

УДК 629.5.067
В 92

МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ЖИВУЧЕСТИ СУДОВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В. В. Вычужанин, д-р. техн. наук, доц.;

В. Д. Бойко, ст. преподаватель

Одесский национальный морской университет, г. Одесса

Аннотация. Предложена разработанная методика оценки живучести судовых технических систем, позволяющая получать комплексную оценку живучести системы с точки зрения ее структурной уязвимости и функциональности. Выработан математический аппарат для моделирования распространения внешних воздействий по структуре системы.

Ключевые слова: живучесть, судовая техническая система, комплекс, когнитивная модель.

Анотація. Запропоновано розроблену методику оцінки живучості суднових технічних систем, яка дозволяє отримувати комплексну оцінку живучості системи з точки зору її структурної вразливості і функціональності. Вироблено математичний апарат для моделювання поширення зовнішніх впливів за структурою системи.

Ключові слова: живучість, суднова технічна система, комплекс, когнітивна модель.

Abstract. The developed evaluation method of marine engineering systems survivability is offered, which allows to obtain total system survivability evaluation in terms of its structural vulnerability and functionality. The mathematical instrument is developed for modeling external influences extension considering the structure of the system.

Keywords: survivability, marine engineering system, complex, cognitive model.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Работа современных судовых технических систем (СТС) неразрывно связана с функционированием их организационной и технической составляющих, влияющих на безопасную эксплуатацию судов и во многом определяющих их живучесть.

С помощью конструктивных решений на стадии проектирования и организационно-технических мероприятий при эксплуатации в той или иной мере решаются задачи по обеспечению живучести СТС [9, 10]. Однако соблюдение при проектировании и постройке нормативных требований не является достаточным условием для обеспечения живучести судов.

Само понятие живучести технических систем включает в себя структурную составляющую, исследование которой сводится в настоящее время только к выявлению уязвимых мест в топологии системы и определению степени их влияния на ее целостность. Поэтому поиск путей обеспечения живучести СТС требует постановки ряда научно-технических задач, связанных с ее оценкой.

Существующий спектр СТС характеризуется [3, 7] относительным разнообразием используемого оборудования в зависимости от типа судна; различной степенью износа компонентов СТС, работающих в одном комплексе; разнообразием показателей живучести систем; динамическим, «подвижным», характером изменения компонентов и их характеристик в модели оценки живучести. Выбор показателей при оценке живучести должен удовлетворять требованиям соответствия их смыслового содержания определению живучести, обеспечению системности исследований, доступности моделирования и расчетов, чувствитель-

ности к манипуляциям на уровне характеристик. Разработка модели оценки живучести может опираться на графоаналитическую объектно-ориентированную базу данных, в которой отдельные элементы СТС — объекты, функционально-структурные связи которых представлены матрицами взаимосвязей, содержащими информацию о взаимосвязях объектов модели, событий и связанных с ними протоколов и процедур.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Анализ литературных источников [8, 11, 12] показал, что динамизм технической системы обуславливает модульный характер модели оценки живучести, учитывающей изменения в реальной структуре СТС. Авторы особое значение уделяют оценке живучести систем с точки зрения структуры ее построения и достоверно определяют ее показатели.

В ходе исследований, результаты которых приведены в работах [2, 5, 6], детально рассмотрены подходы к оценке и управлению свойством живучести систем, основанные на построении соответствующих логико-вероятностных моделей с использованием вероятностных и детерминированных показателей. Так, в [6] предложены методики, применимые для ассоциативных, ассоциативно-структурных и структурных систем с учетом их связности. Однако весомости действующих в системе взаимосвязей должного значения не придается. В работе [5] этот недостаток устранен, но в предлагаемой методике не предусматривается оценка степени способности системы в целом функционировать после повреждающих воздействий на ее элементы. Методика,

предложенная в [2], направлена на оценку живучести систем с точки зрения функциональности с учетом иерархических взаимосвязей. Недостатком является то, что структурный аспект живучести представлен только одним видом взаимосвязей, к тому же без учета их значимости.

Таким образом, можно считать, что в теории живучести не обозначен устоявшийся методологический подход, позволяющий решать задачи по разработке моделей оценки живучести судовых технических систем с точки зрения их структурной уязвимости и функциональности с учетом значимости существующих в системе взаимосвязей.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ — разработка модели взаимодействия элементов системы оценки живучести судовых технических систем.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

С целью обеспечения гибкости используемой виртуальной когнитивной модели судна для оценки живучести его технических систем разработана объектно-ориентированная модель, в которой каждый компонент представлен относительно автономным объектом. Каждый из объектов модели представляет собой структуру данных, содержащую индивидуальные характеристики элемента СТС, а также данные, отражающие его функционально-структурные связи с другими элементами модели. Взаимодействие объектов в модели осуществляется с помощью обмена данными в момент события, отражающего происходящие изменения в одном или нескольких объектах. При моделировании технического комплекса его характеристики отражают обобщенное поведение и воздействия на смежные, связанные технические системы. Объект модели может находиться в двух («исправен», «неисправен») и более состояниях (промежуточные значения указывают на частичную исправность объекта и/или ее оценку в безразмерном масштабе).

К индивидуальным характеристикам объекта относятся:

- дескриптор объекта D , являющийся его идентификатором в системе;
- состояние S , представленное в виде вектора состояний объекта S_0, \dots, S_n (исправное, неисправное, промежуточное);
- оценка вероятности смены состояния объекта в ближайший промежуток времени t — P_0, \dots, P_n ;
- время эксплуатации объекта T к текущему моменту времени, выраженное в календарных или в непосредственно рабочих часах;
- время последнего тестирования узла на работоспособность T_j ;
- оценка работоспособности узла F_0, \dots, F_n для каждого из его состояний S_0, \dots, S_n соответственно, представленного в виде вектора;

– вектор оценки ресурса C восстановления системы из текущего состояния до «нулевого» (исправного состояния).

Функционально-структурные связи модели характеризуются вектором исходящих связей A , являющимся ассоциативным массивом; вектором входящих связей I , являющимся ассоциативным массивом; местом объекта в иерархии системы L , отражающим связь, характер и взаимодействие объекта с другими объектами иерархии, его воздействие на другие объекты и на весь комплекс СТС в целом. Веса связей выбираются на основе методов статистического прогнозирования или на основе экспертной оценки. В качестве критериев для формализации значений работоспособности и весов входящих и исходящих связей используются результаты исследований с применением метода экспертной оценки.

Кроме объектов, модель включает в себя набор матриц взаимосвязей (МВ), каждая из которых отражает взаимосвязь между объектами системы для определенного типа связи. В самом общем случае, при учете только статистического взаимодействия объектов СТС, из всего массива МВ используется главная матрица взаимосвязей, отражающая влияние и взаимосвязь по работоспособности элементов. Работа модели СТС базируется на концепции событий, воздействующих на объекты модели и каким-либо образом изменяющих их и их характеристики. Модель не требует, чтобы одновременно в оценке живучести участвовали все параметры, а благодаря объектно-ориентированному построению может включать в себя автоматический сбор информации, отражающей состояние системы.

Представим индивидуальные характеристики объектов модели живучести СТС следующим образом. Вектор состояний объекта S_0, \dots, S_n характеризует объект n состояниями, каждое из которых отражает эволюцию исправности узла. В соответствии с [6] за S_0 принимается абсолютно исправное состояние узла, S_n — состояние неисправности узла, а набор состояний S_i для $i=1, \dots, n$ отражает переход узла ко все менее исправным состояниям. В простейшем случае у узла два состояния: $n=0$ — узел исправен и $n=1$ — узел неисправен.

Оценка вероятности смены состояния объекта P_i указывает на вероятность перехода объекта в состояние S_i на промежутке времени t .

Таким образом, для текущего состояния системы S_c можно записать

$$\left\{ \begin{array}{l} P_0 = P(S_c \rightarrow S_0) \\ P_1 = P(S_c \rightarrow S_1) \\ \dots \\ P_n = P(S_c \rightarrow S_n) \end{array} \right\} \quad (1)$$

Вектор состояний P_0, \dots, P_n в (1) может быть использован для описания и прогнозирования поведения объекта на промежутке времени t . Время эксплуатации объекта T и время последнего тестирования объекта

на работоспособность T_p , как и в [1], используются при расчете амортизации объекта, а также при учете в диагностиках системы контроля ее компонентов. Оценка работоспособности объекта F в общем случае выражает вероятность выполнения им поставленной задачи за заданное время t и определяется как

$$F_i = \frac{P_i^t}{P_0^t} = \frac{P(S_i | \Delta t)}{P(S_0 | \Delta t)}. \quad (2)$$

Тогда оценка (2) работоспособности объекта F для n возможных состояний объекта будет:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_1 = \frac{P_1^t}{P_0^t} = \frac{P(S_1 | \Delta t)}{P(S_0 | \Delta t)} \\ F_2 = \frac{P_2^t}{P_0^t} = \frac{P(S_2 | \Delta t)}{P(S_0 | \Delta t)} \\ \dots \\ F_n = \frac{P_n^t}{P_0^t} = \frac{P(S_n | \Delta t)}{P(S_0 | \Delta t)} \end{array} \right\}. \quad (3)$$

Оценка работоспособности (3) является качественной характеристикой, которая также может быть получена на основе экспертной оценки, отражающей отношение вероятности выполнения целевой работы в состоянии S_0 к вероятности выполнения работы в S_i .

Ожидаемая работоспособность на участке времени t оценивается математическим ожиданием работоспособности объекта

$$F_\Sigma = \sum_{i=0}^n f_i p_i, \quad (4)$$

где f_i — работоспособность объекта в состоянии i ; p_i — вероятность перехода в состоянии i .

В случае двух состояний объекта вектор (4) имеет значения $F_0 = 1$ (объект работоспособен) и $F_0 = 0$ (объект неработоспособен):

$$F_0 = \frac{P(S_0 | \Delta t)}{P(S_0 | \Delta t)} = \frac{1}{1} = 1;$$

$$F_1 = \frac{P(S_1 | \Delta t)}{P(S_0 | \Delta t)} = \frac{0}{1} = 0.$$

Оценка ресурса C_i является оценкой затрат на восстановление объекта из текущего состояния до исправного состояния:

$$C_i = W(C_i \rightarrow C_0). \quad (5)$$

Для полностью исправного объекта (5) имеет вид

$$C_0 = W(C_0 \rightarrow C_0) = 0.$$

Единицами оценки могут быть как временные (человеко-часы), так и финансовые затраты. Общая оценка работ по объекту является математическим ожиданием затрат ресурсов на восстановление объекта

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

где c_i — работоспособность узла в состоянии i .

На примере импульсного моделирования продемонстрируем работу системы поддержки принятия решений для возможных событий и сценариев. Моделирование импульсного воздействия проведено с помощью программы, написанной на языке Python с использованием средств визуализации graphviz.

Надежности элементов системы, приписываемых соответствующим вершинам орграфа, недостаточно для полной оценки характера воздействия на систему неблагоприятных факторов и поражающих воздействий. Одним из путей оценки живучести системы является моделирование воздействия на нее, приводящее к изменению весов вершин графа по импульсному правилу. Импульсное воздействие определяется импульсным вектором Imp вида: $imp_j(t)$, $j=1, 2, \dots, n$ для дискретного времени $t=0, 1, 2, 3, \dots$, которое задается соотношением вида

$$imp_j(t) = w_j(t) / w_j(t-1).$$

Это соотношение задает изменение весов орграфа и тем самым определяет динамику распространения внешних воздействий по системе.

Единичное импульсное воздействие на систему с помощью вектора Imp вида

$$Imp(0) = (imp_1 = 1, imp_2 = 1, \dots, imp_i = I, \dots, imp_n = 1)$$

моделирует поражение объекта номер i импульсом силы I .

Рассмотрим упрощенную модель системы электропитания рефрижераторного судна (рис. 1), поражаемую единичным импульсным воздействием на один из ее элементов. Вектор воздействия $Imp()$ играет роль поражающего фактора. Система содержит три основные шины питания, основные коммутаторы ($S1-S9$), предохранители ($B1-B3$), главный щит электропитания (W), холодильные установки ($Ref.1, Ref.2$), основные и побочные потребители электроэнергии ($P1-P3$) и питается от двух дизельных генераторов ($G1, G2$) основного генератора ($S.Gen$).

В зависимости от судовых энергопотребностей, режима маневрирования система электропитания потребляет энергию от основного генератора, одного из дизельных генераторов, двух генераторов, основного генератора и дизельных генераторов отдельно, от портовых систем через коммутатор $S7$.

Схема (см. рис. 1) в обобщенном виде представлена на рис. 2 ориентированным графом (орграфом).

Рассмотрим первый режим работы системы электропитания судовых систем от основного генератора $G0$ для случая возникновения импульсного действия на объект $B1$. Пусть изначально все элементы системы полностью исправны (находятся в состоянии S_0 и имеют работоспособность $F_0 = 1$). Для упрощения модели примем коэффициент взаимодействия между объектами везде одинаковым и равным 1,6. Состояния

объектов системы после пошагового моделирования распространения импульса приведены в табл. 1.

Распространению импульса соответствует графическое отображение последовательностью диаграмм (рис. 3–6). Частично пораженные узлы выделены пунктиром.

По табл. 1 и диаграммам рис. 4–6 можно проследить развитие процесса поражения системы энергоснабжения. Импульсная помеха вывела из строя объект *B1* и распространилась на объекты *S1*, *S2*, *S3* и *W0*, существенно повредив их (оценка работоспособности упала до 0,5), а также опосредованно повлияла на работоспособность объектов *R1*, *R2*, *M0*, *B2*, *B3*. На следующем шаге — объекты *S7*, *S8*, *S9*, *P3*.

Далее рассмотрим поражение частично исправной системы — системы, в которой узел *W0* работоспособен только частично ($F_{W0}=0.5$).

Частичная неисправность узла *W0* привела к выходу его из строя уже на начальной стадии распространения помехи по системе энергоснабжения.

Из приведенных диаграмм и табл. 1, 2 следует, что в конфигурации схемы питания системы от главного генератора ключевыми элементами системы электропитания являются объекты *W0*, *B1–B3*, живучести которых следует уделить наибольшее внимание.

При исследовании поведения системы в конфигурации питания сети от вспомогательных генераторов *G1*, *G2* при импульсном воздействии по узлу *B1* были получены результаты, отраженные на диаграммах рис. 7, 8. Состояние объектов системы после пошагового моделирования распространения импульса приведено в табл. 3.

Из диаграммы рис. 8 следует, что даже при частичной неисправности объекта *W0* поражающее влияние объекта *B1* на него не распространится. Таким образом, хотя объекты *W0*, *B1–B3* по-прежнему играют главную роль в системе электропитания,

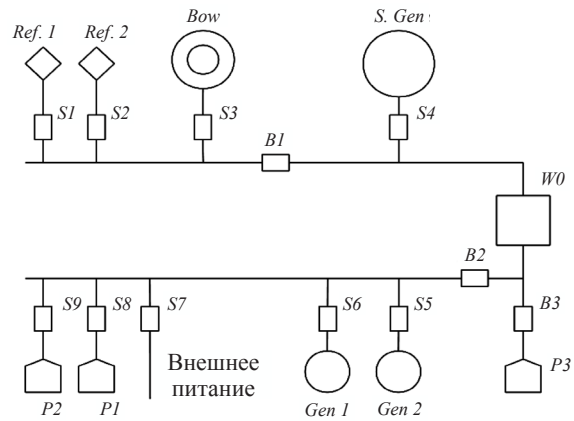


Рис. 1. Упрощенная схема системы электропитания рефрижераторного судна

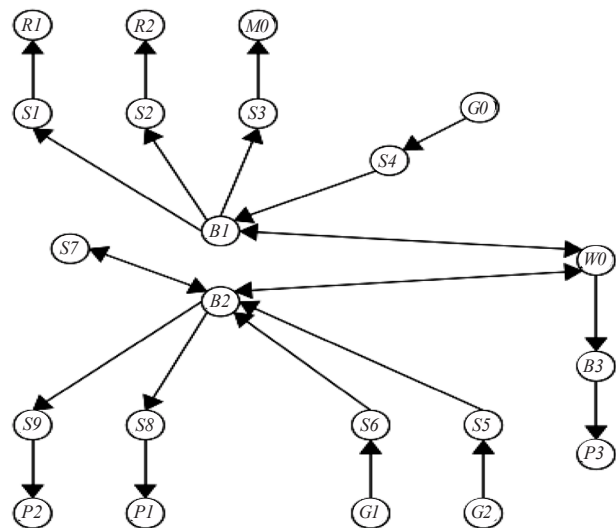


Рис. 2. Оргграф системы электропитания: *R1*, *R2* — рефрижераторные установки; *M0* — маневровый привод; *W0* — главный электроцит

Таблица 1. Импульсное поражение узла *B1*

<i>T</i>	<i>B1</i>	<i>B2</i>	<i>B3</i>	<i>G0</i>	<i>M0</i>	<i>P1</i>	<i>P2</i>	<i>P3</i>	<i>R1</i>	<i>R2</i>	<i>S1</i>	<i>S2</i>	<i>S3</i>	<i>S4</i>	<i>S7</i>	<i>S8</i>	<i>S9</i>	<i>W0</i>
0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1	0,40	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2	0,40	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,52	0,52	0,52	1,00	1,00	1,00	1,00	0,52
3	0,40	0,68	0,68	1,00	0,68	1,00	1,00	1,00	0,68	0,68	0,52	0,52	0,52	1,00	1,00	1,00	1,00	0,52
4	0,40	0,68	0,68	1,00	0,68	1,00	1,00	0,88	0,68	0,68	0,52	0,52	0,52	1,00	0,88	0,88	0,88	0,52
5	0,40	0,68	0,68	1,00	0,68	1,00	1,00	0,88	0,68	0,68	0,52	0,52	0,52	1,00	0,88	0,88	0,88	0,52

Таблица 2. Поражение системы с частично поврежденным узлом *W0*

<i>T</i>	<i>B1</i>	<i>B2</i>	<i>B3</i>	<i>G0</i>	<i>M0</i>	<i>P1</i>	<i>P2</i>	<i>P3</i>	<i>R1</i>	<i>R2</i>	<i>S1</i>	<i>S2</i>	<i>S3</i>	<i>S4</i>	<i>S7</i>	<i>S8</i>	<i>S9</i>	<i>W0</i>
0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,50
1	0,40	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,50
2	0,40	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,64	0,64	0,64	1,00	1,00	1,00	1,00	0,32

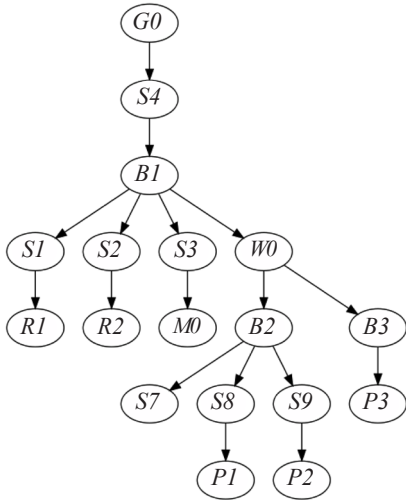


Рис. 3. Орграф системи електропитання в режимі роботи основного генератора

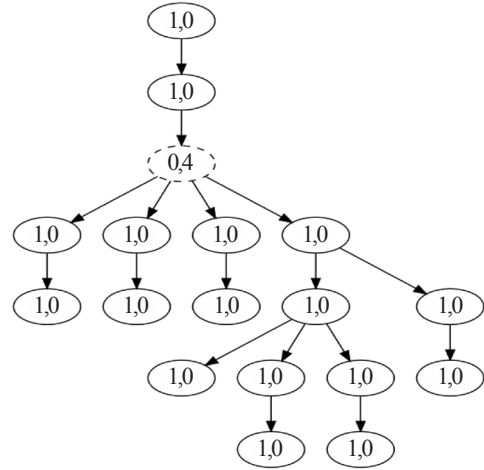


Рис. 4. Орграф для моменту часу $T=1$

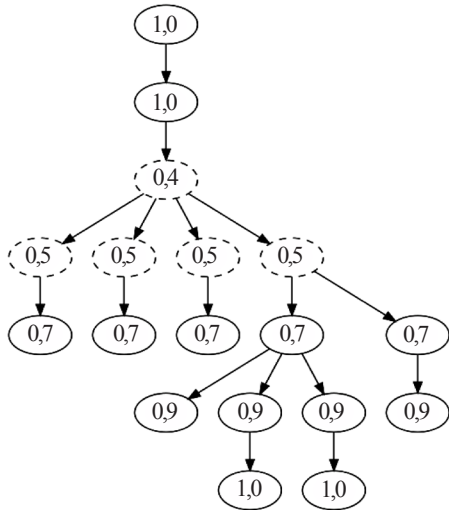


Рис. 5. Состояние графа на момент времени $T=5$

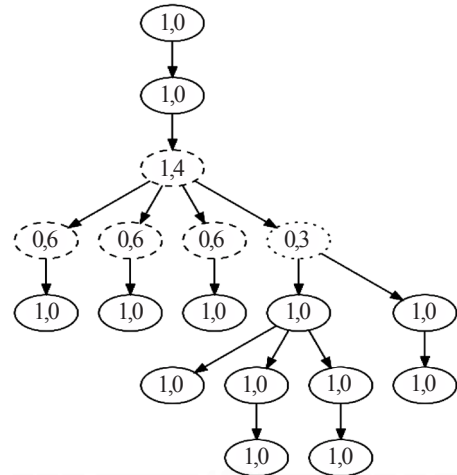


Рис. 6. Состояние графа при поражении узла $W0$ в момент времени $T=3$

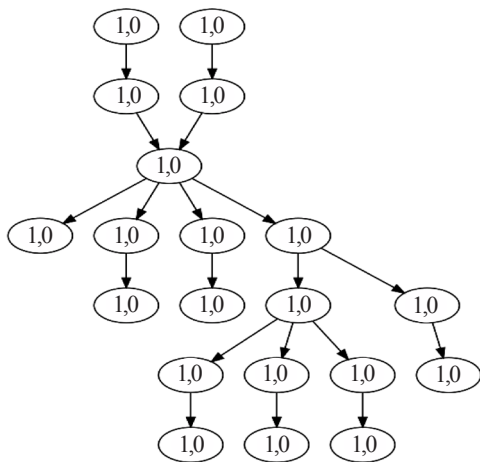


Рис. 7. Начальная конфигурация системы в варианте 2

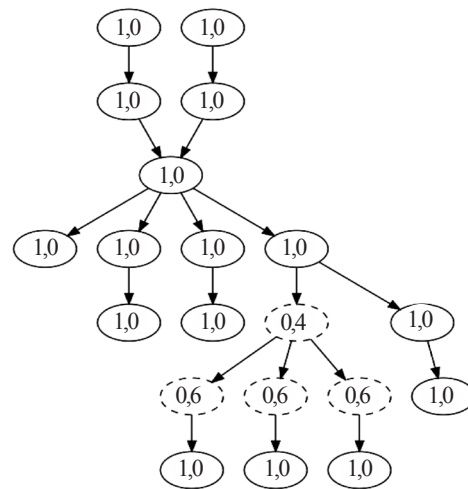


Рис. 8. Конечная конфигурация системы при поражении узла $B1$

Таблица 3. Поражение узла *B1* в конфигурации 2

<i>T</i>	<i>B1</i>	<i>B2</i>	<i>B3</i>	<i>G1</i>	<i>G2</i>	<i>M0</i>	<i>P1</i>	<i>P2</i>	<i>P3</i>	<i>R1</i>	<i>R2</i>	<i>S1</i>	<i>S2</i>	<i>S3</i>	<i>S5</i>	<i>S6</i>	<i>S7</i>	<i>S8</i>	<i>S9</i>	<i>W0</i>	
0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
1	0,4	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
2	0,4	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,6	0,6	0,6	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
3	0,4	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,6	0,6	0,6	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
4	0,4	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,6	0,6	0,6	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

обеспечение живучести объектов *B1* и *B3* является менее приоритетным, чем объектов *W0* и *B2*.

Аналогичным образом конфигурация системы и приоритеты ее объектов будут меняться в зависимости от режима работы системы электроснабжения, причем каждая новая конфигурация будет приводить к изменению приоритетов во взаимодействии объектов системы и общей реакции системы на поражающий фактор. Соответственно должна изменяться оценка живучести СТС.

ВЫВОДЫ

1. Из полученных результатов следует, что модель оценки живучести СТС имеет объектно-ориентированный характер.

2. В когнитивной модели СТС необходимо избыточное резервирование полей данных, поскольку в различных конфигурациях системы могут возникать различные по характеру и функционально-структурному принципу связи. Полнота учета данных связей зависит от возможностей когнитивного анализа системы, однако даже на уровне относительно примитивных моделей можно добиться практически полезных результатов.

3. Разработанная модель оценки живучести судовых технических систем позволяет: определить значимость действующих в системе взаимосвязей; моделировать распространение внешних воздействий по структуре системы; получить комплексную оценку живучести исследуемых систем с точки зрения их структурной уязвимости.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Войтецкий, В.** Комплексные системы автоматизированного управления борьбой за живучесть [Текст] / В. Войтецкий, В. Корчанов, М. Наумов // Военный парад. — 1998. — Т. 03–04.
- [2] **Казаков, В. И.** Основы теории топогеодезического обеспечения боевых действий войск [Текст] / В. И. Казаков. — М. : ВИА, 1977. — Разд. 1.
- [3] **Калявин, В.** Организация систем диагностирования судового оборудования [Текст] / В. Калявин, А. Малышев, А. Мозгалевский. — Л. : Судостроение, 1991. — 168 с.
- [4] **Ковтун, Л. И.** Методы имитационного моделирования и ситуационного анализа управленческих решений при авариях на кораблях на основе лингвистического описания процессов, алгебры высказываний и нейронных сетей [Текст] / Л. И. Ковтун, Н. А. Шарков // Матер. ИММОД-2009. — 2009. — С. 139–145.
- [5] **Кочкаров, А. А.** Обеспечение стойкости сложных систем. Структурные аспекты [Текст] / А. А. Кочкаров. — М. : ИПИМ им. М. В. Келдыша РАН, 2005.
- [6] **Рябинин, И. А.** Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем [Текст] / И. А. Рябинин, Г. Н. Черкесов. — М. : Радио и связь, 1981. — 264 с.
- [7] **Стекольников, Ю. И.** Живучесть систем [Текст] / Ю. И. Стекольников. — СПб. : Политехника, 2002. — 155 с.
- [8] **Шумилов, Р. М.** Система технического состояния судна — основа управления технической эксплуатацией морского флота [Текст] / Р. М. Шумилов. — М. : В/О «Мортехинформреклама», 1987.
- [9] ISO. 31000:2009 Risk management — Principles and guidelines [Электронный ресурс]. — Geneva : International Organization for Standardization, 2009. — Режим доступа: www.iso.org.
- [10] BSI. BS EN ISO 9001:2008 [Text] / Quality management systems. — Requirements, 2008.
- [11] **Wang, J.** Technology and Safety of Marine Systems (Ocean Engineering Series) [Text] / J. Wang // Elsevier Science. — 2003. — Vol. 1.
- [12] **Wang, J.** Formal safety assessment of containerships [Text] / J. Wang, P. Foinikis // Marine Policy. — 2001. — Т. 25. — Р. 143–157.

© В. В. Вычужанин, В. Д. Бойко

Надійшла до редколегії 15.05.12

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК
д-р техн. наук, проф. *С. І. Сербін*
канд. техн. наук, проф. *В. М. Горбов*

Статтю розміщено у Віснику НУК №3, 2012