

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ

УДК 656.61.052

С. В. Смоленцев

АВТОМАТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ РЕШЕНИЙ ПО РАСХОЖДЕНИЮ СУДОВ В МОРЕ

В статье рассматривается проблема безопасности мореплавания. Для ее решения разрабатывается автоматизированная система расхождения судов в море. В случае, если текущая навигационная ситуация оценивается как опасная, необходимо принимать решения по расхождению с опасными целями. Разрабатываемая система является интеллектуальным советчиком судоводителя. В ней синтезируются варианты оптимальных и субоптимальных решений, обеспечивающие безопасное расхождение со всеми судами-целями в заданной акватории с учетом навигационных ограничений. В статье предложен оригинальный алгоритм синтеза безопасных решений по управлению судном. Получаемое множество решений является результирующим в последовательности множеств: возможные решения — реализуемые решения — допустимые решения — безопасные решения. В качестве вариантов решений судоводителю предлагаются безопасные траектории движения судна, в конечном итоге, приводящие судно на прежний маршрут следования. При этом новые траектории формируются в результате последовательности маневров, соответствующих МППСС-72 в данных условиях плавания.

Ключевые слова: система расхождения судов, предупреждение столкновений, принятие решений, безопасные решения, траектория движения судна, МППСС-72.

Введение

Одним из основных аспектов безопасности мореплавания является обеспечение безопасности расхождения судов в море. Для решения проблемы предупреждения столкновений в 1972 г. была принята Конвенция о Международных правилах предупреждения столкновений судов в море, приложением к которой являются Правила МППСС-72 [1], выполнение которых является обязательным для гражданских судов. Однако применение этих правил не гарантирует безопасности мореплавания, поскольку МППСС не учитывают навигационных ограничений в районе плавания, регламентируют расхождение двух судов, но неприменимы в случае встречи нескольких судов.

Таким образом, использование только МППСС не позволяет обеспечить безопасность мореплавания в узкостях, где в настоящее время скапливаются большие судовые потоки. В условиях большого количества окружающих судов-целей судоводитель физически не может самостоятельно оценить навигационную обстановку и принять правильное решение по управлению своим судном. Решением данной проблемы является создание автоматизированной системы предупреждения столкновений судов. Рассмотрение различных аспектов подобных систем содержится в литературе [2] – [8]. В работе [2] изложены основные принципы построения интеллектуальных систем управления. В работах [3], [4] рассматриваются вопросы использования интеллектуальных систем при решении задач судовождения, в частности задач расхождения судов. Статья [5] содержит интересные идеи по формализации МППСС-72 в системах автоматического расхождения судов в море. В работах группы исследователей ЦНИИ «Электроприбор» [6] – [8] предложен траекторный подход к решению задачи безопасного расхождения судов, учитывающий требования МППСС-72. Аналогичный подход используется и в настоящей статье. В работе [9] была изложена общая структура автоматизированной системы расхождения судов и основные принципы ее функционирования. В публикации [10] описывается подсистема оценки навигационной ситуации, от работы которой зависит необходимость принятия решений по управлению судном для расхождения с другими судами, и рассматриваются основные принципы работы подсистемы принятия

решений по управлению судном в случае возникновения опасной ситуации сближения с окружающими судами-целями или навигационными препятствиями.

Как показано в работе [9], в системе формируется последовательность векторов навигационной ситуации:

$$\mathbf{S} = \{\mathbf{S}_t\}_{t \in [-T, 0]}, \quad (1)$$

где T — глубина хранения истории навигационных ситуаций; \mathbf{S}_t — вектор навигационной ситуации.

Вектор навигационной ситуации представлен в виде

$$\mathbf{S}_t = \langle \mathbf{S}_t^c, \mathbf{S}_t^f, \mathbf{S}_t^e, \mathbf{S}_t^d \rangle, \quad (2)$$

где \mathbf{S}_t^c — текущая навигационная ситуация; \mathbf{S}_t^f — прогноз навигационной ситуации; \mathbf{S}_t^e — оценка навигационной ситуации; \mathbf{S}_t^d — решение по управлению судном в данной навигационной ситуации.

Далее будут рассматриваться принципы формирования компонента \mathbf{S}_t^d — решения по управлению судном. Решение по управлению судном представляет собой множество возможных решений, каждое из которых соответствует некоторому i варианту управления из множества I возможных управлений:

$$\mathbf{S}_t^d = \{\mathbf{S}_t^{di}\}_{i \in I};$$

$$\mathbf{S}_t^{di} = \langle \mathbf{S}_t^{dci}, \mathbf{S}_t^{dfi}, \mathbf{S}_t^{dei}, p_t^i \rangle, \quad (3)$$

где \mathbf{S}_t^{dci} — навигационная ситуация с учетом i варианта управления; \mathbf{S}_t^{dfi} — прогноз навигационной ситуации с учетом i варианта управления; \mathbf{S}_t^{dei} — оценка навигационной ситуации с учетом i варианта управления; p_t^i — вес i варианта управления.

Общие принципы принятия решения

В случае, если оценка текущей навигационной ситуации определена как опасная, необходимо предпринять действия по безопасному расхождению с судами-целями. Для принятия решения по безопасному расхождению необходимо определить новую траекторию движения судна, обеспечивающую безопасное движение судна относительно судов-целей и навигационных опасностей в районе плавания. Однако в системе управления судном необходимо использовать не траекторию движения, а последовательность маневров, приводящую к данной траектории. Таким образом, в качестве решения необходимо получить маневр (последовательность маневров), приводящий к необходимой траектории движения собственного судна.

В дальнейшем термины «маневр» и «последовательность маневров» будут считаться равнозначными в контексте получения одной траектории движения. Маневр должен удовлетворять следующим условиям:

- быть реализуемым судовыми средствами управления;
- быть естественным для судоводителя, т. е. состоять из комбинации стандартных управляющих действий (изменения курса или скорости);
- не противоречить МППСС-72;
- приводить к безопасному расхождению со всеми судами-целями и навигационными опасностями в районе плавания.

Поиск маневра, приводящего к безопасному расхождению, реализуется с помощью механизма порождения и проверки гипотез. Оценка каждой гипотезы (предлагаемого маневра) производится в следующем порядке:

- строится модифицированный маршрут, соответствующий предполагаемому маневру;
- с использованием моделей собственного судна и судов-целей генерируется прогноз траекторий их движения на определенный промежуток времени, таким образом, получают прогноз навигационной ситуации, которая реализуется в случае выполнения данного маневра;

– с использованием методов, изложенных в статье [10], выполняется оценка полученного прогноза навигационной ситуации;

– в случае, если нарушаются навигационные ограничения: прогнозируемая траектория движения собственного судна выходит в зону навигационных опасностей или зоны, запретные для плавания, гипотеза отвергается;

– если траектория движения судна с учетом навигационных ограничений является допустимой, то оценивается риск опасного сближения со всеми контролируруемыми судами-целями. В модуле оценок строится оценка опасности сближения с каждым из судов-целей, а также комплексная оценка по шкале RGB, состоящей из трех категорий: <RED><YELLOW><GREEN> (<опасно><внимание><безопасно>);

– в случае, если комплексная оценка безопасности относится к категории <RED> (<опасно>), гипотеза отвергается, в противном случае данный вариант маневра сохраняется в множестве гипотез-кандидатов.

После проверки всех сгенерированных гипотез, в случае, если множество гипотез-кандидатов не пусто, из них выбирается оптимальное решение.

В качестве решения рассматривается маршрут судна, порождаемый маневром (последовательностью маневров). Каждый маршрут L_i порождает траекторию движения судна в соответствии с его динамикой. При прогнозировании траекторию движения судна (прогноз) строят с использованием следующей модели динамики судна:

$$Tr_0^{di} = F(L^i, M), \quad (4)$$

где Tr_0^{di} — прогноз траектории собственного судна; L_i — маршрут судна (i решение: $i \in I$); M — модель динамики собственного судна.

В случае, если текущий маршрут L^0 порождает опасную прогнозируемую траекторию собственного судна, необходимо найти новый маршрут, который обеспечит безопасность получаемой траектории движения судна.

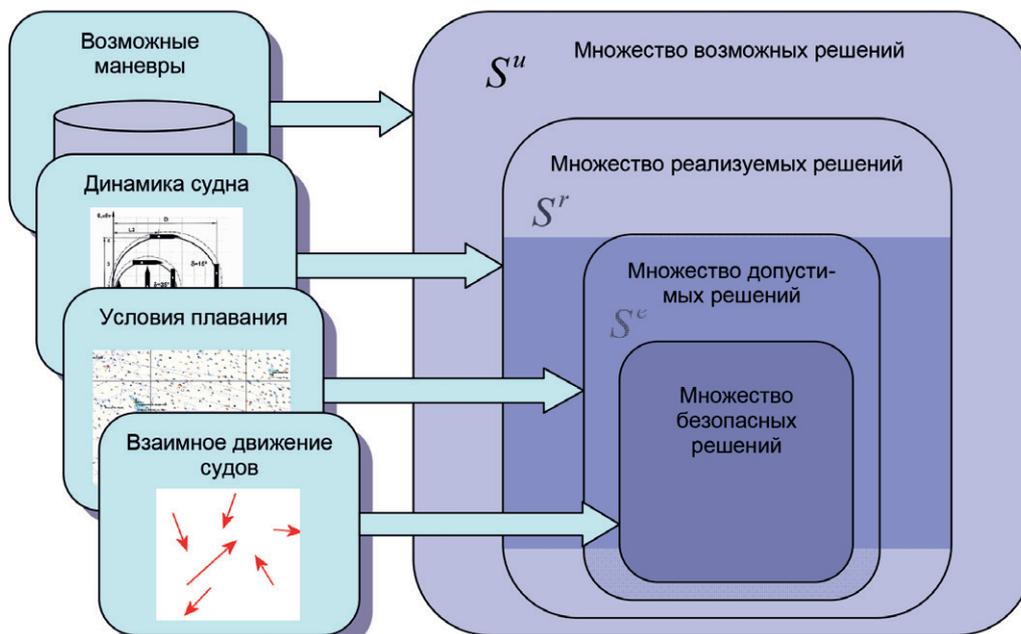


Рис. 1. Соотношения множеств решений

На рис. 1 показаны следующие множества решений:

S^u — **множество возможных решений**, которое определяется множеством возможных маневров и содержит все возможные маршруты из заданной начальной точки в заданную конечную точку;

S^r — **множество реализуемых решений**, которое определяется динамикой судна и содержит маршруты, по которым может следовать судно с учетом его динамических характеристик;

S^e — **множество допустимых решений**, которое определяется условиями плавания и содержит реализуемые маршруты, которые являются безопасными и разрешенными в заданной акватории с учетом навигационных ограничений, районов ограниченного плавания и т. п.;

S^s — **множество безопасных решений**, которое определяется параметрами сближения с судами-целями и содержит маршруты, безопасные как с точки зрения навигационных ограничений, так и безопасного расхождения со всеми целями в районе плавания.

Соотношение этих множеств можно выразить следующим образом:

$$S^s \subset S^e \subset S^r \subset S^u. \quad (5)$$

Таким образом, задачей модуля принятия решений является построение множества безопасных решений. В случае, если это множество окажется не пустым ($S^s \neq \emptyset$), необходимо найти оптимальное решение:

$$S^* \in S^s, \\ Crit(S^*) \rightarrow \min. \quad (6)$$

Параметризация решений

Для построения множества возможных решений необходимо определить те маршруты, которые будут считаться возможными. Обозначим первоначальный маршрут (заданный план движения собственного судна — *Voyage Plan*) — L^0 , маршрут определяющий i возможное решение — L^i , разность маршрутов $DL = |L^0 - L^i|$. Тогда маршрут $L^i \in S^u$, т. е. является возможным, если он удовлетворяет следующим условиям.

1. Маршрут L^i (возможное решение) отличается от первоначального маршрута L^0 на ограниченном участке (DL ограничено).
2. Разность маршрутов DL может порождаться не более чем тремя маневрами изменения курса.
3. Разность маршрутов DL может порождаться не более чем двумя маневрами изменения скорости.

Таким образом, рассматриваются маневры либо курсом (не более трех поворотов, последний из которых должен привести на первоначальный маршрут), либо скоростью (не больше двух изменений скорости, последнее из которых должно восстановить плановую скорость на соответствующем участке первоначального маршрута).

Представим первоначальный маршрут в виде объединения двух сегментов:

$$L^0 = L^0_S \cup L^0_F. \quad (7)$$

Аналогично представим возможный маршрут:

$$L^i = L^i_S \cup L^i_F. \quad (8)$$

Разбиение на сегменты выполним таким образом, чтобы эти маршруты различались только начальными сегментами:

$$L^0_F = L^i_F; \\ DL = |L^0_S - L^i_S|. \quad (9)$$

Тогда при анализе различных маршрутов можно рассматривать только их начальные сегменты. Соответственно можно ввести следующую параметризацию начальных сегментов маршрутов, а значит и возможных решений:

$$L^k_S = \langle L^k_0, L^k_1, \alpha^k_0, \alpha^k_1 \rangle \text{ — для маневров курсом;}$$

$L_S^V = \langle L_0^V, L_1^V, V_0^V \rangle$ — для маневра скоростью;

L_0^k — расстояние от текущей точки местоположения судна до точки первого поворота;

L_1^k — расстояние от точки первого поворота до точки второго поворота (расстояние движения на новом курсе);

α_0^k — изменение курса при первом повороте;

α_1^k — изменение курса при втором повороте;

L_0^V — расстояние от текущей точки местоположения судна до точки начала маневра скоростью;

L_1^V — расстояние движения с новой скоростью;

V_0^V — значение новой скорости.

На рис. 2 приведены параметры маршрута для маневра курсом, а на рис. 3 — параметры маршрута для маневра скоростью.

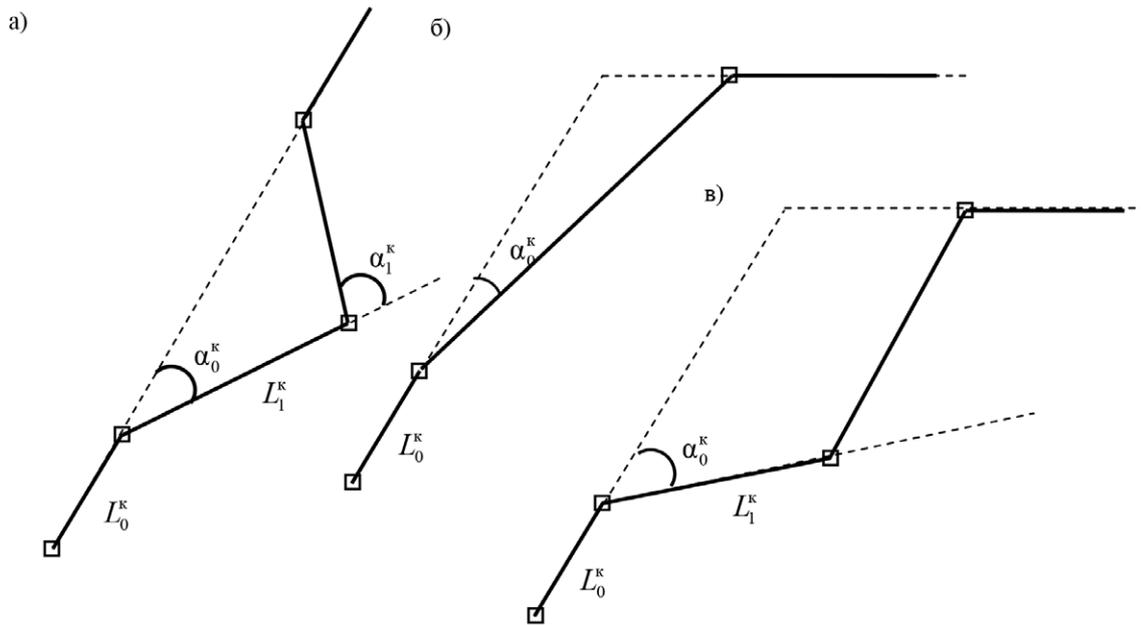


Рис. 2. Параметры маршрута для маневра курсом:
 а — $L_S^k = \langle L_0^k, L_1^k, \alpha_0^k, \alpha_1^k \rangle$; б — $L_S^k = \langle L_0^k, 0, \alpha_0^k, 0 \rangle$; в — $L_S^k = \langle L_0^k, L_1^k, \alpha_0^k, 0 \rangle$

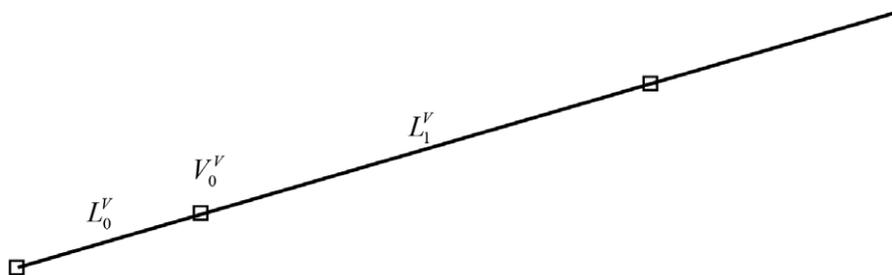


Рис. 3. Обозначение параметров маршрута для маневра скоростью

Генерация решений

В модуле генерации решений заполняется компонента S_i^d -решения по управлению судном. Для этого генерируется множество возможных вариантов управления судном. Для генерации

различных решений используются знания из базы, содержащей сведения, полученные по различным вариантам маневрирования судном:

$$\mathbf{S}_t^d = \{\mathbf{S}_t^{di}\}_{i \in I};$$

$$\mathbf{S}_t^{di} = \langle \mathbf{S}_t^{dci}, \mathbf{S}_t^{dfi}, \mathbf{S}_t^{dei}, p_t^i \rangle. \quad (10)$$

В этом модуле для каждого i -го варианта решения из множества возможных решений I заполняется компонента \mathbf{S}_t^{dci} — навигационная ситуация с учетом управления, принятого в данном варианте решения:

$$\mathbf{S}_t^{dci} = D(\mathbf{S}_t^c, \mathbf{S}_t^f, U_t^i, M_0, K_d), \quad (11)$$

где U_t^i — принятый вариант управления для i -го варианта, который представляет собой маршрут L_t^i : $U_t^i = L_t^i$; M_0 — модель собственного судна; K_d — знания по управлению судном.

Для каждого построенного решения в модуле прогноза формируется прогноз развития ситуации \mathbf{S}_t^{dfi} , в котором учитывается прогноз траектории своего судна в соответствии с выбранным маршрутом $Tr_{0i} = F(L_t^i, M)$. Траектории судов-целей при этом остаются такими же, как и в прогнозе \mathbf{S}_t^f :

$$\mathbf{S}_t^{dfi} = \langle Tr_0^{di}, \{Tr_j\}_{j \in J} \rangle. \quad (12)$$

Затем в модуле оценок проводят оценку безопасности навигационной ситуации с учетом новой траектории движения Tr_0^{di} и заполняют компоненту \mathbf{S}_t^{dei} . Подробно методика оценки безопасности навигационной ситуации изложена в статье [10]. В соответствии с данной методикой строятся следующие оценки:

$$e(Tr_0^{di}) = \min(Q_l), l \in L;$$

$$e(Tr_0^{di} \circ Tr_j) = Q_j, j \in J, \quad (13)$$

где Q_l — оценка безопасности i -го решения по шкале RYG;

$e(Tr_0^{di})$ — оценка безопасности траектории относительно навигационных опасностей по шкале RYG в случае, если $e(Tr_0^{di}) = R$, т. е. она является опасной, это решение отбрасывается.

Таким образом, множество допустимых решений S^e содержит только те из них, для которых $e(Tr_0^{di}) > R$. Для оставшихся решений проводят оценку безопасности их траекторий относительно траекторий судов-целей.

Множество безопасных решений S^s включает все решения, траектории которых удовлетворяют следующему условию:

$$\min(e(Tr_0^{di} \circ Tr_j)) = \min Q_j > R, j \in J. \quad (14)$$

Соответственно множество безопасных решений содержит только безопасные (относительно навигационных опасностей и судов-целей) траектории.

Учет требований МППСС-72

При генерации решений необходимо учитывать требования МППСС-72 [1], т. е. маневры, которые предпринимаются для расхождения с судами-целями, должны соответствовать требованиям ч. В МППСС-72 [1]. Например, *Правило 8* «Действия для предупреждения столкновения» определяет предпочтительность маневра курсом над маневром скоростью в случае, если имеется достаточное водное пространство. Кроме того, требуется заметность предпринимаемого маневра и неприемлемость использования ряда последовательных небольших изменений курса и (или) скорости. Это накладывает определенные ограничения на возможные маневры при генерации решений. *Правило 19* «Плавание судов при ограниченной видимости» требует при выполнении маневров на расхождение избегать:

- изменения курса влево, если другое судно находится впереди траверза и не является обгоняемым;
 - изменения курса в сторону судна, находящегося на траверзе или позади траверза.
- Таким образом, подобные маневры следует исключать из рассмотрения в случае, если судно находится в условиях ограниченной видимости.

Выбор оптимального решения

Выбор оптимального решения осуществляется из множества безопасных решений. В данном множестве могут находиться решения, порожденные управлениями как курсом, так и скоростью:

$$S^s = J_K \cup J_V. \quad (15)$$

При выборе оптимального маневра курсом используются следующие критерии оптимальности:

- минимум расстояния, пройденного на модифицированном участке маршрута:

$$R_1^K = \min_{j \in J_K} \left(\sum_{i=1..N_j} d_{ij} \right), \quad (16)$$

где $d_j = \sum_{i=1..N_j} d_{ij}$ — сумма длин участков движения судна на модифицированном участке маршрута L_S^K .

- минимум суммы углов поворота при маневрировании курсом:

$$R_2^K = \min_{j \in J_K} \left(\sum_{i=1..N_j} \Delta K_{ij} \right), \quad (17)$$

где $\Delta K_\Sigma = \sum_{i=1..N_j} \Delta K_{ij}$ — сумма углов поворотов при маневрировании курсом, включая поворот на прежний (заданный исходным маршрутом) курс.

Поскольку имеется два критерия оптимальности, то применяются они по следующей схеме.

1. На множестве безопасных решений по управлению курсом с помощью первого критерия оптимальности получают множество субоптимальных решений:

$$J_K^* = \{j | R_1^K(j) < \rho, j \in J_K\}, \quad (18)$$

где ρ — заданный уровень.

Таким образом,

$$J_K^* \subset J_K. \quad (19)$$

2. На множестве субоптимальных решений с помощью второго критерия находят оптимальное решение:

$$j^* = j : \min(R_2^K(j)), j \in J_K^*. \quad (20)$$

При выборе оптимального маневра скоростью используют критерий минимума времени при движении судна с модифицированной скоростью:

$$R^V = \min_{j \in J_V} \left| \frac{D_j}{V_j} - \frac{D_j}{V} \right|, \quad (21)$$

где V — первоначальная скорость собственного судна; V_j — скорость движения при маневре скоростью; D_j — расстояние движения с новой скоростью.

Таким образом, если это возможно, находятся два оптимальных решения: *маневрирование курсом* и *маневрирование скоростью*. Эти решения выводятся как рекомендации для судоводителя. Кроме того, имеется возможность отображения множества субоптимальных решений, определяемых параметром ρ , значение которого может задаваться судоводителем (рис. 4).

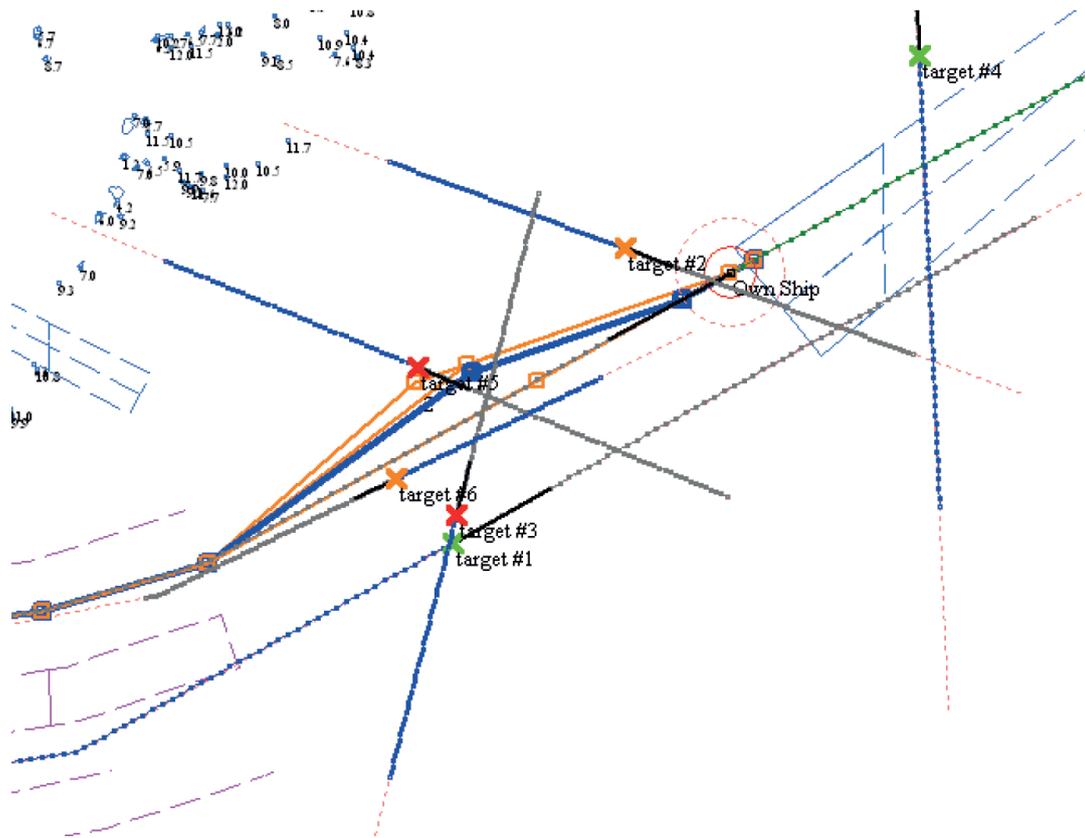


Рис. 4. Оптимальное и субоптимальные решения

Выводы

1. В данной работе изложена методика автоматического принятия решений в автоматизированной системе расхождения судов в море. Решения, принимаемые в системе, позволяют безопасно разойтись одновременно с несколькими судами с учетом навигационных ограничений района плавания. Кроме того, эти решения строятся в соответствии с требованиями МППСС-72 и являются естественными для судоводителя.

2. Рекомендации по безопасному расхождению предоставляются судоводителю в виде набора оптимальных и субоптимальных маршрутов, из которых он может выбрать маршрут, соответствующий его собственным предпочтениям.

3. Система расхождения судов в море, основные принципы работы которой изложены в настоящей статье и в статье [10], реализована в виде программно-аппаратного комплекса, который прошел испытания на судне компании Совкомфлот в 2015 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Международные правила предупреждения столкновений судов в море 1972 г. (МППСС-72). — 5-е изд. — М.: Моркнига, 2011. — 142 с.
2. Васильев С. Н. Интеллектуальное управление динамическими системами / С. Н. Васильев, А. К. Жерлов, Е. А. Федосов [и др.]. — М.: Физматлит, 2000. — 352 с.
3. Вагущенко Л. Л. Поддержка решений по расхождению с судами / Л. Л. Вагущенко, А. Л. Вагущенко. — Одесса: Феникс, 2010. — 229 с.
4. Вагущенко Л. Л. Мультиагентный подход к решению задач расхождения судов / Л. Л. Вагущенко, А. Л. Вагущенко // Судовождение. — 2008. — № 15. — С. 35–43.
5. Цымбал Н. Н. Формализация МППСС-72 в части координации взаимодействия судов при расхождении / Н. Н. Цымбал, Р. Ю. Бужбецкий // Судовождение. — 2006. — № 12. — С. 124–129.

6. *Dmitriev S. P. Safety Measures for a Ships Passing Track in the Multiagent Framework / S. P. Dmitriev, N. V. Kolesov, A. V. Osipov // 5th IFAC Conference on Maneuvering and Control of Marine Craft, Aalborg, Denmark, 2000. — Oxford: Pergamon, 2001. — Pp. 373–378.*

7. *Дмитриев С. П. Автоматический синтез траекторий движения как средство интеллектуальной поддержки судоводителя / С. П. Дмитриев, Н. В. Колесов, А. В. Осипов, Г. Н. Романычева // Гироскопия и навигация. — 2001. — № 3 (34). — С. 19–31.*

8. *Дмитриев С. П. Система интеллектуальной поддержки судоводителя при расхождении судов / С. П. Дмитриев, Н. В. Колесов, А. В. Осипов, Г. Н. Романычева // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. — 2003. — № 2. — С. 98–105.*

9. *Смоленцев С. В. Концепция автоматизированной интеллектуальной системы расхождения судов / С. В. Смоленцев, Б. В. Афанасьев, А. Е. Филяков, Д. В. Куниц // Эксплуатация морского транспорта. — 2012. — № 4 (70). — С. 11–14.*

10. *Смоленцев С. В. Проблема оценки навигационной ситуации в море / С. В. Смоленцев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 6 (34). — С. 23–28.*

AUTOMATIC SYNTHESIS OF DECISIONS ON VESSELS COLLISION AVOIDANCE AT SEA

The current article discusses the problem of maritime safety. To solve this problem an automated vessels collision avoidance system was developed. If the current navigation situation is estimated as dangerous, there is a need to make decisions to maneuver. The developed system is an intelligent advisor. This system offers options for optimal and suboptimal solutions for collision avoidance with all targets-vessels considering the navigational restrictions in the area. The authors propose an original algorithm of the synthesis of safe ship management solutions. The final set of solutions is a result of a sequence of sets: Possible solutions — Workable solutions — Feasible solutions — Safe solutions. Safe paths for the vessel are presented as possible solutions, eventually leading the vessel to its initial route. New trajectories are formed by a sequence of maneuvers as consistent with COLREG-72 in current navigation conditions.

Keywords: collision avoidance system, collision avoidance, making decisions, safe solutions, ships trajectory, COLREG-72.

REFERENCES

1. *Mezhdunarodnye pravila preduprezhdenija stolknovenij sudov v more 1972 g. (MPPSS-72). 5-e izd. M.: Morkniga, 2011.*

2. *Vasilev, S. N., A. K. Zherlov, E. A. Fedosov, et al. Intellektualnoe upravlenie dinamiceskimi sistemami. M.: Fizmatlit. 2000.*

3. *Vagushhenko, L. L., and A. L. Vagushhenko. Podderzhka reshenij po rashozhdeniju s sudami. Odessa: Feniks, 2010.*

4. *Vagushhenko, L. L., and A. L. Vagushhenko. “Multiagentnyj podhod k resheniju zadach rashozhdenija sudov.” *Sudovozhdenie* 15 (2008): 35–43.*

5. *Cymbal, N. N., and R. Ju. Buzhbeckij. “Formalizacija MPPSS-72 v chasti koordinacii vzaimodejstvija sudov pri rashozhdenii.” *Sudovozhdenie* 12 (2006): 124–129.*

6. *Dmitriev, S. P., N. V. Kolesov, and A. V. Osipov. “Safety Measures for a Ships Passing Track in the Multiagent Framework.” *5th IFAC Conference on Maneuvering and Control of Marine Craft, Aalborg, Denmark, 2000.* Oxford: Pergamon, 2001: 373–378.*

7. *Dmitriev, S. P., N. V. Kolesov, A. V. Osipov, and G. N. Romanycheva. “Avtomaticeskij sintez traektorij dvizhenija kak sredstvo intellektual’noj podderzhki sudovoditelja.” *Gyroskopy and Navigation* 3(34) (2001): 19–31.*

8. *Dmitriev, S. P., N. V. Kolesov, A. V. Osipov, and G. N. Romanycheva. “System of intelligent support of a ship navigator for collision avoidance.” *Journal of Computer and Systems Sciences International* 42.2 (2003): 256–263.*

9. *Smolentsev, S. V., B. V. Afanasiev, A. E. Filyakov, and D. V. Kunits. “Concept of automated intelligent system for ships collision avoidance.” *Jekspluatacija morskogo transporta* 4(70) (2012): 11–14.*

10. *Smolentsev, S. V. “The problem of estimation of navigation situation in the sea.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 6(34) (2015): 23–28.*

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Смоленцев Сергей Викторович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
sswasily@mail.ru, kaf_avt@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Smolentsev Sergey Victorovich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
sswasily@mail.ru, kaf_avt@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 20 января 2016 г.

УДК 004: 656.61.073

В. М. Дорожко

**ОЦЕНКА ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОБЛАСТИ ОПРОКИДЫВАНИЯ КОНТУРА
МОРСКОГО СУДНА НА «ВОЛНЕ-УБИЙЦЕ»**

На основе метода вычислительной гидродинамики создан виртуальный опытовый бассейн, в котором выполнялись вычисления опрокидывания контура морского судна. Обоснован выбор типа и параметров «волны-убийцы» с одним центральным максимумом высотой 30 м и двумя боковыми возвышениями. Сформулированы начальные и граничные условия, обеспечивающие генерацию «волны-убийцы» в расчетной области и движение контура под воздействием волн. Обеспечена регистрация на каждом шаге вычислений величин, определяющих движение контура. Выбран перечень основных параметров, оказывающих влияние на устойчивость контура к опрокидыванию «волной-убийцей», к которым относятся масса контура, начальная метацентрическая высота контура, длина «волны-убийцы», начальное удаление контура от «волны-убийцы». Для всех сочетаний указанных параметров получены значения максимального угла крена контура. На основании указанных параметров сформированы параметрические области, соответствующие «опрокидыванию» контура. Установлено, что уменьшение массы контура судна, его начальной метацентрической высоты, начального расстояния контура до «волны-убийцы» и её длины способствует «опрокидыванию» контура. Полученные результаты могут использоваться при разработке мероприятий по обеспечению безопасности и проектированию морских судов.

Ключевые слова: «волна-убийца», вычислительная гидродинамика, контур судна, опрокидывание судна, метацентрическая высота контура, угол крена.

Введение

Среди многообразия морских волн особое место занимают «волны-убийцы», достигающие высоты 30 м [1]. Исследования механизма их возникновения выполнены Т. В. Benjamin, J. E. Feir и В. Е. Захаровым в периодическом издании [2]. В России изучением «волн-убийц» занимаются ученые Е. Ф. Пелиновский, С. И. Бадулин, А. И. Дьяченко, И. И. Диденкулова, В. Е. Захаров, А. А. Куркин, А. В. Слюняев, Д. В. Чаликов, Р. В. Шамин и др. Исследование этих волн является актуальным научным направлением. Такие проекты, как «MaxWave» (2000 – 2003 гг.) [3] и «Extreme Seas» (2009 – 2012 гг.), см. сайт в Интернете <https://www.hse.ru/data/2011/10/12/1270460467/ES%202011sep17.pdf>, были профинансированы Евросоюзом с целью установки частоты возникновения «волн-убийц» и разработки предложений по безопасности морских судов. Для координации отечественных исследований в 2012 г. был создан Научный центр по изучению «волн-убийц». За рубежом аналогичными исследованиями занимается «Rogue Waves Research Project»), сокр. назв. «MULTIWAVE» (сайт в Интернете <http://www.ercmultiwave.eu>), в состав которого от России входит академик В. Е. Захаров.

В ряде публикаций: [1], [4], приводится анализ потерь среди морских судов от встречи с «волнами-убийцами». Считается, что именно эти волны явились причиной гибели 22 супертанкеров [1] в период 1968 – 1994 гг. Только за четыре года (2006 – 2010 гг.) было зарегистрирова-