Оптимальность взаимосвязей в социо-технической системе управления состоянием безопасной эксплуатации судна

М.А. Гладышевский, В.И. Меньшиков, А.В. Солянин
Судоводительский факультет МА МГТУ, кафедра судовождения

Аннотация. Составлены модели взаимосвязей технических средств судовождения и судоводителя, а также судоводителя и объекта управления в социо-технической системе управления состоянием безопасной эксплуатации судна. Получены соотношения, которые позволяют оценить эффективность указанных взаимосвязей, влияющих на организованность и эффективность процесса управления состоянием безопасной эксплуатации судна в целом при одновременной минимизации информационной загрузки судоводителя.

Abstract. The models of correlation between navigation hardware and a navigator as well as a navigator and a management object in the socio-technical system of the vessel secure exploitation management have been constructed. The ratios permitting to estimate the efficiency of the given correlation have been obtained. The correlation increases organization and efficiency of the process of the vessel secure exploitation management as a whole at simultaneous minimization of navigator informational load.

1. Введение

Современная оснащенность судна приборами, информационными, информационно-вычислительными и экспертными системами, образующими на рабочем месте единую подсистему, требует всесторонней и специализированной подготовки судовых специалистов. Такая подготовка должна учитывать, что средства автоматизации социо-технической системы отдаляют специалиста от непосредственного контакта с объектом управления. Более того, необходимо учитывать постоянное снижение численности судовых экипажей, усиливающее роль "человеческого элемента" и приводящее к необходимости минимизации влияния ошибок одного члена экипажа на общее состояние безопасности эксплуатации. Требование минимизации такого влияния соответствует позиции IMO, изложенной в ее Резолюции A.850 (20), согласно которой "адекватность действий в тех или иных условиях должна исключать ошибки одного человека, влияющие на состояние эксплуатации судна в целом" (*Резолюция ИМО…*, 2004).

Человек-оператор является в современных социо-технических системах не только самым ненадежным звеном, но и самым непредсказуемым звеном. Каково будет поведение судового специалиста в опасной ситуации, может зависеть от множества факторов таких, например, как установочные, мотивационные, личностные факторы (*Ларичев*, 1979).

В последние годы в связи с использованием на судах интегрированных систем представления навигационных данных, например, интегрированной системы "Ходовой мостик", используемых для управления состоянием эксплуатации судна, возникает необходимость в оптимальном описании структуры таких данных. Причем далее под структурой навигационных данных будем понимать описание некоторой предметной области на языке конкретной модели системы представления базы данных (СПБД).

Здесь и далее предметная область будет рассматриваться как обобщающее понятие по отношению к сферам применения СПБД. В конкретных приложениях предметная область может интерпретироваться как система представления навигационных данных по запросу судоводителя.

Основная идея при разработке системы представления базы навигационных данных должна заключаться в том, чтобы создать средства описания этих данных на концептуальном уровне, которые, с одной стороны, позволяли бы достаточно естественно описывать предметную область, а с другой – были бы достаточно формализованными.

В социо-технической системе средства отображения информации о состоянии объекта управления должны учитывать не только чувствительность анализаторов или характеристик восприятия человека-оператора, но и процессы предвидения, и формирование программы действий, составленной в виде технической подсказки, характерной для экспертных систем. Особенностью судовой социо-технической системы является то, что в ней функции человека-оператора исполняет целый экипаж, со специализированной индивидуальной подготовкой его членов, где ошибка в своевременном принятии верного решения одним членом экипажа должна быть сведена к минимуму для предотвращения аварийной ситуации. Например, в резолюции ИМО A.850 (20) отмечается, что эффективные действия по исправлению ситуаций, возникающих в результате аварий на море, требуют глубокого понимания вовлеченного "человеческого элемента".

Силовое взаимодействие между судовым специалистом и пассивным объектом управления характерно для решения задачи по поддержанию заданного уровня безопасной эксплуатации судна. При отклонении параметров объекта от заданных значений возникает необходимость во вмешательстве в его состояние. С этого момента объект частично или полностью теряет свою эффективность и восстанавливает ее только после силового воздействия на него со стороны судового специалиста. Судовой специалист по принятой информации распознает состояние эксплуатации судна и при необходимости должным образом на него воздействует.

Поэтому далее сформулируем методы оценки эффективности взаимодействия между системой и судовым специалистом, а также судовым специалистом и объектом управления, ориентируясь для этой цели на стоимостные, временные, метрологические характеристики и параметры надежности элементов информационной и силовой связей, составляющих основу социо-технической системы управления.

2. Структура предпочтений на множестве сообщений, поступающих к человеку от технических средств судовождения

Устойчивый механизм универсального выбора $\varphi^*(\omega)$ у судового специалиста при управлении им состоянием эксплуатации судна, вводящий квазипорядок на множестве условий альтернатив управления, ориентируясь на результаты работы (*Айзерман, Малишевский*, 1981), можно записать так:

$$\varphi^*(\omega) = \boldsymbol{E} \cup \boldsymbol{Tr}\,[\omega],$$

где ω – входное сообщение, E – отношение равенства, $\boldsymbol{Tr}$ – отношение транзитивности.

Полученное выражение описывает устойчивое "управленческое поведение" судового специалиста, которое может возникать при решении им конкретной управленческой задачи по поддержанию заданного уровня безопасной эксплуатации судна в социо-технической системе "Вахта". Особенностью такого поведения является то, что у судового специалиста при выполнении им обязанностей "управляющего" элемента формируется стереотип выбора альтернатив $\varphi^*(\omega)$, который является "мажорантой" по отношению к любой последовательности функций индивидуального выбора $\varphi(\omega)$. Однако для обеспечения необходимого устойчивого "управленческого поведения" у судового специалиста необходимо выполнение еще одного основополагающего условия вида:

$$\omega \subseteq \varGamma \subset \varOmega.$$

В этом выражении $\varGamma$ – множество сообщений ω, которые поступают к судовому специалисту и на которых реализуется мажорированная последовательность функций индивидуального выбора $\varphi(\omega)$, применительно к решению конкретной эксплуатационной задачи. В свою очередь, величина $\varOmega$ является множеством всех возможных сообщений (информационной базой данных), которые вообще способны поступать к специалисту от информационных, информационно-вычислительных и экспертных систем, образующих мультимедийную подсистему "Ходовой мостик" в комплексе.

Далее будем исходить из допущения о том, что на множестве всех возможных сообщений, или иными словами, в информационной базе $\varOmega$ существует следующая система бинарных отношений для любой пары сообщений a и b:

– строгого предпочтения

$$P = \{>, N, \sim\}: a > b \Leftrightarrow \forall\ i = 1, m\ a_i \geq b_i\ \forall f: a_i > b_i; \quad (1)$$

– несравнимости

$$P = \{>, N, \sim\}: a\,N\,b \Leftrightarrow \exists\ i_1, i_2: a_{i1} > b_{i1}\ a_{i2} < b_{i2}; \quad (2)$$

– эквивалентности

$$P = \{>, N, \sim\}: a \sim b \Leftrightarrow \forall\ i = 1, m\ a_i = b_i. \quad (3)$$

Тогда задачу по выделению множества $\varGamma$ векторных сообщений, необходимых для решения конкретной эксплуатационной задачи, из информационной векторной базы данных $\varOmega$ можно рассматривать как выбор из исходного множества сообщений, сравнимых в рамках введенных бинарных отношений, подмножества, состоящего из сообщений, в некотором смысле наиболее предпочтительных. При этом в зависимости от конкретики решаемой управленческой задачи понятие "наиболее предпочтительные сообщения" может определяться через множество приоритетов. Кроме того, вполне естественно, принимать и учитывать информацию о множестве приоритетов, строя модель векторного выбора $\varGamma \subset \varOmega$ на предположении об однородности этих приоритетов.

Следует заметить, что достаточно часто могут возникать ситуации, когда при решении управленческой задачи по поддержанию заданного уровня состояния эксплуатации судна отсутствует какая-либо информация о сравнительной важности отдельных поступающих судоводителю сообщений. Выход из этого положения следует искать в использовании информации $\varGamma \subset \varOmega$, привлекая для ее выделения множества

$$\varGamma = \{\omega \in \varOmega \mid \exists\ b \in \varOmega: b > \omega\}, \quad (4)$$

где сообщения $\omega \in \Gamma$ являются оптимальными по Парето.

При описании механизма выбора оптимальных по Парето сообщений обычно используют структуру σ, определенную на множестве Ω, и правило π, указывающее, как при каждом предъявлении $X \subseteq \Omega$, используя структуру σ, найти Γ.

При организации векторно-оптимального выбора структура σ будет задаваться в виде $n > 1$ отображений $\varphi_i(x)$, $i = 1, \ldots, n$, множества Ω на числовую ось, т.е. будет задаваться вектор-функцией $\varphi(x) = [\varphi_1(x),..., \varphi_n(x)]$. Правило π – это "векторная максимизация" функции $\varphi(\omega)$ на Ω, понимаемая как выделение из Ω множества всех (по Парето) вариантов по "векторному критерию" φ (множества Парето). Описанием такого правила может служить, например, выражение

$$G(\Omega) = \Gamma = \{y \in \Gamma \mid \text{не существует } \omega \in \Omega, \text{ такого, что } \varphi(\omega) > \varphi(y)\}, \tag{5}$$

где неравенство $\varphi(\omega) > \varphi(y)$ следует понимать, как векторное.

В общем случае при реализации (5) употребительны два следующих толкования векторного неравенства:

"строгое", когда $\varphi(\omega) > \varphi(y)$ понимается как набор покомпонентных неравенств $\varphi_i(\omega) > \varphi_i(y)$, $i = 1, n$;

"полустрогое", когда $\varphi(\omega) > \varphi(y)$ определяется как $\varphi(\omega) \geq \varphi(y)$ и $\varphi(\omega) \neq \varphi(y)$, где $\varphi(\omega) \geq \varphi(y)$ понимается как набор покомпонентных неравенств $\varphi_i(\omega) \neq \varphi_i(y)$, $i = 1, n$ (*Айзерман, Малишевский*, 1981).

Обычно в основу определения оптимальности по Парето кладется "полустрогое" определение неравенства $\varphi_i(\omega) > \varphi_i(y)$, хотя можно рассматривать также и "слабую оптимальность по Парето" на основе "строгого" векторного неравенства. Все предыдущие и последующие утверждения относительно векторно-оптимального механизма остаются равно справедливыми и при одном, и при другом определении векторного неравенства и, соответственно, множества Парето (4) в (5). Во избежание недоразумений следует особо подчеркнуть, что определяемый по Парето векторно-оптимальный механизм включает все оптимальные по Парето сообщения, принципиально не делая между ними различия.

Иногда под "векторной оптимизацией" можно понимать выделение каких-либо специальных сообщений среди всех сообщений, оптимальных по Парето. Однако в любом случае описанный векторно-оптимальный механизм всегда используется только при отсутствии какой-либо информации о сравнительной важности сообщений, поступающих судоводителю от подсистемы "Ходовой мостик". Натурный эксперимент (в разведочном плане), проведенный одним из авторов статьи, напротив, показывает, что при решении задачи оптимизации информационной связи между объектом управления и оператором в рассматриваемой социо-технической системе следует учитывать информацию о приоритетности сообщений, получаемых из базы данных Ω.

Поэтому далее, рассматривая возможность оптимизации информационной связи между подсистемой "Ходовой мостик" и социальным элементом системы "Вахта", будем считать, что приоритетность сообщений ω из множества Γ при решении конкретных задач управления состоянием безопасной эксплуатации судна существует и "хорошо" определена, например, с помощью принятой системы отношений (1-3).

3. Оптимизация информационного взаимодействия между объектом управления и оператором социо-технической системы "Вахта"

Пусть при решении некоторой управленческой задачи в социо-технической системе "Вахта" к судовому специалисту (судоводителю) поступает от подсистемы "Ходовой мостик" конечное множество информационных m-мерных векторных величин (сообщений) $\Omega = \{\omega = (\omega_1,..., \omega_m)\}$. Кроме того, судоводителю известен вектор приоритетов $K = \{K_1,..., K_m\}$, который определяет порядок "наиболее предпочтительных" сообщений в информационной базе Ω, поступающей к нему, при этом ω_i является оценкой вектора ω по приоритету K_i.

Предположим далее, что структура предпочтений на множестве приоритетов задана в виде набора отношений (1-3). По сути, принятая структура предпочтений фиксируется в следующем виде: про каждый из некоторого подмножества приоритетов $K_i \in K$ ($i \in I \subseteq 1, m$) известно, что он обладает следующим свойством: если сообщение ω превосходит сообщение b по приоритету K_i ($\omega_i > b_i$), то сообщение ω не может оказаться менее предпочтительным, чем b, по совокупности всех приоритетов.

Приоритеты, обладающие этим свойством, будем считать наиболее важными, а все сообщения, отвечающие этим приоритетам, будут составлять множество $\Gamma \subset \Omega$, которое обеспечивает формирование стереотипа выбора альтернатив $\varphi^*(\omega)$, являющегося "мажорантой" по отношению к любой последовательности функций индивидуального выбора $\varphi(\omega)$.

Пусть далее сообщения из множества $A = \Omega / \Gamma$ сравниваются лишь по оставшимся приоритетам, среди которых вновь в силу принятой системы бинарных отношений (1-3) существуют "хорошо" определенные приоритеты. Тогда, продолжая подобные рассуждения, можно получить некоторое разбиение множества K на непересекающиеся подмножества:

$$K = L_q \cup L_{q-1} \cup \ldots L_1. \tag{6}$$

Приоритеты, принадлежащие одному подмножеству в выражении (6), будем называть равноправными и будем утверждать, что из двух приоритетов важнее тот, который принадлежит группе с большим индексом q.

Следовательно, разбиение (6) задает упорядочение групп приоритетов в порядке убывания их важности. На практике информацию о подобном упорядочении приоритетов представляется возможным получить за счет как последовательности экспертных опросов судовых и береговых специалистов, так и обработки записей "черных ящиков", внедряемых на морских судах.

Далее будем считать, что система бинарных отношений строгого предпочтения, эквивалентности и несравнимости (1-3), записанная:

$$P^q = \{>^q, \sim^q, N^q\}, \tag{7}$$

определена для каждой группы из выражения (6) и, более того, эта система вообще способна характеризовать результат сравнения сообщений по всем группам приоритетов $L_1, \ldots, L_q$. Для этого по определению, во-первых, положим

$$P^1 \equiv P^{L,1}, \text{ т.е. } >^1 \equiv >^{L,1}, \sim^1 \equiv \sim^{L,1}, N^1 \equiv N^{L,1}, \tag{8}$$

а, во-вторых, так же для $\forall\ \omega, b \in \Omega$, при $k = 2, q$ по определению будем иметь:

$$\begin{aligned} &\omega >^k b \Leftrightarrow [(\omega >^{L,k} b) \mathbin{\&} \neg (b >^{k-1} \omega)] \vee [(\omega \sim^{L,k} b) \mathbin{\&} (\omega >^{k-1} b)],\\ &\omega \sim^k b \Leftrightarrow (\omega \sim^{L,k} b) \mathbin{\&} (\omega \sim^{k-1} b),\\ &\omega\, N^k\, b \Leftrightarrow \neg [(\omega >^k b) \vee (b >^k \omega) \vee (\omega \sim^k b)]. \end{aligned} \tag{9}$$

Введенная система отношений (7-9) характеризует отношение сообщений, поступающих судоводителю при сравнении их по k младшим группам приоритетов $L_1, \ldots, L_k$.

Для пояснения смысла системы отношений (9) рассмотрим ее связь с паретовской системой. Пусть далее для простоты множество приоритетов разбито только на две группы

$$K = L_2 \cup L_1.$$

Тогда сообщение ω оказывается предпочтительней сообщения $b(\omega >^2 b)$ в следующих четырех случаях:

$$\begin{aligned} &\omega >^{L.2} b,\ \omega >^{L.1} b,\\ &\omega >^{L.2} b,\ \omega\, N^{L.1}\, b,\\ &\omega >^{L.2} b,\ \omega \sim^{L.1} b,\\ &\omega \sim^{L.2} b,\ \omega >^{L.1} b. \end{aligned} \tag{10}$$

Как следует из составленной группы выражений (10), одного предпочтения для сообщения по более важной группе приоритетов недостаточно. Для его превосходства в целом необходимо, чтобы это сообщение оказалось еще не хуже и по менее важной группе приоритетов. Тогда, во введенной системе отношений, в отличие от паретовской системы, менее важные приоритеты способны существенно влиять на результаты выбора и на сам механизм выбора в целом.

Отметим еще одну особенность системы отношений (7), которая определяет "чувствительность" разбиения (6) и влияет на результат выбора при добавлении новых существенных приоритетов. Для этой цели достаточно обратиться к выражениям (10). Анализ этих выражений показывает, что отношение между сообщениями способно измениться на противоположное лишь при условии ввода в разбиение (6) двух дополнительных важных приоритетов. В то же время в паретовской системе отношений разбиение обладает абсолютной "нечувствительностью", поскольку даже добавление произвольного числа новых существенных приоритетов не может изменить существующее соотношение между сообщениями.

Для определения состояния оптимальности информационной связи между объектом управления и судоводителем в социо-технической системе "Вахта" примем, что системе отношений (7) поставлено в соответствие подмножество

$$\Gamma^q = \{\upsilon \in \Omega \mid \exists^* \omega \in \Omega : \omega >^q \upsilon\}, \text{ если } \Gamma^q \neq \varnothing,$$

где $\upsilon \in \Gamma^q$ – сообщения недоминирующего характера, вывод которых из обращения в информационной связи социо-технической системы оптимизирует эту связь, обеспечивая минимальную информационную загрузку вахтенного судоводителя.

Число оптимизирующих сообщений из множества Γ^q может принимать, вообще говоря, любое значение от единицы до мощности исходного множества Ω. Поэтому поставим задачу о вероятностной оценке мощности подмножества Γ^q, а именно оценке математического ожидания числа сообщений $M[Card\ \Gamma^q]$, образующих это подмножество.

Для этой цели представим множество сообщений, поступающих к судоводителю от подсистемы "Ходовой мостик" $\Omega\{\omega = (\omega_1, \ldots, \omega_m)\}$, как конечное множество s реализаций m-мерной случайной величины $\xi = (\xi_1, ..., \xi_m)$. Обозначим через $F_i(\xi_i)$ произвольные непрерывные функции распределения случайных величин ξ_i ($i = 1, m$) и будем предполагать, что введена в действие система отношений (7-9).

Задачу по определению величины $M[Card\,\Gamma^q]$ доопределим следующими предположениями:

– по каждой координате i ($i = 1, m$) реализации строго упорядочены, т.е. если ω и υ – две реализации случайной величины ξ, то $\omega_i \neq \upsilon_i$;
– осуществлено разбиение $K = K_m \cup \ldots \cup K_1$, при котором приоритет K_i более важен, чем приоритет K_j, если $i > j$.

Если учитывать эти предположения, то определения (9) можно заменить при $k = 2, m$ следующими:

$$(\upsilon >^{k} \omega) \Leftrightarrow (\upsilon_k > \omega_k)\ \&\ \neg\,(\omega >^{k-1} \upsilon),$$
$$\upsilon\, N^{k}\, \omega \Leftrightarrow \neg\,[(\upsilon >^{k} \omega) \vee (\omega >^{k} \upsilon)],$$

поскольку при $k = 1$ имеет место $\upsilon >^{1} \omega \Leftrightarrow \upsilon_1 > \omega_1$.

В то же время будем считать, что ранг $R_i(\upsilon)$ реализации υ, определяемый приоритетом K_i, равен l, если ровно $(l - 1)$ реализаций имеют по этому приоритету значение большее, чем υ_i.

Зафиксируем реализацию $\upsilon \in \Omega$, такую, что $R_m(\upsilon) = r$, рассмотрим следующие четыре события:

событие B: $\forall \omega \in \Omega\ \neg\,(\omega >^{m} \upsilon)$, т.е. $\upsilon \in \Gamma^{m}$,
событие C: $R_{m-1}(\upsilon) = 1$,
событие D_k: $R_{m-2}(\upsilon) = k$, где ($k = 1, r$),
событие E_k: $\forall \omega \in \Omega_k\ \neg\,(\omega >^{m-2} \upsilon)$, где $\Omega_k\{\omega \in \Omega \mid R_{m-2}(\upsilon) < k\}$,

и покажем, что первое событие B можно найти так:

$$B = C \cap [\bigcup_{k=1}^{r} (D_k \cap E_k)]. \tag{11}$$

Пусть при некотором $k = k_0$ имеют место события C, $D_{k,0}$ и $E_{k,0}$. Рассмотрим некоторое сообщение $\omega \in \Omega$, когда $\omega \in \Omega_{k,0}$. Событие $E_{k,0}$ состоит в том, что для таких сообщений $\omega = \neg\,(\omega >^{m-2} \upsilon)$ и при этом $\upsilon_{m-1} > \omega_{m-1}$, т.е. имеет место событие C, а из определения (10) следует, что $\neg\,(\omega >^{m} \upsilon)$.

Пусть сообщение $\omega \in \Omega_{k,0}$. В этом случае $\upsilon_{m-2} > \omega_{m-2}$ и $\upsilon_{m-1} > \omega_{m-1}$, следовательно,

$$\neg\,(\omega >^{m} \upsilon) \text{ и } \forall \omega \in \Omega\ \neg\,(\omega >^{m} \upsilon),$$

т.е. имеет место событие B.

Пусть произошло событие B и тогда, если $R_{m-1}(\upsilon) > 1$, то

$$\exists\ \omega \in \Omega\text{: } R_{m-1}(\omega) = 1, \text{ при } \omega_{m-1} > \upsilon_{m-1},$$

а это значит $(\omega >^{m} \upsilon)$, что противоречит начальному предположению. Следовательно, произошло событие C.

Пусть произошло событие $D_{k,0}$, когда $R_{m-2}(\upsilon) = k_0$ и $\exists\ \omega \in \Omega_{k,0}$, такое, что $(\omega >^{m-2} \upsilon)$. Но постольку $\omega_m > \upsilon_m$, то из определений (10) непосредственно следует, что $(\omega >^{m} \upsilon)$, но это также противоречит начальному предположению. Следовательно, имеет место и событие $E_{k,0}$.

Выполненный анализ появления четырех выделенных выше возможных событий позволяет не сомневаться в правильности выражения (11) и использовать его при определении математического ожидания $M[Card\,\Gamma^q]$, где $Card$ – мощность множества Γ^q.

Далее по формуле Байеса получим

$$P(B) = P(C) \times \sum_{k=1}^{r} P(D) \times P(E_k / D_k),$$

где $P(B) = \pi\,(m, r)$ – вероятность того, что $\upsilon \in \Gamma^m$, $P(C) = P(D) = 1/r$, а $P(E_k / D_k) = \pi\,(m - 2, k)$.

Преобразуя формулу Байеса следующим образом:

$$\pi\,(m, r) = 1 / r^2 \sum_{k=1}^{r} \pi\,(m - 2, k),$$

и, учитывая, что математическое ожидание числа недоминирующих сообщений $\upsilon \in \Gamma^q$ можно найти так:

$$M[Card\,\Gamma^q] = M(m, r) = \sum_{i=1}^{r} \pi\,(m, i),$$

получим возможность оценить количество

$$Card\,\Gamma = Card\,\Omega \setminus M[Card\,\Gamma^q],$$

доминирующих сообщений, необходимых судоводителю для решения конкретной управленческой производственной задачи.

Таким образом, использование в процессе управления состоянием безопасной эксплуатации судна только конечного и счетного множества доминирующих сообщений *Card Г*, идущих по информационной связи, способно повысить эффективность и организованность функционирования социо-технической системы в целом при минимальной информационной загрузке судоводителя.

4. Оптимизация силового взаимодействия между оператором и объектом управления

Пусть судовой специалист управляет объектом, причем вероятность события, заключающегося в появлении за малое время Δt необходимости вмешательства судового специалиста в функционирование объекта управления, равна величине $\lambda\Delta t + O(\Delta t)$, при $\lambda > 0$.

При обращении к объекту управления судовой специалист взаимодействует с ним случайное время τ с функцией распределения $\Phi(\tau)$ и конечным математическим ожиданием $<\tau>$. Идентифицируя состояние эксплуатации судна, судовой специалист осуществляет эту операцию с вероятностью q. Кроме того, пусть вероятность "правильного" функционирования цепи "опрос – распознавание – силовое действие" составляет величину R.

Судового специалиста, включенного в цепь "опрос – распознавание – силовое действие", целесообразно рассматривать как универсальную систему управления, поскольку такой специалист, как правило, имеет многоцелевое назначение, и априори неизвестно все множество задач управления, для решения которых он может быть привлечен. В связи с этим в качестве экономического показателя, который будет характеризовать деятельность судового специалиста, можно использовать показатель трудовых затрат $H(\tau)$ и случайную величину эффективности взаимодействия этого специалиста с техническими средствами (ТС) B.

Для оценки эффективности силового взаимодействия "судовой специалист – объект управления" дополнительно используем следующие допущения. Пусть в момент времени t_1 из-за ошибки человеческого элемента процесс поддержания заданного уровня состояния эксплуатации судна был прерван, а в момент $t_2 > t_1$ ошибка была устранена и продолжена нормальная работа. Тогда человеческий элемент опустит операции, которые необходимо выполнять в интервале (t_2 t_1), и продолжит работу так, как будто сбой не возникал.

Анализ эффективности силовой взаимосвязи требует совместного рассмотрения вероятностных исходов $(j-1)$-го взаимодействия человека и технических средств с поведением судоводителя на j-м интервале. С этой целью на множестве указанных исходов выделим два события. Первое событие состоит в том, что по окончании $(j-1)$-го взаимодействия судоводитель способен с вероятностью p_1 функционировать на j-м интервале. Второе событие заключается в том, что с вероятностью $(1-p_1)$ такая способность у судоводителя отсутствует.

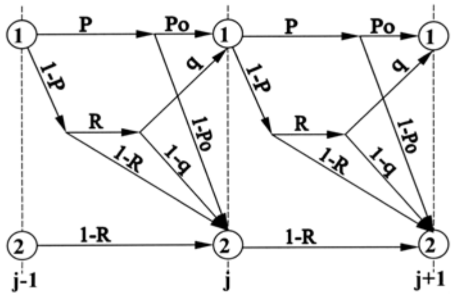

Рис. 1

На рис. 1 приведена диаграмма эволюции судового специалиста, в которой вершины соответствуют событиям, определенным выше, а дуги – возможным переходам с их вероятностями. Вертикалями на диаграмме отмечаются соответствующие моменты времени ...,$j-1, j, j+1$,... завершения взаимодействий человека и ТС, а величины P и P_0 – вероятности непоявления у судоводителя информации относительно состояния эксплуатации судна за время T и τ, соответственно, равны:

$$P = \int_0^\infty e^{-sT}\, \Xi(T)\, dT, \quad P_0 = \int_0^\infty e^{-s\tau}\, \Phi(\tau)\, d\tau, \tag{12}$$

где $\Xi(T)$ и $\Phi(\tau)$ – плотности вероятностей случайных величин T и τ, T – случайный интервал времени между двумя последовательными обращениями к техническим средствам.

Здесь следует заметить, что моменты завершения взаимодействий могут рассматриваться как точки регенерации случайного процесса функционировании взаимосвязи "человек и технические средства" (*Дынкин, Юшкевич*, 1967).

Следуя диаграмме (рис. 1), нетрудно указать вероятность $P(d/e)$ того, что в j-й момент регенерации ТС окажутся в состоянии d, если до этого они находились в состоянии e, и, тем самым, определить вложенный Марковский процесс с матрицей переходных вероятностей:

$$||P(d/e)|| = \left\|\begin{vmatrix} P(1/1) & P(1/2) \\ P(2/1) & P(2/2) \end{vmatrix}\right\|,$$

где $P(1/1) = PP_0 + Rq(1-P)$, $P(1/2) = 1 - P(1/1)$, $P(2/1) = Rq$, $P(2/2) = 1 - P(2/1)$.

Исследуя вложенный Марковский процесс, в стационарном режиме функционирования социо-технической системы можно получить для вероятностей 1-го и 2-го событий, соответственно:

$$\pi_1 = Rq/[1 - P(P_0 - Rq)], \qquad \pi_2 = 1 - \pi_1.$$

Очевидно, что случайная величина B_j – эффективность взаимодействия человека и технических средств на j-м интервале – равняется нулю при условии, что в итоге (j – 1)-го взаимодействия имело место второе событие.

Определение величины B_j, если на (j – 1)-м интервале имело место первое событие, требует предварительной фиксации закона распределения плотности вероятности $\chi(t)$ величины t – отрезка времени от начала j-го интервала до появления запроса на управление. При фиксированных значениях T и τ в качестве закона распределения плотности вероятности можно, например, использовать выражение, записанное так:

$$\chi(t) = \lambda e^{-\lambda t} + \delta(t - T - \tau)\, e^{-\lambda(T-\tau)}, \text{ при } 0 \le t \le T + \tau, \tag{13}$$

где $\delta(t)$ – дельта-функция.

Тогда с учетом соотношений (11) и (13) и вероятностей π_1 и π_2 математическое ожидание величины B_j будет равно:

$$<B_j> = bRq(1 - PP_0) / \lambda[1 + P(P_0 - Pq)], \tag{14}$$

где b – величина эффективности взаимодействия в единицу времени.

В свою очередь, средняя величина разности эффекта и трудозатрат на один интервал управления определится так:

$$<\Delta_j> = <B_j> - <H(\tau)>,$$

где $<H(\tau)>$ – математическое ожидание трудозатрат человеческого элемента.

Далее предположим, что техническим состоянием судна следует управлять в течение времени $T_0 > T + \tau$. В этом случае

$$T_0 = \sum_{j=1}^{n} T_j + \sum_{j=1}^{n} \tau_j, \tag{15}$$

где n – количество интервалов взаимодействия.

Если выполнить операцию усреднения соотношения (15) с учетом (14), получим выражение для разности эффекта от эксплуатации объекта управления и соответствующих трудозатрат на n интервалах управления в социо-технической системе:

$$<\Delta_n> = T_0<H(\tau)>/[(<T> + <\tau>)\,(<B>/<H(\tau)> - 1)]. \tag{16}$$

Для поиска максимума выражения (16) представим этот функционал следующим образом:

$$J = (J_1 - J_2) / (J_2 - J_3), \tag{17}$$

где

$$J_1 = bRq(1 - PP_0) / \lambda < H(\tau)>,$$
$$J_2 = 1 + P(Rq - P_0),$$
$$J_3 = <T> + <\tau>.$$

Первая вариация этого функционала равна

$$\delta J = [J_2J_3(\delta J_1 - \delta J_2) - (J_1 - J_2)\,(J_2\delta J_3 + J_3\delta J_2)\,]/J_2J_3. \tag{18}$$

Пусть существует функция $z(T) = z_0$, которая доставляет экстремум функционалу (17). Тогда, используя условие:

$$\delta J = 0 \text{ при } J_2 \neq 0 \text{ и } J_3 \neq 0$$

можно из выражения (18) получить

$$\delta J_1 + \mu_1\delta J_3 - \mu_2\delta J_2 - \mu_3\delta J_3 = 0,$$

где $\mu_1 = J_2(z_0) / J_3(z_0)$; $\mu_2 = J_1(z_0) / J_2(z_0)$; $\mu_3 = J_1(z_0) / J_3(z_0)$.

Следовательно, функция, доставляющая экстремум функционалу (15), должна удовлетворять уравнению Эйлера для промежуточного функционала

$$J^* = J_1 + \mu_1 J_3 - \mu_2 J_2 - \mu_3 J_3,$$

в принципе, относящегося к классу функционалов вида

$$\int_0^{\infty} [X(T) + z(T)Y(t)]dT.$$

Для этих функционалов дифференциальное уравнение Эйлера обращается в алгебраическое

$$Y(T) = 0, \tag{19}$$

а оптимальная взаимосвязь достигается в классе функций с вертикальными участками. Поскольку соотношение (19) в данном случае не обращается в тождество, то, принимая во внимание граничные условия $z(0) = 0$ и $z(\infty) = 1$, используем в качестве экстремали индикаторную функцию вида

$$z(T) = \begin{cases} 0, & T \le T^*, \\ 1, & T > T^*. \end{cases} \tag{20}$$

Значение величины T^* можно получить из условия максимума величины $<\Delta_n>$, предварительно подставив выражение (20) в выражение (16). В результате подстановки получим

$$<\Delta_n> = F(T, \tau) \,/\, (T + \tau)\, T_0 <H(\tau)>,$$

где

$$F(T, \tau) = [bRqe^{-\lambda(T+\tau)} \,/\, \lambda<H(\tau)>\, (Rq - e^{-\lambda\tau})\, (1 - e^{-\lambda(T+\tau)})] - 1.$$

Если функция F строго монотонна и обладает горизонтальной асимптотой, которая соответствует значению

$$F(T, \tau) = (bRq \,/\, \lambda<H(\tau)>) - 1,$$

то условием существования максимума величины $<\Delta_n>$ является выполнение неравенства, записанного так:

$$bRq \,/\, \lambda H(\tau) > 1. \tag{21}$$

Следовательно, оптимальным, в плане максимума эффективности от "правильного" использования взаимосвязи "оператор – объект управления", является регулярный поток обращений оператора к средствам управления. Значение оптимального интервала T определяется из условия максимума (16) при подстановке в это выражение индикаторной функции (20). В свою очередь, неравенство (21) определяет границу экономической целесообразности функционирования этой взаимосвязи. Если оно не выполняется, то оптимальным оказывается интервал обращения бесконечной длины.

5. Заключение

Современная оснащенность судна приборами, информационными, информационно-вычислительными и экспертными системами требует всесторонней и специализированной подготовки судовых специалистов. Такая подготовка должна учитывать, что средства автоматизации отдаляют специалиста от непосредственного контакта с объектом управления.

Судового специалиста, включенного в цепь "опрос – распознавание – силовое действие", целесообразно рассматривать как универсальную систему управления, поскольку ему, как правило, априори неизвестно все множество задач управления, для решения которых он может быть привлечен.

Использование в процессе управления состоянием безопасной эксплуатации судна только доминирующих сообщений повышает эффективность информационной связи социо-технической системы и всей этой системы в целом при минимизации информационной загрузки судоводителя.

"Правильным" использованием взаимосвязи "оператор – объект управления" является регулярный поток обращений оператора к средствам управления с оптимальным интервалом и ограничением на экономическую целесообразность функционирования этой взаимосвязи.

Литература

Айзерман М.А., Малишевский А.В. Некоторые аспекты общей теории выбора лучших вариантов. *Автоматика и телемеханика*, № 2, с.65-83, 1981.

Дынкин Е.Б., Юшкевич А.А. Теоремы и задачи о процессах Маркова. *М., Наука*, 1967.

Ларичев О.И. Наука и искусство принятия решения. *М., Наука*, 1979.

Резолюция ИМО А.850 (20). *СПб, ЦНИИМФ*, 9 с., 2004.