

Наведено результати розробки методу оцінки, прогнозування технічного стану функціонально-взаємопов'язаних і взаємодіючих підсистем (ФВВП) судових складних технічних систем (СТС) при екстремальних умовах. Рішення поставленого завдання вимагало: розробити когнітивні імітаційні, нечіткі моделі оцінки та прогнозування технічного стану ФВВП СТС; розвинути метод інформаційного забезпечення підтримки прийняття рішень при пошуку причин відмов елементів судових СТС

Ключові слова: складні технічні системи, ризик відмови, оцінка технічного стану, прогнозування технічного стану, когнітивні моделі

Приведены результаты разработки метода оценки, прогнозирования технического состояния функционально-взаимосвязанных и взаимодействующих подсистем (ФВВП) судовых сложных технических систем (СТС) при экстремальных условиях. Решение поставленной задачи потребовало: разработать когнитивные имитационные, нечеткие модели оценки и прогнозирования технического состояния ФВВП СТС; развить метод информационного обеспечения поддержки принятия решений при поиске причин отказов элементов судовых СТС

Ключевые слова: сложные технические системы, риск отказа, оценка технического состояния, прогнозирование технического состояния, когнитивные модели

УДК 004.732.629.5-52

DOI: 10.15587/1729-4061.2016.85605

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СУДОВЫХ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

В. В. Вычужанин

Доктор технических наук, заведующий кафедрой*

E-mail: vint532@yandex.ua

Н. Д. Рудниченко

Кандидат технических наук,

старший преподаватель*

E-mail: murder8910@mail.ru

В. Д. Бойко

Кандидат технических наук*

E-mail: boyko-work@yandex.ua

Н. О. Шибарева

Ассистент*

E-mail: nati1986@bk.ru

С. Н. Коновалов

Аспирант*

E-mail: konserge-serge@rambler.ru

*Кафедра информационных технологий
Одесский национальный морской университет
ул. Мечникова, 34, г. Одесса, Украина, 65029

1. Введение

Элементы и подсистемы судовых сложных технических систем функционально взаимосвязаны. Они эксплуатируются при экстремальных техногенных и природных воздействиях [1]. Эффективность эксплуатации судовых СТС, уровень безопасности плавания и экономические последствия во многом определяются качеством диагностирования и прогнозирования технического состояния подсистем и СТС в целом, их энергетическими, материально-вещественными и информационными характеристиками, результатами анализа оценки риска отказов систем [2]. Неэффективная эксплуатация хотя бы одной из подсистем отражается на работе других подсистем и приводит к авариям с повреждениями оборудования и даже гибели людей [3].

В настоящее время оценки и прогнозирование технического состояния судовых СТС не в полной мере учитывают требования Международной конвенции по охране человеческой жизни на море СОЛАС-74, положения Международного кодекса по управлению безопасностью [4]. В используемых методах не учитывается сложность и разнородность ФВВП СТС при оценке и прогнозировании их технического состояния [5].

В целях снижения аварий и повреждений оборудования актуальной является разработка новых методов

оценок риска и прогнозирования технического состояния судовых СТС.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

С точки зрения технической безопасности количественные оценки риска отказов СТС представляют собой необходимую и сложную задачу, требующую разработки и применения специального математического аппарата. Как следует из [6], решение прикладных задач такого типа часто основывается на методах математического и статистического моделирования, методе анализа «дерева отказов» и т. д. В настоящее время среди методов моделирования надежности имеет место развитая технология автоматизированного структурно-логического моделирования и расчета надежности, безопасности сложных системных объектов и процессов, эффективности и риска функционирования систем [7].

Надежность судовых СТС зависит от большого числа факторов, характеризующих их конструкцию, условия производства и эксплуатации. Это приводит к тому, что процессы изменения технического состояния и надежности носят случайный характер, а при оценке и анализе показателей надежности не-

обходимо использовать методы теории вероятности. На перспективность в таких случаях использования имитационного моделирования (ИМ) для прогноза уровня безопасности СТС указано в [8]. Известные программные продукты CARA и RCM-Tool, разработанные Норвежским научно-исследовательским институтом морских технологий MARINTEK, представляют собой систему автоматизированного построения «дерева отказов» СТС. Но они не используют ИМ, например, на основе статистических испытаний, что существенно ограничивает возможность их использования, особенно при неопределенности исходных данных, возникающей при эксплуатации СТС. Перспективным методом ИМ для исследования надежности СТС и прогнозирования их технического состояния является когнитивное имитационное моделирование (КИМ) [9], позволяющее рассмотреть большое число вероятных альтернатив. Учитывая объективно существующую неопределенность, неполноту и нечеткость информации об объекте при разработке базы знаний и механизмов вывода экспертных систем, целесообразно использовать аппарат нечеткой логики [10]. Это позволит объективно оценить техническое состояние и более обоснованно принимать решения по управлению ремонтом судового оборудования. Нечеткие модели оценок риска отказов СТС, разработанные с учетом вариационной информации об оценке риска отказов в различных сценариях, позволяют исследовать модели поведения систем в экстремальных сценариях при минимизации времени на расчет. При этом учитывается как функциональная взаимосвязанность, так и взаимодействие подсистем и элементов, а также количественные и качественные характеристики информационно-энергетического взаимообмена. Наиболее эффективным инструментом для реализации процедуры оценки и прогноза риска отказов СТС является КИМ в сочетании с нечетким моделированием, обеспечиваемым алгоритмами и методами, адекватно отражающими особенности систем. Однако в настоящее время для оценки и прогноза риска отказов СТС такой подход нуждается в дальнейшем развитии. Это позволит учесть сложность и разнородность ФВВП СТС при оценке и прогнозировании их технического состояния, поддерживать системы в работоспособном состоянии за счет своевременного обнаружения дефектов. Необходимы разработка новых эффективных моделей для решения задач диагностики и прогнозирования поведения СТС. При решении задач, связанных с повышением надежности эксплуатации судовых СТС, возрастает роль методов, базирующихся на современном программном обеспечении диагностики и прогнозирования таких технических систем.

3. Цель и задачи исследования

В работе поставлена цель создать и исследовать метод оценки и прогнозирования технического состояния ФВВП судовых СТС при экстремальных техногенных и природных условиях. Это даст возможность повысить надежность эксплуатации судовых СТС.

Для достижения поставленной цели работы были поставлены следующие задачи:

- разработать когнитивные имитационные и нечеткие модели оценки и прогнозирования технического состояния ФВВП СТС;
- разработать модель поддержки принятия решений при поиске причин отказов элементов ФВВП судовых СТС;
- развить метода информационного обеспечения поддержки принятия решений при поиске причин отказов элементов ФВВП судовых СТС.

4. Метод оценки и прогнозирования технического состояния ФВВП судовых СТС

Оценка риска отказов как комплексного показателя надежности СТС и системы ДМДП включает многоступенчатую оценку риска отказов различных взаимосвязанных между собой величин. В качестве таких величин могут выступать энергия-вещество-информация (ЭВИ). Оценка выполняется на основе статистических и экспертных данных с учетом условий эксплуатации элементов систем. Процедура построения сценария поведения СТС при развитии аварии является итерационным процессом. В соответствии с предлагаемым методом последовательность количественной оценки и прогнозирования риска отказов ФВВП судовых СТС включает этапы:

- определение ФВВП судовых СТС в иерархии и топологии систем с учетом используемого ресурса ЭВИ;
- оценки риска отказов элементов систем от пораженных компонентов систем; прогнозирование риска отказов элементов систем от пораженных компонентов СТС;
- поддержка принятия решений (ППР) при поиске причин отказов элементов судовых СТС.

В основу метода оценки и прогнозирования технического состояния ФВВП судовых СТС положена технология КИМ оценок риска функционирования систем в сочетании с нечетким моделированием, позволяющая реализовать формализованное с разной степенью описание состояния оборудования с учетом эволюции систем во времени.

4.1. Реализация метода на основе КИМ оценок и прогнозирования риска отказов судовых СТС

Когнитивная модель представлена в виде функционального графа

$$\Phi_{\Pi} \langle G, X, F, Q \rangle, \quad (1)$$

где $G = \langle V, E \rangle$, G -знаковый орграф: $V = \{v_i\}$, $i = 1, 2, \dots, k$ – множество вершин когнитивной карты; $V = \{e_{ij}\}$ – множество дуг, соединяющих вершины v_i и v_j ; $X = \{x_i\}$ – множество параметров вершин; $F = f\{v_i, v_j, e_{ij}\}$ – функция связи между вершинами; Q – пространство параметров вершин.

При разработке когнитивной модели (1) часть ее построена по статистическим данным об объекте, другая часть – на основании обработки экспертных и теоретических данных. Этапы КИМ включают:

- исследования причинно-следственных связей (путей и циклов когнитивной модели) ФВВП СТС с учетом используемого ресурса ЭВИ;

- анализ структуры модели, отображающей механизм функционирования исследуемых СТС;
- исследование возможного развития процессов в системе путем импульсного моделирования;
- оценки вероятностей потерь работоспособности, ущерба и риска отказа СТС.

При построении КИМ учитывается тип передаваемого ресурса ЭВИ от элемента-источника к элементу-приемнику. Для оценки вероятностей потерь работоспособности, ущерба и риска отказов элементов СТС в КИМ используются поражающие моделирующие импульсы (ПМИ) – $1 - \text{imp}_k(t)$, $k \in \{1, 2, 3, \dots, 1\}$ с амплитудой $m_{\text{imp}_k}(t)$ для дискретных моментов времени [4]. ПМИ представляет собой массив значений, определяющих тип элемента (взаимосвязи) КИМ. Кроме того, ПМИ – это степень поражения элемента (взаимосвязи) модели, лежащая в диапазоне от 0 (элемент (взаимосвязь) работоспособен) до 1 (элемент (взаимосвязь) неработоспособен). Состоянию элемента (взаимосвязи) соответствует 0, если ПМИ не проходит элемент (взаимосвязь), и 1, если ПМИ проходит элемент (взаимосвязь). Импульсный вектор для V, E

$$\text{imp}_{i(j)}(t) = (x_1, x_2, \dots, x_{V(E)}), \quad (2)$$

где $x_1, x_2, \dots, x_{V(E)}$ – состояния элементов (взаимосвязей)

Для ранжирования оценок риска отказов элементов (взаимосвязей) СТС используется обобщенная функция желательности Харрингтона [16]: 0–0,2 – уровень риска оценивается как минимальный, последствия аварии минимальны, не оказывающие на эксплуатацию СТС существенного воздействия; 0,2–0,37 – уровень риска оценивается как допустимый, последствия аварии незначительные, позволяющие эксплуатировать СТС без существенного ремонта; 0,37–0,63 – уровень риска оценивается как максимальный, последствия аварии значительные, но позволяющие эксплуатировать СТС при выполнении ремонтных работ; 0,63–1 – уровень риска оценивается как критический, последствия аварии катастрофические, не позволяющие эксплуатировать СТС. Качественное состояние подсистем и их элементов, входящих в СТС, при оценке вероятностей потерь работоспособности выражается функционалом состояний

$$Q = [P_{V,n}, P_{V,i}, v_i, v_j, H_m^v(t), K_{V,i}], \quad (3)$$

где $P_{V,n}$ – номинальная вероятность потери работоспособности элементов систем; $P_{V,i}$ – текущая вероятность потери работоспособности элементов систем; $H_m^v(t)$ – передаточный коэффициент изменения амплитуды ПМИ, проходящего через вершины КИМ; $K_{V,i}$ – коэффициент степени поражения элемента СТС.

Качественное состояние взаимосвязи подсистем СТС и их элементов выражается функционалом состояний

$$E_z = [P_{E,n}, P_{E,i}, e_{ij}, H_m^e(t), K_{E,i}], \quad (4)$$

где $P_{E,n}$ – номинальная вероятность потери работоспособности взаимосвязи; $P_{E,i}$ – текущая вероятность потери работоспособности

взаимосвязи; e_{ij} – тип ресурса ЭВИ; $H_m^e(t)$ – передаточный коэффициент изменения амплитуды ПМИ, проходящего через взаимные связи элементов СТС; $K_{E,i}$ – коэффициент степени поражения взаимосвязи.

ПМИ генерируется в условно заданной пораженной вершине (ребре) КИМ, движется к последующим вершинам (ребрам), последовательно выводя из строя взаимосвязанные элементы систем.

В качестве объекта моделирования выбрана СТС – судовая энергетическая установка (СЭУ). Типичная структура СЭУ представляет собой ФВВП, осуществляющие преобразование энергии топлива в механическую, электрическую, тепловую энергию и транспортировку ее к потребителям. Орграф исследуемой масляной подсистемы СЭУ приведен на рис. 1

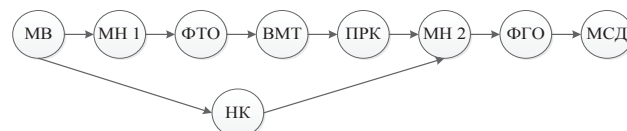


Рис. 1. Орграф масляной подсистемы СЭУ (МВ – масляная ванна, МН1 – первый насос масла, ФТО – фильтр тонкой очистки масла, ВМТ – охладитель масла, ПРК – предохранительный клапан, МН2 – второй насос масла, ФГО – фильтр грубой очистки масла, МСД – масляная система дизеля, НК – невозвратный клапан)

Моделирование действия поражающих импульсов на систему производилось на базе немецкого дистрибутива операционной системы Debian GNU/Linux 8.0 (stable). Реализация основного алгоритма модели выполнена средствами высокоуровневого языка программирования Python, исходные данные моделей представлены в формате JSON, результаты – в виде протоколов в формате CSV и диаграмм на языке DOT системы graphviz. В качестве IDE использовался редактор Vim. Автоматизация работы системы осуществлялась на базе инструментов GNU make, визуализация – с помощью ПО graphviz. Форматы файлов представления данных (CSV/JSON) универсальные, платформу- и языко-независимые, хорошо обрабатываются большинством программных средств сериализации данных и нетребовательны к вычислительным ресурсам и каналам передачи данных.

Процесс моделирования организован следующим образом (рис. 2): исходная модель задается в виде файла в формате JSON; программа Python обрабатывает модель, генерируя массив таблиц в формате CSV и диаграмм в формате DOT.

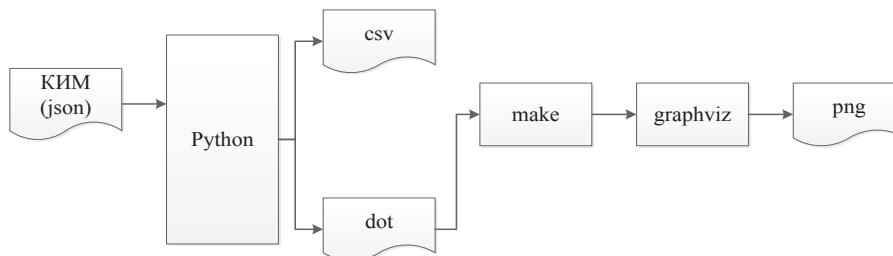


Рис. 2. Процесс моделирования живучести в среде Debian GNU/Linux

Утилита make обрабатывает DOT-файлы с помощью программы graphviz, в результате работы которой создается массив графических диаграмм состояния системы в формате png. Анализ полученных результатов проводится средствами Calc Libre Office.

Использование формата JSON позволяет гибко задавать структуру и конфигурацию существующего оборудования. Одно из преимуществ работы с JSON-форматом заключается в том, что полная спецификация системы (численные характеристики узлов, конфигурация и граф межузловых связей) может быть задана в едином файле в универсальном формате. При этом JSON-файл может редактироваться как вручную, так и автоматизированными средствами сбора и обработки информации. Сценарии прохождения диагностирующих импульсов по системе представляются как в графическом виде, так и в виде CSV-сценариев (вместе с данными расчетов). При этом генерируется как отдельный файл протокола пошагового прохождения импульса, так и итоговый CSV-файл с общей сводкой протоколов и расчетом числовых характеристик рисков отказов для различных конфигураций системы.

В CSV-файле указывается численное значение импульса в каждом из узлов в каждый из моментов дискретного времени. Отдельно генерируются файлы с указанием рассчитанных характеристик по каждому из узлов СТС. Полученные CSV-файлы могут быть использованы как в аналитическом программном обеспечении (табличные редакторы – Libre Office, Excel Microsoft Office, более сложные системы визуализации – gnuplot, R, Seaborn), так и в системах поддержки принятия решений для автоматической обработки и оценивания рисков (например, для систем, использующих sklearn, Dataiku Data Science Studio, и других). Благодаря использованию сочетания форматов JSON/CSV/DOT система позволяет работать с конфигурацией и анализом СТС в двух плоскостях – визуальной и автоматической, а также в их комбинации. При визуальном методе на этапе создания модели системы файл конфигурации редактируется вручную. Предварительный анализ характеристик может контролироваться визуально – согласно диаграммам прохождения импульсов. Автоматические методы используют CSV-файлы для численного анализа характеристик системы, выработки и анализа решений.

4. 2. Реализация метода на основе нечеткой модели оценок и прогнозирования риска отказов судовых СТС

В нечетко-вероятностных подмоделях используются вероятностные нечеткие правила Такаги-Сугено нулевого порядка [11].

Риск отказов исследуемой СТС можно представить в виде

$$R = \{ \langle P_i, Y_i, q_i \rangle, i = 1, 2, \dots, N, \} \quad (5)$$

где P_i – вероятность риска выхода из строя элемента СТС; Y_i – ущерб от последствий рискованного события; q_i – вес i -го риска, устанавливается для каждого риска в пределах 0...1 при выполнении условий

$$\sum_{j=1}^{n_i} q_{ji} = 1 (i = 1, \overline{N}) \text{ и } \sum_{i=1}^N q_i = 1.$$

Суммарная количественная оценка риска отказов СТС с учетом оценок риска отказов подсистем определяется

$$R = \sum_{i=1}^N R_i \cdot q_i, \quad (6)$$

где R_i – количественная оценка i -го вида риска.

Нечеткое подмножество для выходной переменной с функцией принадлежности можно представить в виде

$$\mu_{\Sigma}(Y_R) = \mu_{x_i}(Y_{R_i, q_i}) = \max_{Y_R} [\mu_{x_{P_i}}(Y_R), \mu_{x_{Y_i}}(Y_R), \mu_{x_{q_i}}(Y_R)], \quad (7)$$

где $\mu_{\Sigma}(Y_R)$ – итоговое нечеткое подмножество для выходной переменной оценки рисков отказов (Y_R); $\mu_{x_i}(Y_{R_i, q_i})$ – нечеткое множество, входящее в состав подмножества $\mu_{\Sigma}(Y_R)$; $\mu_{x_{P_i}}(Y_R)$ – нечеткое множество вероятностей выхода из строя подсистем и элементов СТС; $\mu_{x_{Y_i}}(Y_R)$ – нечеткое множество ущербов подсистем и элементов СТС и системы ДМДП; $\mu_{x_{q_i}}(Y_R)$ – нечеткое множество весов рисков отказов подсистем и элементов СТС и системы ДМДП.

Построение разработанных нечетких моделей оценки рисков отказов подсистем и элементов на примере СЭУ проводилось с помощью пакета прикладных программ Matlab, графических средств и инструментов пакета расширения Matlab – Fuzzy Logic Toolbox. При исследованиях используется функция распределения Гаусса в качестве функции принадлежности, реализуемая в Matlab в виде gaussmf для задания гладких симметричных функций принадлежности. На этапе фазификации задаются входные переменные нечетких моделей оценок риска отказов в виде вероятностей выхода из строя и ущерба от последствий рискованных событий элементов СЭУ.

4. 3. Поддержка принятия решений при поиске причин отказов элементов судовых СТС

В основу метода ППР при поиске причин отказов элементов ФВВП судовых СТС положены критерии, определяемые нормативной документацией, экспертными оценками. К ним относятся:

- максимальная вероятность потери работоспособности;
- минимальный ущерб от отказа элементов подсистем;
- максимальная оценка последствий возникновения риска отказов;
- максимальная длительность эксплуатации элементов подсистем СТС.

Для ППР по оценкам риска отказов ФВВП судовых СТС по априорным и апостериорным данным, а также при поиске отказавших элементов систем в целях повышения эффективности их эксплуатации предлагается метод, основанный на динамических байесовских сетях доверия (ДБСД) [12]. Поставленная задача решается использованием постоянной системы опроса всех элементов системы на различных ее уровнях за конкретный период времени. Построение и исследование ДБСД вероятности потери работоспособности, оценок риска отказов элементов ФВВП СТС осуществлено с использованием программного продукта GiNie [13].

Целевая функция оценки работоспособности элементов СТС и системы МДП посредством ДБСД имеет вид

$$F(P_b) = \{G, M\}, \quad (8)$$

где G – ациклический направленный граф сети; M – множество элементов СЭУ, составляющих ДБСД.

Вершинами графа являются ФВВП СТС, которые с учетом иерархии сети определяются

$$v = \{v_i^j | 1 \leq i \leq n, j = 1, m\}, \quad (9)$$

где v – наименование элемента СТС; i – номер блока в сети; n – число блоков в сети; j – номер уровня в сети; m – число уровней в сети.

Структура исследуемой ДБСД масляной подсистемы СЭУ представлена на рис. 3.

Принято, что вероятности потери работоспособности при прогнозировании работоспособности элементов СЭУ изменяются в соответствии с экспоненциальным законом распределения с использованием логистической регрессии, способствующей предсказанию вероятности возникновения некоторого события по значениям множества признаков.

Реализация модели ППР осуществлена в соответствии с алгоритмом по оценкам риска отказов таких подсистем. Она заключается в построении ДБСД СТС с использованием баз данных (рис. 4).

При анализе данных для каждого конкретного сценария отказа формируется выборка требуемого набора данных. Полученные данные интерпретируются и обрабатываются с помощью блоков приобретения знаний, ППР и управления правилами. Затем обновляются и модифицируются базы знаний, данных и правил. На основе обновленной информации происходит анализ возможных рекомендуемых решений и осуществляется выбор предпочтительных альтернатив из общего набора решений, после чего принимается решение по устранению причин отказов.

Для выявления возможной причины выхода из строя масляной подсистемы проведены исследования в соответствии со схемой поиска отказа ее работы, приведенной на рис. 5.

В предположении, что неисправность F_i имеет вероятность появления p_i и показатель критичности S_i , эффективность диагностирования DSE можно определить по формуле [14]

$$DSE = \frac{\sum_{D_F} S_i p_i}{\sum_F S_i p_i}, \quad (10)$$

где F – множество возможных неисправностей, полученное в результате анализа видов и последствий отказов [14]; D_F – множество диагностируемых неисправностей (подмножество F); $\sum_{D_F} S_i p_i$ – сумма подмножеств произведений показателей критичности и вероятности отказа элементов СЭУ; $\sum_F S_i p_i$ – сумма произведений показате-

телей критичности и вероятности отказа множества элементов масляной подсистемы СЭУ.

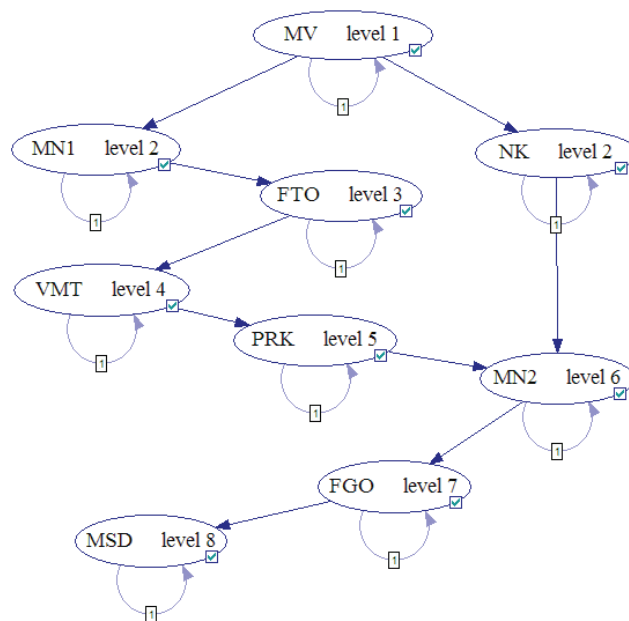


Рис. 3. Структура ДБСД масляной подсистемы СЭУ (FTO – фильтр тонкой очистки масла, MN1 – первый насос масла, FGO – фильтр грубой очистки масла, MV – масляная ванна, VMT – водомасляный теплообменник, MN2 – второй насос масла, NK – невозвратный клапан, PRK – предохранительный клапан, MSD – масляная система дизеля)

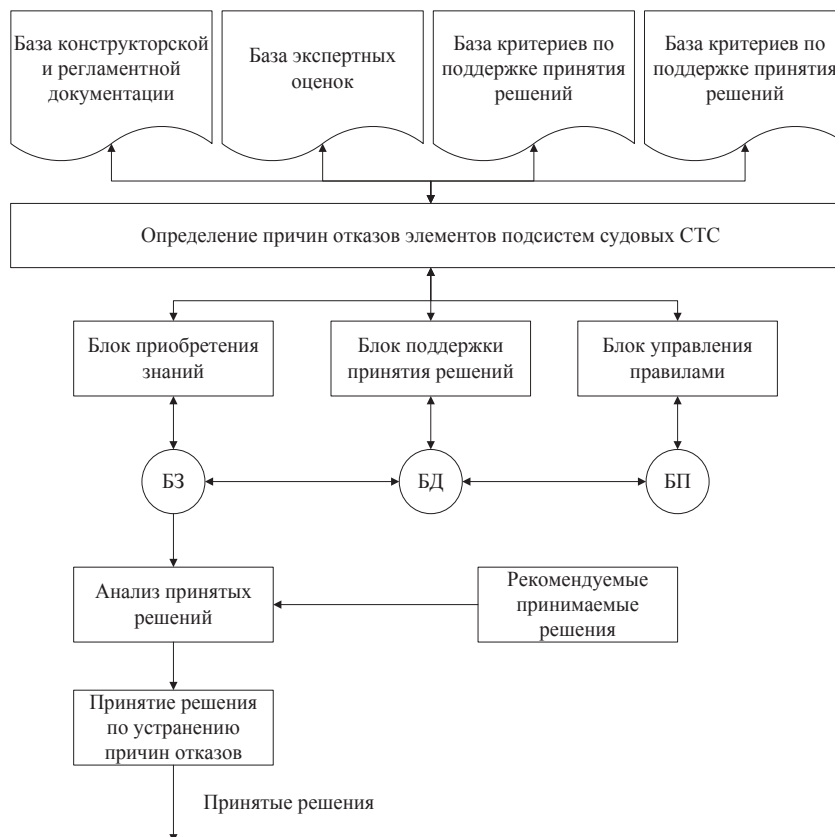


Рис. 4. Структурная схема ППР при поиске причин отказов по оценкам риска отказов судовых СТС

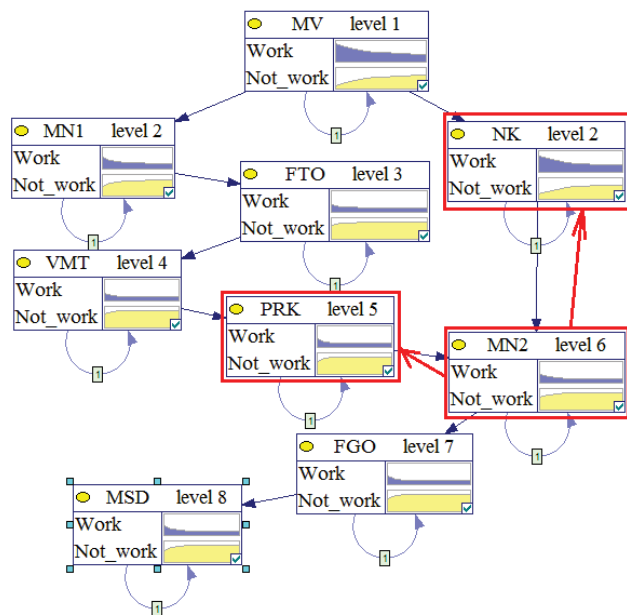


Рис. 5. Схема поиска причины отказа масляной подсистемы

Показатель критичности S_i -й неисправности рассчитывают по формуле:

$$S_i = FR \cdot CF \cdot SF \cdot SDF, \quad (11)$$

где FR – частота отказов (число отказов в час); CF – стоимостной коэффициент, принимающий целочисленные значения в диапазоне от 1 до 3 (низкий, средний, высокий) и определяемый затратами на требуемое техническое обслуживание, потерями от возможного простоя; SF – коэффициент опасности, принимающий целочисленные значения в диапазоне от 1 до 3 (низкий, средний, высокий); SDF – коэффициент вторичных повреждений, принимающий целочисленные значения в диапазоне от 1 до 3 (низкий, средний, высокий).

Используя зависимость (10), можно оценить эффективность проведенного диагностирования исследуемой подсистемы СТС.

5. Результаты исследований разработанного метода

Для упрощения математического описания обобщенная модель СЭУ разработана на уровне подсистем СЭУ, механизмов и устройств. При необходимости детального исследования модели СЭУ модель может дополняться отдельными моделями (орграфами) подсистем СЭУ. В этом случае сохраняется разработанный принцип моделирования.

Ранжирование результатов исследований оценок риска отказов для вершин орграфа КИМ масляной подсистемы СЭУ приведено на рис. 6. Оценка риска отказов подсистемы проводилась для двух массивов значений с наибольшей вероятностью выходов из строя. Из результатов расчетов структурных повреждений элементов подсистемы следует, что наиболее уязвимым элементом подсистемы СЭУ является фильтр тонкой очистки масла (риск отказа – 0,44). К менее уязвимому элементу СЭУ относится масляная система дизеля (0,02).

В ходе проведенных исследований моделированием получена трехмерная визуализация поверхности нечеткой модели оценок риска отказов масляной подсистемы СЭУ (рис. 7). Разработанная модель используется для формализации представления критериев риска отказов исследуемого объекта. Она позволяет получить прогноз риска отказов элементов подсистемы СТС при экстремальных возмущающих воздействиях на них.

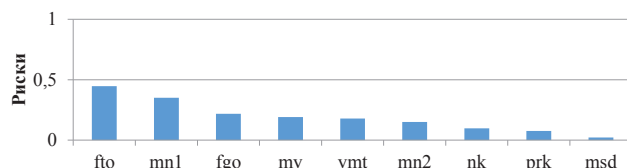


Рис. 6. Ранжирование результатов оценки риска отказов масляной подсистемы СЭУ (fto – фильтр тонкой очистки масла, mn1 – первый насос масла, fgo – фильтр грубой очистки масла, mv – масляная ванна, vmt – водомасляный теплообменник, mn2 – второй насос масла, nk – невозвратный клапан, prk – предохранительный клапан, msd-масляная система дизеля)

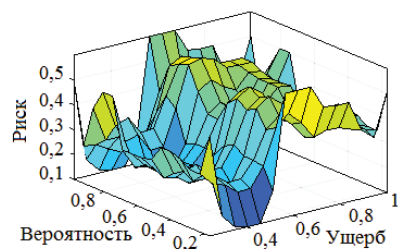


Рис. 7. Трехмерная визуализация поверхности нечеткой модели оценок риска отказов масляной подсистемы СЭУ

При моделировании ДБСД СЭУ для различных значений вероятности (риска) отказа входного элемента определены значения риска отказов функционально-взаимосвязанных и взаимодействующих элементов масляной подсистемы за 20000 часов эксплуатации СЭУ (рис. 8). Из результатов проведенных исследований следует, что при росте риска отказа входного элемента подсистемы от 0,09 до 0,2 растут значения риска отказов всех дочерних, нижестоящих элементов ДБСД СЭУ.

Целевым назначением применения ДБСД при оценках, как вероятности потери работоспособности, так риска отказов элементов подсистем СТС, является апостериорный вывод. Апостериорный вывод основан на процедурах анализа данных, получаемых вследствие использования ДБСД. Моделированием по априорным и апостериорным данным определены элементы масляной подсистемы СЭУ, наибольшим образом влияющие на работоспособность дизеля и работу всей системы за различные промежутки времени. Установлено, что к такому элементу относится предохранительный клапан (рис. 9).

Если по истечении 20000 часов эксплуатации подсистема MN2 находится в работоспособном состоянии, тогда проводится исследование на работоспособность взаимосвязанных с работоспособностью MN2 подсистем PRK, NK.

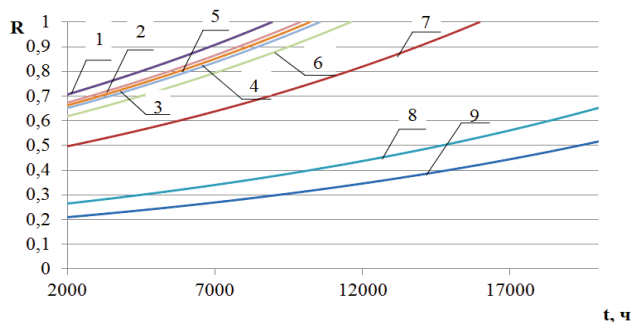


Рис. 8. Риск отказа элементов масляной подсистемы при риске отказа элемента на входе системы 0,26 (1 — водомасляный теплообменник, 2 — фильтр тонкой очистки масла, 3 — фильтр грубой очистки масла, 4 — предохранительный клапан, 5 — второй насос масла, 6 — масляная система дизеля, 7 — первый насос масла, 8 — невозвратный клапан, 9 — масляная ванна)

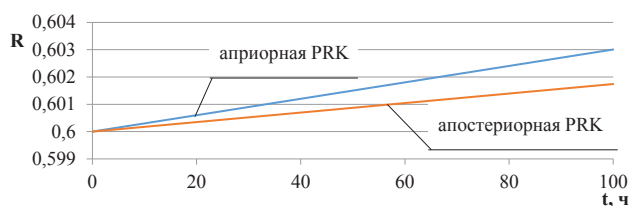


Рис. 9. Априорная и апостериорная оценки риска отказа предохранительного клапана масляной подсистемы при поступлении информации об отказах

После технического обслуживания подсистемы MN2, в ДБСД выполняется пересчет оценок риска отказов подсистем, т.к. PRK непосредственно влияет на MN2 и имеет риск отказа (0,6). Следовательно, необходимо выполнить проверку этой подсистемы. Отказ PRK будет являться вероятностной причиной отказа подсистемы MN2. После технического обслуживания PRK обновленные данные по техническому состоянию подсистемы поступят в ДБСД и произойдет пересчет оценок риска отказов подсистем. Если после технического обслуживания подсистем MN2 и PRK, а также пересчета оценки риска отказов для этих систем значение риска отказа остается недопустимо высоким, тогда необходимо выполнить проверку подсистемы NK, значение отказа которой составляет (0,24).

В дальнейшем выполняется поиск следующих подсистем в структуре схемы поиска причин отказов подсистем, оценки риска отказов которых максимальны. Выполняется проверка подсистем и всех связанных с ними подсистем на других уровнях схемы ДБСД. На каждом этапе выполняемых действий данные в ДБСД обновляются.

6. Обсуждение результатов исследований оценок риска отказов подсистем судовых СТС

Из полученных результатов исследований следует, что наибольший рост суммарного уровня риска отказов подсистем и элементов СТС наблюдается при значениях вероятности потери работоспособности в диапазоне 0,455...1. При значениях ущерба, напри-

мер для СЭУ равного 0,234 и вероятности потери работоспособности равной 0,5, значение риска отказа составило 0,157.

Разработанные нечеткие модели оценок риска отказов СТС позволяют исследовать модели систем в экстремальных сценариях при минимизации времени на расчет.

Исследование имитационных и нечетких моделей оценки риска отказа при эксплуатации ФВВП судовых СТС показало следующее. Относительно небольшое количество элементов подсистем порождают большое число возможных вариантов развития экстремальной ситуации при поражении какого-либо из элементов.

При дополнении моделей показателями реальной критичности и пространственной компоновки подсистем масштабы моделей возрастают в несколько раз. Увеличение масштаба исследуемых подсистем приводит к дальнейшему увеличению состояний подсистем.

В результате исследования модели ППР по повышению эффективности эксплуатации диагностируемых ФВВП судовых СТС определена степень влияния каждого элемента системы на вероятность потери работоспособности и риск отказов системы.

Из ретроспективного анализа результатов исследований при моделировании СЭУ выявляются элементы, влияющие на работоспособность системы. При исследовании аварийных ситуаций, анализе происшествий в СТС, главной целью является определение причины аварии.

Выполненные исследования позволяют получить алгоритмическое и методическое обеспечение принятия обоснованных решений на этапе эксплуатации СЭУ с учетом влияния случайных воздействий. Используемый алгоритм поиска неисправностей в системе СЭУ обеспечивает:

- нахождение критических в техническом отношении подсистем на всех уровнях системы СЭУ, обслуживание которых необходимо выполнить незамедлительно;
 - оптимизацию времени поиска неисправностей.
- Использование разработанного метода и модели ППР при поиске причин отказов элементов диагностируемых ФВВП судовых СТС позволяет:
- контролировать значения риска отказов элементов системы при поступлении информации об отказах в подсистемах;
 - прогнозировать значение риска отказов элементов систем с целью выбора стратегии ее восстановления;
 - поддерживать принятие решений при поиске причин отказов элементов системы;
 - обеспечить экономический эффект за счет увеличения сроков эксплуатации систем и снижения затрат на их ремонт при сохранении заданного уровня их надежности.

7. Выводы

Место в иерархии и топологии элементов ФВВП судовых СТС определено по характеристикам используемых системами энергетических, веществен-

ных и информационных ресурсов в разработанном методе оценки и прогнозирования технического состояния СТС.

Наиболее уязвимые элементы ФВВП судовых СТС найдены при учете их весовых значений в системах, получаемых когнитивным имитационным и нечетким моделированием.

Элементы СТС, склонные к отказам, определены заблаговременным их выявлением моделированием процессов поддержки принятия решений при поиске причин отказов.

Стратегия восстановления элементов ФВВП судовых СТС с поддержкой принятия решений при поиске причин их отказов основана на прогнозе изменения вероятности потери работоспособности и риска отказов элементов.

Полученные результаты обеспечивают решение поставленных обоснованных задач научно-прикладной проблемы – разработка метода оценки и прогнозирования технического состояния ФВВП судовых СТС в условиях непредсказуемых экстремальных и техногенных воздействий.

Литература

1. Вычужанин, В. В. Технические риски сложных комплексов функционально взаимосвязанных структурных компонентов судовых энергетических установок [Текст]: сб. науч. пр. / В. В. Вычужанин, Н. Д. Рудниченко // Вісник Одеського національного морського університету. – 2014. – № 2. – С. 68–77.
2. ISO 13381-1:2015 Condition monitoring and diagnostics of machines – Prognostics – Part 1: General guidelines [Text]. – Enter. 2015-03-01. – 2015. – 21 p.
3. Вычужанин, В. В. Информационное обеспечение дистанционной оценки рисков сложных технических систем [Текст] / В. В. Вычужанин, Н. О. Шибяева // Інформатика та математичні методи в моделюванні. – 2016. – № 2. – С. 133–141.
4. IEC 60812. Analysis techniques for system reliability – Procedure for failure mode and effects analysis (FMEA) [Text]. – Enter. 2006-04-05. – 2006. – 11 p.
5. Вычужанин, В. В. Оценка структурного и функционального рисков сложных технических систем [Текст] / В. В. Вычужанин, Н. Д. Рудниченко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 2. – С. 18–22. doi: 10.15587/1729-4061.2014.19846
6. Рудницкий, В. И. Информационное обеспечение для управления надежностью судового оборудования [Текст] / В. И. Рудницкий, А. В. Рудницкий, В. С. Виноградов // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева. – 2011. – № 2. – С. 147–154.
7. Медведев, В. В. Использование прогноза и оценки рисков при проектировании судовых энергетических установок и их элементов [Текст] / В. В. Медведев // Судостроение. – 2008. – № 6. – С. 159–164.
8. Beetz, M. Cognitive technical systems—what is the role of artificial intelligence? [Text] / M. Beetz, M. Buss, D. Wollherr. – Lecture Notes in Computer Science, 2007. – P. 19–42. doi: 10.1007/978-3-540-74565-5_3
9. Schwenk, C. R. The cognitive perspective on strategic decision making [Text] / C. R. Schwenk // Journal of Management Studies. – 1988. – Vol. 25, Issue 1. – P. 41–55. doi: 10.1111/j.1467-6486.1988.tb00021.x
10. Wulan, M. A fuzzy logic based system for risk analysis and evaluation within enterprise collaborations [Text] / M. Wulan, D. Petrovic // Computers in Industry. – 2012. – Vol. 63, Issue 8. – P. 739–748. doi: 10.1016/j.compind.2012.08.012
11. Штовба, М. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB [Текст] / М. Д. Штовба. – СПб.: Горячая линия–Телеком, 2007. – 288 с.
12. Jensen, F. V. Bayesian Networks and Decision Graphs [Text] / F. V. Jensen, T. D. Nielsen. – Berlin: Springer, 2007. – 457 p. doi: 10.1007/978-0-387-68282-2
13. Дорожко, И. В. Оценка надежности структурно сложных технических комплексов с помощью моделей байесовских сетей доверия в среде GeNIe [Текст] / И. В. Дорожко, А. Г. Тарасов, А. М. Барановский // Intellectual Technologies on Transport. – 2015. – № 3. – С. 36–45.
14. ISO 13379- 2:2015-04 Condition monitoring and diagnostics of machines – General guidelines on data interpretation and diagnostics techniques [Text]. – Enter. 2015-03-01, 2015. – 21 p.