

УДК 629.5.067

Состояние целостности систем безопасной эксплуатации судов и управление этим состоянием через ресурс

В.И. Меньшиков, М.А. Пасечников, В.В. Ишков

Судоводительский факультет МА МГТУ, кафедра судовождения

Аннотация. Составлено описание структуры управления безопасной эксплуатацией судов компании, предложены варианты оценки целостности этой структуры, сформулирован возможный подход к управлению целостностью системы через ресурс.

Abstract. Structure of safe operation management of company vessels has been described; variants of estimation of this structure integrity have been proposed; possible approach to managing system integrity by resource has been defined.

Ключевые слова: система управления безопасностью, локальные управляющие подсистемы, информация, целостность системы, управляющий ресурс

Keywords: system of safety management, local managing subsystems, information, system integrity, managing resource

1. Введение

На протяжении всей истории судоходства эксплуатация водного транспорта сопровождается аварийными происшествиями с судами. С ростом технического прогресса успешно решаются задачи обеспечения надёжности работы судовых систем и судов в целом, создаются новые технические средства, облегчающие процесс судовождения. Тем не менее, проблема аварийности судов остаётся актуальной и в настоящее время. С вступлением в силу и внедрением на морском транспорте Международного Кодекса по управлению безопасной эксплуатацией судов и предотвращением загрязнения в виде системы безопасной эксплуатации судов (СУБ) были осуществлены организационные меры по снижению рисков, связанных с мореплаванием. Однако "человеческий фактор" остаётся преобладающим среди факторов, приводящих к морским аварийным происшествиям.

Благодаря усилиям стран-участников международных морских договоров накоплено множество данных о морских аварийных происшествиях с их обстоятельным анализом и выработаны рекомендации, способствующие предотвращению таких аварий в будущем. Невозможность полного устранения аварий с помощью только организационных методов заставляет искать новые пути решения задач оптимизации взаимодействия технической и социальной подсистем СУБ. Именно целостность технической и социальной подсистем способна создать возможность скоординированного и сбалансированного менеджмента, позволяющего приблизиться к оптимизации результатов деятельности СУБ компании. Именно поэтому как теоретические, так и практические вопросы, связанные с исследованием проблемы целостности систем управления эксплуатацией судов компании, являются достаточно актуальными.

2. Описание структуры управления состоянием эксплуатации судов компании

Система управления безопасностью компании является многоуровневой иерархической и состоит из вышестоящей управляющей подсистемы S_0 (объединения береговых подразделений – береговая СУБ), и n нижестоящих локальных управляющих подсистем S_1, \dots, S_n (СУБ судов), в совокупности, воздействующих на состояние метапроцесса X , идущего в СУБ.

Управляющую подсистему S_0 , влияющую на метапроцесс X , следует рассматривать в качестве координатора, так как её управления γ , $\gamma \in \zeta$ являются координирующими для СУБ судов S_1, S_2, \dots, S_n . Используя это допущение, можно принять, что береговая СУБ S_0 имеет один вход, по которому принимается информация w . Эта информация, передается в подсистему S_0 по обратной связи от СУБ судов компании и используется объединением береговых подразделений S_0 для формирования координирующих управлений, $\gamma \in \zeta$. Тогда подсистема S_0 , осуществляя управление метапроцессом X , идущим в СУБ, должна функционировать в рамках отображения:

$$S_0: W \rightarrow \zeta, \quad (1)$$

где W представляет собой множество информационных данных w , с помощью которых реализуется обратная связь "судовая СУБ – береговая СУБ".

Управления из множества ζ в отображении (1), поступая в судовые СУБ, могут интерпретироваться персоналом системы с разных позиций. Поэтому далее целесообразно считать, что

координирующие управления γ являются n -мерными векторами $\gamma = (\gamma_1, \dots, \gamma_n)^T$, причем такими для которых на вход i -й СУБ судна поступает только i -я компонента координирующего управления γ_i .

Состояние метапроцесса X в любых случаях управления состоянием безопасности судов зависит от поступающих на него воздействий из подсистем S_1, \dots, S_n . Однако на метапроцесс, кроме управлений $m_i \in M$, идущих от судов компании, где M – множество этих управлений, поступают воздействия $\theta \in \Theta$, представляющие собой внешние возмущения, определенные на множестве Θ и образованные факторами окружающей среды. Поэтому метапроцесс X можно представить в виде P – отображения вида:

$$P : M \times \Theta \rightarrow X.$$

Поскольку в СУБ компании имеется n СУБ судов, то множество управлений M можно рассматривать, как декартово произведение n множеств

$$M = M_1 \times \dots \times M_n,$$

причем i -я локальная управляющая система S_i имеет полномочия выбирать i -ю компоненту m_i управления m , оказывая тем самым соответствующее воздействие на процесс X .

Поступающая по каналам обратной связи информация w содержит в себе данные относительно состояния безопасности каждого судна компании. Тогда общая информация, поступающая в СУБ координатора S_0 от СУБ судов, может быть оценена так

$$f_0 : \zeta \times Z \times M \rightarrow W,$$

где $Z = Z_1 \times \dots \times Z_n$ – информация о координирующих управлениях, поступающая в СУБ судов компании от подсистемы S_0 .

На вход любой СУБ судна поступает информация относительно состояния метапроцесса X . Тогда можно допустить, что во всех локальных подсистемах управления (на судах компании) СУБ компании поддерживается определенная функциональная зависимость. Эта зависимость между управлениями $m_i \in M$, внешними возмущениями $\theta \in \Theta$, и данными с выхода координатора $\gamma \in \zeta$. Следовательно, количество текущей информации Z_i , поступающей на судно компании, с учетом оговоренной выше функциональной зависимости между управлениями и возмущениями, можно представить с помощью следующего отображения:

$$F_i : M \times \Theta \times X \rightarrow Z_i.$$

В СУБ судна поступают данные двух видов: координирующие управления $\gamma \in \zeta$, поступающие от береговой СУБ, и информация z_i , направляемая по обратной связи из СУБ компании относительно состояния глобального процесса X . Выходом подсистемы (СУБ судна) S_i является локальное управление m_i , выбираемое администрацией судна из множества M_i . Очевидно, что в этой подсистеме должно вырабатываться множество управлений, получаемое по отображению вида:

$$S_i : \zeta \times Z_i \rightarrow M_i,$$

где Z_i – множество информационных сообщений z_i , передаваемых по каналу обратной связи.

При описании СУБ компании в руководствах по управлению состоянием эксплуатации судов важной задачей является лингвистическое представление метапроцесса X и его структуры. По сути, сформулированное выше представление о метапроцессе X позволяет его рассматривать лишь как образ, лингвистическое описание которого образует множество признаков принадлежности к классу управляемых эксплуатационных процессов. Именно наличие метапроцесса в структуре СУБ компании и элементах этой системы вызывает необходимость выделения координатора по управлению состоянием эксплуатации судов. Кроме того, метапроцесс X является первопричиной, определяющей вид взаимодействий и отношений между береговой компонентой СУБ компании S_0 и судовыми системами управления S_i , формируя наиболее общие элементы корпоративной культуры управления состоянием эксплуатации судов.

Для определения особенностей структуры метапроцесса положим, что в классе X определены n процессов управления состоянием эксплуатации судов компании $X_i \in X$ при $i = 1, \dots, n$, каждый из которых реализуется конкретным элементом СУБ, причем каждый i -й процесс может быть представлен с помощью отображения:

$$P : M_i \times U_i \times \Theta \rightarrow X_i, \quad (2)$$

где U_i – множество факторов u_i , посредством которых процесс управления состоянием эксплуатации судов X_i связан с другими процессами из класса X .

Для определенности в отображении (2) принято считать, что для каждого i множество факторов u_i задано отображением

$$H: M \times X \rightarrow U, \quad (3)$$

причем в этом отображении элементы u_i множества $U = U_1 \times \dots \times U_n$, связывают параллельно идущие процессы управления состоянием эксплуатации судов в СУБ компании.

Пусть на управляющие процессы, идущие в элементах СУБ компании, кроме факторов u_i , воздействует одно и то же внешнее возмущение $\theta \in \Theta$. Влияние одного и того же внешнего возмущения θ будет по-разному сказываться на параллельно идущих управляющих процессах. Поэтому в дальнейшем будем внешние возмущения $\theta \in \Theta$ рассматривать как n -компонентный набор величин $(\theta_1, \dots, \theta_n)$, причем такой в котором на каждый i -й управляющий процесс воздействует только i -я компонента θ .

Если далее учитывать отображения (2) и (3), то появляется возможность выделить из метапроцесса класс процессов Y , определенных в пространстве размерностью $M \times U \times \Theta$ и записанных так:

$$Y(m, u, \theta) = X_1(m_1, u_1, \theta_1), \dots, (X_n(m_n, u_n, \theta_n)). \quad (4)$$

Вид функций (4) показывает, что в классе X определен подкласс Y , в котором расположено множество связанных общих процессов управления состоянием эксплуатации судов компании $Y(m, u, \theta)$, которые являются основой для наделения СУБ свойством целостности.

3. Оценка целостности системы управления состоянием безопасности и ее отдельных элементов

В качестве характеристики глобальной целостности СУБ можно рекомендовать индикаторную функцию вида:

$$\varepsilon: Y \times Y \rightarrow [0, 1], \quad (5)$$

где $Y = Y(m, u, \theta)$ – множество процессов, идущих в СУБ и объединённых единством цели управления, а $\varepsilon(Y, Y^*)$ – функция, определяющая степень близости между эксплуатируемым множеством Y и его стандартным аналогом Y^* , заданным такими нормативными документами, как девятая глава Международной Конвенции Солас-74, Кодекса к ней и Концепцией ФОБ.

Индикаторную функцию целостности (5) для конкретной СУБ можно преобразовать и представить с помощью относительной метрики. Такая метрика определяет разность между идеальным множеством процессов $Y(m, u, \theta)$, представленным нормативными документами, и наихудшим множеством в заданном подклассе таких процессов, например:

$$\varepsilon(Y, Y^*) = 1 - [\Delta(Y, Y^*)] / \Delta_m(Y, j), \quad (6)$$

где

$$\Delta_m(Y, j) = \max_{(Y, j) \in Y} \Delta(Y, j).$$

При оценке целостности локальных процессов (судовых ключевых операций), определенных на множестве $Z(m, x)$, можно рекомендовать к практическому использованию индикаторную функцию вида:

$$f_b: C \rightarrow \{0, 1\}, \quad (7)$$

где C – множество возможных целостных состояний отдельного процесса из множества $Z(m, x)$, а f_b – функция выбора. Тогда для определения значений функции (14) достаточно найти её проекцию на подмножество возможных состояний целостности процесса $C_y \subset C$, получаемых в результате реализации некоторой технологии управления этим процессом:

$$T_r: U_r \times R_r \times G, \quad (8)$$

где U_r – планируемая деятельность (план) по поддержанию состояния безопасности судовой ключевой операции; R_r – цель управления судовой ключевой операцией; G – ресурсы, необходимые для выполнения безопасной технологической деятельности.

Связь технологии (8) с реализуемой ключевой операцией $Z_z \in Y(m, u, \theta)$, которая участвует в процессе эксплуатации судна, позволяет предложить численную оценку целостности для этой операции (Тропин и др., 2008) в таком виде:

$$f_b^y = [f_b \downarrow S_y]: C_y \rightarrow \{0, 1\}. \quad (9)$$

Таким образом, глобальная оценка целостности множества $Y(m, u, \theta)$ может быть определена на уровне метапроцесса, идущего в системе управления безопасностью, с возможной коррекцией взаимодействий отдельных элементов и процессов из X .

Система управления состоянием эксплуатации судна при реализации в ней ключевой операции может быть представлена структурой, записанной так:

$$\eta = (Y, K, X, R, J, G), \quad (10)$$

где Y – элементное множество судовой СУБ;

K – корпоративная культура управления состоянием эксплуатации судна;

X – метапроцесс, реализуемый в структуре η ;

R – цель управления;

J – множество планов управлений процессами, определенные на множестве X ;

G – множество управленческого ресурса, в том числе и информационного, необходимого для достижения поставленной цели R .

В рамках заданной структуры (10) реализацию плана безопасной судовой ключевой операции $Z_Z \in X$, составленного с учетом условия (4), цели и выделенного ресурса, осуществляют с помощью механизма функционирования $M_J = \{J, R, G\}$, моделью которого является следующее отображение:

$$\Sigma_1 : J \times R \times G \rightarrow X_{CO}, \quad (11)$$

где X_{CO} – вектор текущих координат безопасной траектории судовой ключевой операции.

В структуре (10) тройка множеств $M_{X_0} = \{X_0, R, G_0\}$ дает возможность организовать механизм предвидения состояния судна при выполнении на нем ключевой операций с траекторией X_{CO} , где $X_0 \subset X$ – модель (математическая модель) ключевой операции, позволяющая определить состояние судна в некоторый наперед заданный момент времени, а $G_0 \subset G$ – информационный управленческий ресурс, необходимый для организации процесса предсказания. Общее представление о функционировании механизма предвидения M_J можно составить, ориентируясь, например, на отображение вида

$$\Sigma_2 : X_0 \times R \times G_0 \rightarrow X_{PP}, \quad (12)$$

где X_{PP} – вектор прогнозируемых на некоторый наперед заданный момент времени координат безопасной траектории судовой ключевой операции.

С технической точки зрения, отображение (12) может быть реализовано в технических средствах по эксплуатации судна с помощью прогнозирующих фильтров Φ . В общем случае при выполнении судовых ключевых операций будущее безопасное состояние судна с параметрами $x_n \in X_{PP}$, получаемое с прогнозирующего фильтра должно отвечать условию:

$$\Phi = [x_n | M_{X_0} = \{R, X_0\} \subseteq \{R, J\} = M_J]. \quad (13)$$

Общая модель механизма предвидения M_{X_0} (12) с учетом условия (13), предназначенная для прогнозирования состояния судна в каком-либо отдельном классе судовых ключевых операций, обычно алгоритмизируется. Полученный прогнозирующий фильтр Φ вводится в состав программного обеспечения экспертных систем и даёт рекомендации по безопасной эксплуатации судна. При этом основной задачей механизма предвидения является оценка будущего состояния судна при выбранном управлении и стремление этого состояния к заданной цели R . Результаты оценок состояний и их стремлений должны быть переданы судоводителю в виде сигналов, включённых в общее мультимедийное пространство ходового мостика.

Пусть текущие координаты реализуемой безопасной ключевой операции (11) и прогнозируемые координаты этой же операции (12) определяются с помощью общей рекурсивной последовательности:

$$x_{n+1} = \Psi_\alpha x_n, \quad (14)$$

где Ψ_α – оператор, положенный как в основу реализации отображения (11), так и отображения (12); α – параметр оператора Ψ , причем $\alpha \in A$.

Требование локальной целостности судовой ключевой операции $Z_Z \in Z(m, x)$ как на этапе реализации, так и на этапе прогнозирования, всегда будет выполняться и оцениваться с помощью индикаторной функции (9), если для этого потребовать, чтобы множество параметров оператора A было сепарабельным.

Целостность процесса реализации судовой ключевой операции (11) и ее прогнозирующего аналога (12) плана определяется элементами пересечения $S_{X_{CO}} \cap S_{X_{PP}}$ деятельности в двух смежных этапах ее проведения (11) и (12), охваченных общим видом деятельности (14), направленным на управление состоянием эксплуатации судна. Если принять во внимание управления (7), то с учётом выражения (8) можно составить условие локальной целостности этапов операции (11) и (12) в следующем виде:

$$[f_b^y \downarrow S_y \cap S_j] = [f_b^j \downarrow S_y \cap S_j]. \quad (15)$$

Для оценки целостности двух видов деятельности не всегда целесообразно использовать предложенное условие (15). Поэтому для практической оценки свойства локальной целостности двух видов деятельности (11) и (12) можно рекомендовать к использованию условие:

$$[f_b^y \downarrow S_y \cap S_j] - [f_b^j \downarrow S_y \cap S_j] = \Delta(y, j) \leq \Delta_{ad}, \quad (16)$$

где Δ_{ad} – допустимая по заданному критерию нецелостность элементов СУБ при ее функционировании.

В дополнение к выражению (16), относительную степень локальной целостности отдельных элементов деятельности $\varepsilon_Z(Z, Z^*)$ с учетом условия (6) можно найти с помощью характеристической функции:

$$\varepsilon_Z(Z, Z^*) = [(\Delta Z, Z_{max}) - \Delta(Z, Z^*)] / \Delta(Z, Z_{max}),$$

где $\Delta(Z, Z_{max})$, $\Delta(Z, Z^*)$ – метрики максимальной и имеющейся в данный момент оценки целостности между элементами СУБ, а Z_{max} – максимальная целостность по отношению к цели управления судовой ключевой операции на судах компании.

4. Вариант управления целостностью систем эксплуатации судов через ресурсы

Нарушение глобальной целостности подкласса, локальной целостности судовых ключевых операций и целостности этапа прогнозирования и реализации этой же операции можно отнести к несистемностям, которые способны сорвать процесс управления. Поэтому для повышения эффекта от деятельности СУБ в компании необходимо разрабатывать и внедрять методики по минимизации величин рисков, связанных с появлением несистемностей, обусловленных возможной потерей целостности как самой системой в целом, так и отдельными ее элементами.

Для оценки качества минимизации величин таких рисков далее рекомендуется использовать метрику ζ

$$\zeta = \omega - \omega_1, \quad (17)$$

где ω – закон распределения плотности вероятности величин рисков того, что выделенный управленческий ресурс не способен поддержать состояние целостности СУБ или ее элементов;

ω_1 – закон распределения плотности вероятности величин рисков того, что используемая технология управления при дополнительно выделенном ресурсе способна минимизировать риск появления несистемности от потери целостности СУБ или ее элементов.

Применение критерия (17) основано на допущении, что появление несистемности от потери целостности СУБ или ее элементов связано с вариациями ресурса, выделяемого в СУБ администрацией компании в соответствии с требованиями концепции ФОБ. Если использовать эту концепцию, то появление форс-мажорных обстоятельств с управляющим ресурсом и соответствующую эволюцию распределения вероятности величин рисков (17) целесообразно формализовать с помощью Марковских процессов. В рамках теории Марковских процессов для описания эволюции закона распределения рисков, связанных с потерей СУБ или ее элементов целостности, можно воспользоваться уравнением Колмогорова с правой частью:

$$\partial \omega / \partial t + a(g, t) \partial \omega / \partial g - \frac{1}{2} b(g, t) \partial^2 \omega / \partial g^2 = g(t), \quad (18)$$

где a – коэффициент сноса; b – коэффициент диффузии; $g(t) \in G$ – выделенный ресурс, например, с согласованным ограничением на стоимость и используемый для поддержания целостности СУБ или ее элемента с величинами рисков, распределенных по закону ω .

Минимизировать величины рисков, связанных с потерей СУБ или ее элементов целостности, можно, если руководство компании направит на реализацию этой цели дополнительный ресурс $u(g, t)$. Использование дополнительного ресурса, минимизирующего величины рисков, по сути, следует рассматривать, как управление состоянием целостности СУБ или ее элементами через ресурс.

При адекватном функционировании СУБ или ее элемента и использовании дополнительного управляющего ресурса описание эволюции закона распределения рисков, связанных с потерей СУБ или ее элементами целостности, также можно характеризовать с помощью уравнения Колмогорова, но с исправленной правой частью:

$$\partial \omega_1 / \partial t + a(g, t) \partial \omega_1 / \partial g - \frac{1}{2} b(g, t) \partial^2 \omega_1 / \partial g^2 = g(t) + u(g, t). \quad (19)$$

Таким образом, возникает задача управления через ресурсы состоянием целостности СУБ или ее элементов с целью минимизации величин рисков, распределенных в соответствии с законами распределения ω и ω_1 .

В качестве критерия оптимальности при управлении состоянием целостности СУБ или ее элементов через ресурс целесообразно привлекать сумму потерь, во-первых, идущих на минимизацию рисков, и, во-вторых, идущих на рискоснижающие мероприятия, которые можно оценить виртуально. Поэтому, в соответствии с теорией аналитического конструирования, в качестве критерия оптимальности окончательно можно принять сумму квадратов потерь, зависящих от стоимости затрат на реализацию

рискоснижающих мероприятий, минимизирующих разность законов распределения ω и ω_1 , и стоимости затрат C , направляемых на приобретение дополнительного управляющего ресурса $u(g, t)$.

С формальной точки зрения, такой критерий записывается так:

$$F = \int_0^{\tau} (C^2 + k\zeta^2) dt \rightarrow \min, \quad (20)$$

где k – некоторый постоянный, но размерный коэффициент.

Составленная задача оптимизации управления состоянием целостности СУБ или ее элемента через ресурс (17-20) относится к классу задач на условный экстремум при заранее составленной функции Лагранжа. Для функции Лагранжа, учитывающей выражения (17-20), критерий оптимальности (20) можно переписать так:

$$F = \int_0^{\tau} (C^2 + k\zeta^2 + \lambda[\partial\zeta/\partial t + a\partial\zeta/\partial g + 1/2(b\partial\zeta^2/\partial g^2)] + C) dt \rightarrow \min, \quad (21)$$

где λ – множитель Лагранжа.

Для практического использования условия (21) необходимо дополнительно знать зависимость метрики ζ от интенсивности проведения рискоснижающих мероприятий и удельную стоимость единицы дополнительного управляющего ресурса. Кроме того, при решении задачи по оптимальному управлению состоянием целостности СУБ или ее элементов через ресурс необходимо учитывать, что для рискоснижающих мероприятий чем выше интенсивность их проведения (обусловленная режимом изменением поставок ресурсов), тем больше вероятность того, что эти мероприятия не завершатся в установленные сроки.

5. Заключение

Из описания структуры СУБ следует, что из метапроцесса может быть выделен класс глобально связанных процессов, идущих во всех элементах СУБ и образующих целостное элементное множество социотехнической системы. Глобальная оценка целостности множества $Y(m, u, \theta)$ может быть определена на уровне метапроцесса, идущего в системе управления безопасностью, с возможной коррекцией взаимодействий отдельных элементов и процессов из X и учетом их локальной целостности.

Предложенное описание (10) структуры СУБ компании предусматривает вариант оценки целостности этой структуры, который формирует оптимальный, на наш взгляд, подход к управлению целостностью системы через ресурс.

Литература

Тропин Б.Л., Кузьминых А.С., Меньшиков В.И. Целостность систем эксплуатации судов компании с минимизацией избыточности ресурса. *Вестник МГТУ*, т.11, № 2, с.360-363, 2008.