

УДК 656.61.052.1 : [528.9 : 004]

## Шкалирование пространства функциональных обязанностей в системе "Судоводитель – ЭКНИС"

М.М. Еремин, В.И. Меньшиков, А.В. Серов, В.В. Ковальчук  
Судоводительский факультет МА МГТУ, кафедра судовождения

**Аннотация.** Предложены два варианта шкалирования пространства функциональных обязанностей в эргатической системе "Судоводитель – ЭКНИС", привлекаемых для решения задач управления состоянием безопасности навигации.

**Abstract.** In the paper two variants of scaling of functional duties space in the system "Navigator – EMNIS" have been considered. The variants are to solve some tasks of safety navigation management.

### 1. Введение

В современном морском судовождении происходит активное внедрение информационных, информационно-вычислительных и экспертных систем и, в частности, электронных картографических навигационно-информационных систем (ЭКНИС). Обычно программное обеспечение ЭКНИС содержит конечное число модулей, решающих конечное число навигационных задач, которые так или иначе связаны с решением общей задачи – обеспечением безопасности плавания (безопасности навигации) судна. Естественно, что программное обеспечение ЭКНИС, обладая большим быстродействием, чем вахтенный судоводитель, решает навигационные задачи быстрее и точнее, чем "человеческий элемент". Однако для получения исходной информации ЭКНИС должна быть сопряжена с датчиками навигационной информации. Отказы этих датчиков и систем их сопряжения с ЭКНИС существенно влияют на надежность решения навигационных задач. Надежность решений навигационных задач дополнительно зависит как от типа протоколов опроса датчиков информации, так и топологии систем сопряжения программного обеспечения ЭКНИС с датчиками информации. При некоторых условиях могут возникнуть такие ситуации, при которых "правильность" принятия решения по выбору управления состоянием навигации с ориентацией исключительно только на "человеческий элемент" будет больше, чем "правильность" принятия решения, основанного на рекомендациях программного продукта ЭКНИС. В связи с этим возникает очевидная необходимость шкалирования функциональных обязанностей программного продукта технического средства и "человеческого элемента", образующих эргатическую систему "Судоводитель – ЭКНИС". От правильного решения такой задачи, в конечном счете, зависит безопасность мореплавания и безопасность эксплуатации судна в целом.

### 2. Шкалирование пространства функциональных обязанностей с привлечением отношения порядка

Для исследования особенностей распределения пространства функциональных обязанностей в системе, включающей ЭКНИС, датчики навигационной информации, систему сопряжения и "человеческий элемент", будем рассматривать ее как эргатическую систему, надежность которой при управлении состоянием навигации складывается из аддитивных вероятностных компонент.

Пусть, с одной стороны, вероятность "правильного" принятия решения для задачи по поддержанию состояния безопасности навигации с ориентацией на рекомендации программного обеспечения ЭКНИС в рамках эргатической системы без учета ошибок "человеческого элемента" (технический вариант решения) равна

$$P(t) = K_{gk} K_{gm} P_d(t_1) P_m(t_2) P_{ms}(t_2) = P_m P_d, \quad (1)$$

где  $K_{gk}$  – коэффициент готовности датчиков навигационной информации, необходимых для решения текущей навигационной задачи;  $K_{gm}$  – коэффициент готовности программного обеспечения ЭКНИС;  $P_d(t_1)$  – вероятность безотказной работы датчиков навигационной информации с системами сопряжения за время решения текущей навигационной задачи;  $P_m(t_2)$  – вероятность отсутствия отказа технических средств ЭКНИС за время решения текущей навигационной задачи  $t_2$ ;  $P_{ms}(t_2)$  – вероятность отсутствия сбоев в программном обеспечении ЭКНИС за время решения текущей навигационной задачи  $t_2$ ;  $P_m$  – вероятность исправности ЭКНИС;  $P_d$  – вероятность исправности датчиков навигационной информации.

Тогда, с другой стороны, вероятность "правильного" принятия решения для той же задачи по управлению состоянием безопасности навигации, но с ориентацией только на способности "человеческого элемента" без учета отказов технических средств можно определить так:

$$Q(t) = K_{gk} P_d(t') Q_r(t') Q_v(t'') = P_d Q_{rz}, \quad (2)$$

где  $Q_r(t')$  – вероятность получения правильных навигационных данных с датчиков навигационной информации за время  $t'$ ;  $Q_v(t'')$  – вероятность правильных вычислений за время  $t''$ ;  $Q_{rz}$  – вероятность безошибочного решения текущей навигационной задачи "человеческим элементом".

Возможность "правильного" одномерного шкалирования пространства функциональных обязанностей программного продукта ЭКНИС и "человеческого элемента" можно обеспечить, если зафиксировать отношения порядка между вероятностными показателями (1) и (2). Пусть вероятностные показатели надежности решения задачи по выбору управлений состоянием безопасности навигации связаны отношениями вида

$$P(t) < Q(t) \text{ или } P(t) > Q(t), \quad (3)$$

где символы "<", ">" определяют отношение порядка.

Во всех практических случаях любая эмпирическая система отношений  $A$  содержит, по крайней мере, одно из отношений порядка (3). При этом сама система  $A$  всегда является неприводимой системой отношений и в данном случае будет представлять собой упорядоченное множество задач, обеспечивающих безопасность навигации и решаемых в рамках эргатической системы "Судоводитель – ЭКНИС". Действительно, упорядоченность системы  $A$  достигается за счет определения показателей (1) и (2) на множестве действительных чисел с естественным отношением порядка. Поэтому, если далее учитывать отношения (3), то систему  $A$ , способную одномерно шкалировать пространство функциональных обязанностей в эргатической системе "Судоводитель – ЭКНИС", можно записать так

$$A = \{A_0; <, >\},$$

где  $A_0$  – множество задач, решаемых в эргатической системе "Судоводитель – ЭКНИС", "<" и ">" – бинарные отношения порядка, удовлетворяющие условиям:

- для всех  $a_1, a_2 \in A_0$  или  $a_1 = a_2$  или  $a_1 < a_2$  или  $a_2 < a_1$ ;
- для всех  $a_1, a_2, a_3 \in A_0$  из  $a_1 < a_2$  и  $a_2 < a_3$  следует  $a_1 < a_3$ .

Введенные ограничения на элементы из множества  $A_0$  могут показаться достаточными для введения термина "шкала порядка". Однако только этих ограничений недостаточно, поскольку топология на  $A_0$ , определенная отношением порядка "<" или ">", не будет совпадать с относительной топологией множества  $m(A_0)$ , индуцированной естественной топологией на  $R$ . Поэтому необходимо дополнительно принять предположение о том, что формируемая шкала единственна с точностью до монотонно возрастающих непрерывных отображений множества  $m(A)$  в  $R$ . С учетом последнего предположения уже можно отображение

$$m : A \rightarrow R \quad (4)$$

принять за шкалу порядка, которая позволяет шкалировать пространство функциональных обязанностей как программного продукта технического средства, так и "человеческого элемента" в эргатической системе "Судоводитель – ЭКНИС". Однако практическое решение задачи шкалирования с привлечением отображения (4) осложняется тем, что существуют трудности в учете надежности характеристик "человеческого элемента". Даже привлечение специальных методик расчета надежности "человеческого элемента" в системах "человек – техника" (Губинский и др., 1969) не способно обеспечить нужной достоверности оценкам вероятностного показателя вида (2).

### 3. Особенности пространства функциональных обязанностей в системе "Судоводитель – ЭКНИС"

Пусть множество состояний пространства функциональных обязанностей эргатической системы "Судоводитель – ЭКНИС"  $T$  является точечным с двумя состояниями  $t_i$  и  $t_k$ . Эти состояния, в свою очередь, разбивают конечное пространство функциональных обязанностей  $L$ , подлежащее исполнению в эргатической системе "Судоводитель – ЭКНИС", на подмножества  $L_0(t_i)$ ,  $L_1(t_i)$  и  $L_0(t_k)$ ,  $L_1(t_k)$ . Будем считать, что состояния  $t_i$  и  $t_k$  сравнимы только в том случае, если в одном из исходных состояний  $t_i$  подпространство  $L_p(t_i)$  является собственным подпространством  $L_s(t_k)$ :

$$L_p(t_i) \subset L_s(t_k), \quad (5)$$

где  $p, s$  – булевы переменные. Если же подпространства тождественны

$$L_p(t_i) = L_s(t_k),$$

то естественно предполагать, что выделенные состояния адекватны, и из двух адекватных состояний выбирать такое состояние, которое по параметрам будет являться предпочтительным, например, по показателям (1) и (2). Пусть, далее, состояния пространства функциональных обязанностей в эргатической системе "Судоводитель – ЭКНИС" таковы, что для них выполняется условие (5). Тогда из того, что

$$\begin{aligned} L_0(t_i) &= L \setminus L_1(t_i), \\ L_0(t_k) &= L \setminus L_1(t_k), \end{aligned} \quad (6)$$

следует

$$L_0(t_k) \subset L_0(t_i). \quad (7)$$

Рассмотрим два варианта отношений состояний  $t_i$  и  $t_k$  из множества  $T$ , и пусть в первом случае реализуется состояние  $t_i$ . Из направленного графа (рис. 1) непосредственно следует, что выбранное состояние разбивает пространство функциональных обязанностей  $L$  на части  $L_0(t_i)$  и  $L_1(t_i)$ . Поэтому, учитывая (5), можно получить

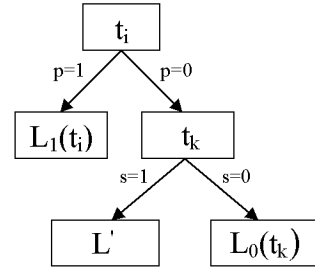


Рис. 1

$$\begin{aligned} L_1(t_i) \cap L_1(t_k) &= L_1(t_i), \\ L_1(t_i) \cap L_0(t_k) &= \emptyset. \end{aligned}$$

Следовательно, по ветви, определяемой булевой переменной  $p = 1$ , фиксировать состояние  $t_k$  вообще нецелесообразно. Тогда фиксируем состояние  $t_k$  по ветви, определяемой булевой переменной  $p = 0$ . Очевидно (рис. 1), что это состояние разобьет множество  $L_0(t_i)$  на два подмножества: первым в силу (7) будет  $L_0(t_k)$ , а вторым – подмножество полученное так

$$L' = (L \setminus L_1(t_i)) \setminus L_0(t_k). \quad (8)$$

Во втором случае пусть реализуется состояние  $t_k$ . Построенный направленный граф показывает (рис. 2), что это состояние разбивает пространство функциональных обязанностей  $L$ , подлежащих исполнению в эргатической системе, на подмножества  $L_1(t_k)$  и  $L_0(t_k)$  соответственно.

Тогда из выражения (7) для ситуации, изображенной на рис. 2, имеем

$$\begin{aligned} L_0(t_k) \cap L_0(t_i) &= L_0(t_k), \\ L_0(t_k) \cap L_1(t_i) &= \emptyset. \end{aligned} \quad (9)$$

Фиксируем состояние  $t_i$  по ветви булевой переменной  $s = 1$ . В этом случае получим как подмножество  $L_1(t_i)$ , так и подмножество, равное

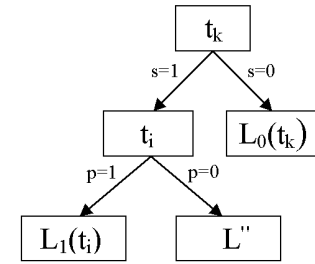


Рис. 2

$$L'' = (L \setminus L_0(t_k)) \setminus L_1(t_i). \quad (10)$$

Сравнивая (6) и (10), убеждаемся, что

$$L' = L'' = L^*. \quad (11)$$

Таким образом, выражение (11) и направленные графы (рис. 1 и 2) подчеркивают одно достаточно простое и важное для эргатических систем физическое свойство, которое, в свою очередь, способно обеспечивать повышение эффективности использования таких систем. Это свойство заключается в том, что эффективная эксплуатация системы возможна лишь при тождественности пространств функциональных обязанностей, выполняемых как программным продуктом ЭКНИС, так подготовленным "человеческим элементом".

#### 4. Шкалирование пространства функциональных обязанностей с привлечением отношения предпочтения

Получив условия эффективного функционирования эргатической системы "Судоводитель – ЭКНИС", перейдем к построению шкалы, которая способна на базе отношения предпочтения разделить общее пространство функциональных обязанностей (11) программного продукта ЭКНИС и "человеческого элемента". Для этой цели предположим, что состояния пространства функциональных обязанностей системы обладают весами:

$$C_1 = C(L^*) + C(L_1(t_i)) + C(L_0(t_k)) + c(t_i) + c(t_k) \sum_{\substack{y \in L_0(t_i) \\ j \quad 0 \quad i}} p(y_j), \quad (12)$$

$$C_2 = C(L^*) + C(L_1(t_i)) + C(L_0(t_k)) + c(t_k) + c(t_i) \sum_{\substack{y \in L_1(t_i) \\ j \quad 1 \quad i}} p(y_j), \quad (13)$$

где  $C_1$  и  $C_2$  – вес состояний, представленных графически соответственно, а  $C(L^*)$  – вес состояния, индицирующего пространство функциональных обязанностей  $L^*$ .

Если вычесть (12) из (13), то можно получить, что состояние, представленное на графе (рис. 1), будет иметь меньший вес, чем состояние на графе (рис. 2), но только в том случае, когда

$$c(t_k) / \sum_{\substack{y \in L_0(t_i) \\ j \quad 0 \quad k}} p(y_j) = \Phi_0(t_k) \geq c(t_i) / \sum_{\substack{y \in L_1(t_i) \\ j \quad 1 \quad i}} p(y_j) = \Phi_1(t_i). \quad (14)$$

Полученное условие (14) является условием предпочтения двух сравнимых состояний  $t_i, t_k \in T$ . Поэтому введем обозначение  $t_i \prec t_k$ , которое будет означать, что состояние пространства функциональных обязанностей  $t_i$  предпочтительнее состояния  $t_k$ . Если далее принять, что одновременно выполняются условия (5) и (14), то это предположение приводит к отношению, которое можно записать в нестрогой формулировке так:

$$(L_p(t_i) \subset L_s(t_k)) \& (\Phi_p(t_i) \leq \Phi_s(t_k)) \Rightarrow (t_i \prec t_k).$$

Вновь, как и ранее, дополнительно принимая предположение о том, что формируемая шкала единственна с точностью до монотонно возрастающих непрерывных отображений множества  $m(A)$  в  $R$ , получим отображение (4), которое можно использовать в качестве шкалы предпочтений, которая позволяет шкалировать обобщенное пространство функциональных обязанностей (11) в эргатической системе "Судоводитель – ЭКНИС".

Определим условие транзитивности состояний пространства функциональных обязанностей эргатической системы. Пусть, кроме заданных состояний  $t_i$  и  $t_k$  на  $T$  существует еще одно – третье состояние  $t_m$ . Кроме того, пусть эти три состояния, являясь попарно неэквивалентными и сравнимыми, показывают нарушение свойства транзитивности у отношения предпочтения, т.е.

$$t_i \prec t_m, \quad t_m \prec t_k, \quad t_k \prec t_i.$$

Тогда вводя весовые показатели

$$\begin{aligned} \Delta c_{km} &= c(t_m) - c(t_k), & \Delta c_{im} &= c(t_m) - c(t_i), \\ \Delta p &= \sum_{\substack{y \in L(t_i) \\ j \quad q \quad s=1}} \setminus L(t_k) \quad (t_i) & \Delta p &= \sum_{\substack{y \in L(t_i) \\ j \quad q \quad m \quad p \quad i}} \setminus L(t_i) \end{aligned}$$

и учитывая (14), составим систему неравенств

$$(\Delta c_{im} \setminus c(t_i)) < (\Delta p_{im} \setminus \sum_{\substack{y \in L(t_i) \\ j \quad p \quad i}} p(y_j)), \tag{15}$$

$$(\Delta c_{km} \setminus c(t_k)) < (\Delta p_{km} \setminus \sum_{\substack{y \in L(t_i) \\ j \quad s=0 \quad k}} p(y_j)). \tag{16}$$

Невыполнение хотя бы одного из неравенств (15) или (16) в системе приводит к транзитивности отношения предпочтения. Для составления индикатора транзитивности отношения предпочтения в пространстве  $T$  усилим неравенство (16), изменив его знак на противоположный. Тогда достаточное условие транзитивности отношений предпочтений в пространстве  $T$  можно записать так:

$$(\Delta c_{max} \setminus c_{min}) < (\Delta p_{min} \setminus \sum p(y_j)_{max}),$$

где  $\Delta c_{max}$  – максимальная разность весов между двумя состояниями,  $c_{min}$  – минимальный вес,  $\Delta p_{min}$  – минимальная разность суммарных вероятностей событий, принадлежащих различным исходам сравнимых состояний,  $\sum p(y_j)$  – максимальная сумма вероятностей событий, принадлежащих одному исходу сравнимого состояния.

## 5. Заключение

Эффективность управления состоянием навигации зависит от распределения функциональных обязанностей между программным продуктом технических средств судовождения и "человеческим элементом", которые включены в контур управления судна.

Практическое решение задачи шкалирования пространства функциональных обязанностей с привлечением шкалы порядка осложняется тем, что существуют определенные трудности в учете надежности характеристик "человеческого элемента".

Повышение надежности функционирования эргатической системы "Судоводитель – ЭКНИС" можно связать со шкалированием пространства функциональных обязанностей, основанным на отношении предпочтения, причем результаты такого шкалирования могут обладать свойством транзитивности.

## Литература

Губинский А.И., Бодров В.А., Мозин В.А. Практические методы количественной оценки надежности системы "человек – техника". *Материалы ко второму Всесоюзному симпозиуму по надежности комплексных систем "человек – техника"*. Л., ЛГУ, с.34-37, 1969.