

10. Simankov, V. S. Struktura i metodologiya funkcionirovaniya intellektual'noj sistemy situacionnogo centra. / V.S. Simankov, A.N. CHerkasov // ZHurnal «Global'nyj nauchnyj potencial». – 2015. – № 12.
11. Simankov, V. S. Metodologicheskie aspekty postroeniya sistem podderzhki prinyatiya reshenij / V.S. Simankov, A.N. CHerkasov, A.O. Denisenko, S.N. Vladimirov // ZHurnal «Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta». – Izdatel'skij centr DGTU. – 2008. – Т. 8. – № 3(38). – S. 258–267.
12. Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravleniya / Pod red. A. A. Krasovskogo. — М.: Nauka, 1987. — 712 с.

УДК 656.61

DOI: 10.34046/aumsuomt96/9

## МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В СППР БЕЗОПАСНОСТИ СУДОВОЖДЕНИЯ

*В.В. Астреин, доктор технических наук*

В данной статье рассматриваются базовые математические методы к решению проблемы обеспечения глобальной безопасности судовождения при плавании судна в сложных условиях в некотором распределенном географическом пространстве.

**Ключевые слова:** безопасность, принятие решений, МППСС-72, функциональность, коллективное взаимодействие судов, критерий расхождения судов на заданное расстояние.

This article discusses the basic mathematical methods for solving the problem of ensuring the global safety of navigation when a vessel navigates in difficult conditions in a certain distributed geographic space.

**Keywords:** safety, decision-making, COLREGs-72, functionality, collective interaction of vessels, criterion of separation of vessels at a given distance.

Исследуемая Система Безопасности судо-вождения (СБС) состоит из некоторого множества судов – динамических объектов, распределенных в некотором географическом районе с достижением основной цели – обеспечение комплексной безопасности. Обеспечение безопасности судна осуществляется по человеко-машинной технологии. За последние годы судно обрело технические возможности моделирования себя, окружающую среду и осуществлять взаимообмен информацией с другими судами. Эти технические достижения позволили определить механизмы совершенствования и развития СБС. Одним из таких путей является внедрение Интеллектуальных систем поддержки принятия решений судоводителей (ИСППР) – автоматизированных систем, специально предназначенных для подготовки информации, необходимой судоводителю для принятия решения.

Первоначальным шагом при решении задач безопасности, решаемых в ИСППР является адекватное формализованное представление исследуемых процессов, т.е. построение математических моделей рассматриваемой системы. Построение полной модели СБС – чрезвычайно сложная задача анализа, а использование такой модели в процедуре выработки решений не представляется реальным ввиду переменного количества взаимодействующих судов, их подсистем, элементов, связей и возможного изменения их состава, и конфигурации. Поэтому общую модель

СБС предлагается разбить на единичные суда, их подсистемы и элементы. Тогда эта модель судна будет состоять из иерархической последовательности моделей вложенных подсистем. Такой подход позволяет декомпозировать модель безопасности единичного судна на ряд условно изолированных подсистем, которые в свою очередь разбиваются на элементы более низкого уровня иерархии.

Деятельность, в рассматриваемой системе, с целью обеспечения глобальной безопасности осуществляется одновременно на следующих уровнях взаимодействий:

- взаимодействие внутренних подсистем судна («по подсистемам»);
- взаимодействие с окружающей средой («судно-природа»);
- взаимодействие с другими судами («группа судов»).

Таким образом, построение глобальной стратегии безопасности представляет собой поэтапный процесс. Иначе говоря, сначала должны быть сформированы принципы безопасности для всех подсистем. Далее рассматриваются группы подсистем, объединенных по объектному, технологическому, функциональному и др. признакам; исследуется специфика и характер взаимодействия подсистем группы; строится модель взаимодействия и разрабатывается координирующая стратегия управления группы подсистем, которая обеспечивает согласованное функционирование

судна как в нормальных, так и аварийных режимах. И так далее вверх по ступеням иерархической лестницы. На заключительном этапе рассматривается уже не отдельное судно с его иерархией по подсистемам, а множество судов, объединенных в группы, распределенных в некотором пространстве среды с целью предупреждения столкновений. Наиболее сложным этапом является разработка глобальной стратегии безопасности. Где основным элементом является глобальный регулятор, который должен быть достаточно гибким и предусматривать все возможные варианты реконфигурации системы, оперативно реагировать на возникновение аварийных ситуаций в подсистемах и между судами, а также корректировать (изменять) глобальную цель при изменении общесистемных целей и приоритетов и (или) реагировать на действие внешних факторов.

Таким образом, в поставленной проблеме принятия решений по обеспечению безопасности судовождения возникает необходимость изучения влияния конфликта и поиска компромиссов как на глобальном уровне (между судами и окружающей средой), так и на локальном уровне (по подсистемам судна). Следовательно, в рассматриваемой системе вопросы обеспечения безопасности функционирования СБС, не могут быть решены *единообразно* вследствие отсутствия формальных математических методов описания исследуемого процесса, в частности, из-за объективных теоретических трудностей описания поведения судна в вероятностном пространстве *опасных и безопасных состояний*. В связи с этим задача синтеза нелинейных многомерных объектов относится к центральной проблеме современной теории управления и принятия решений.

И тем не менее, при комплексном учёте факторов влияющих на безопасность в целом, применение ИСППР может быть целесообразным уже на нынешнем этапе развития технологий, а ее комплексное использование будет ощутимо повышать эффективность и безопасность каждого судна.

При выработке решений по обеспечению безопасности судна наблюдается острая потребность в общих качественных результатах, требующая оптимизационного характера. Однако оптимизация требует осторожного отношения в процессах моделирования выработки решений в судовождении. *Оптимально – не значит безопасно*. Для этого подтверждения этого тезиса приведем следующие рассуждения:

1. Как правило, оптимальное решение оказывается неустойчивым, т.е. незначительные до-

вольно изменения в состояниях судна или природы могут привести к выбору существенно отличающихся действий, альтернатив или правил.

2. Критерии оптимизации и математические модели всегда связаны с глобальной целью косвенным образом, т.е. более или менее адекватно, но всегда приближенно.

3. Для повышения эффективности выработки решений определяют совокупность всех физических воздействий, которые обеспечивают минимум экономических потерь, энергии и других ресурсов при одновременной высокой скорости протекания процессов функционирования.

Построение оптимальной модели взаимодействия подсистем судна позволяет осуществить лишь локальную оптимизацию по подсистемам с оптимизационными критериями по сбережению топлива, по режиму работы силовой установки, минимальному потере времени и др. Если каждая подсистема будет работать оптимально, то это не означает, что судно оптимально будет работать в целом. Поэтому в данном случае уместно для целей оптимизации выработки решений вместо термина «оптимальное решение» применять термин «лучшее решение».

Понятие *лучшего решения* ( $BD$ ) зависит от чрезвычайно большого числа факторов, которые, как правило, не удается учесть в рамках фиксированной математической модели как по причине их количества, так и в силу затруднения математизации различных неопределенностей, оказывающих влияние на окончательный выбор. Эффективность выбора лучшего решения ( $BD$ ) для задания его ЭВМ определяется нечетким обобщенным критерием ( $D_i$ ), имеющим количественное представление. Поскольку ( $D_i$ ) есть количественная мера безопасности судна, то математически цель управления безопасностью выражается в стремлении к максимально возможному увеличению значения критерия безопасности ( $D_i$ ) из допустимых значений на каждом уровне сложности окружающей среды  $E_n \in E$ , т. е.

$$BD_{D_i} \rightarrow \max_{E_n \in E} D_i \text{ доп.} \quad (1)$$

Средством достижения этой цели является выбор управлений ( $u_1, u_2, \dots, u_n$ ) принадлежащих к областям их допустимых значений.

В самом общем случае все факторы, от которых зависит эффективность выбора ( $BD$ ), можно разбить на две группы:

- *контролируемые (управляемые) факторы*, выбор которых определяется судоводителем, принимающим решения ( $X_1, X_2, \dots, X_n$ );
- *неконтролируемые (неуправляемые) факторы*. Они характеризуют условия, в которых

осуществляется выбор, и судоводитель не может повлиять на их величину. В состав неконтролируемых факторов включают и время ( $t$ ). Неконтролируемые факторы можно разделить на три подгруппы:

— *детерминированные неконтролируемые факторы* – это неслучайные фиксированные величины, значение которых в точности известно. Обозначим их через  $(A_1, A_2, \dots, A_p)$ ;

— *стохастические неконтролируемые факторы* – случайные величины с известными законами распределения. Обозначим их через  $(Y_1, Y_2, \dots, Y_k)$ ;

— *неопределенные неконтролируемые факторы*, для каждого из которых известна только область, внутри которой находится неизвестный закон их распределения. Обозначим эти величины через  $(Z_1, Z_2, \dots, Z_r)$ . Очевидно, что критерий  $(D_i)$  определяется неконтролируемыми условиями окружающей среды, а вернее степенью ее неопределенности по различным показателям, параметрам и характеристикам.

Такое управление носит характер *полифакторного или многофакторного*. В соответствии с выделенными факторами обобщенный критерий  $(D_i)$  можно представить в следующем виде:

$$\bar{D}_i \rightarrow f(X_1, X_2, \dots, X_n, A_1, A_2, \dots, A_p, Y_1, Y_2, \dots, Y_k, Z_1, Z_2, \dots, Z_r, t). \quad (2)$$

Исходя из представленных рассуждений каждый из внешних параметров подцелей и ограничений  $(a_1, a_2, \dots, a_n)$ , формирующих представление о состоянии судна зависит от внутренних параметров и ограничений  $(b_1, b_2, \dots, b_k)$ , которые представляют собой подзадачи:

$$\begin{aligned} a_1 &= a_1(b_1, b_2, \dots, b_k), \\ a_2 &= a_2(b_1, b_2, \dots, b_k), \\ &\dots\dots\dots \\ a_n &= a_n(b_1, b_2, \dots, b_k), \end{aligned} \quad (3)$$

или в векторном виде:

$$\bar{a}(\bar{b}) = [a_1(\bar{b}), a_2(\bar{b}), \dots, a_n(\bar{b})], \quad (4)$$

при этом допустимым вариантом решения задачи принятия решений будем называть такой набор значений внутренних параметров:

$$\bar{b}_{\text{доп}} = (\bar{b}_{1,\text{доп}}, \bar{b}_{2,\text{доп}}, \dots, \bar{b}_{k,\text{доп}}), \quad (5)$$

при котором удовлетворяются все заданные ограничения. Тогда лучшим решением, на основании информации о состоянии судна и окружающей среды, будет являться выражение:

$$BD_{D_i} = \min_a \max_{\bar{b}_{\text{доп}}} \bar{D}_i \text{ доп.} \quad (6)$$

Следовательно, для выработки решений по управлению безопасностью, ИСППР должна учитывать работу как отдельных подсистем, так и согласование их действий при циклическом решении задач по модели (6).

Рассматривая внутренние подсистемы судна, основные задачи, решаемые на этом уровне управления, отражающие главные цели системы, могут быть отнесены к одному из следующих типов: стабилизация, выполнение программы, слежение, экстремальное управление, и др. При проектировании судна все перечисленные задачи могут находиться в определенной иерархической взаимосвязи и присутствовать одновременно. Например, на одном из иерархических уровней нужно решать задачу стабилизации, в то же время на более высоком уровне может ставиться задача экстремального управления в соответствии с некоторым критерием стабилизации и т.д. Число таких «вложений» теоретически не ограничено. Гибридные режимы являются самыми сложным с точки зрения совместной работы элементов подсистем, с тем чтобы максимально обеспечивалась целостность и безопасность всей системы в целом.

Полнофункциональный процесс поддержки принятия решений обеспечивается поэтапно математическим аппаратом теории принятия решений, способствующим эффективному выбору наилучшего варианта. В настоящее время существует достаточно большое количество классификаций методов и задач принятия решений: на основе исходной информации, с учетом предпочтений судоводителя, с использованием экспертной информации о проблеме и т.д. Рассмотрим наиболее распространенную классификацию задач и методов принятия решений.

#### Методы принятия решений в условиях определенности

К этому классу относятся задачи, для решения которых имеется достаточная и достоверная количественная информация. В этом случае с успехом применяются методы математического программирования, суть которых состоит в нахождении оптимальных решений на базе математической модели реального объекта. Основные условия применимости методов математического программирования следующие:

1. Задача должна быть хорошо формализована, т. е. имеется адекватная математическая модель реального объекта.
2. Существует некоторая единственная целевая функция (критерий оптимизации), позволяющая судить о качестве рассматриваемых альтернативных вариантов.
3. Имеется возможность количественной оценки значений целевой функции.
4. Задача имеет определенные степени свободы (ресурсы оптимизации), т. е. неко-

торые параметры функционирования системы, которые можно произвольно изменять в некоторых пределах в целях улучшения значений целевой функции.

Общий вид задачи оптимизации и принятия решений в условиях определенности определяется следующим выражением:

$$f_i(x) \rightarrow \max, f_i: D \rightarrow R, i = 1, \dots, m; D \subseteq R \quad (7)$$

где  $f_i(x)$  – функции выбора,  $D$  – множество  $n$ -мерных векторов  $(x_1, \dots, x_n)$ ,  $R$  – множество вещественных чисел.

### Задача управления судном в окружающей среде

Задачу управления судна ( $S^0$ ) по траектории можно сформулировать следующим образом: пусть в некоторой окружающей среде функционирует судно ( $S^0$ ) состояние ( $S_0$ ) которого описывается вектор-функцией:

$$S_0(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_n(t)]^T, \quad (8)$$

а состояние среды ( $E$ ) – вектор-функцией:

$$E_0(t) = [e_1(t), e_2(t), \dots, e_w(t)]^T. \quad (9)$$

Под переменными состояниями  $s_i(t)$  ( $i = \overline{1, n}$ ) полагают, например, курс, скорость и т. д. в момент времени  $(t)$ . Под переменными средями  $e_i(t)$  ( $i = \overline{1, w}$ ), понимаются лингвистические переменные, представляющие опасности для судна (течение, ветер, волнение и т. д.).

Судно и среда, взаимодействуя друг с другом, образуют некоторую систему «судно-природа». Состояние системы «судно-природа» в момент времени  $t$  описывается вектор-функцией  $S_0(t)$ , которая определяется как множество различных состояний системы «судно-природа» описывается точками  $(h + w)$ -мерного пространства, которое будем обозначать как  $\{S_0\}$  и называть пространством состояний системы «судно-природа». Под начальным состоянием системы будем понимать состояние  $S_{оп.} = \langle S_{оп.}, E_{оп.} \rangle$ , определяемое вектор-функциями:

$$S_{оп.} = S_0(t_{оп.}), E_{оп.} = E_0(t_{оп.}), \quad (10)$$

где  $t_{оп.}$  – начальный момент времени, т. е. момент начала перевода системы  $S^0$  из состояния  $S_{оп.}$ .

Соответственно, конечное безопасное состояние будет обозначаться как  $S_k = \langle S_k, E_k \rangle$  и определяться векторами:

$$S_k = S_0(t_k), E_k = E_0(t_k), \quad (11)$$

где  $t_k$  – конечный момент времени.

Состояние системы «судно-природа», зафиксированное в текущий момент времени  $t_T$ , будем называть текущим состоянием. Это состояние  $S_T = \langle S_T, E_T \rangle$  определяется вектор-функциями:

$$S_T = S_0(t_T), E_T = E_0(t_T), \quad (12)$$

Предположим, что  $S^0$  выполняет некоторые действия, совокупность которых описывается

вектор-функцией  $A(t) = [a_1(t), a_2(t), \dots, a_m(t)]^T$ . С помощью действий  $A(t)$  она может изменять, как было указано выше, свое состояние  $S_0(t)$  и уменьшать негативное влияние  $E_0(t)$  природы.

Цель  $S^0$  заключается в том, чтобы, совершая некоторые действия, перевести систему «судно-природа» из начального опасного состояния – в конечное безопасное, т. е.  $S_{оп.} \rightarrow S_k$ . Если природа стационарная, т. е. ее состояние  $E_{оп.} = E_T = E_k = const.$ , то изменения в системе «судно-природа» осуществляются лишь за счет изменений состояния  $S_0$  и действий, т. е.  $S_0(t) = \langle S_0(t), E_0(t) \rangle$ , где  $E_0(t) = f_{S_0}(A_0(t))$ , т. е. функцией только действий судна.

Если же природа является нестационарной, т. е. её состояние изменяется не только в результате выполнения  $S^0$  некоторых действий, но и в результате действия каких-либо других сил  $g(t)$ , присущих природе, то её состояние будет описываться функцией  $E_0(t) = f_{E_0}(A_0(t), g(t), t)$ . В этом случае состояние  $S^0$  также изменяется не только в результате выполнения некоторых действий, но и в результате влияния природных сил  $g(t)$ . Поэтому состояние  $S^0$  с учетом его динамики описывается вектор-функцией:

$$S_0(t) = [s_1(g(t), E_0(t), t), s_2(g(t), E_0(t), t), \dots, s_n(g(t), E_0(t), t)]^T, \quad (13)$$

компоненты которой являются функциями действий  $S^0$  и сил, действующих в природе, состояния природы и времени, т. е.

$$S_0(t) = f_{S_0}(g(t), E_0(t), t) = \tilde{f}_{S_0}(A_0(t), g(t), t). \quad (14)$$

В общем случае изменения состояния системы «судно-природа» носят непрерывный характер и описываются системой дифференциальных уравнений вида:

$$\dot{S} = f(A(t), S(t), E(t), g(t), t) = f(A(t), S(t), g(t), t), \quad (15)$$

где  $\dot{S} = dS(t)/dt$  – производная вектор-функции  $S(t)$  по времени.

Ряд состояний системы «судно-природа» может быть запрещен. Поэтому вводятся ограничения, накладываемые на возможные состояния,

$$S_0(t) \in \{S_{доп.}(t)\} \subset \{S_0\}, \quad (16)$$

где  $\{S_{доп.}(t)\}$  – множество допустимых состояний системы «судно-природа» в момент времени  $t$ , принадлежащее множеству  $\{S_0\}$ .

Все возможные действия  $S^0$  образуют множество  $\{A_0\}$ . Аналогично, в каждой конкретной ситуации некоторые действия  $A_{доп.}(t) \in \{A_0\}$  могут быть невыполнимыми или даже недопустимыми. Поэтому определяются ограничения, накладываемые на действия судна в момент времени  $t$ , например, как

$$A_0(t) \in \{A_{доп.}(t)\} \subset \{A_0\}, \quad (17)$$

где  $\{A_{доп.}(t)\}$  – множество допустимых действий  $S^0$  в момент времени  $t$  из множества  $\{A_0\}$ .

Задача управления безопасностью  $S^0$  состоит в том, чтобы определить такую последовательность действий (вектор-функцию действий)  $A_0(t)$  на интервале времени  $[t_{он}, t_к]$ , выполнение которых при связях (15), начальных условиях (10) и ограничениях (16) и (17) обеспечивало бы экстремум функционала:

$$Y = \Phi_{т.}(S_k, E_k, t_k) + \int_{t_{он}}^{t_k} F(A_0(t), S_0(t), E_0(t), g(t), t) dt \quad (18)$$

или с учетом состояния системы  $S_0(t) = \langle S_0(t), E_0(t) \rangle$ , то

$$Y = \tilde{\Phi}(S_k, t_k) + \int_{t_{он}}^{t_k} \tilde{F}(A_0(t), S_0(t), g(t), t) dt \quad (19)$$

определяющего цель функционирования  $S^0$  среди опасностей природы и оценивающего качество процесса управления.

Таким образом, действия  $\bar{A}_0(t)$  будут называться оптимальными действиями, а соответствующая траектория  $\bar{S}_0(t)$  — оптимальной траекторией. В выражениях (18), (19) первое слагаемое в правой части — функционал, оценивающий качество.

Таблица 1 – Матрица решений

$\Omega$ M	$\omega_1$	$\omega_2$	...	$\omega_j$	...	$\omega_r$
$m_1$	$f_{11}$	$f_{12}$		$f_{1j}$		$f_{1r}$
$m_2$	$f_{21}$	$f_{22}$		$f_{2j}$		$f_{2r}$
...						
$m_k$	$f_{k1}$	$f_{k2}$		$f_{kj}$		$f_{kr}$
...						
$m_n$	$f_{n1}$	$f_{n2}$		$f_{nj}$		$f_{nr}$

где  $\omega_j \in \Omega$ , т.е. множества состояний природы  $\Omega = \{\omega_1 \dots \omega_j \dots \omega_r\}$ ;

$m_k \in M$ , т.е. множества управляющих воздействий  $M = \{m_1 \dots m_k \dots m_n\}$ ;

$f_{kj} \in F$ , т.е. функция качества управления  $F = \{f_{11}, \dots, f_{kj}, \dots, f_{nr}\}$ .

Задача расхождения судов по аналогии «игры человека с природой» тоже отражает конфликтную ситуацию, возникающую при столкновении интересов в выборе решения. Но «стихийным силам природы» нельзя приписать разумные действия, направленные против человека и тем более какой-либо «злой умысел». Таким образом, корректнее говорить о конфликтной ситуации, вызванной столкновением интересов человека и неопределенностью действий Природы.

Судоводитель, играя с Природой, стремится максимизировать свой выигрыш (выполнить Правила), поэтому, если он осторожный игрок (а теория игр рассматривает именно таких игроков), он должен при выборе своей стратегии руководствоваться тем, что неизвестные или известные ему закономерные действия Природы приведут к наименее благоприятным последствиям.

**Принятие решений в условиях риска**

Формализация задачи предупреждения

столкновения конечного состояния системы «судно-природа», второе слагаемое оценивает качество процесса управления на всем интервале  $[t_{он}, t_к]$ .

**Принятие решений в условиях неопределенности**

Проблемы принятия решений в условиях неопределенности (на основе недостаточных данных) можно интерпретировать как конфликт игрока, принимающего решения с Природой теории игр. Характерная черта такой игры – возможность получения информации в результате некоторого статистического эксперимента для оценки распределения вероятностей стратегий природы с помощью функции качества управления  $F = \{f_{kj}\}$ . Исследование механизма случайного выбора стратегии природы позволяет принять оптимальное решение, которое будет лучшей стратегией в игре с неантагонистическим противником – Природой. В этом случае, семейство решений описывается некоторой матрицей  $n \times m$ , которую называют матрицей решений в таблице 1.

столкновений двух судов может быть смоделировано следующим образом: у судоводителя (активного игрока) возможные действия называются стратегиями, а возможные действия окружающей среды (пассивного игрока) – состояниями или условиями природы. В порядке обеспечения безопасности судоводитель обязан следовать МППСС-72 (правилам игры). Лучшее решение (алгоритм игры) расхождения судов зависит от степени взаимосвязей судов. Однако из-за неопределенности состояния Природы и Правил (МППСС-72), стратегии, принимаемые судоводителем, так же будут нечеткими, как показано в таблице 1, при этом принятие решений для предупреждения столкновений всегда сопряжено с риском в тех или иных обстоятельствах плавания. Под риском принятия решений при выборе стратегии расхождения судов понимается разность между максимальным выигрышем, который можно получить в этих условиях и выигрышем,

который получит судоводитель в тех же условиях, применяя выбранную стратегию.

Как было сказано выше, принятие решений в условиях риска характеризуется тем, что поведение Природы (среды) имеет случайный характер. Это проявляется в том, что существует некоторая вероятностная мера, в соответствии с которой возникают (наступают) те или иные состояния Природы. При этом судоводитель принимающей решение имеет определённую информацию о вероятностях появления состояний среды, которая по своему характеру может быть весьма разнообразна. Например, имеется три состояния среды  $I_1, I_2$  и  $I_3$ , то дополнительная информация о появлении этих состояний может заключаться в том, что состояние  $I_1$  наименее вероятно, а состояние  $I_3$  более вероятно.

Следовательно, принятие решений в условиях риска предполагает, кроме задания функции реализации, задание некоторой дополнительной информации о вероятностях состояния среды. Таблица 2 – Матрица решений в зависимости от степени сложности и степени динамизма окружающей среды

Если множество состояний природы  $I_n$  конечно (число состояний равно  $n$ ), то вероятностная мера на нём может быть задана вероятностным вектором  $p = (p_1, p_2, \dots, p_r)$ , где  $p_j \geq 0$  и  $\sum_{j=1}^n p_j = 1$ .

Стратегию управления и поиск лучшего решения в нечетких условиях можно соизмерять со степенью опасности окружающей среды в существующих подделах и ограничениях. Степень опасности окружающей среды может быть оценена по двум параметрам: *степени сложности окружающей среды и степени динамизма окружающей среды*. Исходя из этих параметров, степень опасности окружающей среды можно позиционировать в одном из квадратов матрицы таблицы 2. Двухмерная классификация факторов окружающей среды позволяет выявить четыре типа ситуаций, каждая из которых наиболее соответствует той или иной стратегии расхождения судов и лучшего решения в конкретных условиях и обстоятельствах плавания.

<b>Низкая</b> Степень динамизма окружающей среды	<i>Ситуация низкой неопределенности</i>		<i>Ситуация умеренной неопределенности</i>			
	Факторы	Стратегия $i_1^*$	Решение $d_1^*$	Факторы	Стратегия $i_2^*$	Решение $d_2^*$
	Мало			Много		
	Схожи			Не схожи		
Не меняются	Не меняются					
<b>Высокая</b> Степень динамизма окружающей среды	<i>Ситуация умеренно-высокой неопределенности</i>		<i>Ситуация высокой неопределенности</i>			
	Факторы	Стратегия $i_3^*$	Решение $d_3^*$	Факторы	Стратегия $i_4^*$	Решение $d_4^*$
	Мало			Много		
	Схожи			Не схожи		
Постоянно меняются	Постоянно меняются					
<b>Низкая</b> <b>Высокая</b>		<b>Степень сложности окружающей среды</b>				

Проблема выбора стратегии и лучшего решения наиболее остро проявляется в районах стесненного судоходства, которые изобилуют навигационными опасностями, снижающими возможности в выборе безопасных маневров расхождения. Указанное обстоятельство вносит допол-

нительную корректуру в декомпозицию пространства ситуаций на подмножества разной степени опасности, ухудшая текущую ситуацию, либо снижая мощность множества допустимых маневров расхождения. Двухмерная классификация позволяет выявить четыре типа сложности

окружающей среды, каждая из которых наиболее соответствует тому или иному решению.

Квадрант 1 - характеризуется низкой неопределенностью. Суть задачи предупреждения столкновений судов (ЗПР<sub>СПСС</sub>) в этом квадранте сводится к следующей характеристике: известно количество возможных положений судов относительно друг друга и основной фактор, оказывающий влияние на выработку решения. Влиянием остальных факторов из-за их незначительного воздействия можно пренебречь. Нужно выбрать одно действие из списка (в данном случае МППСС-72) по одному из критериев с учетом ограничения на него. Степень сложности процедуры выбора в данном случае определяется лишь количеством альтернативных вариантов.

Квадрант 2 - характеризуется умеренной неопределенностью, является уже более напряженным для судоводителей. Более высокая степень сложности окружающей среды вносит элемент риска в процесс принятия решения. Повышенный риск подталкивает судоводителей к большей альтернативности в действиях.

Квадрант 3 - характеризуется умеренно высокой неопределенностью, требует от судоводителей достаточной гибкости при принятии решений (например, правило 17 МППСС-72).

Таблица 3 – Матрица с вероятным вектором состояния среды

M \ Ω	ω <sub>1</sub>	ω <sub>2</sub>	...	ω <sub>j</sub>	...	ω <sub>r</sub>
	p <sub>1</sub>	p <sub>2</sub>		p <sub>j</sub>		p <sub>r</sub>
m <sub>1</sub>	f <sub>11</sub>	f <sub>12</sub>		f <sub>1j</sub>		f <sub>1r</sub>
m <sub>2</sub>	f <sub>21</sub>	f <sub>22</sub>		f <sub>2j</sub>		f <sub>2r</sub>
...						
m <sub>k</sub>	f <sub>k1</sub>	f <sub>k2</sub>		f <sub>kj</sub>		f <sub>kr</sub>
...						
m <sub>n</sub>	f <sub>n1</sub>	f <sub>n2</sub>		f <sub>nj</sub>		f <sub>nr</sub>

Выбирая решение  $m_k$ , судоводитель знает, что получит один из выигрышей  $f_{k1}, \dots, f_{kr}$  с вероятностями  $p_1, \dots, p_r$  соответственно. Следовательно, решением (исходом игры) для судоводителя, принимающего решение при выборе им решения  $m_k$  является случайная величина:

$$\xi_k = \begin{bmatrix} f_{k1} & \dots & f_{kr} \\ p_1 & \dots & p_r \end{bmatrix}. \quad (20)$$

Итак, сравнение двух решений  $m_1$  и  $m_2$  сводится к сравнению соответствующих им случайных величин  $\xi_1$  и  $\xi_2$ .

Предложенный подход означает повышение эффективности самого принимаемого решения и затрачиваемого времени на его выработку. Судоводитель при выработке «лучшего решения», «погружаясь» в одну из четырех сред, оперирует факторами в зависимости от степени опасности среды. При этом происходит редукция, как

Квадрант 4 - характеризуется высокой неопределенностью, представляет собой наибольшую трудность для управления и предупреждения столкновением судов, т.к. окружающая среда полна неопределенных ситуаций, а для избежания столкновения судов, необходимо отступить от правил в соответствии с п. (b) Правила 2 МППСС-72.

В каждом квадранте поведение Природы имеет случайный характер. Как мы уже отмечали, это проявляется в том, что существует некоторая вероятностная мера, в соответствии с которой возникают (наступают) те или иные состояния природы. При этом судоводитель имеет определённую информацию о вероятностях появления состояний среды, которая по своему характеру может быть весьма разнообразна. Следовательно, принятие решений в условиях риска предполагает, задание некоторой дополнительной информации о вероятностях состояния среды. Если множество состояний природы  $\Omega = \{\omega_1 \dots \omega_j \dots \omega_r\}$ , где конечно (число состояний равно  $r$ ), то вероятностная мера может быть задана вероятностным вектором  $p = (p_1, \dots, p_r)$ . Таким образом, матрица выигрышей в условиях риска (см. таблицу 2) может быть представлена в следующем виде таблицы 3.

списка самих факторов, так и списка управляющих воздействий. При этом выбирается «лучшее решение» по функции качества управления  $F = \{f_{kj}\}$  – в кратчайшее время в соответствии с реальными обстоятельствами и условиями плавания.

**Методы решения слабоструктурированных задач**

Исследуя различные особенности СБС, мы установили, что рассматриваемая система относится к современным информационно-коммуникативным системам с характеристиками интегрированности, многоуровневостью и многообразием показателей эффективности. При проектировании ИСППР оценка качества структурно-функциональных характеристик осуществляется в условиях информационных, процедурно-функциональных, параметрических и критериальных не-

определенностей различного типа. Этим обусловлена целесообразность рассмотрения моделей и методов описания и оценки вариантов (альтернатив), а также принятия решений по выбору лучшего варианта решений расхождения судов в условиях различных неопределенностей, которые представляют собой специальный класс задач принятия решений, получивших название *слабоструктурированных*.

Для решения таких задач предлагается теорию информации рассматривать как единую основу методов распознавания образов и принятия решений. «Если в качестве классов распознавания взять целевые и иные состояния судна и окружающей среды, а в качестве признаков – факторы, влияющие на него, то в модели распознавания образов может быть сформирована мера связи факторов и состояний. Это позволяет по заданному состоянию судна получить информацию о факторах, которые способствуют или препятствуют его переходу в это состояние, и, на этой основе, выработать решение об управляющем воздействии».

Факторы имеют различную ценность для решения задач идентификации состояния судна. Для достижения целей безопасности в работе проблема определения ценности факторов решается алгоритмом, который допускает программную реализацию и обеспечивает на практике определение идентификационной и прогностической ценности факторов.

Выражение (23) определяет, какое количество информации  $I_i^j$ , судно получает о наступлении события для перехода в  $j$ -е заданное состояние, при действии  $i$ -й фактора и в общем выражается следующим условием:

$$I_i^j = \begin{cases} > 0, \text{ способствует переходу в заданное состояние;} \\ < 0, \text{ препятствует изменению существующего состояния;} \\ = 0, \text{ отсутствует влияние фактора на перевод в другое состояние.} \end{cases} \quad (24)$$

Функционирование судна происходит при влиянии целого ряда разнородных факторов и их взаимоотношений, пренебрежение которыми может привести к аварийности или его гибели. Получение достаточно полной и точной оценки, даже простой ситуации, требует учета совокупности состояний судна и окружающей среды в их взаимозависимости. Информация о состоянии судна и окружающей среды носит системный характер и может быть представлена в следующем виде:

$$I = \text{Log}_2 (C_W^1 + C_W^2 + \dots + C_W^M), \quad (25)$$

где  $W$  – количество классов (мощность множества будущего состояния);

$M$  – максимальный уровень сложности состояния.

При идентификации состояния судна одной из основных проблем является выбор единой численной меры факторов, отражающей степень их взаимосвязи и будущих состояний. В качестве количественных мер взаимосвязи факторов и будущих состояний судна используются информационные меры: *Хартли, Шеннона, Харкевича и др.*

Применяя основные понятия теории информации формулу *Хартли*:

$$I = \log_2(X), \quad (21)$$

где  $X$  – одинаковые АО;  $I$  – количество информации о выборе одного из  $N$  АО.

и формулу *Шеннона*:

$$I(x) = -\sum_{i=1}^X \frac{1}{X} \log_2 \frac{1}{X} = -\sum_{i=1}^X p(x_i) \log_2 p(x_i), \quad (22)$$

как количественную меру для измерения информации, а также *семантическую меру информации А.А. Харкевича -  $I_i^j$* , которая определяет количество информации в  $i$ -м признаке о принадлежности к  $j$ -му классу на основе апостериорного подхода:

$$I_i^j = \log_2 \left( \frac{P_i^j}{P_i} \right), \quad (23)$$

где  $I_i^j$ , – количество информации в  $i$ -м признаке о принадлежности к  $j$ -му классу;

$P_i^j, P_i$  – вероятность обнаружения  $i$ -го фактора при переходе судна в  $j$ -е безопасное состояние и вероятность обнаружения этого же фактора при переходе судна в любое состояние.

Таким образом, множество классов состояния судна представляют собой не отдельные символы–признаки, а сообщения, состоящие из последовательностей символов (признаков) любой длины. Для решения задачи идентификации состояния судна, по полученному сообщению, необходимо вычислять количество информации, содержащееся в конкретном  $j$ -м признаке (символе) о том, что он принадлежит данному классу  $i$ -го судна представленного на распознавание:

$$i(x_i, y_i) = \log_2 \frac{p_{ij}}{p_i p_j}, \quad (26)$$

где  $i(x_i, y_i)$  – конкретный  $j$ -й признак данного класса  $i$ -го судна;

$p_{ij}$  – вероятность достижения судном  $j$ -й цели при условии сообщения  $i$ -й информации;

$p_j$  – вероятность самопроизвольного достижения судном  $j$ -й цели.

Если ранжировать классы в порядке убывания суммарного количества информации о принадлежности к ним, содержащейся в данном сообщении (т.е. описании судна), и выбирать первый из них, т.е. тот, о котором в сообщении содержится наибольшее количество информации, то мы получим обоснованную статистическую процедуру, основанную на классической теории информации. Выражение для расчета количества информации в  $i$ -м признаке о принадлежности конкретного судна к  $j$ -му классу через частоты будет иметь следующий вид:

$$I_i^j = K \cdot \text{Log}((N_i^j / N) / (N_i / N^j));$$

$$K = \frac{1}{\text{Log}(2)} \frac{\text{Log}(W)}{\text{Log}(N)}, \quad (27)$$

где  $N_i^j$  - количество встреч  $i$ -го признака у АО  $j$ -го класса;

$N$  - суммарное количество признаков, обнаруженное у предъявленных АО по всем классам;

Таблица 4 - Матричная информационная модель состояния судна

Факторы	Состояния			Дифференцирующая мощность фактора
	...	$J$	...	
...				
$i$		$I_i^j$		$\sigma_i$
...				
		$\sigma^j$		$\sigma$

Матрицы информативностей признаков представляют собой, с одной стороны, количественное формальное описание судна на языке признаков, а с другой стороны, количественное описание признаков на языке классов. Каждому признаку соответствует количество информации, которое он содержит о принадлежности судна к каждому из классов распознавания. *Список классов распознавания, в котором классы расположены в порядке убывания количества информации о принадлежности к ним, и представляет собой результат распознавания судна, описанного данной системой признаков.*

**Анализ математических методов принятия решений**

Анализ правил и методов принятия решений был проведен на основе современных научных публикаций. Были рассмотрены их достоинства и недостатки для выбора наилучшей альтернативы (альтернатив). Цель анализа - поиск наиболее рациональных методов принятия решения при управлении сложными многокритериальными системами. Результаты проведенного анализа приведены в таблице 5.

Основными параметрами сравнения методов были определены три критерия, наиболее сильно влияющие на результат выбора наилучшего

$N_i$  - суммарное количество наблюдений  $i$ -го признака по всем классам;

$N^j$  - суммарное количество признаков, обнаруженных у АО  $j$ -го класса;

$K$  - нормировочный коэффициент, переводящий количество информации в двоичные единицы информации - биты.

Построенная матричная информационная модель обеспечивает отражение взаимосвязей между входными и выходными параметрами судна и окружающей среды (факторами), с одной стороны, и будущими состояниями судна, - с другой. Для удобства анализа предлагается представить информационную модель состояния судна в форме двумерной матрицы, столбцы которой соответствуют возможным будущим, конечным состояниям, а строки - входным параметрам, т.е. факторам в таблице 4:

альтернативного варианта. Первый критерий - структурированность информации, отражающий структурированность информации и ее необходимое наличие для последующей обработки. Оценка производилась в соответствии со следующей шкалой: «структурированная», «слабоструктурированная», «неструктурированная».

Второй критерий - неопределенность информации, отражающий степень неопределенности информации для задачи в СБС. Шкала оценки определена со следующими значениями: «Высокая неопределенность», «Средняя неопределенность», «Малая неопределенность».

Третий критерий - время принятия решений, отражающий период принятия решений по анализируемой задаче. Предусмотрена следующая шкала оценки методов по критерию: «Малое» - необходимо незначительные временные ресурсы для принятия решений, «Среднее» - понадобится время и привлечение дополнительных ресурсов для нахождения наилучшего варианта, «Значительное» - понадобится время и дополнительные ресурсы с участием эксперта или лица принимающего решение

Таблица 5 – Анализ математических методов принятия решений

Методы поддержки принятия решений	Тип и структурированность используемой информации. Способ задания критерия	Неопределенность информации	Время принятия решений	Область применения
Метод главного критерия	Структурированная. Частные критерии равнозначны. Критерии могут задаваться на основе бальной шкалы. Экспертная информация не требуется	Малая	Малое	Техническая Технологическая
Метод максиминной свертки	Структурированная. Частные критерии неравнозначны. Для критериев задаются весовые коэффициенты.	Малая	Среднее	Управленческая Техническая Технологическая
Метод линейной свертки	Структурированная. Частные критерии неравнозначны. Оценка предпочтительности парных сравнений	Малая	Среднее	Экономическая Техническая Технологическая
Критерий Лапласа	Слабоструктурированная. Частные критерии неравнозначны. Для критериев задаются весовые коэффициенты.	Средняя	Среднее	Управленческая Техническая Технологическая
Критерий Вальда	Слабоструктурированная. Частные критерии неравнозначны. Для критериев задаются весовые коэффициенты. Использование априорной информации.	Средняя	Среднее	Экономическая Техническая Технологическая
Критерий Гурвица	Слабоструктурированная. Частные критерии. Неопределенность исхода принятия решений	Средняя	Среднее	Техническая Технологическая Экономическая Управленческая
Метод главного критерия	Структурированная. Частные критерии равнозначны. Критерии могут задаваться на основе бальной шкалы. Экспертная информация не требуется	Малая	Малое	Техническая Технологическая
Критерий Сэвиджа	Слабоструктурированная. Частные критерии. Неопределенность исхода принятия решений	Средняя	Среднее	Техническая Технологическая Экономическая Управленческая
Парето-оптимальность	Слабоструктурированная. Используются критерии различного (обобщенных, частных) вида. Информации задается в количественном виде.	Средняя	Среднее	Экономическая Управленческая Техническая Технологическая
Функция полезности	Неструктурированная. Количественная информация о предпочтениях и последствиях. Качественная информация о предпочтениях и количественная о последствиях.	Высокая	Значительное	Экономическая Управленческая Техническая Технологическая Социальная
Метод анализа иерархий	Слабоструктурированная. Отсутствие информации о предпочтениях; количественная и/или интервальная информация о последствиях.	Средняя	Среднее	Экономическая Управленческая Техническая Технологическая
Метод главного критерия	Структурированная. Частные критерии равнозначны. Критерии могут задаваться на основе бальной шкалы. Экспертная информация не требуется	Малая	Малое	Техническая Технологическая
Экспертные методы выбора	Неструктурированная. Используются критерии различного вида (качественные, количественные)	Высокая	Значительное	Экономическая Управленческая Техническая Технологическая Социальные
Принятие решений в условиях статистической неопределенности	Слабоструктурированная. Априорная информация. Заданы случайные распределения критериев.	Средняя	Значительное	Экономическая Управленческая Техническая
Принятие решений при расплывчатой неопределенности	Слабоструктурированная. Частные суперкритерии. Заданы критериальные распределения в виде функции принадлежности.	Средняя	Значительное	Экономическая Управленческая Техническая

Проведенный анализ позволил сделать вывод о том, что методологический аппарат методов теории принятия решений успешно применим при решении различных задач безопасности судовой системы. Если задача является комплексной, то, соответственно, и выбор методов должен быть комплексным. Наиболее универсальными и эффективными являются методы, позволяющие принимать решение в любых условиях, вне зависимости от структурированности. Такие методы, как пример, показаны выше. Недостатки исследованных методов преодолевают или ослабляют, разрабатывая *гибридные системы*, когда объединяют механизм принятия решений на основе предложенных методов. ИСППР постоянно должна решать задачу перехода из равновесного в неравновесное состояние и наоборот. Процесс обеспечения безопасности представляет собой чередование ситуаций/периодов, в течение которых система ведет себя то как «детерминированная», то как «неопределенная». В этой связи особую значимость приобретает вопрос о разработке адаптивной модели выработки решений, т.е. модели, способной легко перестраиваться и сохранять высокую степень адекватности как при изменении целевых и оценочных установок, так и состояния СБС.

#### Литература

1. Большакова А.А. Интеллектуальная система управления организационно-техническими системами / под ред. проф. А.А. Большаковой. – М.: Горная линия - Телеком, 2006. – 160 с.
2. Бусленко В.И. Автоматизация имитационного моделирования сложных систем. – М., 1977. 427 с.
3. Дубов Ю.А. Многокритериальные модели формирования и выбора вариантов систем / Ю.А. Дубов, С.И. Травкин, В.Н. Якимец. – М.: Наука. – Гл. ред. физ.мат. лит., 1986. – 296 с.
4. Перегудов Ф.И. Системное проектирование АСУ организационными комплексами. – Томск: ТГУ, 1974. – 215 с.
5. Игнатъева А.В. Исследование систем управления: учеб. пособие для вузов / А.В. Игнатъева, М.М. Максимцов. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2000. – 157 с.
6. Каплинский, А.И. Моделирование и алгоритмизация слабоформализованных задач выбора наилучших вариантов систем / А.И. Каплинский, И.Б. Руссман, В.М. Умывакин. – Воронеж: Изд-во ВГУ, 1990. – 168 с.
7. Садовский, В.Н. Основания общей теории систем: Логико-методологический анализ. – М.: Наука, 1974. – 279 с.
8. Симанков, В.С. Алгоритмизация системы поддержки принятия решений. Деп. В ВИНТИ 22.01.08, № 45-V2008 / В.С. Симанков, А.Н. Черкасов, А.О. Денисенко, С.Н. Владимиров. – Краснодар: Кубан. гос. технол. ун-т; Ин-т совр. технол. и экон., 2008.
9. Черкасов, А. Н. Разработка математического и алгоритмического обеспечения адаптивных систем поддержки принятия решений в ситуационных центрах: дис. канд. тех.наук: 05.13.01 / Черкасов Александр Николаевич. – Краснодар, 2011. – 139 с.

#### REFERENCES

1. Bol'shakova, A.A. Intel'lectual'naya sistema upravleniya organizacionno tekhnicheskimi sistemami / Pod red. prof. Bol'shakovoj A.A. - M.: Goryachaya liniya - Telekom, 2006. - 160 s.
2. Buslenko, V.I. Avtomatizaciya imitacionnogo modelirovaniya slozhnyh sistem. - M., 1977. 427 s.
3. Dubov, YU.A. Mnogokriterial'nye modeli formirovaniya i vybora variantov sistem / YU.A. Dubov, S.I. Travkin, V.N. Yakimec. - M.: Nauka. - Gl. red. fiz.mat. lit., 1986. - 296 s.
4. Peregudov, F.I. Sistemnoe proektirovanie ASU organizacionnymi kompleksami. -Tomsk: TGU, 1974. - 215 s.
5. Ignat'eva, A.V. Issledovanie sistem upravleniya: Ucheb. posobie dlya vuzov / A.V. Ignat'eva, M.M. Maksimcov. - M.: YUNITI-DANA, 2000. 157 s.
6. Kaplinskij, A.I. Modelirovanie i algoritimizaciya slaboformalizovannyh zadach vybora nailuchshih variantov sistem / A.I. Kaplinskij, I.B. Russman, V.M. Umyvakin. - Voronezh: Izd-vo VGU, 1990. - 168 s.
7. Sadovskij, V.N. Osnovaniya obshchej teorii sistem: Logiko metodologicheskij analiz. - M.: Nauka, 1974. - 279 s.
8. Simankov, V.S. Algoritimizaciya sistemy podderzhki prinyatiya reshenij / V.S. Simankov, A.N. Cherkasov, A.O. Denisenko, S.N. Vladimirov // Kuban. gos. tekhnol. un-t; In-t sovr. tekhnol. i ekon. Krasnodar, 2008. Dep. V VINITI 22.01.08, № 45-V2008.
9. Cherkasov, A. N. Razrabotka matematicheskogo i algoritmicheskogo obespecheniya adaptivnyh sistem podderzhki prinyatiya reshenij v situacionnyh central: dis. kand. tekhn.nauk: 05.13.01 / Cherkasov Aleksandr Nikolaevich. Krasnodar, 2011. – 139 s.