

## КРИТЕРИЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАНЕВРОВ РАСХОЖДЕНИЯ С СУДАМИ

Л.Л.Вагущенко , А.Л.Вагущенко, А.В.Алексишин (ОНМА)

Рассматриваемая проблема. Выработка рекомендаций по расхождению с судами является одной из задач современных бортовых систем предупреждения столкновений (СПС). Анализ практики судовождения позволяет сделать вывод, что задача планирования маневров расхождения является многоцелевой. При решении этой задачи необходимо использовать несколько частных критериев эффективности с последующим объединением их для получения обобщенной оценки качества вырабатываемой СПС рекомендации по мерам для предупреждения столкновения. Частные критерии должны описывать по возможности все важные аспекты цели системы, но при этом желательно, чтобы их количество было минимальным.

Для того, чтобы СПС могла вырабатывать рекомендации по расхождению с судами, задача предупреждения столкновений формализуется. Эта процедура связана с выбором критериев эффективности и с оценкой взаимоотношений между ними. Из-за нечеткости МППСС72 при формализации задачи расхождения с судами приходится использовать опыт и интуицию судоводителей, что приводит к проявлению неопределенности субъективной, нечеткой природы, которая не может быть описана в привычном вероятностном смысле.

Анализ публикаций. Вопросы выбора критериев для оценки эффективности планов расхождения с судами рассматривается во многих литературных источниках, посвященных проблемам судовождения, например, в книгах [1, 2]. Количественное определение коллизионного риска в процессе сближения судов и оценка эффективности выбираемых для расхождения мер при существующей угрозе столкновения обсуждаются, в частности, в работах [2-4]. Для оценки эффективности планируемых для предупреждения столкновений действий предложены разные способы. Обычно они основаны на использовании одного критерия качества с применением вероятностного подхода к оценке эффективности намечаемых для расхождения мер. Вопросы учета неопределенностей, которые не могут быть описаны в вероятностном плане и которые проявляются в задачах расхождения, проработаны еще недостаточно полно.

Цель статьи состоит в разработке обобщенного критерия качества для оценки эффективности выбираемых для расхождения планов движения в условиях неопределенности нечеткой природы.

Изложение материалов исследования. На основе анализа требований к расхождению с судами (МППСС-72, других нормативных документов) и рекомендаций обычной морской практики можно определить, что при

планировании действий для устранения угрозы столкновения преследуются такие цели:

- безопасность;
- заблаговременность;
- заметность;
- экономность (расхождение не должно сопровождаться значительным увеличением  $\Delta_S$  пути нашего судна)).

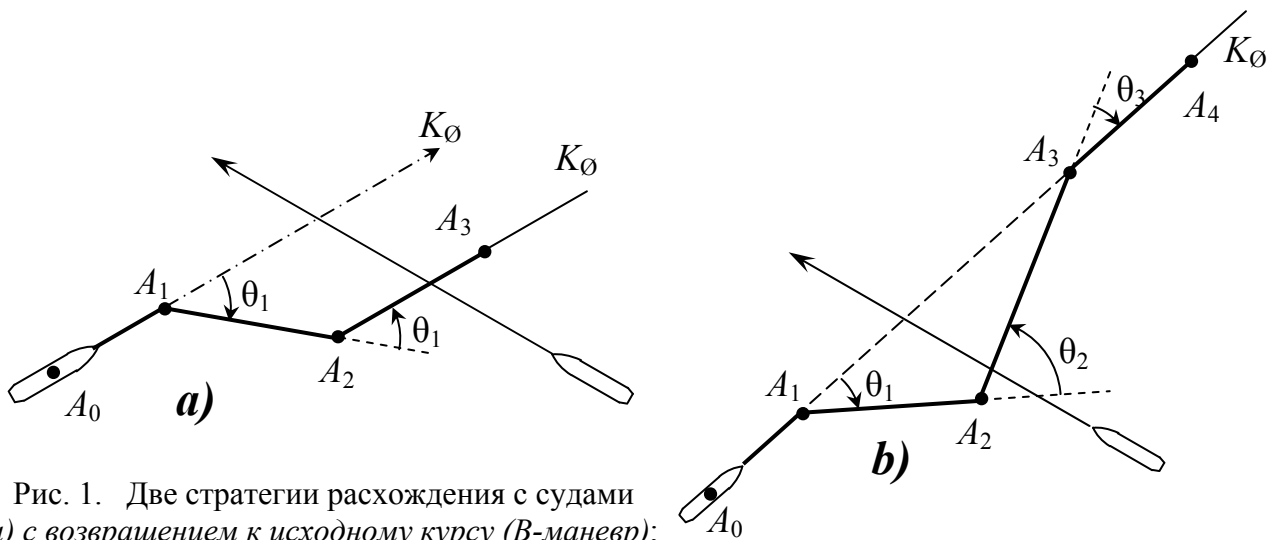


Рис. 1. Две стратегии расхождения с судами  
*a)* с возвращением к исходному курсу (В-маневр);  
*b)* с возвращением на заданную линию пути.

В общем случае стратегия изменений курса для расхождения с судами включает несколько поворотов и состоит из прямолинейных отрезков, т.е. является кусочно-непрерывной. Углы поворота с одного отрезка на другой не должны быть малыми. От начала до конца реализации плана расхождения судно оператора (СО) по отношению ко всем «целям» является «give-way» (уступающим дорогу) судном. Для примера на рис. 1 приведены две простые стратегии расхождения. Первая из них  $A_0A_1A_2A_3$  включает три, а вторая  $A_0A_1A_2A_3A_4$  - четыре отрезка. На этом рисунке  $K_{III}$  - исходный курс,  $\theta_j$  - угол поворота.

На любом из отрезков намеченного для расхождения пути не только не должно быть чрезмерного сближения с «целями», но и при подходе судна оператора к точкам поворота у «целей» не должна возникать необходимость принятия маневра для расхождения с ним. Особенно неблагоприятно, когда во втором случае «цель» становится «give-way» судном и с большой вероятностью может принять действие, препятствующее выполнению выбранного судном оператора плана расхождения. Поэтому первую цель выбора стратегии расхождения следует разделить на две:

- отсутствие чрезмерного сближения с судами при движении по намеченной для расхождения траектории;
- отсутствие у всех «целей» в процессе выполнения судном оператора плана расхождения необходимости маневра для расхождения с СО.

Формализация этих целей не представляет особых затруднений, но при дальнейшем изложении для простоты вторая из них не учитывается.

Показатель эффективности плана расхождения следует выбирать таким, чтобы он количественно отражал степень его соответствия поставленным целям. Задача оценки эффективности системы с несколькими целями относится к сложным. Поэтому количество целей стараются свести к одной, используя дополнительные ограничения на выбираемые решения или другие способы. Если такая редукция сказывается на корректности получаемых результатов, то применяют методы оценки качества многоцелевых систем. Выбор удачного показателя, позволяющего судить об эффективности многоцелевой системы, зависит от того, насколько глубоко она изучена лицами, его определяющими. На все виды систем управления готовых рекомендаций по выбору критерия качества нет. В настоящее время существует множество процедур для решения многоцелевых задач [5]: метод главной компоненты; метод уступок, метод комплексного критерия, метод Гермейера, метод справедливого компромисса, метод условного центра масс, метод на основе функции Харрингтона, метод идеальной точки, метод Парето, графоаналитический метод, ЛПт –поиск и т. д.

Для оценки качества вырабатываемых СПС рекомендаций по расхождению с судами нами выбран метод в чем-то похожий на метод идеальной точки. Задавая на практике границы  $D^S$ ,  $T^S$  безопасных расстояний ( $D$ ) и времени ( $T$ ) кратчайшего сближения, а также учитывая предпочтительное  $\theta^P$  в данных условиях значение угла отклонения ( $\theta$ ) от курса и необходимость избегать существенного увеличения  $\Delta_S$  пути следования, судоводитель, по существу, определяет желаемые (идеальные) параметры  $D_R$ ,  $T_R$ ,  $\theta_R$ ,  $\Delta_{SR}$  для решения задачи. Обычно значения  $D^S$ ,  $T^S$ ,  $\theta^P$  соответствуют рекомендуемым МППСС72 маневрам. Но кроме них имеются и не рекомендуемые, но разрешенные МППСС72 действия, а также вынужденные меры, вызванные несоблюдением другим судном своих обязанностей по устранению угрозы столкновения. Из первых действий в качестве примера можно назвать уклонения с пересечением курса «цели» по носу, повороты в не рекомендуемую сторону. Для не рекомендуемых и вынужденных действий желательными являются значения,  $D_R$ ,  $T_R$ ,  $\theta_R$ , превышающие  $D^S$ ,  $T^S$ ,  $\theta^P$ . Для подстройки желательных значений к таким действиям используются не меньшие единицы коэффициенты  $k_D$ ,  $k_T$ ,  $k_\theta$ . Их величина зависит от характера не рекомендуемых и вынужденных действий. В общем случае желаемые значения параметров  $D_R$ ,  $T_R$ ,  $\theta_R$ ,  $\Delta_{SR}$  можно записать

$$D_R = k_D \cdot D^S, \quad T_R = k_T \cdot T^S, \quad \theta_R = k_\theta \cdot \theta^P, \quad \Delta_{SR} \rightarrow 0; \quad (1)$$

где для рекомендуемых МППСС72 действий коэффициенты  $k_D$ ,  $k_T$ ,  $k_\theta$  равны единице.

Определение эффективности многоцелевых систем, к которым относится и СПС, включает нахождение частных критериев и их объединение (свертку) в обобщенный показатель эффективности системы. В представляемой работе определение частных критериев основывается на применении нечеткой логики. Ее преимущество заключается в простоте количественной оценки эффективности систем с качественными целями.

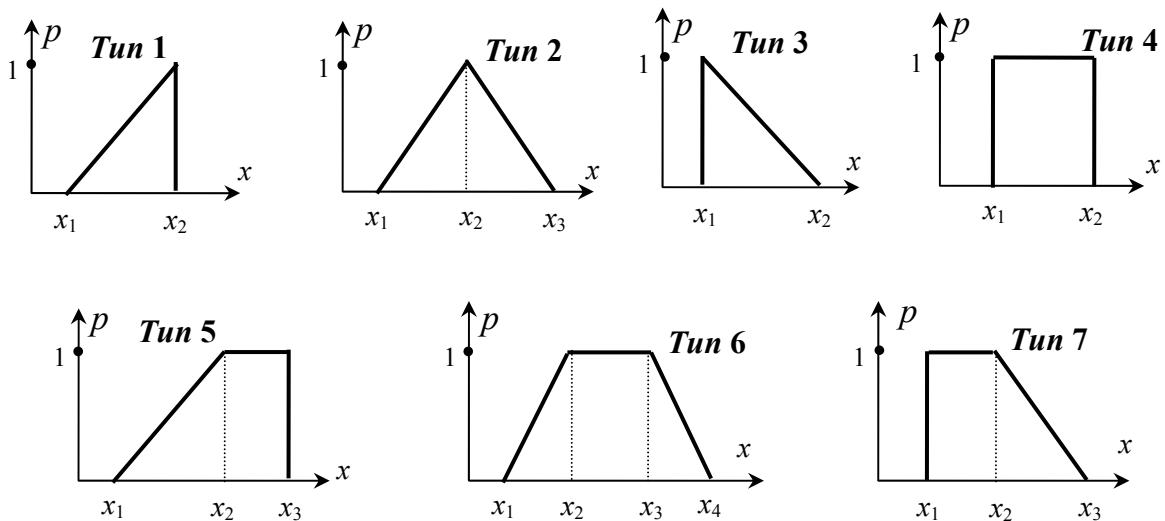


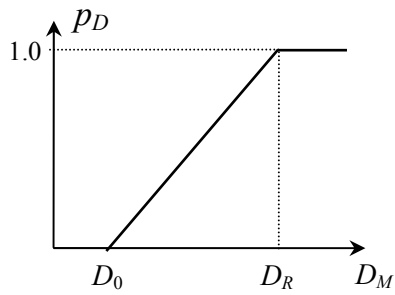
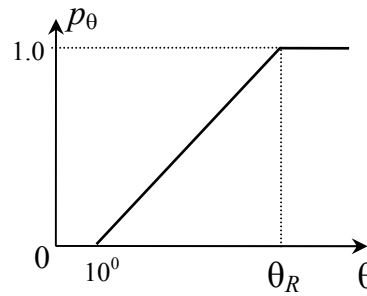
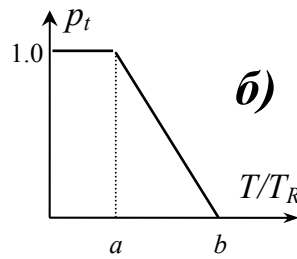
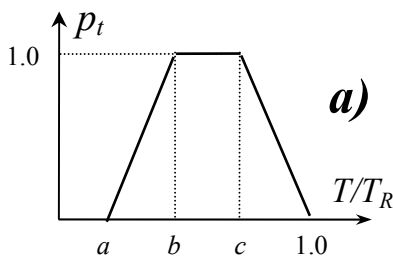
Рис. 2. Возможные типы функций желательности

Нередко для формализации частных показателей эффективности систем применяются так называемые «функции желательности» [5], наиболее распространенные из которых представлены на рис. 2. Функции желательности изменяются от нуля в области недопустимых значений до единицы, когда значение анализируемого показателя качества наилучшее. В итоге все качественные и количественные показатели представляются в единой безразмерной шкале, что позволяет производить их сравнение и упрощает процедуру свертки в обобщенный критерий.

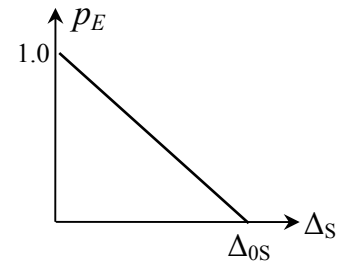
Частными критериями для оценки эффективности вырабатываемой СПС стратегии расхождения нами приняты степени  $p_D$ ,  $p_\theta$ ,  $p_T$ ,  $p_E$  соответствия отвечающих этой стратегии значений  $D$ ,  $T$ ,  $\theta$ ,  $\Delta_S$  желаемым для заданных условий плавания уровням: безопасности ( $D_R$ ), заметности ( $\theta_R$ ), заблаговременности ( $T_R$ ) и экономности ( $\Delta_{SR}$ ). Этим частным критериям соответствуют функции желательности

$$p_D = F_D(D_M); \quad p_T = F_T(T/T_R); \quad p_\theta = F_\theta(\theta); \quad p_E = F_E(\Delta_S); \quad (2)$$

вид которых представлен на рис. 3-6.

Рис. 3. Функция  $p_D = F_D(D_M)$ Рис. 4. Функция  $p_\theta = F_\theta(\theta)$ Рис. 5. Функции  $p_T = F_T(T/T_R)$ 

а) для «give-way» судна; б) для «stand-on» судна.

Рис. 6. Функция  $p_E = F_E(\Delta_S)$ 

Аргументом  $D_M$  первой функции является минимальная из дистанций до «целей» и до границы безопасной в навигационном отношении акватории в процессе выполнения плана расхождения. Опорные точки выбранных функций желательности определяются экспертами на основе опыта решения задач расхождения в различных условиях плавания, анализа требований нормативных документов и учета ряда других факторов.

После определения частных показателей выбирается метод их свертки в обобщенный критерий  $P_0$  эффективности системы

$$P_0 = F_0(p_1, p_2, \dots, p_n). \quad (3)$$

где  $p_j$  - частные показатели эффективности системы.

Вид функции свертки определяется на основе тщательного анализа решаемой задачи и взаимосвязей ее целей. Ниже на примере системы с двумя целями приведены наиболее распространенные процедуры объединения частных критериев:

$$P_0 = (p_1 + p_2)/2;$$

$$P_0 = \frac{w_1 \cdot p_1 + w_2 \cdot p_2}{w_1 + w_2}, \text{ где } w_1, w_2 - \text{ веса целей;}$$

$$P_0 = p_1 \cdot p_2;$$

$$P_0 = \text{MIN}(p_1, p_2).$$

Для получения обобщенного показателя эффективности плана расхождения с судами нами выбрана функция свертки

$$P_0 = \delta(x) \cdot \frac{w_D \cdot P_D + w_\theta \cdot P_\theta + w_T \cdot P_T + w_E \cdot P_E}{w_D + w_\theta + w_T + w_E}, \quad (4)$$

где  $w_D, w_\theta, w_T, w_E$  - веса  $P_D, P_\theta, P_T, P_E$ ;

$$x = P_D \cdot P_T \cdot P_\theta;$$

$$\delta(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x \leq 0 \\ 1 & \text{при } x > 0 \end{cases}.$$

Анализ задачи расхождения показывает, что частные критерии имеют различную важность при ее решении. Из-за этого при свертке их значения берутся с разным весом. Эти веса назначаются экспертами умозрительно, исходя из представления о сравнительной важности частных критериев.

Адекватность предложенного обобщенного критерия качества целям задачи предупреждения столкновений проверялась с помощью созданной имитационной модели процессов расхождения судов. В этой модели используется разработанный нами алгоритм поиска наилучшего варианта расхождения с несколькими судами. Полученные с помощью имитационной модели результаты показали пригодность предлагаемого обобщенного критерия качества для выработки рекомендаций по предотвращению столкновений.

Выводы. Достоинство предложенного обобщенного критерия качества состоит в возможности оценки планов расхождения с учетом нескольких требований (целей), предъявляемых к решению задач предупреждения столкновений судов. Недостатком является необходимость умозрительного определения экспертами ряда параметров, что не исключает в полной мере влияния субъективного фактора на решение задачи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мальцев А.С. Маневрирование судов при расхождении /А. С. Мальцев – Одесса: Морской тренажерный центр, 2002. – 208 с.
2. Цымбал Н.Н. Гибкие стратегии расхождения судов / Н.Н.Цымбал, И.А.Бурмака, Е.Е.Тюпиков – Одесса: КП ОГТ, 2007. – 424 с.
3. Вагущенко Л.Л. Поддержка решений по расхождению с судами /Л.Л.Вагущенко, А.Л.Вагущенко – Одесса: Феникс, 2010. – 296 с.

4. Lee H.J. Development of collision avoidance system by fuzzy theory / H.J.Lee, W.J.Yoo and K.P.Rhee - Osaka, 1993, pp. 164-169 (The Second Japan-Korea Joint Workshop on Ship & Marine Hydrodynamics).
5. Алтунин А. Е. Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях / А.Е. Алтунин, М. В. Семухин. – Тюмень: Изд-во Тюмен. гос. ун-та, 2000. – 352 с.

УДК 656.61.052

Вагущенко Л.Л. Критерий эффективности маневров расхождения с судами / Л.Л.Вагущенко, А.Л.Вагущенко – Одесса: ИздатИнформ, 2012. – С. 51-57 - (Судовождение: Сб. науч. трудов ОНМА, Вып. 21).

Предлагается обобщенный критерий для оценки качества планов последовательных изменений курса для расхождения с несколькими судами. Он описывает такие важные аспекты цели бортовой системы предупреждения столкновений как безопасность, заблаговременность, заметность и экономность рекомендуемых этой системой действий для устранения угрозы столкновения. Учет этих рекомендаций позволяет вахтенному помощнику быстрее получать эффективные решения при расхождении с судами и уменьшить вероятность субъективных ошибок.

Ил. – 6. Список лит. – 5 назв.

Vagushchenko L.L. Criterion of efficiency of manoeuvres for collision avoidance with ships/ L.L.Vagushchenko, A.L. Vagushchenko – Odessa: IzdatInform, 2012. – P. 51-57 - (Navigation: Collection of scientific articles, ONMA, Issue 21).

The generalized criterion for assessment of quality of plans for collision avoidance with a few ships by successive changes of course is offered. It describes the such important aspects of purpose of the collision avoidance system as safety, done early, substantiality and economy of recommended by this system actions. The account of these recommendations allows to the watching officer quick to get the effective decisions for safe passing meeting ships and decrease probability of subjective errors.

Illustrations – 8. References – 5.