

УДК 519.8 : 656.61.052.4

## Механизмы проводки и их неразличимость при плавании в условиях стеснённых вод

А.Ю. Блажеев<sup>1</sup>, Д.В. Ключко<sup>2</sup>, В.И. Меньшиков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Морская академия МГТУ, кафедра судовождения

<sup>2</sup> Судоводительский факультет Морской государственной академии им. адм. С.О. Макарова, кафедра судовождения

**Аннотация.** Дано математическое описание механизмов проводки судов в стеснённых водах для двух вариантов информационного обеспечения. Сформулированы условия, при которых реализуется траекторная неразличимость и неразличимости по показателю безопасности мореплавания.

**Abstract.** The mathematical description of pilotage mechanisms in constrained waters for two variants of information support has been given. The conditions for the trajectory being invisible and invisibility in terms of navigation safety have been formulated.

**Ключевые слова:** механизм, неразличимость, плавание, судно, стеснённые воды  
**Key words:** mechanism, invisibility, navigation, vessel, constrained waters

### 1. Введение

Обеспечение безопасного плавания как транспортных, так и рыболовных судов в сложных условиях ограниченного водного пространства (стеснённые воды) продолжает оставаться весьма актуальной задачей. Такой вывод вытекает из того, что значительное число аварий с судами транспортного и рыболовного флотов происходит именно в этих условиях плавания. Решение подобной навигационной задачи осуществляется в два этапа: предварительная прокладка (планирование проекта плавания) и исполнительная прокладка (реализация планового проекта плавания), выполняемые в строгом соответствии с требованиями безопасности мореплавания, изложенными в применимых Международных морских Конвенциях и Резолюциях Международной морской организации (ИМО).

В соответствии с Международной Конвенцией ПДНВ-74/95 и Кодексов к ней, а также наставлений по несению ходовой вахты, исполнительная прокладка траектории судна при плавании судна в условиях ограниченного водного пространства должна осуществляться с привлечением, по крайней мере, двух механизмов проводки. Эти механизмы, обеспечивая контроль безопасности мореплавания, реализуются в виде приборной проводки, с использованием навигационной информации от системы автоматической радиолокационной прокладки (САРП) или от электронной картографической навигационной информационной системы (ЭКНИС), и визуальной проводки, когда навигационная информация поступает из системы кругового обзора. Одновременное использование этих двух механизмов проводки судна в условиях ограниченного водного пространства, дефицита информации и отсутствия временного ресурса позволяет решать задачу по идентификации моментов появления таких навигационных ошибок "человеческого элемента", как ошибки восприятия информации и ошибки структурирования этой же информации.

### 2. Математическое описание механизмов проводки судна

Для математического описания механизмов проводки будем считать, что структурные модели ситуаций при любой приборной проводке  $D_1$  и при визуальной проводке  $D_2$  судна могут быть представлены так:

$$D_1 = (A, V, G, H, Y, P), \quad (1)$$

$$D_2 = (A, V, G, H, Y, R), \quad (2)$$

где  $A$  – множество детерминированных и случайных (опасных) факторов, определяющих безопасность мореплавания;  $V$  – множество управлений, используемых лицом, принимающим решения (ЛПР);  $G$  – множество результатов, получаемых в процессе выполнения навигационного проекта;  $H$  – множество математических моделей адекватных множествам  $V$ ,  $A$ , и  $G$ ;  $Y$  – оператор соответствия "результат – показатель";  $P$  – структура порядка, используемая вахтенными помощниками при приборных проводках судна в стеснённых водах;  $R$  – структура нестрогого предпочтения капитана судна при визуальной проводке судна по стеснённым водам.

Пусть далее в моделях навигационных ситуаций (1) и (2) определены компоненты множества  $A$ , исходное множество управлений  $V$ , модель  $H$ , адекватная множествам  $V$ ,  $A$ , и  $G$ . Кроме того, пусть заданы структура порядка  $P$  и структура нестрогого предпочтения  $R$ , отражающие формализованное представление о "лучших" или "худших" результатах управления состоянием судна, и используемые как капитаном, так и его вахтенным помощником (ЛПР) при ведении проводки судна с привлечением информационного ресурса. Информационный ресурс позволяет ЛПР, привлекая структуру порядка или отношение нестрогого предпочтения, выбрать управление состоянием судна, которое, с одной стороны, обеспечивают производственный эффект, выраженный, например, в минимизации затрат на эксплуатацию судна, а с другой – его безопасность.

Далее будем считать, что в структурах (1-2) множество  $A$  обладает следующими свойствами:

$$A_1 \cup A_2, A_1 \cap A_2 = \emptyset \text{ и } A_1, A_2 \neq \emptyset, \quad (3)$$

где  $A_1$  – множество детерминированных факторов, определяющих эффективное и безопасное состояние мореплавания;  $A_2$  – множество случайных и опасных факторов, влияющих на безопасное состояние мореплавания при следовании судна в условиях ограниченного водного зеркала (стеснённых вод).

В работе (Ключко и др., 2012) показано условие, при котором факторы опасности  $\lambda \in A_2$  являются локально доминируемыми, а навигационные ситуации (1-2) классифицируются как проблемные (опасные) ситуации. Эти условия можно записать так:

$$\begin{aligned} mi Df_x \cap K_{f(x)} &\neq \emptyset, \\ mi Df_x \cap K_{f(x)} &\neq \{0\}, \\ ker Df_x &\neq \{0\}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $mi Df_x$  и  $ker Df_x$  являются образом и ядром отображения  $Df_x$  соответственно.

Если допустить, что условия (4) выполняются, то операторы соответствия  $Y_1, Y_2 \in Y$  приборной и визуальной проводки соответственно, поддерживая состояние безопасности мореплавания в стеснённых водах, должны обеспечить результаты, записанные в виде следующих отображений:

$$H_1: V \times A_1 \rightarrow Y_1(G) \rightarrow \min; \quad (5)$$

$$H_2: V \times A_2 \rightarrow Y_2(G) \rightarrow \min. \quad (6)$$

Очевидно, что результаты  $Y_1(G)$  и  $Y_2(G)$  определяют эффективность управления опасными факторами в процессе приборной и визуальной проводки. Поэтому для идентификации ошибок "человеческого элемента" при восприятии навигационной информации и структурировании достаточно постоянно сравнивать результаты (5) и (6) в рамках структуры нестрогого предпочтения ЛПР. Появление существенного различия между результатами  $Y_1(G)$  и  $Y_2(G)$  следует принимать за признак наличия субъективных ошибок ЛПР восприятия или структурирования навигационной информации при реализации того или иного механизма проводки. Более того, приемлемый результат из двух сравниваемых ЛПР даёт право "человеческому элементу" выбрать одно из управлений  $v_1 \in V_1$  или  $v_2 \in V_2$ .

### 3. Условие траекторий неразличимости механизмов приборной и визуальной проводки

Обозначим через  $\langle \Sigma, \pi \rangle$  и  $\langle \Sigma', \pi' \rangle$  механизмы проводки судна в условиях стеснённых вод, а через отображение вида  $\Omega: \Sigma \rightarrow \Sigma'$  – эквивалентный переход механизма проводки из класса  $\langle \Sigma, \pi \rangle$  в класс  $\langle \Sigma', \pi' \rangle$ , при заданных свойствах  $S(\sigma)$ ,  $S'(\sigma)$  структур  $\sigma \in \Sigma$  и  $\sigma \in \Sigma'$ . Будем рассматривать только механизмы проводки судна структуры, которые отвечают условиям импликации

$$\forall \sigma \in \Sigma, S_1(\sigma) \Rightarrow S_2(\sigma). \quad (7)$$

При этом свойство  $S_2(\sigma)$  имеет следующий смысл: выбор при помощи правила  $\pi$  из компактного множества  $X$  по структуре  $\sigma \in \Sigma$  не пуст, а свойство  $S_1(\sigma)$  – это какое-либо достаточное условие для поддержания свойства  $S_2(\sigma)$ .

Для формирования условия неразличимости траекторий судна будем использовать допущения, что одна из траекторий судна, отвечающая условию импликации, будет выводима из другой траектории

$$\forall \sigma \in \Sigma', S'_1(\sigma) \Rightarrow S'_2(\sigma) \quad (8)$$

лишь в том случае, если существует эквивалентный переход

$$\Omega: \Sigma \rightarrow \Sigma',$$

причём такой, что

$$S'_1(\sigma) \Rightarrow S'_1(\omega(\sigma)); \quad (9)$$

$$S'_2(\omega(\sigma)) \Rightarrow S_2(\sigma). \quad (10)$$

Отметим, что область определения отображения  $\omega \in \Omega$  в последних отношениях должна совпадать с множеством  $\Sigma$ , в то время как область значений может быть лишь подмножеством множества  $\Sigma'$ .

Содержательный смысл последнего определения таков: если доказано отношение (8), то цепочка

$$S_1(\sigma) \Rightarrow S'_1(\omega(\sigma)) \Rightarrow S'_2(\omega\sigma) \Rightarrow S_2(\sigma)$$

подтверждает справедливость выражения (7).

При этом очевидно, что траектория судна при приборном механизме и траектория судна при визуальном механизме проводки будут эквивалентны лишь в том случае, если они метрически не отличимы одна от другой.

Пусть механизм проводки судна со структурой  $\sigma$  (класс приборных проводов) определён в пространстве физических величин с помощью семейства функций  $\{f(\cdot)/i \in I\}$  на множестве  $X$ . Кроме того, пусть свойство  $S_1(\sigma)$  является полунепрерывностью сверху функций этого семейства на компактном множестве  $X$ , а свойство  $S_2(\sigma)$  – непустота этого множества. Дополнительно будем считать, что механизм проводки со структурой  $\sigma$  (класс визуальных проводов) определён в пространстве морфологических величин, с помощью бинарного отношения  $R$  на компактном множестве  $X$ , причем свойство  $S'_2(\sigma)$  – это рефлексивность, транзитивность и непрерывность, сверху отношения  $R$  на компактном множестве  $X$ , а свойство  $S_2(\sigma)$  определяет непустоту этого множества. Чтобы показать метрическую траекторную неразличимость одного механизма проводки от другого, достаточно показать справедливость выражений (9) и (10) при условии, что отношение  $R$  задано. В условиях компактности множества  $X$  из условия полунепрерывности сверху вытекает рефлексивность, транзитивность и непрерывность сверху отношения  $R$ .

Таким образом, если отношение  $R$  непрерывно сверху на множестве  $X$ , то в каждой точке верхний срез отношения  $R$  замкнут, как пересечение замкнутых верхних срезов порядков, соответствующих отдельным функциям семейства  $\{f(\cdot)/i \in I\}$  на множестве  $X$ . В свою очередь непрерывность и замкнутость отношения  $R$  в каждой точке верхнего среза, представленного как пересечение замкнутых верхних срезов порядков, обеспечивает траекторную неразличимость механизмов проводки и свидетельствует об отсутствии ошибок "человеческого элемента" при восприятии и структурировании навигационной информации.

#### 4. Условия неразличимости показателя навигационной безопасности при реализации механизмов проводки судна

Для вывода условий неразличимости показателей навигационной безопасности при реализации механизмов приборной и визуальной проводки будем считать, что мгновенное численное значение этого показателя  $Z(t)$  связано со значением управляемой величины  $Y(t)$  (вектором скорости судна) неслучайной функцией вида:

$$Z(t) = f[Y(t)]. \quad (11)$$

Случайный процесс изменения управляемой величины при приборной проводке судна обозначим через  $Y_a(t)$ , а при визуальной проводке соответственно  $Y_p(t)$ . Допустим, что процессы  $Y_a(t)$  и  $Y_p(t)$  являются стационарными с плотностями распределения  $\varphi_a(y)$  и  $\varphi_p(y)$ , математическими ожиданиями  $m_a$  и  $m_p$  и дисперсиями  $\sigma_a^2$  и  $\sigma_p^2$  соответственно.

Уточним выражение (11) и запишем его так:

$$Z_a(t) = f[Y_a(t)].$$

Тогда при идеально надёжной (без ошибок восприятия и структурирования навигационной информации) реализации механизма приборной проводки судна показатель безопасности мореплавания можно определить так:

$$W^u = M \int_0^t Z_a(t) dt = tM[Z_a(t)] = t \int_{-\infty}^{\infty} f(y) \varphi(y) dy.$$

В то же время показатель безопасности мореплавания, но для идеального механизма визуальной проводки, будет равен:

$$W^p = v_1 \int_{-\infty}^{\infty} f(y) \varphi_a(y) dy + v_2 \int_{-\infty}^{\infty} f(y) \varphi_p(y) dy,$$

где  $v_1$  и  $v_2$  являются оценками математического ожидания времени использования механизмов проводки в стеснённых водах.

Очевидно, что изменение показателя безопасности мореплавания при переходах от одного

механизма проводки к другому можно найти:

$$\Delta W = W^a - W^p = v_2 \left[ \int_{-\infty}^{\infty} f(y) \varphi_a(y) dy - \int_{-\infty}^{\infty} f(y) \varphi_p(y) dy \right]. \quad (12)$$

Далее рассмотрим два простейших случая оценки величины  $\Delta W$ . Так, в первом случае будем считать, что функция  $f$  линейна:

$$z = f(y) = c_1 y + c_2, \quad (13)$$

где  $c_1$  и  $c_2$  – некоторые коэффициенты.

Подставив (13) в (12), получим:

$$\Delta W = v_2 c_1 (m_a - m_p).$$

Изменение дисперсии процесса  $Y(t)$  из-за перехода с одного механизма проводки на другой при линейной функции  $f$  не будет влиять на показатель безопасности мореплавания.

Для второго случая примем, что функция  $f(y)$  имеет экстремум и допускает разложение в ряд Тейлора относительно точки  $y = m_a$ . Ограничимся тремя членами разложения:

$$f(y) = f(m_a) + \gamma_1 (y - m_a) + \gamma_2 (y - m_a)^2, \quad (14)$$

где  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  – коэффициенты разложения.

Подставив (14) в (12), получим

$$\Delta W = v_2 \{ \gamma_1 (m_a - m_p) - \gamma_2 [\sigma_p^2 - \sigma_a^2 + (m_a - m_p)^2] \}.$$

Если при приборном механизме проводки в точке  $y = m_a$  достигается экстремум функции  $f(y)$ , то  $\gamma_1 = 0$  и

$$\Delta W = -v_2 \gamma_2 [\sigma_p^2 - \sigma_a^2 + (m_a - m_p)^2].$$

Если же при переходе на механизм визуальной проводки среднее значение управляемого параметра не изменяется ( $m_a = m_p$ ), а только увеличивается дисперсия, тогда

$$\Delta W = -v_2 \gamma_2 (\sigma_p^2 - \sigma_a^2).$$

Таким образом, полученные соотношения при заданных механизмах проводки судна в стеснённых водах позволяют оценить величину метрической неразличимости показателей безопасности мореплавания, которая должна отвечать очевидному условию:

$$\Delta W \rightarrow \min.$$

## 5. Заключение

В соответствии с Международными требованиями при плавании в стеснённых водах исполнительная прокладка должна выполняться с привлечением приборного и визуального механизмов проводки.

Нарушение условия траекторной неразличимости механизмов проводки судна в стеснённых водах следует рассматривать как признаки существования субъективных ошибок ЛПР в процессах восприятия или структурирования навигационной информации.

При заданной величине метрической неразличимости показателей безопасности мореплавания оба механизма проводки судна в стеснённых водах можно отнести к одному идентичному классу.

## Литература

**Ключко Д.В., Сиротюк А.А., Меньшиков В.И.** Доминируемые и недоминируемые риски при разрешении проблемной навигационной ситуации. *Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока*, № 1, с. 247-250, 2012.