Round(D12*50*sin(alf12/57.3));
Y2:=255-Round(D12*50*cos(alf12/57.3));
X6:=280+Round(D16*50*sin(alf16/57.3));
Y6:=255-Round(D16*50*cos(alf16/57.3));
alf26:=Pelg(X6-X2,Y2-Y6);
D26:=Distn((X2-280)/50-(X6-280)/50,(Y2-280)/50-(Y6-280)/50);

KotVot(K2,K6,V2,V6,Kot,Vot);

if cos((alf26-Kot)/57.3)>0 then CL:=1
else CL:=0;

if CL=0 then w26:=0{2}
else
  begin
    if Abs(D26*sin((alf26-Kot)/57.3))>Dd then w26:=0
    else w26:=1;
  end;

if CL=0 then
  begin
    Rd:=255; Grn:=255; Bl:=255;
  end
else
  begin
    if w26=1 then
      begin
        Rd:=255; Grn:=80; Bl:=80;
      end
    else
      begin
        Rd:=50; Grn:=250; Bl:=50;
      end;
  end;
end;

```

```

end;

ColorRect(Bmp,Image,75,435,89,449,RGB(Rd,Grn,Bl),0);
ColorRect(Bmp,Image,19,491,33,505,RGB(Rd,Grn,Bl),0);

X3:=280+Round(D13*50*sin(alf13/57.3));
Y3:=255-Round(D13*50*cos(alf13/57.3));
alf36:=Pelg(X6-X3,Y3-Y6);
D36:=Distn((X3-280)/50-(X6-280)/50,(Y3-280)/50-(Y6-280)/50);

KotVot(K3,K6,V3,V6,Kot,Vot);

if cos((alf36-Kot)/57.3)>0 then CL:=1
else CL:=0;

if CL=0 then w36:=0{2}
else
  begin
    if Abs(D36*sin((alf36-Kot)/57.3))>Dd then w36:=0
    else w36:=1;
  end;

if CL=0 then
  begin
    Rd:=255; Grn:=255; Bl:=255;
  end
else
  begin
    if w36=1 then
      begin
        Rd:=255; Grn:=80; Bl:=80;
      end
    else
      begin
        Rd:=50; Grn:=250; Bl:=50;
      end;
    end;

ColorRect(Bmp,Image,75,449,89,463,RGB(Rd,Grn,Bl),0);
ColorRect(Bmp,Image,33,491,47,505,RGB(Rd,Grn,Bl),0);

X4:=280+Round(D14*50*sin(alf14/57.3));
Y4:=255-Round(D14*50*cos(alf14/57.3));
alf46:=Pelg(X6-X4,Y4-Y6);
D46:=Distn((X4-280)/50-(X6-280)/50,(Y4-280)/50-(Y6-280)/50);

KotVot(K4,K6,V4,V6,Kot,Vot);

if cos((alf46-Kot)/57.3)>0 then CL:=1
else CL:=0;

if CL=0 then w46:=0{2}

```

```

else
  begin
    if Abs(D46*sin((alf46-Kot)/57.3))>Dd then w46:=0
    else w46:=1;
  end;

if CL=0 then
  begin
    Rd:=255; Grn:=255; Bl:=255;
  end
else
  begin
    if w46=1 then
      begin
        Rd:=255; Grn:=80; Bl:=80;
      end
    else
      begin
        Rd:=50; Grn:=250; Bl:=50;
      end;
    end;
end;

ColorRect(Bmp,Image,75,463,89,477,RGB(Rd,Grn,Bl),0);
ColorRect(Bmp,Image,47,491,61,505,RGB(Rd,Grn,Bl),0);

X5:=280+Round(D15*50*sin(alf15/57.3));
Y5:=255-Round(D15*50*cos(alf15/57.3));

alf56:=Pelg(X6-X5,Y5-Y6);
D56:=Distn((X5-280)/50-(X6-280)/50,(Y5-280)/50-(Y6-280)/50);

KotVot(K5,K6,V5,V6,Kot,Vot);

if cos((alf56-Kot)/57.3)>0 then CL:=1
else CL:=0;

if CL=0 then w56:=0{2}
else
  begin
    if Abs(D56*sin((alf56-Kot)/57.3))>Dd then w56:=0
    else w56:=1;
  end;

if CL=0 then
  begin
    Rd:=255; Grn:=255; Bl:=255;
  end
else
  begin
    if w56=1 then
      begin
        Rd:=255; Grn:=80; Bl:=80;
      end
    end;
  end;

```

```

    end
  else
    begin
      Rd:=50; Grn:=250; Bl:=50;
    end;
  end;

  ColorRect(Bmp,Image,75,477,89,491,RGB(Rd,Grn,Bl),0);
  ColorRect(Bmp,Image,61,491,75,505,RGB(Rd,Grn,Bl),0);
  end;
end;

procedure AColor(w : byte; var Rd,Grn,Bl : byte);
begin
  case w of
    0 : begin
      Rd:=50; Grn:=250; Bl:=50;
    end;
    1 : begin
      Rd:=255; Grn:=80; Bl:=80;
    end;
    2 : begin
      Rd:=255; Grn:=255; Bl:=255;
    end;
  end;
end;

procedure TForm1.FormCreate(Sender: TObject);
label 1,2,3;
var
  Xn1,Yn1,Xk1,Yk1,Xn2,Yn2,Xk2,Yk2,K11,K12,gam1,gam2,Nb,Ne: word;
  Scale : real;
  StC : string[3];

  HoldTyp : byte;

  i,j,k,Ncn,Ncno,No : word;
  Xtr,Ytr,Ztr,Xs,Ys,Xcr,Ycr,K2o,K11o,K12o,K21o : Integer;
  Gr,Gr1 : Pt;
  Grs : Pt1;
  Rd,Grn,Bl,CL : byte;

begin
  ShowBmp := TBitMap.Create;
  ShowBmp.Width:=800;
  ShowBmp.Height:=600;

  CargoBmp := TBitMap.Create;
  CargoBmp.Width:=800;

```

CargoBmp.Height:=430;

Nves:=2; IndOK:=1; IndVes:=0; IndK:=1; IndV:=1; IndA:=1; IndD:=1; IndS:=1;
 IndAv:=1; DKm:=360; IndDm:=1; IndKm1:=1; IndKm2:=1; IndKm3:=1; IndMat:=0;
 IndAB:=0; IndTimer:=0; t:=0; IndRep:=1;
 alf12:=90; V1:=15; V2:=20; D12:=3; Dd:=1.0;
 K1:=45; K2:=315;
 K1n:=45; K2n:=315;
 Bv:=10; L1:=12; L2:=4; Lv:=40; StV1:='1'; StV2:='2';
 Ks1:=K1; Ks2:=K2; alf:=alf12; D:=D12; Vs1:=V1; Vs2:=V2;

w12:=0; w13:=0; w14:=0; w15:=0; w16:=0; w23:=0; w24:=0; w25:=0; w26:=0;
 w34:=0; w35:=0; w36:=0; w45:=0; w46:=0; w56:=0;

ColorRect>ShowBmp,Image1,0,0,670,512,RGB(219,217,209),0);
 ColorRect>ShowBmp,Image1,0,0,560,512,RGB(250,255,255),0);

Nves:=2;
 Xt:=280{335}+Round(45*D12*sin(alf12/57.3));
 Yt:=255-Round(45*D12*cos(alf12/57.3));
 Xvs:=280{335}-Round(45*D12*sin(alf12/57.3));
 Yvs:=255+Round(45*D12*cos(alf12/57.3));

ShipA>ShowBmp,Image1,2,1,0,Lv,Bv,L1,L2,Xvs,Yvs,Round(K1),Xt,Yt,Round(K2),V1,V
 2,0);

ColorLine>ShowBmp,Image1,Xvs,Yvs,Xt,Yt,RGB(100,140,100),1,0);
 ColorLine>ShowBmp,Image1,Xvs,Yvs,Xvs+Round(5*V1*sin(K1/57.3)),
 Yvs-Round(5*V1*cos(K1/57.3)),RGB(40,40,140),1,0);
 ColorLine>ShowBmp,Image1,Xt,Yt,Xt+Round(5*V2*sin(K2/57.3)),
 Yt-Round(5*V2*cos(K2/57.3)),RGB(140,40,40),1,0);

KotVot(Round(K1),Round(K2),Round(V1),Round(V2),Kot,Vot);

ColorLine>ShowBmp,Image1,Xvs,Yvs,Xvs+Round(200*sin(Kot/57.3)),
 Yvs-Round(200*cos(Kot/57.3)),RGB(140,40,140),1,0);

Danger>ShowBmp,Image1,Nves,K1,K2,K3,K4,K5,K6,V1,V2,V3,V4,V5,V6,alf12,alf13,
 alf14,alf15,alf16,D12,D13,D14,D15,D16,w12,w13,w14,w15,w16,w23,w24,w25,w26,
 w34,w35,w36,w45,w46,w56);
 end;

procedure TForm1.FormDestroy(Sender: TObject);
 begin
 ShowBmp.Free;
 CargoBmp.Free;
 end;

procedure TForm1.Image1MouseMove(Sender: TObject; Shift: TShiftState; X,
 Y: Integer);

```

var Str1 : string[4];

begin
with Image1.Canvas do
begin
{ ColorRect(ShowBmp,Image1,100+7,7,100+35,25,
RGB(230,240,250),0);
Str(X,Str1);
TextOut(100+10,10,Str1);
ColorRect(ShowBmp,Image1,100+40,7,100+68,25,
RGB(230,240,250),0);
Str(Y,Str1);
TextOut(100+43,10,Str1);}
Xcn:=X; Ycn:=Y;
end;
end;

{ SCROLL }
procedure TForm1.ScrollBar1Scroll(Sender: TObject; ScrollCode: TScrollCode;
var ScrollPos: Integer);

var
StrF,StD,StC: string[3];
Stg : string[5];
StF : string[4];
Xob,Yob : Integer;

begin
if IndOK=1 then
begin
ColorRect(ShowBmp,Image1,0,0,672,512,RGB(219,217,209),0);
ColorRect(ShowBmp,Image1,0,0,560,512,RGB(250,255,255),0);
case Nves {IndVes} of
2: begin
if IndScroll=1 then {alf}
begin
alf12:=ScrollPos;
Str(Round(alf12),StrF);
Button3.Caption:='A12 = '+StrF;
Panel1.Caption:='A12 = '+StrF;
end;
if IndScroll=2 then {D}
begin
D12:=ScrollPos/10;
StrF:=FloatToStr(D12);
Button4.Caption:='D12 = '+StrF;
Panel2.Caption:='D12 = '+StrF;
end;
if IndScroll=3 then {K}
begin
if IndK=1 then
begin

```

```

K1n:=ScrollPos;
Str(Round(K1n),StrF);
Button5.Caption:='K1 = '+StrF;
Str(K1n,StD);
Str(V1,StC);
Panel9.Caption:='1 K1='+StD+' V1='+StC;
end;
if IndK=2 then
begin
K2n:=ScrollPos;
Str(Round(K2n),StrF);
Button5.Caption:='K2 = '+StrF;
Str(K2n,StD);
Str(V2,StC);
Panel10.Caption:='2 K2='+StD+' V2='+StC;
end;
end;
if IndScroll=4 then {V}
begin
if IndV=1 then
begin
V1:=ScrollPos;
Str(Round(V1),StrF);
Button6.Caption:='V1 = '+StrF;
Str(K1,StD);
Str(V1,StC);
Panel9.Caption:='1 K1='+StD+' V1='+StC;
end;
if IndV=2 then
begin
V2:=ScrollPos;
Str(Round(V2),StrF);
Button6.Caption:='V2 = '+StrF;
Str(K2,StD);
Str(V2,StC);
Panel10.Caption:='2 K2='+StD+' V2='+StC;
end;
end;
end;

```

```

Xt:=280+Round(45*D12*sin(alf12/57.3));
Yt:=255-Round(45*D12*cos(alf12/57.3));
Xvs:=280-Round(45*D12*sin(alf12/57.3));
Yvs:=255+Round(45*D12*cos(alf12/57.3));

```

```

ShipA(ShowBmp,Image1,2,1,0,Lv,Bv,L1,L2,Xvs,Yvs,Round(K1n),Xt,Yt,Round(K2n),V1,V2,0)
;

```

```

ColorLine(ShowBmp,Image1,Xvs,Yvs,Xt,Yt,RGB(100,140,100),1,0);
ColorLine(ShowBmp,Image1,Xvs,Yvs,Xvs+Round(5*V1*sin(K1n/57.3)),
Yvs-Round(5*V1*cos(K1n/57.3)),RGB(40,40,140),1,0);
ColorLine(ShowBmp,Image1,Xt,Yt,Xt+Round(5*V2*sin(K2n/57.3)),
Yt-Round(5*V2*cos(K2n/57.3)),RGB(140,40,40),1,0);

```

```
{KotVot(Round(K1),Round(K2),Round(V1),Round(V2),Kot,Vot);}
```

```
KotVot(Round(K1n),Round(K2n),Round(V1),Round(V2),Kot,Vot);
Dmin12:=Abs(D12*sin((alf12-Kot)/57.3));
StD:=FloatToStr(Dmin12);
Panel20.Caption:='Dmin12 = '+StD;
if Dmin12<=Dd then
ColorLine(ShowBmp,Image1,Xvs,Yvs,Xvs+Round(200{*D}*sin(Kot/57.3)),
Yvs-Round(200{*D}*cos(Kot/57.3)),RGB(240,40,40),1,0)
else
ColorLine(ShowBmp,Image1,Xvs,Yvs,Xvs+Round(200{*D}*sin(Kot/57.3)),
Yvs-Round(200{*D}*cos(Kot/57.3)),RGB(140,40,140),1,0);

end;
3: begin
if IndScroll=1 then {alf}
begin
case IndA of
1: begin
alf12:=ScrollPos;
Str(Round(alf12),StrF);
Button3.Caption:='A12 = '+StrF;
Panel1.Caption:='A12 = '+StrF;
end;
2: begin
alf13:=ScrollPos;
Str(Round(alf13),StrF);
Button3.Caption:='A13 = '+StrF;
Panel3.Caption:='A13 = '+StrF;
end;
end;
end;

if IndScroll=2 then {D}
begin
case IndD of
1: begin
D12:=ScrollPos/10;
StrF:=FloatToStr(D12);
Button4.Caption:='D12 = '+StrF;
Panel2.Caption:='D12 = '+StrF;
end;
2: begin
D13:=ScrollPos/10;
StrF:=FloatToStr(D13);
Button4.Caption:='D13 = '+StrF;
Panel4.Caption:='D13 = '+StrF;
end;
end;
end;
```

```

end;
if IndScroll=3 then {K}
begin
case IndK of
1: begin
K1n:=ScrollPos;
Str(Round(K1n),StrF);
Button5.Caption:='K1 = '+StrF;
Str(K1n,StD);
Str(V1,StC);
Panel9.Caption:='1 K1='+StD+' V1='+StC;
end;
2: begin
K2n:=ScrollPos;
Str(Round(K2n),StrF);
Button5.Caption:='K2 = '+StrF;
Str(K2n,StD);
Str(V2,StC);
Panel10.Caption:='2 K2='+StD+' V2='+StC;
end;
3: begin
K3n:=ScrollPos;
Str(Round(K3n),StrF);
Button5.Caption:='K3 = '+StrF;
Str(K3n,StD);
Str(V3,StC);
Panel11.Caption:='3 K3='+StD+' V3='+StC;
end;
end;
end;
if IndScroll=4 then {V}
begin
case IndV of
1: begin
V1:=ScrollPos;
Str(Round(V1),StrF);
Button6.Caption:='V1 = '+StrF;
Str(K1,StD);
Str(V1,StC);
Panel9.Caption:='1 K1='+StD+' V1='+StC;
end;
2: begin
V2:=ScrollPos;
Str(Round(V2),StrF);
Button6.Caption:='V2 = '+StrF;
Str(K2,StD);
Str(V2,StC);
Panel10.Caption:='2 K2='+StD+' V2='+StC;
end;
3: begin
V3:=ScrollPos;
Str(Round(V3),StrF);

```

```

Button6.Caption:='V3 = '+StrF;
Str(K3,StD);
Str(V3,StC);
Panel11.Caption:='3 K3='+StD+' V3='+StC;
end;
end;
end;

```

```

X1:=280; Y1:=255;
X2:=280+Round(D12*50*sin(alf12/57.3));
Y2:=255-Round(D12*50*cos(alf12/57.3));
X3:=280+Round(D13*50*sin(alf13/57.3));
Y3:=255-Round(D13*50*cos(alf13/57.3));

```

```

Ship3(ShowBmp,Image1,0,Lv,Bv,L1,L2,X1,Y1,K1n,X2,Y2,K2n,X3,Y3,K3n,V1,V2,V3,0);

```

```

ColorLine(ShowBmp,Image1,X1,Y1,X2,Y2,RGB(100,140,100),1,0);
ColorLine(ShowBmp,Image1,X1,Y1,X3,Y3,RGB(100,140,100),1,0);

```

```

ColorLine(ShowBmp,Image1,X1,Y1,X1+Round(100*sin(K1n/57.3)),
Y1-Round(100*cos(K1n/57.3)),RGB(40,40,140),1,0);
ColorLine(ShowBmp,Image1,X2,Y2,X2+Round(100*sin(K2n/57.3)),
Y2-Round(100*cos(K2n/57.3)),RGB(140,40,40),1,0);
ColorLine(ShowBmp,Image1,X3,Y3,X3+Round(100*sin(K3n/57.3)),
Y3-Round(100*cos(K3n/57.3)),RGB(140,40,40),1,0);

```

```

KotVot(Round(K1n),Round(K2n),Round(V1),Round(V2),Kot,Vot);
Dmin12:=Abs(D12*sin((alf12-Kot)/57.3));
StD:=FloatToStr(Dmin12);
Panel20.Caption:='Dmin12 = '+StD;
if Dmin12<=Dd then
ColorLine(ShowBmp,Image1,X1,Y1,X1+Round(200*sin(Kot/57.3)),
Y1-Round(200*cos(Kot/57.3)),RGB(240,40,40),1,0)
else
ColorLine(ShowBmp,Image1,X1,Y1,X1+Round(200*sin(Kot/57.3)),
Y1-Round(200*cos(Kot/57.3)),RGB(140,40,140),1,0);
KotVot(Round(K1n),Round(K3n),Round(V1),Round(V3),Kot,Vot);
Dmin13:=Abs(D13*sin((alf13-Kot)/57.3));
{StD:=FloatToStr(Dmin12);
Panel20.Caption:='Dmin12 = '+StD;}
if Dmin13<=Dd then
ColorLine(ShowBmp,Image1,X1,Y1,X1+Round(200*sin(Kot/57.3)),
Y1-Round(200*cos(Kot/57.3)),RGB(240,40,40),1,0)
else
ColorLine(ShowBmp,Image1,X1,Y1,X1+Round(200*sin(Kot/57.3)),
Y1-Round(200*cos(Kot/57.3)),RGB(140,40,140),1,0);

alf23:=Pelg(X3-X2,Y2-Y3);
D23:=Distn((X2-280)/50-(X3-280)/50,(Y2-280)/50-(Y3-280)/50);
Str(Round(alf23),StD);

```

```

StF:=FloatToStr(D23);;
Panel12.Caption:='A23='+StD+' D23='+StF;
KotVot(Round(K2n),Round(K3n),Round(V2),Round(V3),Kot,Vot);
Dmin23:=Abs(D23*sin((alf23-Kot)/57.3));
StD:=FloatToStr(Dmin23);
Panel21.Caption:='Dmin23 = '+StD;
end;
4: begin
  if IndScroll=1 then {alf}
    begin
      case IndA of
        1: begin
          alf12:=ScrollPos;
          Str(Round(alf12),StrF);
          Button3.Caption:='A12 = '+StrF;
          Panel1.Caption:='A12 = '+StrF;
          end;
        2: begin
          alf13:=ScrollPos;
          Str(Round(alf13),StrF);
          Button3.Caption:='A13 = '+StrF;
          Panel3.Caption:='A13 = '+StrF;
          end;
        3: begin
          alf14:=ScrollPos;
          Str(Round(alf14),StrF);
          Button3.Caption:='A14 = '+StrF;
          Panel5.Caption:='A14 = '+StrF;
          end;
          end;
        end;
      end;

  if IndScroll=2 then {D}
    begin
      case IndD of
        1: begin
          D12:=ScrollPos/10;
          StrF:=FloatToStr(D12);
          Button4.Caption:='D12 = '+StrF;
          Panel2.Caption:='D12 = '+StrF;
          end;
        2: begin
          D13:=ScrollPos/10;
          StrF:=FloatToStr(D13);
          Button4.Caption:='D13 = '+StrF;
          Panel4.Caption:='D13 = '+StrF;
          end;
        3: begin
          D14:=ScrollPos/10;
          StrF:=FloatToStr(D14);
          Button4.Caption:='D14 = '+StrF;
          Panel6.Caption:='D14 = '+StrF;

```

```

    end;
    end;
end;
if IndScroll=3 then {K}
begin
  case IndK of
1: begin
    K1n:=ScrollPos;
    Str(Round(K1n),StrF);
    Button5.Caption:='K1 = '+StrF;
    Str(K1n,StD);
    Str(V1,StC);
    Panel9.Caption:='1 K1='+StD+' V1='+StC;
    end;
2: begin
    K2n:=ScrollPos;
    Str(Round(K2n),StrF);
    Button5.Caption:='K2 = '+StrF;
    Str(K2n,StD);
    Str(V2,StC);
    Panel10.Caption:='2 K2='+StD+' V2='+StC;
    end;
3: begin
    K3n:=ScrollPos;
    Str(Round(K3n),StrF);
    Button5.Caption:='K3 = '+StrF;
    Str(K3n,StD);
    Str(V3,StC);
    Panel11.Caption:='3 K3='+StD+' V3='+StC;
    end;
4: begin
    K4n:=ScrollPos;
    Str(Round(K4n),StrF);
    Button5.Caption:='K4 = '+StrF;
    Str(K4n,StD);
    Str(V4,StC);
    Panel13.Caption:='4 K4='+StD+' V4='+StC;
    end;
    end;
end;
if IndScroll=4 then {V}
begin
  case IndV of
1: begin
    V1:=ScrollPos;
    Str(Round(V1),StrF);
    Button6.Caption:='V1 = '+StrF;
    Str(K1,StD);
    Str(V1,StC);
    Panel9.Caption:='1 K1='+StD+' V1='+StC;
    end;
2: begin

```

```

V2:=ScrollPos;
Str(Round(V2),StrF);
Button6.Caption:='V2 = '+StrF;
Str(K2,StD);
Str(V2,StC);
Panel10.Caption:='2 K2='+StD+' V2='+StC;
end;
3: begin
V3:=ScrollPos;
Str(Round(V3),StrF);
Button6.Caption:='V3 = '+StrF;
Str(K3,StD);
Str(V3,StC);
Panel11.Caption:='3 K3='+StD+' V3='+StC;
end;
4: begin
V4:=ScrollPos;
Str(Round(V4),StrF);
Button6.Caption:='V4 = '+StrF;
Str(K4,StD);
Str(V4,StC);
Panel13.Caption:='4 K4='+StD+' V4='+StC;
end;
end;
end;

```

```

X1:=280; Y1:=255;
X2:=280+Round(D12*50*sin(alf12/57.3));
Y2:=255-Round(D12*50*cos(alf12/57.3));
X3:=280+Round(D13*50*sin(alf13/57.3));
Y3:=255-Round(D13*50*cos(alf13/57.3));
X4:=280+Round(D14*50*sin(alf14/57.3));
Y4:=255-Round(D14*50*cos(alf14/57.3));

```

```

Ship4(ShowBmp,Image1,0,Lv,Bv,L1,L2,X1,Y1,K1n,X2,Y2,K2n,X3,Y3,K3n,X4,Y4,K4n,V1,V
2,V3,V4,0);

```

```

ColorLine(ShowBmp,Image1,X1,Y1,X2,Y2,RGB(100,140,100),1,0);
ColorLine(ShowBmp,Image1,X1,Y1,X3,Y3,RGB(100,140,100),1,0);
ColorLine(ShowBmp,Image1,X1,Y1,X4,Y4,RGB(100,140,100),1,0);

```

```

ColorLine(ShowBmp,Image1,X1,Y1,X1+Round(100*sin(K1n/57.3)),
Y1-Round(100*cos(K1n/57.3)),RGB(40,40,140),1,0);
ColorLine(ShowBmp,Image1,X2,Y2,X2+Round(100*sin(K2n/57.3)),
Y2-Round(100*cos(K2n/57.3)),RGB(140,40,40),1,0);
ColorLine(ShowBmp,Image1,X3,Y3,X3+Round(100*sin(K3n/57.3)),
Y3-Round(100*cos(K3n/57.3)),RGB(140,40,40),1,0);
ColorLine(ShowBmp,Image1,X4,Y4,X4+Round(100*sin(K4n/57.3)),
Y4-Round(100*cos(K4n/57.3)),RGB(140,40,40),1,0);

```

```

KotVot(Round(K1n),Round(K2n),Round(V1),Round(V2),Kot,Vot);

```

```

Dmin12:=Abs(D12*sin((alf12-Kot)/57.3));
StD:=FloatToStr(Dmin12);
Panel20.Caption:='Dmin12 = '+StD;
if Dmin12<=Dd then
ColorLine(ShowBmp,Image1,X1,Y1,X1+Round(200*sin(Kot/57.3)),
Y1-Round(200*cos(Kot/57.3)),RGB(240,40,40),1,0)
else
ColorLine(ShowBmp,Image1,X1,Y1,X1+Round(200*sin(Kot/57.3)),
Y1-Round(200*cos(Kot/57.3)),RGB(140,40,140),1,0);

KotVot(Round(K1n),Round(K3n),Round(V1),Round(V3),Kot,Vot);
Dmin13:=Abs(D13*sin((alf13-Kot)/57.3));
if Dmin13<=Dd then
ColorLine(ShowBmp,Image1,X1,Y1,X1+Round(200*sin(Kot/57.3)),
Y1-Round(200*cos(Kot/57.3)),RGB(240,40,40),1,0)
else
ColorLine(ShowBmp,Image1,X1,Y1,X1+Round(200*sin(Kot/57.3)),
Y1-Round(200*cos(Kot/57.3)),RGB(140,40,140),1,0);

KotVot(Round(K1n),Round(K4n),Round(V1),Round(V4),Kot,Vot);
Dmin14:=Abs(D14*sin((alf14-Kot)/57.3));
if Dmin14<=Dd then
ColorLine(ShowBmp,Image1,X1,Y1,X1+Round(200*sin(Kot/57.3)),
Y1-Round(200*cos(Kot/57.3)),RGB(240,40,40),1,0)
else
ColorLine(ShowBmp,Image1,X1,Y1,X1+Round(200*sin(Kot/57.3)),
Y1-Round(200*cos(Kot/57.3)),RGB(140,40,140),1,0);

alf23:=Pelg(X3-X2,Y2-Y3);
D23:=Distn((X2-280)/50-(X3-280)/50,(Y2-280)/50-(Y3-280)/50);
Str(Round(alf23),StD);
StF:=FloatToStr(D23);
Panel12.Caption:='A23='+StD+' D23='+StF;
KotVot(Round(K2n),Round(K3n),Round(V2),Round(V3),Kot,Vot);
Dmin23:=Abs(D23*sin((alf23-Kot)/57.3));
StD:=FloatToStr(Dmin23);
Panel21.Caption:='Dmin23 = '+StD;

alf24:=Pelg(X4-X2,Y2-Y4);
D24:=Distn((X2-280)/50-(X4-280)/50,(Y2-280)/50-(Y4-280)/50);
Str(Round(alf24),StD);
StF:=FloatToStr(D24);
Panel14.Caption:='A24='+StD+' D24='+StF;
KotVot(Round(K2n),Round(K4n),Round(V2),Round(V4),Kot,Vot);
Dmin24:=Abs(D24*sin((alf24-Kot)/57.3));

alf34:=Pelg(X4-X3,Y3-Y4);
D34:=Distn((X3-280)/50-(X4-280)/50,(Y3-280)/50-(Y4-280)/50);
Str(Round(alf34),StD);
StF:=FloatToStr(D34);
Panel15.Caption:='A34='+StD+' D34='+StF;
KotVot(Round(K3n),Round(K4n),Round(V3),Round(V4),Kot,Vot);

```

```

Dmin34:=Abs(D34*sin((alf34-Kot)/57.3));
StD:=FloatToStr(Dmin34);
Panel22.Caption:='Dmin34 = '+StD;
end;
5: begin
  if IndScroll=1 then {alf}
    begin
      case IndA of
        1: begin
            alf12:=ScrollPos;
            Str(Round(alf12),StrF);
            Button3.Caption:='A12 = '+StrF;
            Panel1.Caption:='A12 = '+StrF;
            end;
          2: begin
            alf13:=ScrollPos;
            Str(Round(alf13),StrF);
            Button3.Caption:='A13 = '+StrF;
            Panel3.Caption:='A13 = '+StrF;
            end;
          3: begin
            alf14:=ScrollPos;
            Str(Round(alf14),StrF);
            Button3.Caption:='A14 = '+StrF;
            Panel5.Caption:='A14 = '+StrF;
            end;
          4: begin
            alf15:=ScrollPos;
            Str(Round(alf15),StrF);
            Button3.Caption:='A15 = '+StrF;
            Panel7.Caption:='A15 = '+StrF;
            end;
        end;
      end;
    end;

  if IndScroll=2 then {D}
    begin
      case IndD of
        1: begin
            D12:=ScrollPos/10;
            StrF:=FloatToStr(D12);
            Button4.Caption:='D12 = '+StrF;
            Panel2.Caption:='D12 = '+StrF;
            end;
          2: begin
            D13:=ScrollPos/10;
            StrF:=FloatToStr(D13);
            Button4.Caption:='D13 = '+StrF;
            Panel4.Caption:='D13 = '+StrF;
            end;
          3: begin
            D14:=ScrollPos/10;

```

```

    StrF:=FloatToStr(D14);
    Button4.Caption:='D14 = '+StrF;
    Panel6.Caption:='D14 = '+StrF;
    end;
4: begin
    D15:=ScrollPos/10;
    StrF:=FloatToStr(D15);
    Button4.Caption:='D15 = '+StrF;
    Panel8.Caption:='D15 = '+StrF;
    end;
    end;
end;
if IndScroll=3 then {K}
begin
case IndK of
1: begin
    K1n:=ScrollPos;
    Str(Round(K1n),StrF);
    Button5.Caption:='K1 = '+StrF;
    Str(K1n,StD);
    Str(V1,StC);
    Panel9.Caption:='1 K1='+StD+' V1='+StC;
    end;
2: begin
    K2n:=ScrollPos;
    Str(Round(K2n),StrF);
    Button5.Caption:='K2 = '+StrF;
    Str(K2n,StD);
    Str(V2,StC);
    Panel10.Caption:='2 K2='+StD+' V2='+StC;
    end;
3: begin
    K3n:=ScrollPos;
    Str(Round(K3n),StrF);
    Button5.Caption:='K3 = '+StrF;
    Str(K3n,StD);
    Str(V3,StC);
    Panel11.Caption:='3 K3='+StD+' V3='+StC;
    end;
4: begin
    K4n:=ScrollPos;
    Str(Round(K4n),StrF);
    Button5.Caption:='K4 = '+StrF;
    Str(K4n,StD);
    Str(V4,StC);
    Panel13.Caption:='4 K4='+StD+' V4='+StC;
    end;
5: begin
    K5n:=ScrollPos;
    Str(Round(K5n),StrF);
    Button5.Caption:='K5 = '+StrF;
    Str(K5n,StD);

```

```

    Str(V5,StC);
    Panel16.Caption:='5 K5='+StD+' V5='+StC;
end;
end;
end;
if IndScroll=4 then {V}
begin
case IndV of
1: begin
    V1:=ScrollPos;
    Str(Round(V1),StrF);
    Button6.Caption:='V1 = '+StrF;
    Str(K1,StD);
    Str(V1,StC);
    Panel9.Caption:='1 K1='+StD+' V1='+StC;
end;
2: begin
    V2:=ScrollPos;
    Str(Round(V2),StrF);
    Button6.Caption:='V2 = '+StrF;
    Str(K2,StD);
    Str(V2,StC);
    Panel10.Caption:='2 K2='+StD+' V2='+StC;
end;
3: begin
    V3:=ScrollPos;
    Str(Round(V3),StrF);
    Button6.Caption:='V3 = '+StrF;
    Str(K3,StD);
    Str(V3,StC);
    Panel11.Caption:='3 K3='+StD+' V3='+StC;
end;
4: begin
    V4:=ScrollPos;
    Str(Round(V4),StrF);
    Button6.Caption:='V4 = '+StrF;
    Str(K4,StD);
    Str(V4,StC);
    Panel13.Caption:='4 K4='+StD+' V4='+StC;
end;
5: begin
    V5:=ScrollPos;
    Str(Round(V5),StrF);
    Button6.Caption:='V5 = '+StrF;
    Str(K5,StD);
    Str(V5,StC);
    Panel16.Caption:='5 K5='+StD+' V5='+StC;
end;
end;
end;
end;

```

```

X1:=280; Y1:=255;
X2:=280+Round(D12*50*sin(alf12/57.3));
Y2:=255-Round(D12*50*cos(alf12/57.3));
X3:=280+Round(D13*50*sin(alf13/57.3));
Y3:=255-Round(D13*50*cos(alf13/57.3));
X4:=280+Round(D14*50*sin(alf14/57.3));
Y4:=255-Round(D14*50*cos(alf14/57.3));
X5:=280+Round(D15*50*sin(alf15/57.3));
Y5:=255-Round(D15*50*cos(alf15/57.3));

```

```

Ship5(ShowBmp,Image1,0,Lv,Bv,L1,L2,X1,Y1,K1n,X2,Y2,K2n,X3,Y3,K3n,X4,Y4,K4n,
X5,Y5,K5n,V1,V2,V3,V4,V5,0);

```

```

ColorLine(ShowBmp,Image1,X1,Y1,X2,Y2,RGB(100,140,100),1,0);
ColorLine(ShowBmp,Image1,X1,Y1,X3,Y3,RGB(100,140,100),1,0);
ColorLine(ShowBmp,Image1,X1,Y1,X4,Y4,RGB(100,140,100),1,0);
ColorLine(ShowBmp,Image1,X1,Y1,X5,Y5,RGB(100,140,100),1,0);

```

```

ColorLine(ShowBmp,Image1,X1,Y1,X1+Round(100*sin(K1n/57.3)),
Y1-Round(100*cos(K1n/57.3)),RGB(40,40,140),1,0);
ColorLine(ShowBmp,Image1,X2,Y2,X2+Round(100*sin(K2n/57.3)),
Y2-Round(100*cos(K2n/57.3)),RGB(140,40,40),1,0);
ColorLine(ShowBmp,Image1,X3,Y3,X3+Round(100*sin(K3n/57.3)),
Y3-Round(100*cos(K3n/57.3)),RGB(140,40,40),1,0);
ColorLine(ShowBmp,Image1,X4,Y4,X4+Round(100*sin(K4n/57.3)),
Y4-Round(100*cos(K4n/57.3)),RGB(140,40,40),1,0);
ColorLine(ShowBmp,Image1,X5,Y5,X5+Round(100*sin(K5n/57.3)),
Y5-Round(100*cos(K5n/57.3)),RGB(140,40,40),1,0);

```

```

KotVot(Round(K1n),Round(K2n),Round(V1),Round(V2),Kot,Vot);
Dmin12:=Abs(D12*sin((alf12-Kot)/57.3));
StD:=FloatToStr(Dmin12);
Panel20.Caption:='Dmin12 = '+StD;
if Dmin12<=Dd then
ColorLine(ShowBmp,Image1,X1,Y1,X1+Round(200*sin(Kot/57.3)),
Y1-Round(200*cos(Kot/57.3)),RGB(240,40,40),1,0)
else
ColorLine(ShowBmp,Image1,X1,Y1,X1+Round(200*sin(Kot/57.3)),
Y1-Round(200*cos(Kot/57.3)),RGB(140,40,140),1,0);

```

```

KotVot(Round(K1n),Round(K3n),Round(V1),Round(V3),Kot,Vot);
Dmin13:=Abs(D13*sin((alf13-Kot)/57.3));
if Dmin13<=Dd then
ColorLine(ShowBmp,Image1,X1,Y1,X1+Round(200*sin(Kot/57.3)),
Y1-Round(200*cos(Kot/57.3)),RGB(240,40,40),1,0)
else
ColorLine(ShowBmp,Image1,X1,Y1,X1+Round(200*sin(Kot/57.3)),
Y1-Round(200*cos(Kot/57.3)),RGB(140,40,140),1,0);

```

```

KotVot(Round(K1n),Round(K4n),Round(V1),Round(V4),Kot,Vot);
Dmin14:=Abs(D14*sin((alf14-Kot)/57.3));
if Dmin14<=Dd then
ColorLine(ShowBmp,Image1,X1,Y1,X1+Round(200*sin(Kot/57.3)),
  Y1-Round(200*cos(Kot/57.3)),RGB(240,40,40),1,0)
else
ColorLine(ShowBmp,Image1,X1,Y1,X1+Round(200*sin(Kot/57.3)),
  Y1-Round(200*cos(Kot/57.3)),RGB(140,40,140),1,0);
KotVot(Round(K1n),Round(K5n),Round(V1),Round(V5),Kot,Vot);
Dmin15:=Abs(D15*sin((alf15-Kot)/57.3));
if Dmin15<=Dd then
ColorLine(ShowBmp,Image1,X1,Y1,X1+Round(200*sin(Kot/57.3)),
  Y1-Round(200*cos(Kot/57.3)),RGB(240,40,40),1,0)
else
ColorLine(ShowBmp,Image1,X1,Y1,X1+Round(200*sin(Kot/57.3)),
  Y1-Round(200*cos(Kot/57.3)),RGB(140,40,140),1,0);

alf23:=Pelg(X3-X2,Y2-Y3);
D23:=Distn((X2-280)/50-(X3-280)/50,(Y2-280)/50-(Y3-280)/50);
Str(Round(alf23),StD);
StF:=FloatToStr(D23);
Panel12.Caption:='A23='+StD+' D23='+StF;
KotVot(Round(K2n),Round(K3n),Round(V2),Round(V3),Kot,Vot);
Dmin23:=Abs(D23*sin((alf23-Kot)/57.3));
StD:=FloatToStr(Dmin23);
Panel21.Caption:='Dmin23 = '+StD;

alf24:=Pelg(X4-X2,Y2-Y4);
D24:=Distn((X2-280)/50-(X4-280)/50,(Y2-280)/50-(Y4-280)/50);
Str(Round(alf24),StD);
StF:=FloatToStr(D24);
Panel14.Caption:='A24='+StD+' D24='+StF;
KotVot(Round(K2n),Round(K4n),Round(V2),Round(V4),Kot,Vot);
Dmin24:=Abs(D24*sin((alf24-Kot)/57.3));

alf25:=Pelg(X5-X2,Y2-Y5);
D25:=Distn((X2-280)/50-(X5-280)/50,(Y2-280)/50-(Y5-280)/50);
Str(Round(alf25),StD);
StF:=FloatToStr(D25);
Panel17.Caption:='A25='+StD+' D25='+StF;
KotVot(Round(K2n),Round(K5n),Round(V2),Round(V5),Kot,Vot);
Dmin25:=Abs(D25*sin((alf25-Kot)/57.3));

alf34:=Pelg(X4-X3,Y3-Y4);
D34:=Distn((X3-280)/50-(X4-280)/50,(Y3-280)/50-(Y4-280)/50);
Str(Round(alf34),StD);
StF:=FloatToStr(D34);
Panel12.Caption:='A34='+StD+' D34='+StF;
KotVot(Round(K3n),Round(K4n),Round(V3),Round(V4),Kot,Vot);
Dmin34:=Abs(D34*sin((alf34-Kot)/57.3));
StD:=FloatToStr(Dmin34);
Panel22.Caption:='Dmin34 = '+StD;

```

```

alf35:=Pelg(X5-X3,Y3-Y5);
D35:=Distn((X3-280)/50-(X5-280)/50,(Y3-280)/50-(Y5-280)/50);
Str(Round(alf35),StD);
StF:=FloatToStr(D35);;
Panel18.Caption:='A35='+StD+' D35='+StF;
KotVot(Round(K3n),Round(K5n),Round(V3),Round(V5),Kot,Vot);
Dmin35:=Abs(D35*sin((alf35-Kot)/57.3));

alf45:=Pelg(X5-X4,Y4-Y5);
D45:=Distn((X4-280)/50-(X5-280)/50,(Y4-280)/50-(Y5-280)/50);
Str(Round(alf45),StD);
StF:=FloatToStr(D45);;
Panel19.Caption:='A45='+StD+' D45='+StF;
KotVot(Round(K4n),Round(K5n),Round(V4),Round(V5),Kot,Vot);
Dmin45:=Abs(D45*sin((alf45-Kot)/57.3));
StD:=FloatToStr(Dmin45);
Panel23.Caption:='Dmin45 = '+StD;
end;
end; { case}

Danger(ShowBmp,Image1,Nves,K1n,K2n,K3n,K4n,K5n,K6n,V1,V2,V3,V4,V5,V6,alf12,alf13,
alf14,alf15,alf16,D12,D13,D14,D15,D16,w12,w13,w14,w15,w16,w23,w24,w25,w26,
w34,w35,w36,w45,w46,w56);

K1:=K1n; K2:=K2n; K3:=K3n; K4:=K4n; K5:=K5n; K6:=K6n;

end;

if IndOK=2 then
begin
if (IndAB=0) or (Nves=2) then
begin
if IndScroll=1 then
begin
Ks1:=ScrollPos;
Str(Round(Ks1),StrF);
Button3.Caption:='K'+StV1+'='+'+StrF;
end;
if IndScroll=2 then
begin
Ks2:=ScrollPos;
Str(Round(Ks2),StrF);
Button4.Caption:='K'+StV2+'='+'+StrF;
end;

Image1.Canvas.CopyRect(Rect(70,5,670,510),
ShowBmp.Canvas,Rect(70,5,670,510));

Xn:=Round(237+Ks2*0.65);
Yn:=Round(371-Ks1*0.65);

```

```

ColorLine(ShowBmp,Image1,Xn,20{137},Xn,488{371},RGB(250,20,20),1,0);
ColorLine(ShowBmp,Image1,120{237},Yn,588{471},Yn,RGB(20,210,20),1,0);

if Ks1>180 then
  begin
    Yn:=Round(488-(Ks1-180)*0.65);
    ColorLine(ShowBmp,Image1,120{237},Yn,588{471},Yn,RGB(150,210,150),1,0);
  end
else
  begin
    Yn:=Round(20+(180-Ks1)*0.65);
    ColorLine(ShowBmp,Image1,120{237},Yn,588{471},Yn,RGB(150,210,150),1,0);
  end;

if Ks2>180 then
  begin
    Xn:=Round(120+(Ks2-180)*0.65);
    ColorLine(ShowBmp,Image1,Xn,20{137},Xn,488{371},RGB(250,150,150),1,0);
  end
else
  begin
    Xn:=Round(587-(180-Ks2)*0.65);
    ColorLine(ShowBmp,Image1,Xn,20{137},Xn,488{371},RGB(250,150,150),1,0);
  end;

with Image1.Canvas do
  begin
    Font.Color:=TColor(RGB(20,30,80));
    Font.Size:=10;
    Brush.Style:=bsClear;
    KotVot(Ks1,Ks2,Vs1,Vs2,Kot,Vot);
    Lm:=Abs(D*sin((alf-Kot)/57.3));
    StF:=FloatToStr(Lm);
    TextOut(515,455,'Dmin= '+StF);
  end;

if Ks1>Ks1n then Str(Abs(Ks1-Ks1n),StF)
else Str(360-Abs(Cour(Ks1-Ks1n)),StF);
Panel3.Caption:='DeltK'+StV1+'= '+StF;

if Ks2>Ks2n then Str(Abs(Ks2-Ks2n),StF)
else Str(360-Abs(Cour(Ks2-Ks2n)),StF);
Panel4.Caption:='Delt'+StV2+'= '+StF;

if Nves=2 then
  begin
    K1:=Ks1; K2:=Ks2;
  end
else
  begin
    case IndCh of
      12 : begin K1:=Ks1; K2:=Ks2; end;
    end;
  end;

```

```

13 : begin K1:=Ks1; K3:=Ks2; end;
23 : begin K2:=Ks1; K3:=Ks2; end;
14 : begin K1:=Ks1; K4:=Ks2; end;
24 : begin K2:=Ks1; K4:=Ks2; end;
34 : begin K3:=Ks1; K4:=Ks2; end;
15 : begin K1:=Ks1; K5:=Ks2; end;
25 : begin K2:=Ks1; K5:=Ks2; end;
35 : begin K3:=Ks1; K5:=Ks2; end;
45 : begin K4:=Ks1; K5:=Ks2; end;
end;

```

```

with Image1.Canvas do
begin
Font.Size:=10;
Font.Style:=[];
Brush.Color:=TColor(RGB(255,255,255));
Font.Color:=TColor(RGB(120,30,20));
Str(K1,StC);
TextOut(605,30,'K1 = '+StC);
Str(K2,StC);
TextOut(605,60,'K2 = '+StC);
Str(K3,StC);
TextOut(605,90,'K3 = '+StC);
if Nves>3 then
begin
Str(K4,StC);
TextOut(605,120,'K4 = '+StC);
end;
if Nves>4 then
begin
Str(K5,StC);
TextOut(605,150,'K5 = '+StC);
end;
end;
end;

```

```

Danger(ShowBmp,Image1,Nves,K1,K2,K3,K4,K5,K6,V1,V2,V3,V4,V5,V6,alf12,
alf13,alf14,alf15,alf16,D12,D13,D14,D15,D16,w12,w13,w14,w15,w16,w23,w24,
w25,w26,w34,w35,w36,w45,w46,w56);
if w12+w13+w14+w15+w23+w24+w25+w34+w35+w45=0 then
Button14.Enabled:=True
else Button14.Enabled:=False;
end;

```

```

case IndVes of
1: begin
if IndScroll=1 then
begin
K1:=ScrollPos;
Str(Round(K1),StrF);
Button3.Caption:='K1 = '+StrF;
end;

```

```

if IndScroll=2 then
begin
K2:=ScrollPos;
Str(Round(K2),StrF);
Button4.Caption:='K2 = '+StrF;
end;

Image1.Canvas.CopyRect(Rect(70,5,670,510),
ShowBmp.Canvas,Rect(70,5,670,510));

Xn:=Round(237+K2*0.65);
Yn:=Round(371-K1*0.65);
ColorLine(ShowBmp,Image1,Xn,20{137},Xn,488{371},RGB(250,20,20),1,0);
ColorLine(ShowBmp,Image1,120{237},Yn,588{471},Yn,RGB(20,210,20),1,0);

if K1>180 then
begin
Yn:=Round(488-(K1-180)*0.65);
ColorLine(ShowBmp,Image1,120{237},Yn,588{471},Yn,RGB(150,210,150),1,0);
end
else
begin
Yn:=Round(20+(180-K1)*0.65);
ColorLine(ShowBmp,Image1,120{237},Yn,588{471},Yn,RGB(150,210,150),1,0);
end;

if K2>180 then
begin
Xn:=Round(120+(K2-180)*0.65);
ColorLine(ShowBmp,Image1,Xn,20{137},Xn,488{371},RGB(250,150,150),1,0);
end
else
begin
Xn:=Round(587-(180-K2)*0.65);
ColorLine(ShowBmp,Image1,Xn,20{137},Xn,488{371},RGB(250,150,150),1,0);
end;

with Image1.Canvas do
begin
Font.Color:=TColor(RGB(20,30,80));
Font.Size:=10;
Brush.Style:=bsClear;
KotVot(K1,K2,Vs1,Vs2,Kot,Vot);
Lm:=Abs(D*sin((alf-Kot)/57.3));
StF:=FloatToStr(Lm);
TextOut(515,455,'Dmin= '+StF);
end;
if K1>K1n then Str(Abs(K1-K1n),StF)
else Str(360-Abs(Cour(K1-K1n)),StF);
Panel3.Caption:='DeltK1= '+StF;

if K2>K2n then Str(Abs(K2-K2n),StF)

```

```

else Str(360-Abs(Cour(K2-K2n)),StF);
Panel4.Caption:='DeltK2= '+StF;
end;

```

```

2: begin
  if IndScroll=1 then
    begin
      K1:=ScrollPos;
      Str(Round(K1),StF);
      Button3.Caption:='K1 = '+StF;
    end;
  if IndScroll=2 then
    begin
      K2:=ScrollPos;
      Str(Round(K2),StF);
      Button4.Caption:='K2 = '+StF;
    end;
  if IndScroll=3 then
    begin
      K3:=ScrollPos;
      Str(Round(K3),StF);
      Button5.Caption:='K3 = '+StF;
    end;

```

```

Image1.Canvas.CopyRect(Rect(70,5,670,510),
ShowBmp.Canvas,Rect(70,5,670,510));

```

```

{Yn:=Round(194-0.5*K1*0.65);
ColorLine(ShowBmp,Image1,120,Yn,588,Yn,RGB(10,210,10),1,0);
Xn:=Round(412+0.5*K2*0.65);
ColorLine(ShowBmp,Image1,Xn,20,Xn,488,RGB(250,10,10),1,0);
Yn:=Round(430-0.5*K3*0.65);
ColorLine(ShowBmp,Image1,120,Yn,588,Yn,RGB(10,10,250),1,0);
Xn:=Round(180+0.5*K3*0.65);
ColorLine(ShowBmp,Image1,Xn,20,Xn,488,RGB(10,10,250),1,0);}

```

```

Yn:=Round(194-0.5*K1*0.65);
ColorLine(ShowBmp,Image1,120,Yn,588,Yn,RGB(10,210,10),1,0);
Xn:=Round(412+0.5*K2*0.65);
ColorLine(ShowBmp,Image1,Xn,20,Xn,253,RGB(250,10,10),1,0);
Yn:=Round(430-0.5*K2*0.65);
ColorLine(ShowBmp,Image1,120,Yn,588,Yn,RGB(250,10,10),1,0);
Xn:=Round(412+0.5*K3*0.65);
ColorLine(ShowBmp,Image1,Xn,253,Xn,488,RGB(10,10,250),1,0);
Xn:=Round(180+0.5*K3*0.65);
ColorLine(ShowBmp,Image1,Xn,20,Xn,253,RGB(10,10,250),1,0);

```

```

if K1>180 then
  begin
    Yn:=Round(253-(K1-180)*0.65*0.5);
    ColorLine(ShowBmp,Image1,120{237},Yn,588{471},Yn,RGB(150,210,150),1,0);
  end

```

```

else
begin
Yn:=Round(20+(180-K1)*0.65*0.5);
ColorLine(ShowBmp,Image1,120{237},Yn,588{471},Yn,RGB(150,210,150),1,0);
end;

if K2>180 then
begin
Xn:=Round(353+(K2-180)*0.65*0.5);
ColorLine(ShowBmp,Image1,Xn,20{137},Xn,253{371},RGB(250,150,150),1,0);
Yn:=Round(488-(K2-180)*0.65*0.5);
ColorLine(ShowBmp,Image1,120{237},Yn,588{471},Yn,RGB(250,150,150),1,0);
end
else
begin
Xn:=Round(587-(180-K2)*0.65*0.5);
ColorLine(ShowBmp,Image1,Xn,20{137},Xn,253{371},RGB(250,150,150),1,0);
Yn:=Round(253+(180-K2)*0.65*0.5);
ColorLine(ShowBmp,Image1,120{237},Yn,588{471},Yn,RGB(250,150,150),1,0);
end;

(*if K3>180 then
begin
Yn:=Round(488-(K3-180)*0.65*0.5);
ColorLine(ShowBmp,Image1,120{237},Yn,588{471},Yn,RGB(150,150,250),1,0);
end
else
begin
Yn:=Round(253+(180-K3)*0.65*0.5);
ColorLine(ShowBmp,Image1,120{237},Yn,588{471},Yn,RGB(150,150,250),1,0);
end;*)

if K3>180 then
begin
Xn:=Round(120+(K3-180)*0.65*0.5);
ColorLine(ShowBmp,Image1,Xn,20{137},Xn,253{371},RGB(150,150,250),1,0);
Xn:=Round(353+(K3-180)*0.65*0.5);
ColorLine(ShowBmp,Image1,Xn,253{371},Xn,488{371},RGB(150,150,250),1,0);
end
else
begin
Xn:=Round(353-(180-K3)*0.65*0.5);
ColorLine(ShowBmp,Image1,Xn,20{137},Xn,253{371},RGB(150,150,250),1,0);
Xn:=Round(587-(180-K3)*0.65*0.5);
ColorLine(ShowBmp,Image1,Xn,253{371},Xn,488{371},RGB(150,150,250),1,0);
end;

with Image1.Canvas do
begin
Font.Color:=TColor(RGB(20,30,80));
Font.Size:=10;

```

```

Brush.Style:=bsClear;
KotVot(K1,K2,V1,V2,Kot,Vot);
Lm:=Abs(D12*sin((alf12-Kot)/57.3));
StF:=FloatToStr(Lm);
TextOut(361,225,'Dmin12= '+StF);

KotVot(K1,K3,V1,V3,Kot,Vot);
Lm:=Abs(D13*sin((alf13-Kot)/57.3));
StF:=FloatToStr(Lm);
TextOut(130,225,'Dmin13= '+StF);

KotVot(K2,K3,V2,V3,Kot,Vot);
Lm:=Abs(D23*sin((alf23-Kot)/57.3));
StF:=FloatToStr(Lm);
TextOut(361,455,'Dmin23= '+StF);
end;

if K1>K1n then Str(Abs(K1-K1n),StF)
else Str(360-Abs(Cour(K1-K1n)),StF);
Panel3.Caption:='DeltK1= '+StF;

if K2>K2n then Str(Abs(K2-K2n),StF)
else Str(360-Abs(Cour(K2-K2n)),StF);
Panel4.Caption:='DeltK2= '+StF;

if K3>K3n then Str(Abs(K3-K3n),StF)
else Str(360-Abs(Cour(K3-K3n)),StF);
Panel5.Caption:='DeltK1= '+StF;

end;
3: begin
if IndScroll=1 then
begin
K1:=ScrollPos;
Str(Round(K1),StF);
Button3.Caption:='K1 = '+StF;
end;
if IndScroll=2 then
begin
K2:=ScrollPos;
Str(Round(K2),StF);
Button4.Caption:='K2 = '+StF;
end;
if IndScroll=3 then
begin
K3:=ScrollPos;
Str(Round(K3),StF);
Button5.Caption:='K3 = '+StF;
end;
if IndScroll=4 then
begin

```

```

K4:=ScrollPos;
Str(Round(K4),StrF);
Button6.Caption:='K4 = '+StrF;
end;

```

```

Image1.Canvas.CopyRect(Rect(45,50,660,460),
ShowBmp.Canvas,Rect(45,50,660,460));

```

```

Yn:=Round(204-0.423*K1*0.65);
ColorLine(ShowBmp,Image1,54,Yn,646,Yn,RGB(10,200,10),1,0);
Xn:=Round(103+0.423*K2*0.65);
ColorLine(ShowBmp,Image1,Xn,57,Xn,255{452},RGB(250,10,10),1,0);
Yn:=Round(403-0.423*K2*0.65);
ColorLine(ShowBmp,Image1,449,Yn,646,Yn,RGB(250,10,10),1,0);
Xn:=Round(301+0.423*K2*0.65);
ColorLine(ShowBmp,Image1,Xn,255{57},Xn,452,RGB(10,10,250),1,0);

```

```

Xn:=Round(103+0.423*K3*0.65);
ColorLine(ShowBmp,Image1,Xn,255,Xn,452,RGB(10,10,250),1,0);

```

```

Xn:=Round(301+0.423*K3*0.65);
ColorLine(ShowBmp,Image1,Xn,57,Xn,452,RGB(10,10,250),1,0);
Yn:=Round(403-0.423*K2{K3}*0.65);
ColorLine(ShowBmp,Image1,54,Yn,251,Yn,RGB(10,10,250),1,0);
Xn:=Round(499+0.423*K4*0.65);
ColorLine(ShowBmp,Image1,Xn,57,Xn,452,RGB(250,10,250),1,0);
Yn:=Round(403-0.423*K4*0.65);
ColorLine(ShowBmp,Image1,251,Yn,449,Yn,RGB(250,10,250),1,0);

```

```

if K1>180 then
begin
Yn:=Round(255-(K1-180)*0.65*0.423);
ColorLine(ShowBmp,Image1,54,Yn,646,Yn,RGB(150,200,150),1,0);
end
else
begin
Yn:=Round(57+(180-K1)*0.65*0.423);
ColorLine(ShowBmp,Image1,54,Yn,646,Yn,RGB(150,200,150),1,0);
end;

```

```

if K2>180 then
begin
Xn:=Round(53+(K2-180)*0.65*0.423);
ColorLine(ShowBmp,Image1,Xn,57,Xn,452,RGB(250,150,150),1,0);
Yn:=Round(453-0.423*(K2-180)*0.65);
ColorLine(ShowBmp,Image1,449,Yn,646,Yn,RGB(250,150,150),1,0);
end
else
begin
Xn:=Round(251-(180-K2)*0.65*0.423);

```

```

ColorLine>ShowBmp,Image1,Xn,57,Xn,452,RGB(250,150,150),1,0);
Yn:=Round(256+0.423*(180-K2)*0.65);
ColorLine>ShowBmp,Image1,449,Yn,646,Yn,RGB(250,150,150),1,0);
end;

```

```

if K3>180 then

```

```

begin
Xn:=Round(251+(K3-180)*0.65*0.423);
ColorLine>ShowBmp,Image1,Xn,57,Xn,452,RGB(150,150,250),1,0);
Yn:=Round(453-0.423*(K3-180)*0.65);
ColorLine>ShowBmp,Image1,53,Yn,251,Yn,RGB(150,150,250),1,0);
end

```

```

else

```

```

begin
Xn:=Round(449-(180-K3)*0.65*0.423);
ColorLine>ShowBmp,Image1,Xn,57,Xn,452,RGB(150,150,250),1,0);
Yn:=Round(256+0.423*(180-K3)*0.65);
ColorLine>ShowBmp,Image1,53,Yn,251,Yn,RGB(150,150,250),1,0);
end;

```

```

if K4>180 then

```

```

begin
Xn:=Round(449+(K4-180)*0.65*0.423);
ColorLine>ShowBmp,Image1,Xn,57,Xn,452,RGB(250,150,250),1,0);
Yn:=Round(453-0.423*(K4-180)*0.65);
ColorLine>ShowBmp,Image1,251,Yn,449,Yn,RGB(250,150,250),1,0);
end

```

```

else

```

```

begin
Xn:=Round(646-(180-K4)*0.65*0.423);
ColorLine>ShowBmp,Image1,Xn,57,Xn,452,RGB(250,150,250),1,0);
Yn:=Round(256+0.423*(180-K4)*0.65);
ColorLine>ShowBmp,Image1,251,Yn,449,Yn,RGB(250,150,250),1,0);
end;

```

```

with Image1.Canvas do

```

```

begin
Font.Color:=TColor(RGB(20,30,80));
Font.Size:=10;
Brush.Style:=bsClear;
KotVot(K1,K2,V1,V2,Kot,Vot);
Lm:=Abs(D12*sin((alf12-Kot)/57.3));
StF:=FloatToStr(Lm);
TextOut(59,232,'Dmin12= '+StF);

```

```

KotVot(K1,K3,V1,V3,Kot,Vot);
Lm:=Abs(D13*sin((alf13-Kot)/57.3));
StF:=FloatToStr(Lm);
TextOut(258,232,'Dmin13= '+StF);

```

```

KotVot(K1,K4,V1,V4,Kot,Vot);

```

```

    Lm:=Abs(D14*sin((alf14-Kot)/57.3));
    StF:=FloatToStr(Lm);
    TextOut(456,232,'Dmin14= '+StF);

    KotVot(K3,K2,V3,V2,Kot,Vot);
    Lm:=Abs(D23*sin((alf23-Kot)/57.3));
    StF:=FloatToStr(Lm);
    TextOut(59,428,'Dmin23= '+StF);

    KotVot(K3,K4,V3,V4,Kot,Vot);
    Lm:=Abs(D34*sin((alf34-Kot)/57.3));
    StF:=FloatToStr(Lm);
    TextOut(258,428,'Dmin34= '+StF);

    KotVot(K2,K4,V2,V4,Kot,Vot);
    Lm:=Abs(D24*sin((alf24-Kot)/57.3));
    StF:=FloatToStr(Lm);
    TextOut(456,428,'Dmin24= '+StF);
    end;
end;

    end;  { case }
end;
end;

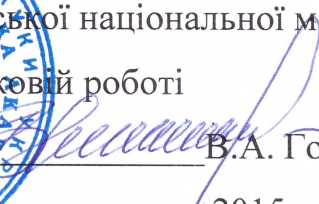
```

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Акты внедрения результатов диссертации

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор Одеської національної морської
академії по науковій роботі

д.т.н., професор  В.А. Голіков

«» 2015 року.

АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи здобувача Булгакова
Олександра Юрійовича на тему „Розробка методу вибору стратегії
розходження суден з використанням областей небезпечних курсів” в
наукових дослідженнях, що виконуються в академії

Ми, що нижче підписались, начальник науково-дослідної частини
академії В.Д. Савчук та провідний фахівець НДЧ О.О. Фірсанова склали цей
акт у тому, що здобувач Булгакова Олександр Юрійович виконав окремий
розділ науково-дослідної роботи "Разработка методов обеспечения безаварийного
плавания судов", яка виконана в академії, ОНМА, 2012, (№ ГР 0111U001610,
науковий керівник - д.т.н., професор М.М. Цимбал).

Начальник науково-дослідної

частини ОНМА, к.т.н., с.н.с., професор

 В.Д. Савчук

Провідний фахівець НДЧ

 О.О. Фірсанова

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Настоящим актом удостоверяется, что в частном высшем учебном заведении «Институт последипломного образования», «Одесский морской тренажерный центр» получили внедрение в учебный процесс следующие результаты диссертационной работы Булгакова Александра Юрьевича „Разработка метода выбора стратегии расхождения судов с использованием областей опасных курсов”:

- построение области опасных курсов двух судов и их использование;
- применение графического способа компьютерного моделирования для выбора оптимального маневра расхождения.

Директор

«Института последипломного образования»,

«Одесский морской тренажерный центр»,

к.т.н., профессор

16.11.2015 г.



Пашенко Ю.В.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор ОНМА

професор  О.М. Шемякін

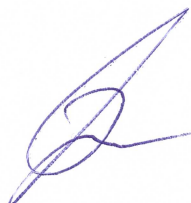
« 12 »  2015 року.

А К Т

про використання результатів дисертаційної роботи здобувача Булгакова Олександра Юрійовича на тему „Розробка методу вибору стратегії розходження суден з використанням областей небезпечних курсів” у навчальному процесі академії

Ми, що нижче підписалися, начальник навчального відділу М. М. Пархоменко, декан судноводійного факультету д. т. н., професор М. М. Цимбал і завідуючий кафедрою "Судноводіння" к. т. н., професор В. Г. Алексішин склали цей акт в тому, що результати кандидатської дисертації здобувача Булгакова Олександра Юрійовича на тему „Розробка методу вибору стратегії розходження суден з використанням областей небезпечних курсів” впроваджені у навчальний процес на кафедрі "Судноводіння" в розділах " Забезпечення навігаційної безпеки плавання".

Начальник навчального відділу

 М. М. Пархоменко

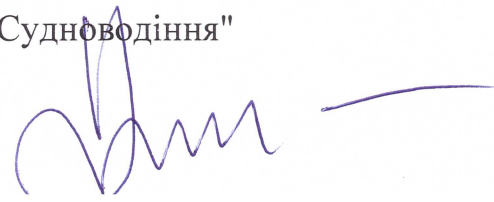
Декан судноводійного факультету

д. т. н., професор

 М. М. Цимбал

Завідуючий кафедрою "Судноводіння"

к. т. н., професор

 В. Г. Алексішин



УЧЕБНО-ТРЕНАЖЕРНЫЙ
ЦЕНТР
«АЛЬФА-ТРЕЙНИНГ»

г. Измаил
ул. Куликова, 31
Тел./факс: (04841) 6-33-66, 2-47-87
Тел: (096) 622-30-33

г. Одесса
Одесса, ул. Жуковского, 26/28
Тел.: (048)700-18-88
Тел.: (094)952-48-88

e-mail: info@alfa-training.com.ua
web: alfa-training.com.ua

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Настоящим актом удостоверяется, что в учебно-тренажерном центре "АЛЬФА - ТРЕЙНИНГ" получил внедрение метод использования области опасных курсов группы судов, а также возможность отображение ее. Этот метод разработан в диссертационной работе Булгакова Александра Юрьевича на тему „Разработка метода выбора стратегии расхождения судов с использованием областей опасных курсов”.

Методика используется при обучении, подготовке и переподготовке офицеров морских судов по направлению «Судовождение», для обеспечения безопасности плавания.

Директор Одесского филиала

УТЦ "АЛЬФА - ТРЕЙНИНГ"

23.11.2015 г.



О.А. Пономарева