

УДК 629.5.067

Вероятностная оценка структурной устойчивости организационно-технических систем управления безопасностью судов методом усреднения

А.И. Бражный¹, В.И. Меньшиков¹, Н.П. Дедков², А.Н. Папуша³,
В.В. Ковальчук⁴

¹ Судоводительский факультет МА МГТУ, кафедра судовождения

² Государственный региональный центр стандартизации, метрологии и испытаний в Мурманской области

³ Естественно-технический факультет МГТУ, кафедра механики сплошных сред и морского нефтегазового дела

⁴ Экономический факультет МГТУ, кафедра информационных систем и прикладной математики

Аннотация. Предложен новый вариант метода усреднения. С его помощью возможна оценка структурной устойчивости организационно-технических систем управления состоянием мореплавания на достаточно длительных временных интервалах.

Abstract. A new variant of the averaging method has been proposed. It helps to evaluate the structural stability of the organizational and technical systems of navigation management on rather long time intervals.

Ключевые слова: структура, устойчивость, вероятность, безопасность, мореплавание
Key words: structure, stability, probability, safety, navigation

1. Введение

Аварийность судов на море является объективной реальностью. Она обусловлена сопутствующими мореплаванию внешними и внутренними факторами и не зависит от человека.

Полное искоренение аварийности судов, к сожалению, невозможно. Однако вполне возможно оказывать влияние на аварийность при помощи определенных действенных мер и, соответственно, – снижать аварийность на ограниченный период. Положительный результат предполагает достижение приемлемого уровня аварийности (с допустимым материальным ущербом), а также ее стабилизацию на продолжительный интервал времени.

Усилия по предупреждению аварийности эксплуатируемых судов должны предусматривать снижение доли "человеческого фактора" в числе причин возникновения аварий на море.

Интерес к исследованиям в данном направлении определен необходимостью повышения надежности функционирования организационно-технической системы несения ходовой вахты. "Человеческий элемент" (в терминологии Международной Морской Организации (ИМО)) является фактором, сдерживающим этот процесс. Поэтому сегодня весьма актуальны исследования по определению элементов личного и коллективного ошибочного поведения "человеческого элемента" в организационно-технических структурах, важна разработка элементов корпоративной культуры разрешения судовых проблемных ситуаций.

2. Расширение метода усреднения для структурно устойчивых организационно-технических систем

Одним из направлений по разрешению проблемных ситуаций в "слабо" изменяющихся структурах управления состоянием безопасности является метод усреднения (Меерков, 1973). Этот метод может быть учтен при исследовании и упрощении процесса функционирования организационно-технических систем. Однако его практическое использование затруднено в случае, если приближение справедливо не на промежутке времени $[0; 1/\varepsilon]$, где $\varepsilon > 0$ – малый параметр, а на существенно меньшем интервале. С формальной точки зрения, в этих случаях не выполняются условия, позволяющие составить первое приближение.

Рассмотрим стандартный метод усреднения, позволяющий получать приближения, справедливые на промежутке времени $[0; 1/\varepsilon]$, хотя точность этих приближений может оказаться хуже,

чем в традиционном варианте усреднения. Пусть состояние организационно-технической системы управления безопасностью судна описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка, записанной в стандартной форме:

$$dx/dt = \varepsilon X(x,t,\varepsilon), \quad (1)$$

где $x \in R^r$, $\varepsilon \in (0, \varepsilon]$, $t \in [0, \infty)$.

Далее будем полагать, что функция $X(x,t,\varepsilon)$ равномерно ограничена при $x = 0$ и удовлетворяет условию Липшица по аргументу x :

$$|X(x_1,t,\varepsilon) - X(x_2,t,\varepsilon)| \leq M|x_1 - x_2|,$$

где $M = \text{const}$, $x_1, x_2 \in R^r$.

В этом случае каждая задача Коши

$$x(0) = x_0$$

для уравнения (1) имеет единственное не локально продолжимое решение вида $x(t, x_0, \varepsilon)$.

Обычно правую часть усредненного уравнения (1) ищут в виде:

$$Z(x,\varepsilon) = (1/T) \varepsilon \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T X(x,t,0) dt \quad (2)$$

при обязательном выполнении условия – функция $X(x,t,\varepsilon)$ допускает усреднение, причем имеется такая функция $\sigma(\varepsilon)$, что $\sigma(\varepsilon) \rightarrow 0$ при $\varepsilon \rightarrow 0$ и для любой ограниченной области $\Omega \subset R^r$ выполняется условие:

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \sup_{\substack{x \in \Omega \\ 0 \leq t \leq 1/\varepsilon}} |\varphi(x) - (\varepsilon/\sigma(\varepsilon)) \int_0^{\sigma(\varepsilon)/\varepsilon} X(x, t + s, \varepsilon) ds| = 0. \quad (3)$$

Если сформулированное условие выполняется, то предел (2) может не существовать или отличаться от функции $\varepsilon\varphi(x)$. Для применения обычного метода усреднения достаточно, чтобы для любой ограниченной области выполнялось условие:

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \sup_{\substack{x \in \Omega \\ 0 \leq t \leq 1/\varepsilon}} |X(x,t,\varepsilon) - X(x,t,0)| = 0. \quad (4)$$

То обстоятельство, что допущение (4) действительно необходимо для применения обычного метода усреднения, можно продемонстрировать так. Если для любой ограниченной области $\Omega \subset R^r$ выполняется условие (4), то предел (3) существует тогда и только тогда, когда функция $X(x,t,\varepsilon)$ допускает усреднение. В этом случае

$$\lim_{T \rightarrow \infty} (1/T) \int_0^T X(x,t,0) dt = \varphi(x) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \varepsilon \int_0^{1/\varepsilon} X(x,t,\varepsilon) dt$$

и условие (3) выполняется для любой ограниченной области $\Omega \subset R^r$ и любой функции $\sigma(\varepsilon) = \varepsilon^\alpha$, где $\alpha < 1$. Расширим возможности метода усреднения. Для этой цели будем считать, что функция $X(x,t,\varepsilon)$ допускает усреднение, если существует предел:

$$\varphi(x) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \varepsilon \int_0^{1/\varepsilon} X(x,t,\varepsilon) dt,$$

а функция $\varphi(x)$ удовлетворяет условию Липшица с постоянной M . Поэтому задача Коши

$$dx'/dt = \varepsilon\varphi(x'), \quad x'(0) = x_0 \quad (5)$$

имеет единственное не локально продолжимое решение $x'(t, x_0, \varepsilon)$.

Если вновь учитывать условие (3), то для любой ограниченной области $\Omega \subset R^r$ и для любого $\sigma > 0$ найдется такое число $\varepsilon_1 > 0$, что из соотношений $0 < \varepsilon \leq \varepsilon_1$ и $x_0 \in \Omega$ следует неравенство:

$$\max_{0 \leq t \leq 1/\varepsilon} |x'(t, x_0, \varepsilon) - x(t, x_0, \varepsilon)| < \sigma.$$

Последнее неравенство подтверждает тот факт, что в условии (3) функция $X(x,t,\varepsilon)$ "успекает усредняться" за время $\sim \sigma(\varepsilon)/\varepsilon$. За это же время $x(t, x_0, \varepsilon)$ изменяется на величину порядка $\sigma(\varepsilon)$. Поэтому траектория $x(t, x_0, \varepsilon)$ системы (1) будет мало отличаться от траектории $x'(t, x_0, \varepsilon)$ усредненной системы (5). Таким образом, предлагаемый вариант метода усреднения применим в более широких предположениях и позволяет получать соответствующее приближение, как и обычный метод усреднения.

3. Вероятностная оценка свойства структурной устойчивости организационно-технических систем

Процесс управления риском в структурах безопасной эксплуатации судов должен охватывать различные аспекты работы с риском, начиная с идентификации и анализа риска и кончая оценкой его допустимости и определения потенциальных возможностей снижения риска посредством выбора, реализации и контроля соответствующих управляющих действий. Анализ риска обычно представляет собой структурированный процесс, целью которого является определение как вероятности, так и размеров неблагоприятных последствий от структурных изменений в организационно-технической системе. В качестве неблагоприятных последствий могут рассматриваться вред, наносимый людям, судну, грузу или окружающей среде. При проведении анализа риска необходимо ответить на три основных вопроса:

- за счет чего может произойти реструктуризация системы (идентификация опасности);
- с какой вероятностью это может произойти (анализ частоты);
- каковы последствия этого события (анализ последствий).

Для ответа на второй вопрос введем индикаторную функцию вида

$$f(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } x(t, x_0, \varepsilon) - x'(t, x_0, \varepsilon) < \Sigma, \\ 0, & \text{если } x(t, x_0, \varepsilon) - x'(t, x_0, \varepsilon) \geq \Sigma. \end{cases} \quad (6)$$

Очевидно, что в силу введенной индикаторной функции выражение

$$\frac{[\int_0^t f(x) dt]}{m}$$

будет определять частное от деления числа состояний $x(t, x_0, \varepsilon) - x'(t, x_0, \varepsilon) < \Sigma$ (единиц) на общее число m наблюдаемых состояний (единиц и нулей) организационно-технической структуры безопасности.

Тогда в пределе равенство

$$f^*(x) = \lim_{N \rightarrow \infty} \left[\frac{\int_0^t f(x) dt}{m} \right]$$

определяет среднюю частоту (вероятность) структурной устойчивости организационно-технической структуры безопасности.

Если функция $f^*(x)$ будет равна постоянной величине для любого множества Φ_0 , тогда, исходя из известного соотношения

$$\int_X f^*(x) dm = \int_X f(x) dm,$$

можно получить следующее равенство:

$$\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m f(x) = m(x) / m(X) = \text{const} = p.$$

Следовательно, вероятность структурной устойчивости организационно-технической структуры безопасности в любой момент времени можно определить через "хорошо" известное значение p и в рамках теоремы Боголюбова временную последовательность изменений (1) следует наделять свойством эргодичности. Если же далее использовать гипотезу о полной вероятности сложного события вида (6), то аналогично можно получить "хорошо" определенную вероятность p_0 событий $x(t, x_0, \varepsilon) - x'(t, x_0, \varepsilon) \geq \Sigma$, когда нарушается структурная устойчивость и эксплуатационное состояние судна не отвечает условию безопасного мореплавания.

4. Заключение

Предложенный вариант метода усреднения позволяет в рамках более расширенных предположений получать соответствующее приближение, необходимое для оценки вероятности структурной устойчивости организационно-технических систем управления состоянием мореплавания. Область, в которой реализуется последовательность структурных переходов, фактически обладает двумя точками плотности, и для поддержания состояния структурной устойчивости необходимо и достаточно минимизировать "хорошо" определенное значение p_0 . Возможность поддержания устойчивости структуры в системе управления состоянием безопасности мореплавания реализуется через выделяемый ресурс.

Литература

Меерков С.М. Об усреднении траекторий медленных динамических систем. *Дифференциальные уравнения*, т. IX, № 9, с.1609-1617, 1973.