

УДК 656.61.052.484

SITUATIONAL DISTURBANCES AND THEIR POSSIBLE COMPENSATION IN MODELING OF SHIPS COLLISION AVOIDANCE

СИТУАЦИОННЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ И ВОЗМОЖНОСТИ ИХ КОМПЕНСАЦИИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ РАСХОЖДЕНИЯ СУДОВ

V.V. Severin, PhD, associate professor

В.В. Северин, к.т.н., доцент

Odessa National Maritime Academy, Ukraine

Одесская Национальная Морская Академия, Украина

ABSTRACT

The paper presents simulation results of own vessel avoiding collision with two dangerous targets.

Proposed method allows to find a safe collision avoidance maneuver with two closing targets, which significantly lowers the risk of collision in difficult navigation conditions.

Key words: mathematical modeling of processes of ship collision avoidance at sea, electronic aids to navigation.

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными или практическими задачами

Одной из важнейших проблем судоходства является обеспечение безопасности плавания. Несмотря на постоянное совершенствование технических средств судовождения, электронного оборудования судов, аварийность находится на высоком уровне. Аварии крупных морских судов приводят к человеческим жертвам, загрязнению окружающей среды, гибели самих судов, потере груза, значительным финансовым убыткам.

Причины, приводящие к авариям на судах морского флота разнообразны.

В недалеком прошлом мировая наука судоходства, ссылаясь на анализ эксплуатации судов, в том числе на статистику аварий и катастроф, утверждала, что для снижения и предотвращения гибели и серьезных аварий судов необходимо совершенствовать их конструкции, оборудование, приборную базу, развивать науку судовождения и технической эксплуатации. Прогресс в этих областях очевиден. Предотвращение столкновений судов в таких ситуациях требует продолжения разработок моделей расхождения судна с несколькими целями. Эта работа должна постоянно совершенствовать средства судовождения, предотвращающие вероятность столкновений судов в море.

Анализ последних достижений и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и выделение нерешенных ранее частей общей проблемы

подавляющее число работ посвящено описанию процесса расхождения судна с одиночной целью, например, [1-4], в которых рассматриваются различные существенные вопросы выбора безопасного маневра предупреждения столкновений. Так, в работе [1] получено условие существования множества безопасных маневров расхождения, причем способ выбора оптимального маневра описан в работе [2]. В работах [3] и [4] приведены соответственно способ учета динамики судна и навигационных опасностей при расчете параметров маневра расхождения. В работах [5] и [6] рассматриваются ситуации расхождения судна с несколькими целями, однако отсутствуют экспериментальные данные, подтверждающие уровень эффективности рекомендуемых маневров расхождения. В работах [9], [10] и [11] автор настоящей статьи предлагал рассмотрение описанной ситуации и теперь предлагается ее продолжение.

Формулировка целей статьи (постановка задачи)

Предлагаемая статья посвящена результатам имитационного моделирования и формализации подтверждающих корректность способа расхождения судна с двумя опасными целями.

Изложение основного материала исследования с обоснованием полученных научных результатов

В работе [10] получена стратегия расхождения судна с двумя опасными целями, для подтверждения корректности, которой была произведена разработка имитационной модели, представляющей собой компьютерную программу.

Как отмечалось в [6], [9] возможные значения выхода Y_{10} процесса P_{10} можно представить пространством состояний, размерность которого $2N$ (значения пеленга и дистанции до каждого из N судов), причем точкой данного пространства является конкретное значение выходных параметров l_i и α_i ($i=1, \dots, N$).

Последовательность состояний во времени можно рассматривать, как траекторию процесса P_{10} в пространстве состояний. Если учесть, что при совместном перемещении судов возможны опасные сближения с угрозой столкновения, которые можно характеризовать предельно-допустимыми дистанциями кратчайшего сближения \widehat{l}_{di} , то в пространстве состояний имеется недопустимая область, попадание траектории процесса P_{10} в которую с высокой вероятностью ведет к столкновению оперирующего судна с одним или несколькими окружающими судами.

Обозначим недопустимую область в пространстве состояний через F_{nd} . Очевидно, она определяется множеством точек, для которых хотя бы по одной из координат выходного пространства состояний текущая дистанция была бы меньше или равна предельно-допустимой ($l_i \leq \widehat{l}_{di}$). В свою очередь, допустимая

область в пространстве состояний, которую обозначим F_d , содержит точки, все координаты которых больше предельно допустимых, т. е. одновременно должны соблюдаться неравенства $l_i \geq \hat{l}_{di}$ ($i=1, \dots, N$).

В качестве примера на рис. 1 показаны допустимая F_d и недопустимая F_{nd} области пространства состояний при $N=2$, а на рис. 2 приведен пример для случая, когда $N=3$.

Очевидно, оперативное судно должно управлять выходом Y_{10} таким образом, чтобы траектория процесса P_{10} в пространстве состояний не попадала в недопустимую область F_{nd} .

Особенностью управляемого движения оперативного судна является то, что оно перемещается по заданному маршруту и стремится удерживать траекторию процесса P_{10} в допустимой области F_d пространства выходных состояний. В случае, когда возникает тенденция попадания траектории процесса P_{10} в недопустимую область F_{nd} , то для того, чтобы избежать этого, оперативное судно уходит с программного маршрута.

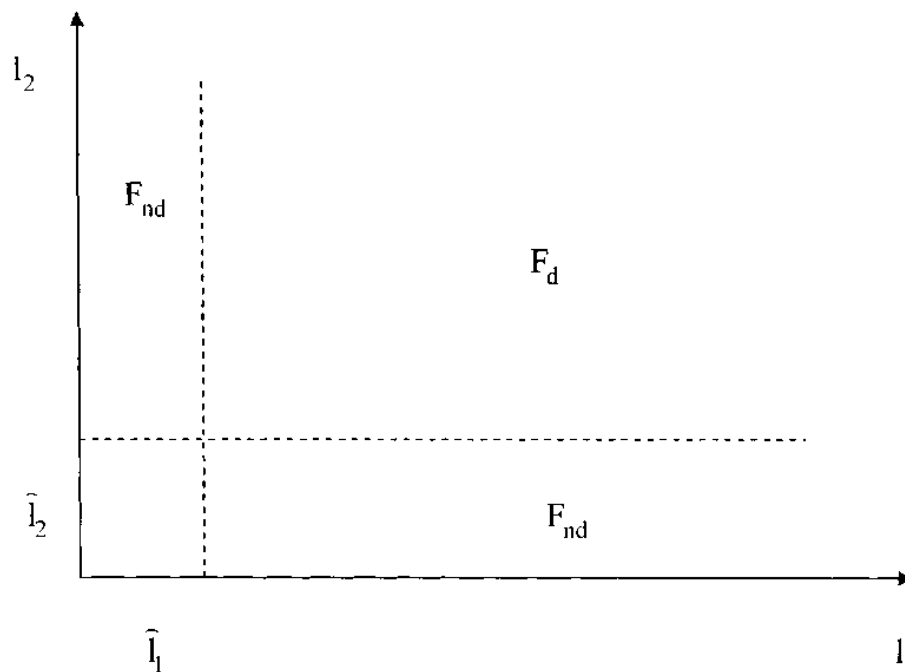


Рис. 1. Допустимая F_d и недопустимая F_{nd} при $N = 2$

Для контроля состояния $S_o(t)$ выхода Y_{10} процесса P_{10} в момент времени t производится оценка дистанций и пеленгов на каждое из N судов, т. е. получают оценку $\bar{S}_o(t)$ состояния $S_o(t)$. Из-за погрешностей в измерениях оценка текущей ситуации $\bar{S}_o(t)$ носит стохастический характер, поэтому для ее получения используют методы, дающие максимальную эффективность.

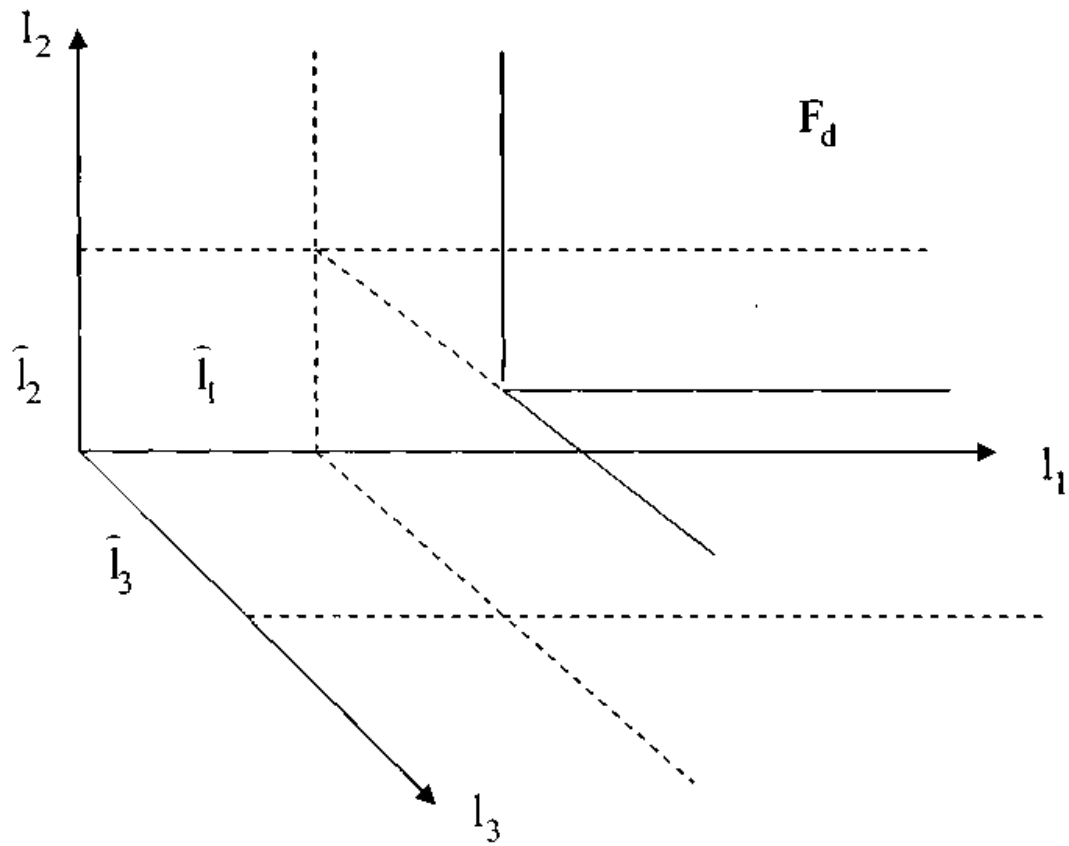


Рис. 2. Допустимая F_d и недопустимая F_{nd} при $N = 3$

Используя полученную оценку и прогнозируя развитие дальнейшей ситуации через некоторый интервал времени Δt , получают прогнозируемое состояние процесса $\hat{S}_0(t + \Delta t)$ на момент времени $t + \Delta t$, а затем сравнивают его с допустимым состоянием, т. е. проверяют, не попадает ли прогнозируемый участок траектории процесса P_{10} в недопустимую область пространства состояний F_{nd} . По результатам проверки принимается решение о необходимости изменения параметров движения оперирующего судна, как управляющих воздействий, влияющих на процесс P_{10} (рис 3).



Рис. 3. Последовательность оценки ситуаций

Если прогнозируемое состояние $\widehat{S}_o(t + \Delta t)$ принадлежит недопустимой области F_{nd} , т. е. $\widehat{S}_o(t + \Delta t) \in F_{nd}$, то необходимо выбрать такие параметры

движения оперирующего судна U , при которых прогнозируемое состояние $\widehat{S}_o(t + \Delta t, U)$ процесса P_{1o} на момент времени $t + \Delta t$ должно принадлежать допустимой области F_d (рис. 4).

В случае, когда прогнозируемое состояние процесса $\widehat{S}_o(t + \Delta t)$ находится в допустимой области F_d пространства выходных состояний, то оперирующее судно продолжает двигаться с прежними параметрами V_o и K_o .

При рассмотренном способе управляемого движения оперативного судна очень существенным является способ прогноза состояния $\widehat{S}_o(t + \Delta t)$ процесса на момент времени $t + \Delta t$. Общепринятым является прогноз, предполагающий в последующий интервал времени Δt неизменность параметров движения окружающих судов V_i и K_i . Задаваясь характером движения (прямолинейное с неизменными параметрами или поворот с постоянной угловой скоростью) оперативное судно может оценить прогнозируемое состояние $\widehat{S}_o(t + \Delta t)$ процесса, воспользовавшись формулами, которые приведены выше.

В работах [6], [9] предложен более точный, но более сложный способ прогноза, учитывающий возможные взаимодействия между судами, вызванные характером взаимного сближения и существующими нормами, которые регламентируют движение судов (рекомендованные пути, зоны разделения движения, навигационные особенности плавания и т. п.). В настоящей работе будем использовать общепринятый способ прогноза, полагая, что за небольшой интервал времени Δt окружающие суда перемещаются с неизменными параметрами движения.

Рассмотрим более подробно процедуру получения прогнозирующего состояния $\widehat{S}_o(t + \Delta t)$ процесса P_{1o} по указанному выше способу и определения минимальной дистанции кратчайшего сближения.

Будем полагать, что оба судна следуют с неизменными параметрами движения и прогнозируемые значения дистанции l_i и пеленга α_i на момент времени $t + \Delta t$ оцениваются с помощью следующих формул:

$$l_i(t + \Delta t) = \{l_{ti}^2 + V_{oti}^2 \Delta t^2 - 2 V_{oti} \Delta t l_{ti} \cos(\alpha_{ti} - K_{oti})\}^{1/2},$$

$$\alpha_i(t + \Delta t) = K_{oti} - \arcsin [l_{ti} \sin(K_{oti} - \alpha_{ti}) / l_i(t + \Delta t)],$$

где l_{ti} и α_{ti} - соответственно дистанция и пеленг на i -е судно в момент времени t , когда производится оценка состояния $S_o(t)$ процесса P_{1o} .

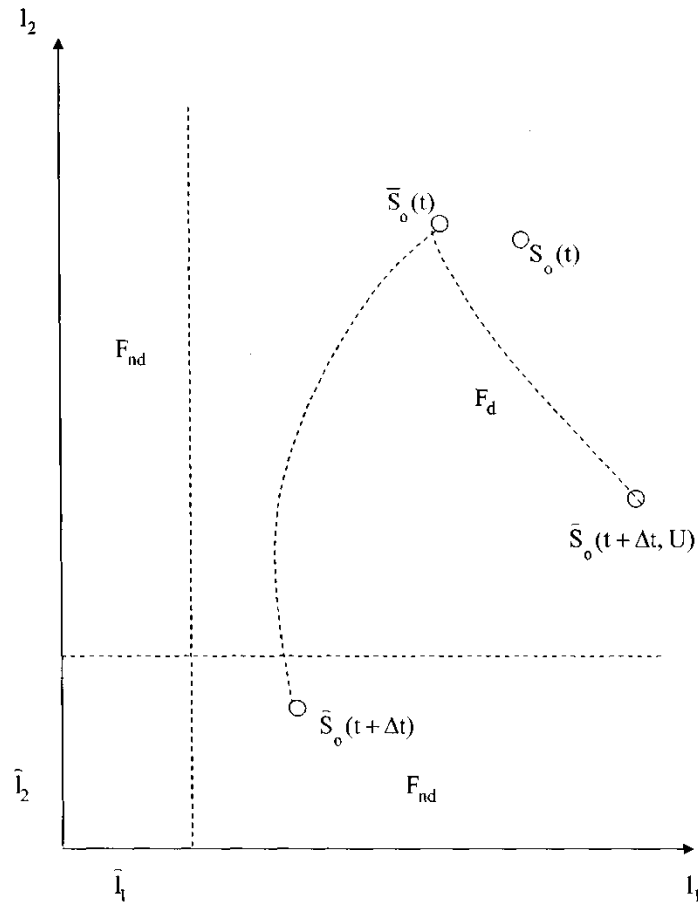


Рис. 4. Прогнозируемое состояние движения

Значение минимальной дистанции кратчайшего сближения можно найти, учитывая, что в этом случае (когда l_1 принимает минимальное значение $\min l_1$) пеленг на цель принимает значение $\alpha_i = K_{oti} \pm \pi/2$. При этом интервал времени, когда достигается значение $\min l_1$, определяется выражением, которое несложно получить с помощью рис. 1:

$$\min t_i = l_{ti} \cos(K_{oti} - \alpha_{ti}) / V_{oti}$$

Выражение для минимальной дистанции кратчайшего сближения $\min l_1$ в этом случае будет принимать следующий вид:

$$\min l_1 = \{l_{ti}^2 + V_{oti}^2 \min t_i^2 - 2 V_{oti} \min t_i l_{ti} \cos(K_{oti} - \alpha_{ti})\}^{1/2}, \quad \text{или}$$

$$\min l_1 = (l_{ti}^2 + V_{oti}^2 \min t_i^2 - 2 V_{oti}^2 \min t_i^2)^{1/2},$$

так как $V_{oti} l_{ti} \cos(K_{oti} - \alpha_{ti}) = V_{oti}^2 \min t_i$. Подставляя приведенное выражение для $\min t_i$, получим:

$$\min l_1 = \{l_{ti}^2 - V_{oti}^2 [l_{ti} \cos(K_{oti} - \alpha_{ti}) / V_{oti}]^2\}^{1/2}, \quad \text{т. е.}$$

$$\min l_i = [l_{ti}^2 - l_{ti}^2 \cos^2(K_{oti} - \alpha_{ti})]^{1/2} = l_t \sin(K_{oti} - \alpha_t).$$

Следовательно, окончательно получаем выражение для $\min l_i$:

$$\min l_i = l_t \sin(K_{oti} - \alpha_t),$$

справедливость которого подтверждается рис. 1.

Возможны случаи, когда в интервал прогноза Δt попадает момент времени изменения судном программного курса движения, т. е. может оказаться необходимым поиск минимальной дистанции кратчайшего сближения при наличии нескольких участков программной траектории движения оперирующего судна.

Рассмотрим случай, когда имеется три участка относительной траектории движения оперативного судна относительно i -го с относительными курсами K_{ot1i} , K_{ot2i} и K_{ot3i} (рис. 5), причем смена курсов производится в моменты времени t_{1i} и t_{2i} . Необходимо найти минимальную дистанцию $\min l_i$ в этом случае. Для этого следует найти локальные дистанции кратчайшего сближения $\min l_{ij}$ на каждом участке программной траектории и выбрать из них наименьшую.

Очевидно, на каждом из относительных участков локальная дистанция $\min l_{ij}$ может достигаться либо на концах участка, либо между ними. Так, на первом участке, если дистанция кратчайшего сближения $\min l_{1i}$ достигается не на концах участка, как показано на рис. 5, то его расчет производится по ранее полученной формуле:

$$\min l_{1i} = l_{ni} \sin(K_{ot1i} - \alpha_{ni}),$$

где l_{ni} и α_{ni} - соответственно начальные дистанция и пеленг.

Второй участок относительной траектории движения характеризуется относительным курсом K_{ot2i} , дистанцией $l_i(t_{1i})$ и пеленгом $\alpha_i(t_{1i})$ на момент времени поворота судна t_{1i} .

Определение дистанции кратчайшего сближения $\min l_{2i}$ на втором участке относительного движения при условии, что суда продолжают сближаться, производится аналогично первому участку, однако вместо параметров K_{ot1i} , l_{ni} , α_{ni} необходимо использовать K_{ot2i} , $l_i(t_{1i})$ и $\alpha_i(t_{1i})$. При этом получаем следующее выражение для $\min l_{2i}$:

$$\min l_{2i} = l_i(t_{1i}) \sin[K_{ot2i} - \alpha_i(t_{1i})].$$

Переход на третий участок относительной траектории движения происходит в момент времени t_{2i} , при этом оперирующее судно ложится на относительный курс K_{ot3i} , находясь на дистанции $l_i(t_{2i})$ относительно i -го судна, пеленг на

которое $\alpha_i(t_{2i})$. Указанные значения относительного курса, дистанции и пеленга применяются для расчета минимальной дистанции $\min l_{3i}$ на третьем участке относительного движения:

$$\min l_{3i} = l_i(t_{2i}) \sin[K_{ot3i} - \alpha_i(t_{2i})].$$

Выражения для расчета дистанций $l_i(t_{1i})$, $l_i(t_{2i})$ и пеленгов $\alpha_i(t_{1i})$ и $\alpha_i(t_{2i})$ на моменты времени t_{1i} и t_{2i} , согласно ранее полученным формулам, имеет следующий вид:

$$l_i(t_{1i}) = [l_{ni}^2 + V_{ot1i}^2 t_{1i}^2 - 2V_{ot1i} t_{1i} l_{ni} \cos(\alpha_{ni} - K_{ot1i})]^{1/2},$$

$\Delta \eta$

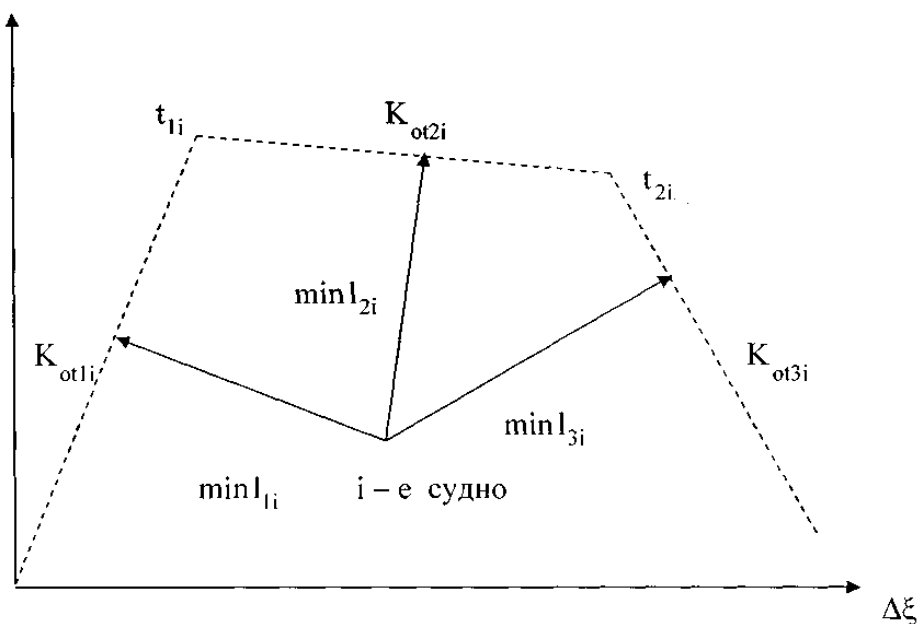


Рис. 5. Относительная траектория движения

$$\alpha_i(t_{1i}) = K_{ot1i} - \arcsin[\min l_{1i} / l_i(t_{1i})], \quad \text{при } t < \min t_{1i},$$

$$\alpha_i(t_{1i}) = K_{ot1i} - \pi + \arcsin[\min l_{1i} / l_i(t_{1i})], \quad \text{при } t > \min t_{1i},$$

$$l_i(t_{2i}) = \{l_i(t_{1i})^2 + V_{ot2i}^2 (t_{2i} - t_{1i})^2 - 2V_{ot2i} (t_{2i} - t_{1i}) l_i(t_{1i}) \cos[\alpha_i(t_{1i}) - K_{ot2i}]\}^{1/2},$$

$$\alpha_i(t_{2i}) = K_{ot2i} - \arcsin[\min l_{2i} / l_i(t_{2i})], \quad \text{при } t < \min t_{2i},$$

$$\alpha_i(t_{2i}) = K_{ot2i} - \pi + \arcsin[\min l_{2i} / l_i(t_{2i})], \quad \text{при } t > \min t_{2i}.$$

Отметим, что минимальная дистанция сближения достигается на заданном участке, если на его концах происходит смена знака первой производной дистанции l_i по времени. Отметим, что знак первой производной дистанции по времени $\partial l_i / \partial t$ определяется величиной угла между относительным курсом и

пеленгом на цель. Если суда сближаются, то дистанция l_i уменьшается, следовательно, $\partial l_i / \partial t < 0$ и угол $K_{oti} - \alpha_i$ является острым, а его косинус положительный, т. е. $\cos(K_{oti} - \alpha_i) > 0$ (рис. 6а). Если дистанция l_i достигает минимального значения, то угол $K_{oti} - \alpha_i$ прямой, $\partial l_i / \partial t = 0$ и $\cos(K_{oti} - \alpha_i) = 0$ (рис. 6б). После кратчайшего сближения дистанция l_i увеличивается, $\partial l_i / \partial t > 0$, угол $K_{oti} - \alpha_i$ становится тупым и $\cos(K_{oti} - \alpha_i) < 0$ (рис. 6в).

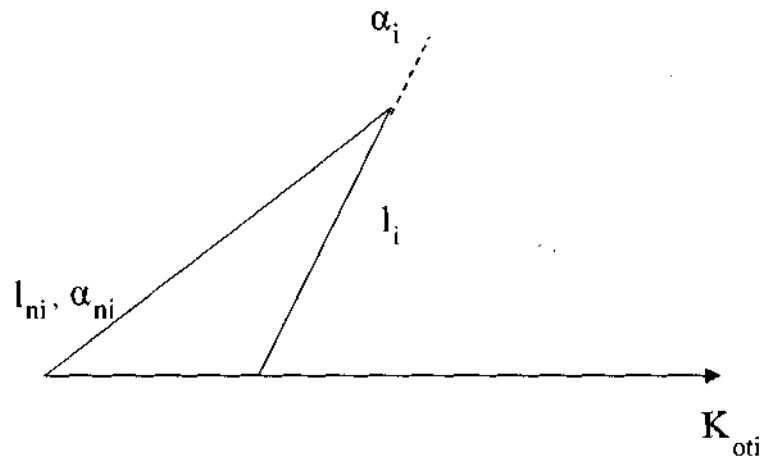
Обобщая вышеизложенное, можно сделать вывод, что знак производной $\partial l_i / \partial t$ определяется знаком выражения “ $-\cos(K_{oti} - \alpha_i)$ ”, т. е.

$$\text{sign}(\partial l_i / \partial t) = \text{sign}[-\cos(K_{oti} - \alpha_i)].$$

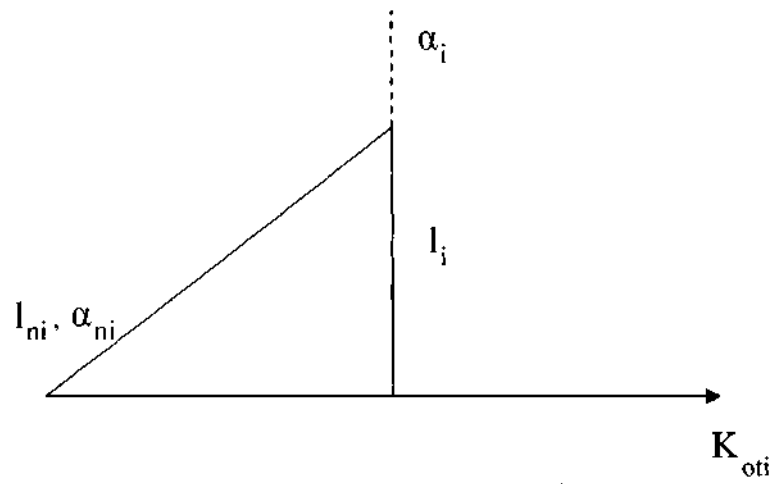
В работе [9] было введено понятие ситуационного возмущения, о котором упоминалось в первом параграфе текущей главы данной работы, как возникающей угрозы столкновения оперирующего судна с одним или несколькими окружающими судами при дальнейшем развитии ситуации опасного сближения. Аналитическим выражением ситуационного возмущения является попадание прогнозирующего участка траектории процесса в недопустимую область пространства состояний, т. е. прогнозируемая дистанция кратчайшего сближения хотя бы с одним из судов меньше соответствующей предельно-допустимой дистанции ($\min l_i \leq \hat{l}_i$). Дистанция кратчайшего сближения связана с временем его достижения $\min t_i$. Анализ ситуационных возмущений показывает, что их основной характеристикой является количество судов, с которыми опасно сближается оперативное судно, а также значения прогнозируемых дистанций и времени кратчайшего сближения. Если ситуационное возмущение обозначить через \mathfrak{R} , то $\mathfrak{R} = \mathfrak{R}(m, \min l_i, \min t_i)$, где m – размерность ситуационного возмущения, т. е. количество окружающих судов, с которыми опасно сближается оперативное судно. Очевидно, что $m \leq N$. Как уже упоминалось, при наличии ситуационного возмущения \mathfrak{R} оперирующее судно должно выбрать маневр расхождения с тем, чтобы перевести процесс в состояние, принадлежащее допустимой области пространства выходных состояний.

В данном случае, учитывая, что суда перемещаются прямолинейными участками с постоянными курсами, маневр расхождения содержит один или несколько участков уклонения от сближающихся судов и участок выхода на программный маршрут движения после завершения уклонений.

Формально маневр расхождения U будем характеризовать с участками уклонения и участком выхода. Если не учитывать инерционность судна, то каждый из участков уклонения характеризуется временем t_{yi} и курсом K_{yi} уклонения, а участок выхода – временем t_b поворота судна к программной траектории движения и курсом выхода K_b .



а).



б).

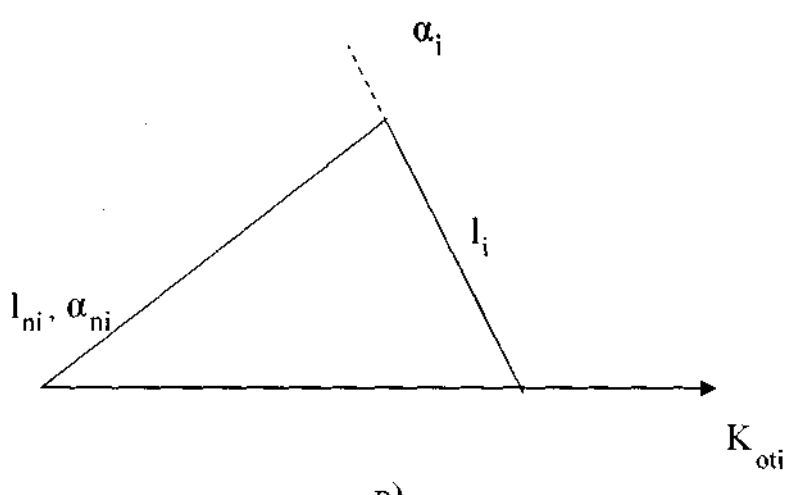


Рис. 6, Зависимость производной дистанции по времени

Следовательно, анализ выходных переменных процесса движения оперирующего судна относительно других судов при возникновении ситуационного возмущения \mathcal{R} позволяет выявить его и компенсировать выбором соответствующего маневра расхождения U .

Процедура выбора безопасного маневра расхождения в зависимости от возникшего ситуационного возмущения и других существенных факторов составляет содержание последующих глав данной работы.

Выводы и перспектива дальнейшей работы по данному направлению

Таким образом, предложенная методика позволяет произвести выбор безопасного маневра расхождения судна с двумя сближающимися с ним целями, существенно понижая риск возможного столкновения в сложных условиях плавания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Павлов В.В. Инвариантность и автономность нелинейных систем управления / Павлов В.В. - Киев: Наукова думка, 1971. - 272 с.
2. Павлов В. В. Начала теории эргатических систем / Павлов В. В. - Киев: Наукова думка, 1975. - 240 с.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Богачук Ю. П. Эргатическая дифференциально – игровая система предотвращения столкновений судов // Богачук Ю. П., Положенцев М. А./ Дискретные и эргатические системы правления. - Киев: Ин-т кибернетики, 1983. –С. 98-105.
7. Мальцев А. С. Управление движением судна. – Одесса: Весть, 1995.-230 с.
8. Сафин И.В. Выбор оптимального маневра расхождения // Сафин И.В./ Автоматизация судовых технических средств: Науч. –техн. сб. – 2002. – Вып. 7.- Одесса: ОНМА. – С. 115 – 120.
9. Северин В.В. Формализованная модель расхождения нескольких судов // Северин В.В. / Судовождение: Сб. науч. трудов / ОНМА. – Вып. 17 – Одесса: «ВидавІнформ», 2009 - С.175– 182.
10. Северин В.В. Выбор маневра расхождения с двумя целями / В.В. Северин // Автоматизация судовых технических средств.- 2005. - № 9. – С. 91 – 95.
11. Северин В.В. Постановка задачи расхождения судна с несколькими целями / В.В. Северин // Судовождение. – №6. – 2003. – С. 130-135.