

УДК 629.5.017 : 519.2

## Модель многопараметрического контроля состояния безопасной эксплуатации судна и ее структурный анализ

А.Н. Анисимов<sup>2</sup>, В.И. Меньшиков<sup>1</sup>, Фургаса Мердаса Дессалень<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Судоводительский факультет МА МГТУ, кафедра судовождения

<sup>2</sup> Судоводительский факультет МА МГТУ, кафедра управления судном

**Аннотация.** Предложена модель многопараметрического контроля состояния безопасной эксплуатации по интервальным оценкам мореходных качеств судна. Выполнен структурный анализ модели и предложены основные расчетные формулы.

**Abstract.** The model of multiparameter control of ship safety operation based on interval estimates of ship nautical qualities has been proposed. The structural analysis of the model has been carried out and the main design equations have been given.

### 1. Введение

Для решения как общих, так и частных задач по вероятностной оценке нахождения состояния эксплуатации судна в заданных пределах вполне допустимо использовать обширный математический аппарат, разработанный и эффективно применяемый в теории надежности. Успешное использование математического аппарата теории надежности в области управления безопасной эксплуатацией обусловлено, прежде всего, идентичностью целей, поскольку в обоих случаях речь идет об обеспечении и поддержании ожидаемых функций, представленных в виде набора конкретных показателей. Поэтому анализ, контроль и подтверждение показателей безопасной эксплуатации и надежности сложных технических систем могут базироваться на одних и тех же математических моделях.

Безопасная эксплуатация судна и надежность некоей технической системы, как состояние, закладывается и обеспечивается на этапах проектирования и постройки, а проявляется и реализуется в процессе практического использования. Поэтому как не может быть состояния безопасной эксплуатации без надежности технических средств, так и надежность технических средств напрямую зависит от состояния безопасной эксплуатации, например, предусмотренной текстами Международных морских Конвенций. Таким образом, можно считать, что состояние безопасной эксплуатации и состояние надежности взаимно обуславливают друг друга. Поэтому вполне естественно, что в основе математического аппарата анализа и контроля в обоих случаях могут лежать одни и те же разделы теории вероятностей, математической статистики и общей теории принятия решений в условиях неопределенности.

Однако при всей близости состояний надежности и безопасной эксплуатации между ними существуют и различия. Эти различия определяются тем, что критериальные параметры состояния надежности выражаются в виде функциональных зависимостей от времени. При анализе состояния безопасной эксплуатации время должно рассматриваться как важнейший и влияющий на это состояние фактор, в принципе, аналогичный другим существенным внешним факторам.

### 2. Особенности многопараметрической модели контроля безопасной эксплуатации судна

Рассмотрим конкретный пример использования математического аппарата теории надежности для построения модели косвенного многопараметрического контроля безопасной эксплуатации судна. Необходимость в разработке такой косвенной модели контроля можно объяснить тем, что безопасная эксплуатация судна теоретически может быть определена лишь как лингвистическая неопределенность. В то же время, если мореходные качества судна рассматривать как характеристики состояния безопасной эксплуатации и учитывать при этом, что эти качества относятся к классу морфологических величин, то, оценивая вероятность принадлежности параметров мореходных качеств к их интервальным значениям, можно найти и вероятностную оценку состояния безопасной эксплуатации судна в целом, хотя бы по нижней грани.

Любое техническое средство, входящее в состав такого сложного сооружения как судно, должно отвечать определенному набору свойств (мореходных качеств), которые, собственно, и определяют способность этого сооружения обеспечивать выполнение в море ожидаемых от него производственных функций в рамках безопасной эксплуатации. Проектирование, производство и эксплуатация любого

технического средства, входящего в состав судна как сложного сооружения, осуществляется в соответствии с требованиями применимых Международных морских Конвенций, а также национальными, например, требованиями Морского Регистра России.

В процессе проектирования и постройки судна происходит конкретизация свойств технических средств, основанная на текстах международных и национальных документов, т. е. выражение свойств в виде числовых значений или в виде интервалов допустимых значений. Перевод требуемых свойств в числовые или интервальные значения придает техническим средствам судна конкретные мореходные качества, которые и обеспечивают безопасную эксплуатацию судна в целом, вытекающую из условий и целей использования этого судна.

Чтобы выделить особенности структурного анализа модели многопараметрического контроля состояния безопасной эксплуатации, будем использовать математическую модель  $\eta$ , адекватную физическому объекту (судну) и заданную с помощью структуры, записанной так:

$$\eta = (Y, J, X), \quad (1)$$

где  $Y$  – множество технических средств и связей между ними, которые при объединении образуют сложное сооружение – судно,  $J$  – система действий и отношений, реализуемая на связях множества  $Y$  и обеспечивающая поддержание некоторого внутреннего состояния судна, характеризуемого множеством процессов с выходными параметрами из множества  $X$ .

В рамках модели (1) наиболее общее описание внутренних процессов (судовых ключевых операций) с параметрами  $x \in X$ , идущих на судне, без учета дополнительных внешних воздействий можно определить как движение вида

$$Y \xrightarrow{J} X. \quad (2)$$

С целью детализации структурного анализа многопараметрического контроля состояния безопасной эксплуатации, а также для удобства дальнейшего изложения материала необходимо провести классификацию параметров  $X$  движения (2) и выделить следующие группы:

- параметры "целостности", которые характеризуют способность отдельных технических средств из состава сложного технического сооружения (судна) и представителей судового экипажа, эксплуатирующих эти средства, "находиться в нужное время в нужном месте" при выполнении судовых ключевых операций;
- "определяющие" параметры, характеризующие через сохранность мореходных качеств судна его состояние безопасной эксплуатации при выполнении ключевых операций;
- параметры "критичности", соответствующие появлению в состоянии судна дополнительных и неожиданных свойств, которые способны лишить это судно естественного соответствия требованиям безопасной эксплуатации, например, лишив его одного из множества качеств мореходности.

Здесь следует заметить, что в соответствии с требованиями, которые выдвигаются как в культуре соответствия, так и культуре управления, судно обладает мореходными качествами и может выполнять судовые ключевые операции лишь при условии, что его состояние отвечает международным и национальным требованиям безопасной эксплуатации. Иными словами, структурный анализ многопараметрического контроля состояния безопасной эксплуатации должен осуществляться только на основе данных из группы "определяющих" параметров.

Параметры "критичности", в свою очередь, не должны вытекать напрямую из индивидуальных свойств отдельных технических средств, участвующих в выполнении судовой ключевой операции. Однако признаки критичности и, соответственно, параметры критичности способны возникать, как следствие объединения этих технических средств в единое целое. Группа критичных параметров движения (2) отражает хорошо известный постулат системности: "целое всегда больше суммы его частей" (*Перегудов, Тарасенко, 2001*). Поэтому в случаях, когда при разработке процедур выполнения судовых ключевых операций акцентируется внимание на параметрах "критичности", это значит, что такие параметры стали приниматься разработчиками процедуры уже за определяющие параметры.

Группа параметров "целостности" движения (2) характеризует, в первую очередь, свойство связанности судовой ключевой операции по мере безопасности, введенной, например, с помощью модели сфероида безопасной эксплуатации судна (*Меньшиков и др., 2006*). В тех случаях, когда судовая ключевая операция связана, используемая мера безопасности транзитивна по всей траектории движения (2) и способна обладать стандартизирующим свойством.

Естественно, что представленная выше классификация параметров движения (2) условна, поскольку, в зависимости от точки зрения и целей структурного анализа, практически любой параметр можно отнести к любой из перечисленных групп. Важно отметить, что параметры первой и второй групп должны быть учтены при разработке и планировании судовых ключевых операций, а параметры третьей

группы, появляясь только в процессе реализации операций, образуют систему возможных рисков. Появление рисков только в процессе выполнения судовой ключевой операции естественно вызывает трудности при их идентификации.

Согласно структурному подходу, любое сложное движение вида (2), или, иными словами, любую судовую ключевую операцию можно представить в виде событийной системы, состоящей из отдельных взаимодействий (событий) между эргатическими системами, включающими технические средства и управляющих ими людей из состава экипажа судна. Последовательность событий образует на временной оси связанную операцию (2), причем каждое событие из временной последовательности, в свою очередь, является подсистемой или структурной группой внутреннего уровня, состоящей из множества определяющих параметров.

Необходимо заметить, что в самом неблагоприятном случае определяющие параметры сложного движения (2) могут быть взаимосвязаны таким образом, что выход за установленные пределы хотя бы одного из них приводит к риску потери судном каких-либо мореходных качеств и, соответственно, к невозможности осуществлять безопасную эксплуатацию судна в целом.

Если исходить из того, что мореходные качества отдельных событий, связанных в единую судовую ключевую операцию, независимы, то вероятность "целостности" всей цепочки (2), состоящей из  $n$  последовательно объединенных событий, определится так

$$P = \prod_{i=1}^n P_i, \quad (3)$$

где  $P_i$  – вероятность сохранности мореходных качеств  $i$ -ой эргатической системой.

Поскольку сохранность мореходных качеств в каждом из  $n$  событий, образующих движение (2), можно характеризовать величиной  $m(n)$  взаимосвязанных определяющих параметров, то выражение (3) необходимо уточнить и записать его следующим образом:

$$P = \prod_{i=1}^n \left( \prod_{k=1}^{m(i)} P_{ki} \right) = \prod_{i=1}^n \prod_{k=1}^{m(i)} P_{ki}, \quad (4)$$

где  $P_{ki}$  – вероятность правильности или соответствия действий  $i$ -ой эргатической системы по  $k$ -му параметру.

Для иллюстрации практического использования выражений (3) и (4) рассмотрим конкретный пример. Пусть судовая ключевая операция состоит из достаточно большого, но конечного числа взаимодействий (событий) между эргатическими системами. Тогда при уровне несоответствия каждого определяющего параметра, не превышающем 10 *ppm* (не более 10 несоответствий на миллион правильных действий), для судовой ключевой операции, состоящей из 1000 последовательных действий, (по 10 определяющих параметров в каждом) вероятность того, что эта операция будет реализована в рамках сохранности мореходных качеств судна, равна

$$P = (1 - 10^{-5})^{1000 \times 10} = 0.900.$$

Если снизить уровень несоответствий до величины равной 1 *ppm*, то в этом случае вероятность  $P$  окажется равной 0,990. Поэтому может сложиться представление о том, что ситуация с контролем мореходных качеств при выполнении судовых ключевых операций абсолютно бесперспективна, поскольку простые контрольные мероприятия, используемые в судовых условиях, не способны обеспечить идентификацию уровня несоответствий в единицы и даже сотни *ppm*.

Некоторые дополнительные гарантии безопасности при выполнении ключевых операций все же можно получить, если они выполняются на судах, являющихся элементами сертифицированной системы менеджмента безопасной эксплуатации (СМБ). В этом случае при проведении судовых ключевых операций должно использоваться достаточно мощное средство управления процессами (2) – чек-листы (контрольные карты). Однако и это мероприятие имеет в большей степени "риторический" характер по отношению к гарантиям безопасности, поскольку чек-листы не способны дать эти гарантии в количественных показателях, выраженных в цифровой форме.

### 3. Модель контроля безопасности при интервальном оценивании "определяющих" параметров мореходных качеств судна

В теории надежности разработаны вполне пригодные для практического применения методы, предназначенные для контроля именно таких высоконадежных событийных систем со сложной структурой, у которых статистически-вероятностные показатели типа (3) и (4) близки к единице. Эффективность практического применения этих методов определяют, по крайней мере, три обстоятельства:

– системный подход к проектированию и изготовлению технических средств, который заключается не только и не столько в структурировании, сколько в целевой подчиненности мореходных качеств таких средств безопасности судна в целом;

– максимальный учет всей информации, и, прежде всего, экспериментальной информации, касающейся результатов контроля и испытаний технических средств судна;

– переход от точечных показателей мореходных качеств судна к интервальным показателям.

Эффективность, вытекающая из первых двух принципов, вполне понятна и очевидна, поскольку и состояние безопасной эксплуатации, и сохранность мореходных качеств судна напрямую зависят от безопасной эксплуатации и сохранности мореходных качеств у технических средств, составляющих это судно.

Третий принцип эффективности также требует пояснения. Дело в том, что интервальные оценки, в отличие от точечных оценок, позволяют увязать жесткой взаимосвязью оцениваемый статистический параметр, достоверность или точность его идентификации и объем экспериментальной информации, которая необходима для выполнения контроля этого параметра. Например, в случае использования интервального оценивания становится возможным при заданных значениях статистического показателя и достоверности определять необходимый объем экспериментальной информации. Или, наоборот, по объему имеющейся экспериментальной информации рассчитывать сам показатель, но только с той достоверностью, которая будет зависеть от используемого объема информации. Иными словами, по имеющимся двум характеристикам всегда можно найти значение третьей характеристики с допустимым уровнем доверия.

Для разработки модели многопараметрического контроля параметров мореходных качеств и, соответственно, состояния безопасной эксплуатации судна можно воспользоваться хорошо известной и широко применяемой в теории надежности теоремой о нижней доверительной границе вероятности безотказной работы системы, состоящей из последовательно соединенных элементов. Теорема о нижней доверительной границе, доказанная еще в середине прошлого века, неоднократно обобщалась и уточнялась, в том числе и для условий контроля статистических показателей работоспособности сложных технических систем (Павлов, 1982).

Для условий многопараметрического контроля состояния безопасной эксплуатации при реализации судовой ключевой операции эту теорему целесообразно представить в следующей формулировке: "нижняя доверительная граница вероятности целостности некоей последовательности, состоящей из любого числа событий любой сложности, с коэффициентом доверия  $\gamma$ , не может быть меньше значения, рассчитанного по формуле

$$P_n = \min (P_{ni}), \quad (5)$$

где  $P_{ni}$  – нижняя  $\gamma$ -доверительная граница сохранности мореходных качеств отдельно взятой  $i$ -ой эргатической системой, задействованной в этой операции, причем минимум берется по всем  $n$  последовательно соединенным событиям".

Пусть при использовании модели многопараметрического контроля в плановой последовательности событий, определяющей судовую ключевую операцию, по априорной и текущей информации исключены все возможные риски. Тогда по всем  $m(n)$  определяющим параметрам минимальное значение нижней  $\gamma$ -доверительной границы  $P_{ni}$  для любого события из этой последовательности, в соответствии с формулой Клоппера-Пирсона, можно найти так

$$P_{ni} = (1 - \gamma)^{1/I(\min)}, \quad (6)$$

где  $I(\min)$  – минимальный объем экспериментальной информации при контроле сохранности мореходных качеств судна.

Следовательно, для планов, составленных с минимизацией рисков, и при минимуме экспериментальной информации нижняя  $\gamma$ -доверительная граница вероятности сохранности всем судном мореходных качеств, которые и должны обеспечивать безопасную эксплуатацию этого судна, равна

$$P_n = (1 - \gamma)^{1/I(\min)}. \quad (7)$$

При этом верхняя граница вероятности сохранности мореходных качеств судна будет равна единице, а точечные оценки величин (3) или (4) будут удовлетворять соотношению

$$P_n \leq P \leq 1.$$

Статистический смысл выражения (7) заключается в том, что все технические средства судна и члены его экипажа, участвующие в проведении судовой ключевой операции, должны быть проверены и проинструктированы. Проверка технических средств и инструктирование членов экипажа должны

проводиться с обязательным акцентом на возможные риски и в информационном объеме не менее  $I(\min)$ . Если статистическая корректность выражения (7) соблюдена, то верхняя граница уровня несоответствия мореходных качеств судна условию его безопасной эксплуатации с коэффициентом доверия  $\gamma$  не превысит значения

$$Q \leq 1 - P_n = 1 - (1 - \gamma)^{1/I(\min)}. \quad (8)$$

Расчет верхней границы уровня несоответствия по мореходным качествам судна условиям безопасной эксплуатации по формуле (8) для различных значений коэффициента доверия  $\gamma$  и минимального информационного объема представлены в табл. 1.

Таблица 1

$I(\min)$	Верхняя граница уровней несоответствия с коэффициентом доверия						
	0.99	0.98	0.97	0.95	0.9	0.85	0.80
1	0.99	0.98	0.97	0.95	0.90	0.85	0.80
5	0.60	0.54	0.50	0.45	0.37	0.32	0.28
10	0.40	0.32	0.30	0.26	0.21	0.17	0.15

Общие модельные представления, лежащие в основе формул (5-8) для контроля состояния эксплуатации, базируются на операции классификации мореходных качеств судна в рамках двух альтернатив: "обеспечивающие безопасную эксплуатацию" или "не обеспечивающие безопасную эксплуатацию". При такой классификации, естественно, теряется некоторая часть информации о тех параметрах, которые являются измеримыми. Однако такие информационные потери, как правило, компенсируются. Привлечение простейшего биномиального подхода с представлением о вероятности событий, исходя из комбинаторики, позволяет избежать каких-либо предположений относительно вида статистических законов распределения.

#### 4. Оценка количества информации при выборочном контроле параметров мореходных качеств судна

Рассмотренная модель многопараметрического контроля состояния эксплуатации судна позволяет определить тот минимальный объем информации  $I(\min)$ , который необходим для проверки технических средств и инструктирования членов экипажа, задействованных в судовой ключевой операции. Безусловно, этот информационный объем зависит от общего числа событий  $N$ , образующих судовую ключевую операцию.

Пусть  $I(\gamma)$  – количество информации о том, что уровень несоответствий  $Q$  мореходных качеств условиям безопасной эксплуатации судна с доверительной вероятностью  $\gamma$  попадает в интервал  $[0; Q_0]$ , или с вероятностью  $(1 - \gamma)$  – в интервал  $[Q_0; 1]$ . Тогда количество информации при выполнении интервального оценивания можно найти так:

$$I(\gamma) = - [(1 - \gamma)\log(1 - \gamma) + \gamma \log(\gamma)]. \quad (9)$$

Далее определим, какое количество информации способен дать выборочный контроль мореходных качеств судна, если  $D$  – число событий, в которых не выполняются условия безопасной эксплуатации хотя бы по одному (любому) определяющему параметру. Пусть судовая ключевая операция включает  $N$  последовательных событий. Тогда эта операция, как событийная система, способна находиться в одном из  $N+1$  состояний:

$$X_0 (D = 0); X_1 (D = 1); X_3 (D = 3); \dots ; X_N (D = N),$$

причем ее максимальная априорная энтропия при равновероятных событиях будет равна

$$H(N) = \log(N + 1).$$

Если в процессе выборочного контроля в  $n$  случаях установлено, что нет ни одного события, так или иначе связанного с потерей мореходных свойств судна, то в системе  $\Xi$  останется только  $(N - n - 1)$  равновозможных состояний

$$X_0 (D = 0); X_1 (D = 1), \dots, X_{N-n+1} (D = N - n + 1),$$

а ее энтропию можно определить так

$$H(N|n) = \log(N - n + 1).$$

Тогда количество информации по результатам выборочного контроля мореходных качеств судна составит

$$I_{n \rightarrow N} = H(N) - H(N | n) = \log[(N + 1) / (N - n + 1)].$$

Приравнивая это количество информации к той, которая соответствует интервальному оцениванию (9), найдем

$$\log[(N + 1) / (N - n + 1)] = - [(1 - \gamma)\log(1 - \gamma) + \gamma \log(\gamma)].$$

Отсюда, выражая правую и левую части последнего выражения через натуральные логарифмы, легко получить связь между относительным объемом контроля событий в судовой ключевой операции и уровнем доверия к ней в части сохранения состояния безопасной эксплуатации судна:

$$n / (N + 1) = 1 - \exp(-I(\gamma)).$$

Значения относительного объема контрольных действий  $n / (N + 1)$ , а также количества информации  $I(\gamma)$  в зависимости от  $\gamma$  представлены в табл. 2.

Таблица 2

$\gamma$	0.8	0.85	0.9	0.95	0.975	0.99
$I(\gamma)$	0.5004	0.4227	0.3251	0.1985	0.1169	0.0560
$n / (N + 1)$	0.3937	0.3447	0.2775	0.1801	0.1103	0.0545

Анализ данных, помещенных в табл. 1 и 2, показывает, что нет особой необходимости при выполнении судовой ключевой операции, так или иначе оказывающей влияние на мореходные качества судна, назначать большие значения коэффициентов доверия  $\gamma$ , поскольку при увеличении  $\gamma$  уменьшается относительный информационный объем  $n / (N + 1)$  и, соответственно, доверительный интервал, содержащий "истинное" значение уровня несоответствия  $Q \in [0; Q_e]$ .

### 5. Заключение

Для решения как общих, так и частных задач по оценке вероятности нахождения состояния эксплуатации при выполнении на судах ключевых операций в заданных пределах допустимо использовать обширный математический аппарат теории надежности.

Составленная модель контроля параметров мореходных качеств и, соответственно, состояния безопасной эксплуатации судна использует хорошо известную в теории надежности теорему о нижней доверительной границе вероятности безотказной работы событийной системы, состоящей из последовательности взаимодействий между эргатическими элементами.

Эффективность рассмотренной модели многопараметрического интервального контроля над состоянием эксплуатации судна заключается в том, что нет необходимости в обработке значительного объема несоответствий мореходных качеств судна установленным значениям, как требует классический подход.

### Литература

- Меньшиков В.И., Меньшикова К.В., Пасечников М.А., Калитенков Н.В.** Информационная оценка полноты гарантированного планирования судовой ключевой операции. *Вестник МГТУ*, т.7, № 3, с.364-369, 2004.
- Павлов И.В.** Статистические методы оценки надежности сложных систем по результатам испытаний. *М., Радио и связь*, 168 с., 1982.
- Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П.** Основы системного анализа. *Томск, НТЛ*, 396 с., 2001.