

УДК 629.5.067: 656.611.052

В.В. Вычужанин, В.Д. Бойко

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ЖИВУЧЕСТИ  
СУДОВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

*Проанализированы методы и методики по выбору и оценке критериев живучести судовых технических систем. В целях обеспечения информационной поддержки принятия решений на стадии эксплуатации судовых технических систем разработана концепция построения системы поддержки принятия решений на базе когнитивно-информационной модели оценки их живучести.*

**Ключевые слова:** критерии живучести судовых технических систем, когнитивная модель, информационная поддержка.

*Проаналізовано методи та методики по вибору і оцінці критеріїв живучості судових технічних систем. З метою забезпечення інформаційної підтримки прийняття рішень на стадії експлуатації судових технічних систем розроблено концепцію побудови системи підтримки прийняття рішень на базі когнитивно-інформаційної моделі оцінки їх живучості.*

**Ключові слова:** критерії живучості судових технічних систем, когнитивна модель, інформаційна підтримка.

*The methods and procedures for the selection and evaluation criteria for ship survivability engineering systems. In order to provide information to support decision-making at the operational stage of ship engineering systems developed conception of structure decision support system based on cognitive-information model to assess their viability.*

**Keywords:** survivability criteria marine engineering systems, cognitive model, information support.

**Введение.** Современное судно представляет собой сложную совокупность технических систем, подсистем и технического оборудования, влияющих на безопасную эксплуатацию судов и во многом определяющих их живучесть. Обеспечение живучести технических систем судна является комплексным элементом, входящим в общую концепцию борьбы за живучесть судна, наряду с такими разделами, как обеспечение непотопляемости, борьба с пожарами.

К техническим системам, влияющим на живучесть судна относятся энергетическая установка и общесудовые системы (трюмные, балластные, пожаротушения, создания микроклимата, санитарные, судового энергоснабжения, специальные системы танкеров и наливных судов, навигационного оборудования, средств связи, информационные).

Сохранение работоспособности судового оборудования (непосредственно не подвергнувшегося аварийным воздействиям внешней среды), безаварийность комплекса технических средств и возможность управления режимами его работы зависит от живучести схем управления техническими системами. Использование конструктивных решений на стадии проектирования и организационно-технических мероприятий, осуществляемых при эксплуатации, решаются задачи по обеспечению живучести судовых технических систем [1-3].

**Актуальность.** Соблюдение на стадии проектирования и постройки нормативных требований не является достаточным условием для обеспечения живучести судов при их эксплуатации. Это связано с тем, что предпринимаемые соответствующие меры могут быть настолько дорогими, что сделают эксплуатацию судна экономически нецелесообразной.

Из анализа результатов эксплуатации судов следует, что, не смотря на принимаемые меры по обеспечению безопасности мореплавания, количество аварийных случаев на море остается высоким.

Одной из наиболее полных открытых баз данных по авариям судов является база данных **МАІВ** (*Marine Accident Investigation Branch*) [4], годовые отчеты в которой отражают статистику происшествий для больших торговых и рыболовецких судов за 1998-2011 годы. Исходя из имеющейся статистики, соответствующие соотношения аварий технических систем к общему количеству аварий представлены в табл.1. Если рассматривать количество аварийных случаев в мире за год, то в 2005 году зафиксировано 1150 аварийных случаев, в 2006-м – 1283, в 2007-м – 1609, в 2008-м – 1623 и в 2009-м – 1688 [5]. Самые распространенные аварии связаны с повреждением корпуса и механизмов – свыше 30 %. Второе место занимают аварии, связанные со сносом (выбросом)/ посадкой на мель (около 20 %). Еще около 20 % выпадает на столкновения с судами, пожары и взрывы составляют 7-8 %.

Анализ распределения аварий по водоизмещению и возрасту судов показывает, что выход из строя технических систем чаще всего служит одной из самых многочисленных причин аварий на судах большого и среднего тоннажа. Проблема обеспечения живучести актуальна не только для старых, но и для новейших типов судов и, в особенности, для судов большого водоизмещения, с развитыми системами управления и коммуникациями и как следствие с более уязвимыми судовыми подсистемами. Так 87 % всех рассмотренных инцидентов приходится на суда водоизмещением больше 10000 брт. Установлено, что 44 % случаев аварий приходится на суда со сроком эксплуатации менее 10 лет [6]. Доля технических неисправностей на самом деле может составлять больший процент, поскольку некоторую часть случаев составляют комбинированные аварии. Например, инцидент с контейнеровозом "*Clonlee*", который 16 марта 2011 года в результате отключения электроэнергии в судовой сети поте-

рял управление и сел на мель. Другой случай, когда пожар на судне "Maersk Doha" возник из-за неисправности трубопровода.

К основным причинам состояния аварийности судов можно отнести следующие [7]:

- современные нормы по проектированию и эксплуатации обычно согласуются с множеством мнений и инстанций и в результате часто являются компромиссным решением;

- существует разрыв во времени между полученным при инциденте опытом, его анализом, осмыслением и внедрением на практике;

- развитие технологий и изменение трендов в мореплавании приводит к появлению новых особенностей и схем эксплуатации, которые не прошли полную апробацию на практике.

К техническим средствам первой очереди, в которых возникают ключевые неисправности, относятся: главная силовая установка; котлы и магистрали; рулевое устройство; генераторы; электрокабели; распределительные щиты; пожарные насосы; пожарные магистрали. Повреждения паропроводов главных магистралей системы свежего пара и коллекторов котлов считаются одними из наиболее опасных повреждений. При авариях, связанных с затоплением помещений электростанций или пожарами в них, подача электроэнергии не должна прекращаться, пока это возможно.

Анализ литературных источников показал, что в настоящее время теория живучести находится в такой стадии развития, когда еще не сформированы основные понятия и определения, не существует единого мнения и о том, что такое живучесть, какова область применения этого понятия. Практически нет апробированных длительным практическим использованием моделей живучести судовых технических систем. Большое разнообразие известных показателей живучести скорее свидетельствует о недостаточной ясности в решении и этого вопроса, чем о его проработанности. Нет определенных методических разработок и по вопросу о том, для каких судовых технических систем следует оценивать, нормировать и обеспечивать живучесть. До сих пор не создано развитой теории, которая содержала бы, как и теория надежности, общетехнические результаты, позволяющие исследовать это свойство, оценивать его количественно и разрабатывать практические рекомендации проектировщика сложных систем по обеспечению живучести.

Исходя из вышеизложенного, обеспечение живучести судовых технических систем в целях повышения уровня безопасной эксплуатации судов и снижения их аварийности является по-прежнему актуальной научно-технической задачей.

**Целью работы** является создание концепции построения системы поддержки принятия решений для оценки и управления живучестью технических систем, обеспечивающих безопасную эксплуатацию судов.

**Изложение основного материала.** Степень живучести технических систем, обеспечивающих безопасную эксплуатацию судов, во многом зависит от эффективности функционирования используемых методов

и методик, основывающихся на обоснованном выборе критериев и оценок живучести судовых технических систем.

Анализ используемых критериев и оценок живучести подобных систем показал, что с точки зрения борьбы за живучесть, жизненный цикл судна, как совокупности технических систем, можно разделить на несколько основных этапов. На первом этапе (стадии планирования и проектирования судна) живучесть систем должна обеспечиваться конструктивными мерами - в частности отказоустойчивой топологией их размещения, дублированием критичных для выживания судна узлов и так далее. Второй этап (эксплуатационный) можно разделить на несколько отдельных периодов - борьбу за живучесть до вероятной аварии, борьбу за живучесть в момент условной аварии и в момент после условной аварии. В первом периоде борьба за живучесть технических систем сводится к мерам профилактического и частично упреждающего характера - основной целевой задачей является недопущение возможных аварий. Во втором периоде целевая задача состоит в предотвращении развития мелких аварий в более крупные. В третьем - максимально возможная локализация уже происшедших аварий и восстановление нормального функционирования судовых систем.

В работе [6] по результатам проведенных исследований предлагается рассматривать судно, как последовательное взаимодействие технических систем, экипажа, организационной инфраструктуры и внешней среды (на физическом, коммерческом и правовом уровнях). Рекомендуются проводить анализ рисков и ущерба в результате неисправностей в оборудовании. Так же предлагается рассматривать работу судна по отдельным оперативным фазам: погрузка, выход из гавани, навигация в открытом море и так далее, поскольку на разных стадиях деятельности выход из строя технических систем может иметь последствия различной степени тяжести. Определение риска, как сочетания (частоты) вероятности и тяжести последствий определенного события приводится в работах [8].

В [9] особо подчеркивается роль мониторинга ключевых и критичных для живучести технических систем на стадии эксплуатации, а в работе [10] рассматривается взаимовлияние судовых систем и их возможные неисправности на разных стадиях эксплуатации судна. В работе [11] рассматривается увеличение надежности мореплавания и экономические эффекты от внедрения целостного системного подхода к обеспечению живучести судна.

Среди различных подходов к оценке живучести технических систем одним из главных инструментов является аналитический анализ безопасности, в ходе которого определяется спектр неисправностей (исходов), их возможные последствия, вероятность исходов и меры, которые можно предпринять, чтобы уменьшить риск [12]. В данном случае живучесть системы является функцией надежности ее технических узлов, показателем надежности которых могут быть как количественные (численные величины, выражающие надежность узлов), так и качественные (взаимо-

связь и взаимовлияние систем, подсистем и отдельных узлов) критерии. Надежность технического узла оценивается, как это предложено в [13] с точки зрения нескольких характеристик – вероятности отказа, времени наработки на отказ и так далее. Сама надежность технического узла в общем случае может характеризоваться моделью кривой отказов, приведенной на рис.1, где  $P$  – вероятность выхода узла из строя,  $t$  – время эксплуатации узла. В данной модели вероятность выхода из строя технического узла – это функция от времени эксплуатации. Вероятность выхода из строя особенно высока в первой и третьей фазах.



Рис.1. Модель кривой отказов технического узла

Следует отметить, что предлагаемую в работе [13] модель взаимосвязи систем необходимо дополнительно расширить до интегральной характеристики – критичности, которая станет интегральной характеристикой живучести всей системы в целом и ее отдельных узлов. Критичность должна сочетать в себе не только надежность узла, но и его влияние на прочие компоненты системы – так выход из строя второстепенного узла, может повлечь за собой отказ основных систем.

Основным недостатком рассмотренных выше работ является отсутствие возможности оценки критичности технических узлов, позволяющей в зависимости от риска выхода из строя этих узлов, формировать рекомендации по профилактическому ремонту и замене технических систем, а на стадии упреждения аварии – по мерам направленным на возможное предотвращение более серьезных аварий.

Известные методы анализа критериев живучести технических систем можно условно разделить на четыре основные группы [12, 14] (рис.2): аналитические методы, методы работы со структурированными знаниями, комбинированные и методы нечеткой логики.

Аналитические методы (непосредственное решение уравнений, методы малого параметра, вероятностные, логические, продукционные и методы теории распознавания образов) позволяют использовать удобные методы оптимизации и соотношения, характеризующие эволюцию состояния оборудования.

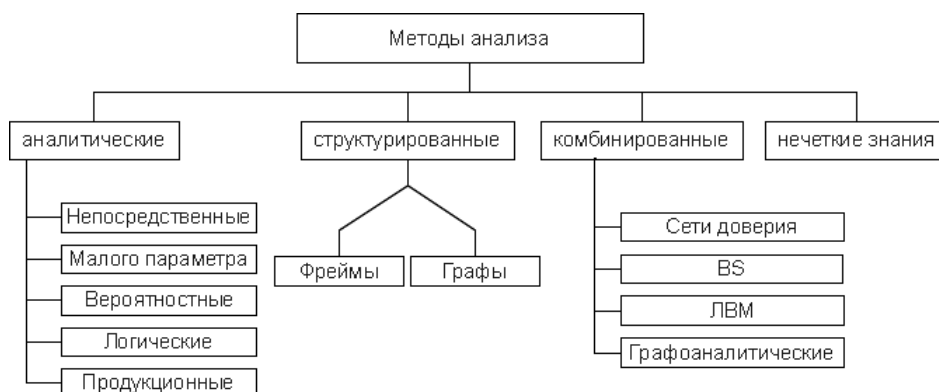


Рис.2. Методы анализа критериев живучести

Преимуществом метода непосредственного решения систем уравнений является точность достигаемых результатов при условии получения аналитического решения уравнений и достоверной информации о состоянии технические судовые системы (ТСС) [14]. Недостатком является быстро растущая сложность вычислений по мере роста сложности ТСС и количества рассматриваемых параметров модели. Кроме того, далеко не во всех случаях представляется возможным получить аналитическое решение (а иногда и представление) ТСС [15]. Метод малого параметра (метод возмущений) широко применяется в прикладной математике, в частности, для уточнения решения, полученного из упрощенной модели, а также для выяснения погрешности этого решения. Известны следующие типы задач, для решения которых применяется метод малого параметра. В задачах первого типа малый параметр входит в саму их постановку, а цель исследования состоит в выяснении влияния этого параметра на решение. Метод приводит к асимптотическим формулам, в которых отражено это влияние. Задачи второго типа в своей постановке малого параметра не содержат и в целях применения метода параметр необходимо ввести. Методы вероятностного анализа в чистом виде [16] как правило сводятся к вычислению математического ожидания. При этом вводится критерий полезности, по которому определяется эффективность того или иного решения. Часть подходов включает в себя использование теоремы Байеса, устанавливающей вероятность наступления одного события, если произошло другое. Использование теории вероятности ставит перед разработчиком следующие проблемы, которые лучше всего сформулировать в терминах задачи выбора:

- либо априори предположить, что все данные независимы, и использовать менее трудоемкие методы вычислений, за что придется платить снижением достоверности результатов;

- либо организовать отслеживание зависимости между используемыми данными, количественно оценить эту зависимость, реализовать оперативное обновление соответствующей нормативной информации, т.е. усложнить вычисления, но получить более достоверные результаты. Инструменты вероятностного анализа так же используются во множестве комбинированных систем (ЛВМ, Байесовские сети доверия и т.д.).

Методы и аппарат математической логики (двухзначной и многозначной) [17] часто применяется в анализе критериев живучести для целей структурного моделирования. В основном анализируются системы, характеризуемые конечным числом состояний. Продукционная система [17] состоит из множества правил, интерпретатора правил, решающего, когда надлежит применить каждое из них, и рабочей памяти, содержащей данные, описание цели и промежуточные результаты, в совокупности определяющие текущее состояние проблемы. Именно структуры данных в рабочей памяти анализируются и преобразуются порождающими правилами. Обращение к правилам синхронизируется текущими данными, а интерпретатор правил управляет выбором и активизацией определенных правил в каждом цикле.

Анализ критериев живучести может выполняться при помощи средств классификации, используемых теорией распознавания образов [18]. Одно из общих решений задачи заключается в рассмотрении двух интервалов времени работы объекта – наблюдения за состоянием объекта и прогнозированием состояния объекта. На практике первый период влечет за собой экономические и ресурсные затраты и его стараются максимально сократить. При классификации выполняется систематизация, выявление общих черт и закономерностей в работе объекта, далее выстраиваются классы и на их основе по т.н. признаку векторов объекта выполняется прогнозирование его дальнейшего поведения. Классификация может производиться, как на основе информативной совокупности прецедентов состояний объекта, так и без него – в зависимости от специфики задачи классификации.

В структурированных методах анализа критериев живучести технических систем термин "структурированный объект" используется по отношению к любой схеме представления, базовые блоки которой аналогичны узлам и дугам в теории графов или слотам и заполнителям структур записей. Представление с помощью структурированных объектов является весьма удобным средством для группирования информации более или менее естественным путем [19]. Сущность фундаментальной идеи в структурированных методах анализа критериев живучести технических систем заключается в том, что свойства и процедуры, ассоциированные с фреймами в виде свойств узлов, расположенных выше в системе фреймов, являются более или менее фиксированными. Объясняется это тем,

что они представляют понятия, которые в большинстве случаев являются истинными для интересующей сущности, в то время как фреймы нижних уровней имеют слоты, которые должны быть заполнены наиболее динамической информацией, подверженной частым изменениям. Если такого рода динамическая информация отсутствует из-за неполноты информации о наиболее вероятном состоянии системы, то слоты фреймов нижних уровней заполняются данными, унаследованными от фреймов верхних уровней, носящих глобальный характер. Данные, передаваемые в процессе функционирования системы от посторонних источников знаний во фреймы нижних уровней, имеют более высокий приоритет, чем данные, унаследованные от фреймов верхних уровней.

Графические методы анализа критериев живучести технических систем обладают большой наглядностью и могут служить как для анализа, так и в иллюстративных целях при проектировании систем [20]. Особое место в графических методах отводится направленным и ненаправленным графам и аппарату матричных представлений графов. С помощью графов возможно моделирование самых различных взаимодействий в системах – в частности статический, динамический и симплицальный анализ. Для обработки графа в вычислительных средах, он может быть представлен в матричном виде одним из трех основных способов – матрицей смежности, матрицей инцидентности или списком ребер [18, 21]. Использование матрицы смежности предпочтительно только в случае неразрезанных графов, с большим числом ребер, так как она требует хранения по одному биту данных для каждого элемента. Если граф разрежен, то большая часть памяти напрасно будет тратиться на хранение нулей, зато в случае неразрезанных графов матрица смежности достаточно компактно представляет граф в памяти.

Комбинированные методы анализа критериев живучести технических систем совмещают в себе сразу несколько различных подходов [23]. В работе [24] была предложена концепция бортовой интегрированной интеллектуальной системы, объединяющей методы теории катастроф и, наряду с традиционными математическими методами, использующую достижения в области искусственного интеллекта и принципы функционирования интеллектуальных систем реального времени.

Кроме интегрированной ИС, можно выделить системы основанные на сетях доверия, системы с доской объявлений (BS – Blackboard Systems) [17], ЛВМ – логико-вероятностные модели [25] и различные графоаналитические системы.

Неточные методы анализа критериев живучести технических систем играют важную роль в оценке критериев живучести [22], однако вопрос, какие именно методы должны использоваться. До последнего времени считалось, что теория вероятности не является адекватным инструментом для решения задач представления неопределенности знаний и данных. Эти соображения породили новый формальный аппарат для работы с неопределенностями, получивший название нечеткая логика.



В настоящее время получение достоверной информации и ее быстрый анализ стали важнейшими предпосылками успешного управления объектами. Это особенно актуально, если объект управления и его внешняя среда представляют собой комплекс сложных процессов и факторов, существенно влияющих друг на друга. Одно из наиболее продуктивных решений проблем, возникающих в области управления и организации, состоит в применении когнитивного анализа. Сущность когнитивного подхода заключается в том, что бы помочь «эксперту» отразить ситуацию и разработать наиболее эффективную стратегию управления, основываясь не столько на своей интуиции, сколько на упорядоченном и верифицированном знании о сложной системе. Когнитивный анализ рассматривается как один из наиболее мощных инструментов исследования нестабильной и слабоструктурированной среды.

Методология когнитивного моделирования, предназначенная для анализа и принятия решений в плохо определенных ситуациях, была предложена Р. Аксельродом [26]. Суть когнитивного моделирования – ключевого момента когнитивного анализа – состоит в том, чтобы сложнейшие проблемы и тенденции развития системы отразить в упрощенном виде в модели, исследовать возможные пути и условия их разрешения в модельной ситуации.

Когнитивно-информационная модель (КИМ) представляет собой формализованное с разной степенью описание оборудования, учитывающее эволюцию технической системы во времени. КИМ разделяются на три категории (рис.3).



Рис.3. Категории когнитивно-информационных моделей

Непрерывные – описывают процессы, протекающие в непрерывно изменяющемся времени. Как правило, описываются с помощью передаточных функций и характеристических уравнений. Дискретные – описывают модель в ряд некоторых дискретных моментов времени без учета происходящего в промежутках времени. Обычно описываются в виде конечных автоматов или конечно-разностных уравнений. В основном используются для описания цифровых или импульсных устройств. Специ-

альные модели разделяют на три основные группы: информационные, функциональные и характеристики оборудования. Информационные специальные модели представляют собой описание информационных потоков в оборудовании, при этом КИМ рассматривается как фильтр-преобразователь информации. Функциональные модели отражают совокупность операций, выполняемых оборудованием и его отдельными частями в процессе функционирования.

Исследователи когнитивного анализа приводят разную номенклатуру этапов в зависимости от специфики изучаемого объекта (объектов). Если суммировать и обобщить все эти подходы, то можно выделить следующие этапы, характерные для когнитивного анализа любой ситуации:

1. Формулировка цели и задач исследования.

2. Изучение сложной ситуации с позиций поставленной цели: сбор, систематизация, анализ существующей статистической и качественной информации относительно объекта управления и его внешней среды, определение присущих исследуемой ситуации требований, условий и ограничений.

3. Выделение основных факторов, воздействующих на развитие ситуации.

4. Определение взаимосвязи между факторами путем рассмотрения причинно-следственных цепочек (построение когнитивной карты в виде ориентированного графа).

5. Изучение силы взаимовлияния разных факторов.

В результате прохождения этапов 3-5 строится когнитивная модель системы, отображаемая в виде функционального графа.

6. Верификация когнитивной модели.

7. Определение с помощью когнитивной модели возможных вариантов развития ситуации (системы), обнаружение путей, механизмов воздействия на ситуацию с целью достижения желаемых результатов, предотвращения нежелательных последствий, то есть выработка стратегии управления. Задание целевых, желаемых направлений и силы изменения тенденций процессов в ситуации. Выбор комплекса мероприятий (совокупности управляющих факторов), определение их возможной и желаемой силы и направленности воздействия на ситуацию (конкретно-практическое применение когнитивной модели).

Существуют две главные проблемы построения когнитивной модели. Во-первых, трудности вызывает выявление факторов (элементов системы) и ранжирование факторов (выделение базисных и второстепенных) (на этапе построения ориентированного графа). Во-вторых, выявление степени взаимовлияния факторов (определение весов дуг графа) (на этапе построения функционального графа). Можно констатировать, что исследователями не разработан четкий алгоритм выявления элементов исследуемых систем. Предполагается, что изучаемые факторы ситуации уже известны «эксперту», проводящему когнитивный анализ. Важнейшая

проблема когнитивного моделирования – выявления весов дуг графа – то есть количественная оценка взаимовлияния или влияния факторов.

В целом когнитивное моделирование позволяет:

- исследовать проблемы, возникающие в нестабильных, слабо-структурированных средах (системах), которые часто не поддаются изучению с помощью традиционных математических моделей;
- учитывать изменения внешней среды и самого объекта управления;
- прогнозировать последствия тех или иных управленческих решений.

Исходя из вышеизложенного, основным назначением разрабатываемой системы поддержки принятия решений (СППР) при оценке живучести технических систем стало обеспечение информационной поддержки принятия решений на стадии эксплуатации и упреждающих действий при аварии судна.

СППР основывается на когнитивно-информационной модели оценки живучести судовых технических систем, сочетающей взаимодействующие между собой системы, подсистемы и отдельные технические узлы, рассматриваемые как объекты с индивидуальными характеристиками. Взаимодействие узлов определяется их входящими и исходящими параметрами. СППР оценивает общее состояние технических систем с использованием единой системы параметров узлов, а также значения характеристик узлов, их взаимодействие, основанное на значении и динамике входящих и исходящих параметров. Каждый узел подключается к системе, либо как виртуальный компонент библиотеки узлов (модель функционирующего узла судовой технической системы), либо как реальный компонент, получающий через информационный интерфейс на входе параметры диагностики технических систем и преобразующий их в системные параметры СППР. Интерфейсы используются как аппаратные, так и программные. Применение единой параметрической модели и системных интерфейсов для отдельных узлов позволяет включать в модель узлы самых различных систем и самой широкой номенклатуры.

Благодаря единой системе интерфейсов, предлагаемая СППР может функционировать как самостоятельная бортовая система, так и как составная часть судового информационного комплекса, например, в среде интегрированной ИС предложенной в [24, 27, 28].

Для рассматриваемой обобщенной технической системы общее количество узлов принято равным  $m$ . В качестве индивидуальных характеристик каждого узла выбраны: срок службы ( $S_i$ ); текущее состояние ( $S_n$ ) и вектор состояний узла; вектора вероятности состояний и работоспособности узла; ресурсный вектор; матрица влияния узла; коэффициент доверия. Характеристики узла и его взаимодействие со смежными узлами системы в соответствии с когнитивно-информационной моделью технических систем судна отражены на рис. 4.

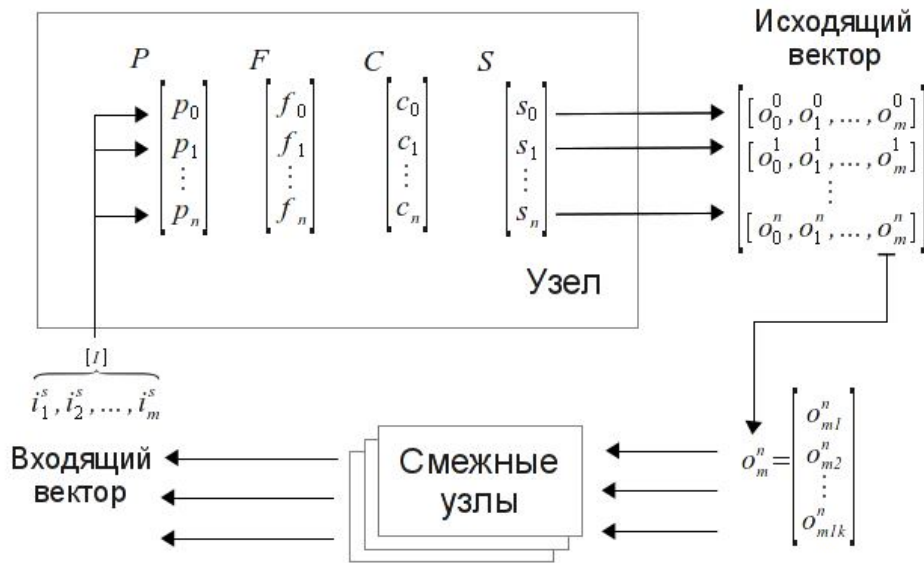


Рис. 4. Характеристики узла и его взаимодействие со смежными узлами технической системы

Срок службы задается в момент создания системы, автоматически увеличивается по мере эксплуатации узла и изменяется в момент замены узла на новый. Каждый узел характеризуется  $n$  состояниями  $S_n$ , каждое из которых отражает эволюцию исправности узла. При этом за  $S_0$  принимается полностью исправное состояние узла, а  $S_i$ , для  $i = 1, \dots, n$  отражают переход узла во все менее исправные состояния. В простейшем случае у узла два состояния:  $n = 0$  – узел исправен и  $n = 1$  – узел неисправен. Характеристика "состояние узла"  $S_i$  – отражает его состояние на текущий момент времени. Промежуточные значения для количества состояний  $n > 2$  могут отражать как различные варианты неисправного состояния узла (поломка, перегрев, вибрация выше проектной и т.д. и т.п.), так и несколько стадий износа узла (в частности – различные состояния распределения). Параметры влияния рассматриваются, как безразмерные немасштабные величины в диапазоне от 0 до 1, где 0 отражает полное отсутствие связи (выход узла из строя не влияет на смежный узел), а 1 – прямую связь (выход из строя узла, влечет за собой однозначный выход из строя смежного узла).

Матрица влияния узла – комбинация входящего и исходящего векторов влияния, отражающего взаимодействие узла с другими узлами системы. Входящий вектор влияния отражает параметры влияния на данный узел других узлов системы и зависит от состояния узлов системы, связанных с данным узлом. Исходящий вектор влияния отражает параметры влияния данного узла на узлы системы связанные с данным узлом и изменяется по мере перехода системы в каждое из  $n$  состояний. Следо-

вательно, исходящий вектор  $O$  состоит из  $n$  матриц влияния. Каждая из матриц влияния представляет собой сочетание  $m \times k$ , где  $m$  – число узлов системы смежных данному узлу,  $k$  – число возможных состояний смежных узлов. Значением поля матрицы является модификатор вероятности смены состояния смежного узла. Соответственно, полная матрица исходящего влияния узла представляет собой  $m \times k$  матрицу из  $n$  векторов влияния по  $m$  параметров в каждом из них. Вектор вероятности состояний узла  $P$  отражает вероятности перехода узла в одно из  $n$  состояний. Вероятность перехода узла в одно из  $n$  состояний является функцией текущего состояния узла  $S$ , его срока службы  $T = t$ , а так же входящего вектора влияния, моделирующего входящие параметры влияния других узлов системы. Вектор работоспособности узла  $F$  указывает на состояние узла в каждом из  $n$  состояний и отражает его способность выполнить поставленную задачу за время  $\Delta t$

$$F_i = \frac{P_i^t}{P_o^t} = \frac{P(S_i | \Delta t)}{P(S_o | \Delta t)}.$$

Приведенная характеристика является качественной, соответствующая отношению вероятности выполнения целевой работы в состоянии  $S_o$  к вероятности выполнения работы в  $S_i$ . В случае двух состояний узла такой вектор будет иметь всего два значения –  $F_o=1$  (узел работоспособен) и  $F_i=0$  (узел неработоспособен)

$$F_i = \frac{P(S_o | \Delta t)}{P(S_o | \Delta t)} = \frac{1}{1} = 1$$

$$F_o = \frac{P(S_i | \Delta t)}{P(S_o | \Delta t)} = \frac{0}{1} = 0.$$

Вектор ресурса восстановления отражает затраты на восстановление узла до состояния  $S_o$ . Он может иметь как временную (человеко-часы, активное время на восстановление при оптимальном количестве персонала), так и экономическую составляющую.

В каждый момент времени узел системы характеризуется несколькими обобщенными параметрами: состоянием, сроком службы, ожидаемой работоспособностью, ожидаемым ущербом, критичностью. Ожидаемая работоспособность является математическим ожиданием работоспособности узла и вычисляется по формуле

$$F_\Sigma = \sum_{i=0}^n f_i \cdot p_i.$$

Ожидаемый ресурс восстановления узла является математическим ожиданием затрат ресурсов на восстановление узла и вычисляется по формуле

$$C_{\Sigma} = \sum_{i=0}^n c_i \cdot p_i.$$

Работа разработанной системы оценки живучести судовых технических систем возможна в нескольких режимах. В *режиме интегральной оценки* система указывает на возможные в разные моменты времени неисправности, оценивает их критичность и выдает рекомендации по восстановлению/замене узлов в зависимости от их влияния на систему и экономического эффекта. В *режиме дифференциальной оценки* система оценивает каждую из иерархий технических систем по категории "система – подсистема – узел" и выдает рекомендации аналогичные режиму интегральной оценки. В *поисковом режиме* система моделирует возможные неисправности и выход из строя узлов с различными целевыми функциями поиска. К целевым функциям относятся: поиск критических и уязвимых мест системы; оценка различных вариантов профилактики системы (в зависимости от критичности и экономического эффекта, который может выражаться как в ценовой, так и в ресурсозатратной форме); наихудшие сценарии возможных неисправностей и возможность "аварийных резонансов" (случаи когда выход из строя незначительных элементов может повлечь за собой каскадную цепь поломок и выходов из строя систем).

**Выводы.** Разработанная система поддержки принятия решений, основывающаяся на когнитивно-информационной модели судовых технических систем, рекомендуется для использования на стадии их проектирования и эксплуатации систем. На стадии проектирования – с целью моделирования возможных сценариев неисправностей и устранения уязвимых мест конструктивными методами, в частности резервированием уязвимых участков. На стадии эксплуатации – оценки критичности технических узлов, позволяющей в зависимости от риска выхода из строя этих узлов, формировать рекомендации по профилактическому ремонту и замене технических систем, а на стадии упреждения аварии – по мерам направленным на возможное предотвращение более серьезных аварий.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. ГОСТ Р 51897-2002. Менеджмент риска. Термины и определения. – Введ. 2003–01–01. – М.: Изд-во стандартов,
2. BS1. BS EN ISO 9001:2008. Quality management systems. – Requirements. – 2008.

3. ISO. 31000:2009. *Риск Менеджмент. – Принципы и руководства Geneva: International Organization for Standardization. – 2009.*
4. MAIB. *Annual Report 2011. Southampton, United Kingdom: Crown. – 2011.*
5. Дерменжи М., А.Г. *Аварийность на море: реальный взгляд на жизнь // Качественное судоходство: стандарт XXI века. Безопасность и защита морской среды: грядущие перемены. – СПб., 2009.*
6. Wang J., Foinikis P. *Formal safety assessment of containerships / Marine Policy. – 2001. – Vol. 25. – P. 143-157.*
7. Колесников Р.Д. *Проблема обеспечения борьбы за живучесть на современных кораблях [Электронный ресурс]. URL: <http://flot.com/science/reality/shipdamagecontrol>*
8. Ковтун Л.И., Шарков Н.А. *Интеллектуальный интерпретатор критических событий и их последствий в корабельной АСУ на базе упреждающего имитационного моделирования и ситуационного анализа контролируемых процессов / ИММОД2011 «Имитационное моделирование. Теория и практика». – Россия, СПб., 2011.*
9. Hecht H. *Systems Reliability and Failure Prevention / Artech House. – 2003.*
10. Turan O. *Investigating the reliability and criticality of the maintenance characteristics of a diving support vessel / Quality and Reliability Engineering International. – 2011. – Vol. 27. – P. 337-357.*
11. Datta A., Turan O., Aksu S. *Increasing ship operational reliability through the implementation of a holistic maintenance management strategy / Ships and Offshore Structures. – 2010. – Vol. 5. – P. 337-357.*
12. Wang J. *Technology and Safety of Marine Systems (Ocean Engineering Series) / Elsevier Science. – 2003.*
13. OREDA. *OREDA - Offshore Reliability Data Handbook 2002 - 4th Edition [Текст] / OREDA. – 2002.*
14. Мозгалеvский А.В., Калявин В.П. *Системы диагностирования судового оборудования. – М.: Судостроение, 1987.*
15. Саати Т. *Целочисленные методы оптимизации и связанные с ними экстремальные проблемы. – М.: Мир, 1973.*
16. Мартино Д. *Технологическое прогнозирование. – М.: Прогресс, 1977.*
17. Джексон П. *Введение в экспертные системы. – М.: Вильямс, 2001.*
18. Гайдышев И. *Анализ и обработка данных: Специальный справочник. – 2001.*

19. Месарович М., Такахара Я. *Общая теория систем: математические основы.* – М.: Мир, 1978.
20. Minsky M. *A framework for representing knowledge / The Psychology of Computer Vision.* – 1975. – P. 211-277.
21. Горелова Г.В., Мельник Э.В. *О возможности анализа и синтеза структур отказоустойчивых распределенных информационно-управляющих систем, основанной на когнитивном подходе / Искусственный интеллект.* – 2008. – Т. 3.
22. Варбанец Р.А., Ивановский В.Г., Бень А.П. *Использование принципов нечеткой логики в экспертной системе технической диагностики судовых двигателей внутреннего сгорания / Искусственный интеллект.* – 2010.
23. Nguyen H., Saaty T.L., L.G. V. *The application of the ahp method in ship system risk estimation / Polish Maritime Research.* – 2009. – Vol. 16. – P. 78-82.
24. Нечаев Ю.И. *Теория катастроф: современный подход при принятии решений* – СПб.: Арт-Экспресс, 2011.
25. Рябинин И.А., Черкесов Г.Н. *Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем.* – М.: Радио и связь, 1981.
26. Axelrod R. *The Structure of Decision: Cognitive Maps of Political Elites.* / Princeton. University Press. – 1976.
27. *Бортовые интеллектуальные системы. Ч. 2. Корабельные системы.* – М.: Радиотехника, 2006.
28. Нечаев Ю.И., Сизов В.Г. *Принятие решений при управлении судном в экстремальных ситуациях на основе современной теории катастроф // Судовождение.* – № 6. – ОНМА. – 2011.

*Стаття надійшла до редакції 21 вересня 2012 р.*