

УДК 629.5.067: 656.611.052

В. В. Вычужанин,
д-р техн. наук, профессор,
Одесский национальный
морской университет;

В. Д. Бойко,
ст. преподаватель,
Одесский национальный
морской университет;

Н. Д. Рудниченко,
аспирант,
Одесский национальный
морской университет

МЕТОД ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ СОСТОЯНИЯ МЕЖАГРЕГАТНЫХ СВЯЗЕЙ НА СТРУКТУРНУЮ ЖИВУЧЕСТЬ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

METHOD OF ESTIMATING THE IMPACT ON THE STATE OF INTER-AGGREGATE BONDS ON STRUCTURAL ROBUSTNESS OF COMPLEX ENGINEERING SYSTEMS

В статье рассматривается разработка и обоснование принципов, критериев и метода оценки влияния состояния межагрегатных связей на структурную живучесть сложной технической системы, проектирование и реализация алгоритма оценки живучести на базе разработанных принципов, критериев и метода, описание программных аспектов реализации метода и определение возможных дальнейших путей развития метода оценки живучести сложных технических систем.

The article discusses the development and substantiation of principles, criteria and method for assessing the impact of the state of inter-aggregate bonds for structural survivability of complex technical system, the design and implementation of the algorithm determining the survivability based on the developed principles, criteria and method, a description of the programmatic aspects of the method and identifies possible ways of further development of methods to evaluate the survivability of complex technical systems.

*Ключевые слова: живучесть, межагрегатные связи, графы, сложные технические системы.
Key words: survivability, inter-aggregate communication, graphs, complex technical systems.*

Т РАДИЦИОННО проектировщиками судно рассматривается как сложная система с многоуровневой структурой, состоящей из взаимодействующих между собой и внешней средой агрегатов (подсистемы и соответствующие связи между ними) [1, с. 12–15]. То есть судно можно представить в двух различных формах: в виде материальной системы с четко выраженными подсистемами и реальными связями между ними; в виде системы, состоящей из условных функциональных подсистем, предназначенных для выполнения определенных функций, в которых системообразующие связи не существуют. Для последней формы представления характерной является роль управляющего оператора — человека. Такой подход позволяет исследовать процесс обеспечения живучести судна после его аварийного повреждения.

Анализ литературных источников [1; 2; 3, с. 20–22; 4, с. 173–175] показывает, что живучесть судна во многом зависит от надежности судовых подсистем, а также от эффективных действий экипажа при борьбе за его живучесть. Ввиду того, что привычные методы резервирования всех агрегатов для повышения надежности и живучести судовых технических систем (СТС) не всегда возможно реализовать из-за ограниченного судового пространства и высокой стоимости обору-

дования, актуальным является определение наиболее уязвимых (критичных) агрегатов СТС в различных аварийных сценариях.

Для обеспечения живучести СТС их необходимо рассматривать во взаимосвязи друг с другом, с учетом количественного и качественного информационно-энергетического взаимодействия. Такой подход позволяет оптимизировать время поиска возникшей неисправности в реальной аварийной ситуации и выявить взаимозависимость всех агрегатов технической системы от конкретного критичного агрегата.

Для оценки живучести взаимозависимых СТС актуальным является разработка и исследование математических моделей, учитывающих реальную технологическую взаимозависимость технических систем судна. Для успешного подобного исследования может быть использовано когнитивно-имитационное моделирование технических систем (ТС) [3; 4].

Однако когнитивно-имитационные модели ТС, предложенные в [3; 4], рассматривают только влияние состояния агрегатов на общую живучесть системы. При этом не учитываются технологические связи и коммуникации между агрегатами ТС, которые оказывают существенное влияние на живучесть системы в целом [5, с. 113–117].

Рассмотрим сложную СТС, представляющую собой либо функциональный комплекс СТС, либо взаимосвязь этих комплексов. Агрегаты СТС взаимодействуют между собой по межагрегатным связям (МС) — трубопроводам, линиям передачи энергии и информации и т. д., которые передают энергию, информацию либо вещество [6, с. 40–43].

Функциональное состояние МС (исправность, надежность, работоспособность) и структурные аспекты построения МС (структура, топология, взаимосвязь со смежными системами) непосредственно сказываются на живучести СТС. Поэтому при разработке критериев оценки живучести СТС следует выделить две основные категории живучести — структурные (рассматривающие влияние на общую живучесть структурных аспектов построения МС) и функциональные (рассматривающие влияние на общую живучесть функционального состояния МС). В качестве оценки влияния состояния МС на обе категории критериев живучести используем понятие угрозы — безразмерной немасштабной оценки «важности» («уязвимости») состояния МС на структурную либо функциональную живучесть системы в целом.

Представим СТС в виде связанного, цветного, ориентированного графа (орграфа), в котором направленные дуги (ребра графа) выполняют функцию МС. Каждому агрегату СТС соответствует узел орграфа, каждой МС — направленная дуга, направление которой совпадает с направлением передачи энергии–вещества–информации (ЭВИ), а цвет дуги соответствует характеру связи.

Основной задачей разработанного метода является оценка влияния состояния отдельной МС на общую функциональную и структурную живучесть СТС, то есть оценка функциональных и структурных угроз МС. По аналогии со структурной и функциональной угрозами агрегатов СТС используем для оценки степени угроз коэффициенты структурной и функциональной угроз, численно выражающие степень этих угроз на интервале (0–1). Для значения коэффициента 0 состояние МС не сказывается на живучести СТС, а для значения 1 живучесть СТС определяется состоянием МС.

Рассмотрим граф, соответствующий одному цвету дуг (одна из составляющих ЭВИ), $G = (V, E)$, моделирующий СТС, состоящую из набора узлов и соединяющих их дуг:

$$V = (v_i), i = 1, \dots, n,$$

$$E = (e_{ij}), i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, n,$$

где V — множество узлов системы;
 E — множество направленных дуг системы;
 v_i — узел с номером i ;
 e_{ij} — ребро графа, направленное от узла v_i к узлу v_j ;
 n — количество узлов в орграфе.

Узлы (вершины) орграфа моделируют состояние агрегатов, причем вес каждого узла v_i соответствует его функциональному состоянию. Направленные дуги (ребра) орграфа моделируют МС, причем вес каждой дуги v_{ij} соответствует ее функциональному состоянию, а направление дуги обозначается порядком индексов i и j . Таким образом, дуга e_{ij} направлена от i -го узла v_i к j -му узлу v_j .

В простом случае, когда рассматриваются только дискретные состояния узлов и дуг (по бинарной шкале значений «исправен–не исправен») для момента дискретного времени $t = 0$, все значения весов узлов и дуг равны единице:

$$v_i = 1, i = 1, \dots, n,$$

$$e_{ij} = 1, i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, n.$$

Для оценки структурной угрозы и вычисления коэффициента структурной угрозы используется метод поражающего моделирующего импульса (ПМИ), используемый для решения задачи оценки структурных угроз МС. ПМИ моделирует поражение отдельного ребра и задается вектором

$$I(t) = (imp_{ij}(t)), i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, n, t = t_1, \dots, t_d,$$

где $imp_{ij}(t)$ — набор значений модулей ПМИ, соответствующих направленным дугам орграфа;

t — момент дискретного времени;

t_1 — начальный момент дискретного времени;

t_d — конечный момент дискретного времени.

В каждый из моментов дискретного времени t вектор модулей ПМИ $I(t)$ задается таким образом, что для каждой дуги e_{ij} в момент дискретного времени t_z существует $imp_{ij}(t_z)$, равный нулю, если на момент t_z импульс не проходит по дуге, и единице, если импульс поражает дугу.

На начальном этапе исследований производится выбор поражаемой дуги e_{ab} (моделируется поражение МС между агрегатами с номерами a и b каким-либо внешним фактором). Далее создается вектор $I(t)$, в котором для момента дискретного времени $t = 1$ модули ПМИ имеют следующие значения:

$$imp_{ij}(t = 1) = 1, \text{ для } i = a, j = b,$$

$$imp_{ij}(t = 1) = 0, \text{ для } i \neq a, j \neq b,$$

ПМИ последовательно распространяется по орграфу, выводя из строя смежные узлы и дуги на каждом очередном шаге дискретного времени. При этом дуга и узел меняют свое значение с единицы («исправен») на нуль («не исправен»), а значения модулей вектора $I(t)$ отражают прохождение ПМИ по узлам на каждый дискретный момент времени вдоль направленных ребер графа. Импульсное воздействие ПМИ на дугу орграфа определяется рекуррентным соотношением вида

$$\frac{e_{ij}(t_n)}{e_{ij}(t_{n-1})} = 1 - imp_{ij}(t_n),$$

$$i = 1, 2, \dots, n,$$

$$j = 1, 2, \dots, n,$$

$$t = 0, 1, 2, 3,$$

где $e_{ij}(t)$ — значение веса (передаточный коэффициент) дуги e_{ij} в дискретный момент времени t .

При прохождении по дуге e_{ij} модули значений ПМИ будут связаны следующим соотношением для двух дискретных моментов времени t и $t + 1$:

$$imp_{ij}(t + 1) = imp_{ij}(t)e_{ij}(t).$$

Таким образом, при распространении по системе импульс ослабляется в зависимости от весов дуг орграфа СТС. В рассматриваемом случае веса дуг принимают бинарные значения (нуль либо единица) в зависимости от исправности дуги. С целью моделирования промежуточных состояний частичной исправности МС алгоритм ПМИ предусматривает использование широкого диапазона весов.

После прохождения по дуге соответствующее значение модуля ПМИ меняется на нулевое — как отработавшее по данной дуге. Критерием окончания действия ПМИ является нулевое значение суммы модулей $I(t)$ в момент времени t_d :

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n imp_{ij}(t_d) = 0.$$

Коэффициент структурной угрозы по связям (КСС) для заданной МС вычисляется как отношение пораженных связей системы ко всем связям системы при поражении рассматриваемой МС и беспрепятственном распространении импульса по системе.

Пусть после поражения МС e_{ij} распространяющимся импульсом будет поражено i_s связей, а общее количество связей в графе N_s , получим следующее выражение для коэффициента угрозы k_s :

$$k_{ss}(e_{ij}) = \frac{i_s}{N_s},$$

где i_s — число пораженных ПМИ связей;

N_s — общее количество связей в графе;

$k_{ss}(e_{ij})$ — коэффициент структурной угрозы по связям для узла e_{ij} .

Коэффициент структурной угрозы по агрегатам (КСА) для заданной МС вычисляется как отношение пораженных агрегатов системы ко всем агрегатам системы, при поражении рассматриваемой МС и беспрепятственном распространении импульса по системе.

Пусть после поражения МС e_{ij} распространяющимся импульсом будет поражено i_a узлов, моделирующих агрегаты СТС, а общее количество узлов в графе N_a . В результате получим следующее выражение для коэффициента угрозы k_s :

$$k_{sa}(e_{ij}) = \frac{i_a}{N_a},$$

где i_a — число пораженных ПМИ агрегатов;

N_a — общее количество агрегатов в графе;

$k_{sa}(e_{ij})$ — коэффициент структурной угрозы по связям для узла e_{ij} .

Рассмотрим применение разработанного метода на примере СТС, состоящей из 21 агрегата, связанных между собой сложными межагрегатными связями единого характера. На рис. 1 приведен граф обобщенной СТС, а на рис. 2 и 3 — конечные стадии поражения связей между узлами 1 и 5 и 2 и 6 соответственно. Вышедшие из строя связи графа обозначены пунктиром.

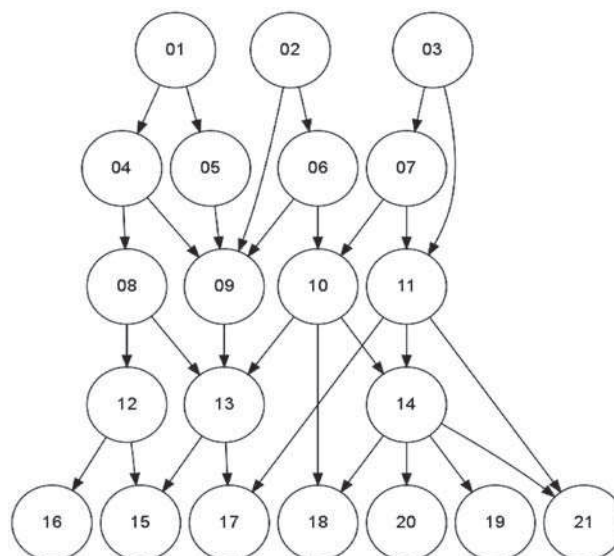


Рис. 1. Орграф обобщенной СТС

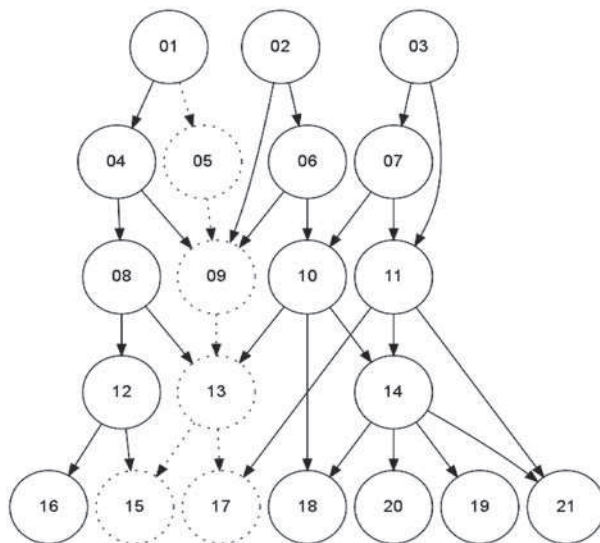


Рис. 2. Конечная стадия поражения МС между агрегатами 1 и 5 соответственно

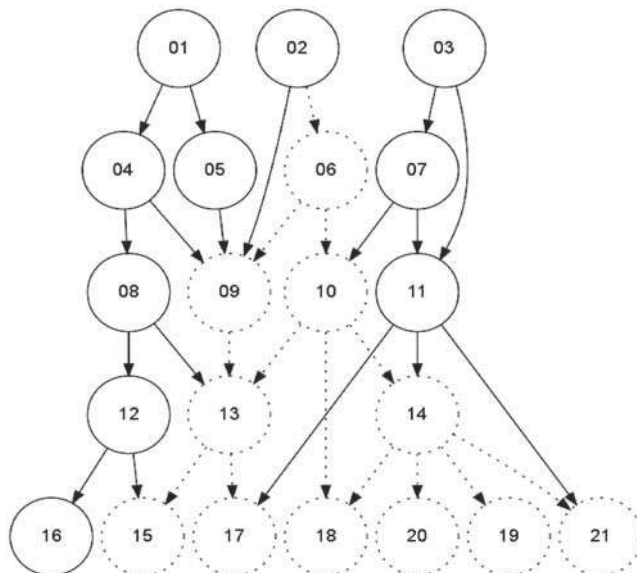


Рис. 3. Конечная стадия поражения МС между агрегатами 2 и 6 соответственно

Для случая поражения связи между агрегатами 1 и 5 установлено число пораженных связей $i_s = 5$, агрегатов $i_a = 5$. Для случая поражения связи между агрегатами 2 и 6 пораженные связи и агрегаты составят $i_s = 5$ и $i_a = 5$ соответственно. Общее число связей и агрегатов в системе $N_s = 17$ и $N_a = 21$. В результате значения КСС и КСА для первого и второго случаев:

$$k_{ss}(e_{1,5}) = \frac{i_s}{N_s} = \frac{5}{17} \approx 0.2941,$$

$$k_{sa}(e_{1,5}) = \frac{i_a}{N_a} = \frac{5}{21} \approx 0.2381,$$

$$k_{ss}(e_{2,6}) = \frac{i_s}{N_s} = \frac{12}{17} \approx 0.7059,$$

$$k_{sa}(e_{2,6}) = \frac{i_a}{N_a} = \frac{11}{21} \approx 0.5238.$$

Из приведенных оценок следует, что, несмотря на одинаковый уровень в иерархии СТС, связь между агрегатами 2 и 6 почти вдвое приоритетнее, чем связь между агрегатами 1 и 5.

Для реализации методики ПМИ для оценки структурных угроз МС был разработан алгоритм распространения ПМИ по связям СТС (рис. 4).



Рис.4. Алгоритм оценки структурных угроз МС СТС

В целях сокращения времени разработки программной реализации алгоритма оценки структурных угроз МС СТС, решения вопросов лицензирования и стоимости ПО были максимально задействованы сторонние утилиты, а также программное обеспечение с открытым исходным кодом. В качестве среды моделирования работы ПМИ выбран язык Python. Для автоматизации моделирования и экономии времени разработки задействованы утилиты GNU make и язык визуализации ggraphviz. В процессе моделирования с помощью программы sv.py считываются данные из файла в json-формате, на основании которых строится и оценивается модель орграфа СТС. Результатом работы программы являются файлы в форматах .dot (графические диаграммы прохождения ПМИ) и .csv (табличная информация о прохождении ПМИ по СТС).

Представление данных моделируемого графа осуществляется с помощью файла в формате JSON, в котором задаются исходные параметры моделируемой системы. В частности, определения вида узлов и связей для СТС (рис. 1) выглядят следующим образом:

```
{
...
«v»:
{
«01»:{«04»:1, «05»:1},
«02»:{«06»:1, «09»:1},
«03»:{«07»:1, «11»:1},
«04»:{«08»:1, «09»:1},
```

```

«05»:{«09»:1},
«06»:{«09»:1, «10»:1},
«07»:{«10»:1, «11»:1},
«08»:{«12»:1, «13»:1},
«09»:{«13»:1},
«10»:{«13»:1, «14»:1, «18»:1},
«11»:{«14»:1, «21»:1, «17»:1},
«12»:{«15»:1, «16»:1},
«13»:{«15»:1, «17»:1},
«14»:{«18»:1, «19»:1, «20»:1, «21»:1},
«15»:{},
«16»:{},
«17»:{},
«18»:{},
«19»:{},
«20»:{},
«21»:{}
},
...
}

```

Кроме узлов СТС и связей между ними, в файле задаются исходные данные, названия и веса узлов, название моделируемой системы и прочие служебные параметры. Это позволяет гибко изменять модель СТС, не меняя основного исходного кода программы.

Основная программа организована по модульному принципу и включает в себя основную часть (модуль main()), вспомогательные функции и модуль моделирования ПМИ. Набор вспомогательных функций содержит следующие функции: MakeEdge — генерирует список дуг графа и их весов, GetJson — выполняет анализ JSON-файла и строит на его основе оргграф СТС; AddToCsvFile — используется для сбора информации в csv-файлы; Impuls — моделирует прохождение ПМИ по оргграфу для заданной МС.

«Изоминкой» построения алгоритма является нумерация дуг оргграфа, которая осуществляется с помощью словарей (dictionary) языка Python, в которых в качестве ключа вхождения используется тип данных «кортеж» (tuple), состоящий из двух элементов — названий начального и конечного узла дуги. В частности, для оргграфа, приведенного на рис. 1, такой массив выглядит следующим образом:

```

{('01', '04'):1, ('01', '05'):1, ('02', '06'):1, ('02', '09'):1, ('03', '07'):1, ('03', '11'):1, ('04', '08'):1, ('04', '09'):1, ('05', '09'):1, ('06', '09'):1, ('06', '10'):1, ('07', '10'):1, ('07', '11'):1, ('08', '12'):1, ('08', '13'):1, ('09', '13'):1, ('10', '13'):1, ('10', '14'):1, ('10', '18'):1, ('11', '14'):1, ('11', '17'):1, ('11', '21'):1, ('12', '15'):1, ('12', '16'):1, ('13', '15'):1, ('13', '17'):1, ('14', '18'):1, ('14', '19'):1, ('14', '20'):1, ('14', '21'):1}

```

Такое представление облегчает формирование массива данных по дугам оргграфа и работу с ними, поскольку дает возможность организовывать списки дуг автоматизированно на основе исходной матрицы оргграфа, а также вести их обработку при моделировании прохождения ПМИ. В частности, упомянутая выше подпрограмма MakeEdge получается компактной, как по быстрдействию, так и по форме:

```

def MakeEdge(v,Vs,e):
    for i in Vs:
        if len(v[i]) > 0:
            ishod = v[i].keys()

```

```
ishod.sort()
for j in ishod:
    e[(i,j)] = v[i][j]
```

На вход этой программы подаются словари v и e , а также упорядоченный список вершин V_s . Изначально словарь e пуст, а словарь v содержит данные, полученные из json-файла. Если существует связь между узлами i и j в процессе анализа орграфа, в словарь e добавляется пара «ключ-значение» в формате $(i,j):1$. То есть обеспечивается возможность формировать списки связей для любой возможной конфигурации, заданной в исходном json-файле.

Таким образом, были разработаны принципы, критерии и методика оценки влияния состояния межагрегатных связей на живучесть СТС. Разработан и реализован алгоритм оценки структурной живучести на базе метода оценки влияния состояния межагрегатных связей, описаны программные особенности реализации метода. Полученные результаты станут основой в дальнейшей разработке метода оценки влияния МС на живучесть неиерархических СТС, в которых возможно возникновение контуров и паттернов взаимодействия замкнутого характера и оценка СТС, в которых связи представлены небинарными параметрами.

Список литературы

1. *Безнос Л. А.* Системный подход к обеспечению живучести судна / Л. А. Безнос // Судостроение. — 1982. — № 1.
2. *Сергиенко Л. И.* Электроэнергетические системы морских судов / Л. И. Сергиенко, В. В. Миронов. — М.: Транспорт, 1991. — 264 с.
3. *Бойко В. Д.* Система контроля и оценки живучести оборудования корабля на основе функционально-когнитивной модели / В. Д. Бойко, В. В. Вычужанин // Інформаційні управляючі системи та технології (ІУСТ–2012): науч.-практ. конф. — Одеса, 2012.
4. *Бойко В. Д.* Оцінка структурних загроз за допомогою поразяючого моделюючого імпульсу / В. Д. Бойко, В. О. Савченко // Інформатика, інформаційні системи та технології: десята Всеукраїнська конференція студентів і молодих науковців. — Одеса, 2013.
5. *Колоколова В. А.* Алгоритмы и программные средства проектирования функционально-топологических структур распределенных систем по критериям живучести (на примере корабельных систем) / В. А. Колоколова, П. В. Холодных, И. П. Симаков // Вычислительные, измерительные и управляющие системы: сб. науч. тр. — СПб.: Изд-во СПбГУ, 2010.
6. *Ярошенко А. В.* Математическое описание технологической взаимозависимости всех систем и механизмов корабля и алгоритм его практического применения / А. В. Ярошенко // Судостроение. — 2000. — № 1.