

---

---

УДК 629.5.067: 656.611.052

**ПОДІЄВО-ОРІЄНТОВАНЕ МОДЕЛЮВАННЯ  
ВІДНОВЛЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ СКЛАДНИХ  
ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ**

**СОБЫТИЙНО-ОРИЕНТИРОВАННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СЛОЖНЫХ  
ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

**EVENT ORIENTED MODELING RESTORING OPERABILITY  
OF LARGE-SCALE SOCIO-TECHNICAL SYSTEMS**

**В.Д. БОЙКО**, канд.техн.наук

*Одесский национальный морской университет, Украина*

*Запропоновано подієво-орієнтовану чотирикомпонентну модель для аналізу ефективності процесу діагностики несправностей. Виконано моделювання процесу діагностики та відновлення складних організаційно-технічних систем для сліпих і спрямованих стратегій пошуку несправностей. Запропоновано критерії доцільності впровадження систем діагностики і пошуку несправностей в залежності від діагностичних систем і контексту використання.*

**Ключові слова:** *складні соціально-технічні системи, подієве моделювання, управління ризиками.*

*Предложена событийно-ориентированная четырехкомпонентная модель для анализа эффективности процесса диагностики неисправностей. Выполнено моделирование процесса диагностики и восстановления сложных организационно-технических систем для слепых и направленных стратегий поиска неисправностей. Предложены критерии целесообразности внедрения систем диагностики и поиска неисправностей в зависимости от диагностируемых систем и контекста использования.*

**Ключевые слова:** *сложные социально-технические системы, событийное моделирование, управление рисками.*

*This paper introduces an event-oriented four-component model for analyzing the efficiency of the fault diagnosis process. The simulation of the process of diagnostics and recovery of complex socio-technical systems allows for modeling either blind, either directed troubleshooting strategies.*

*Also paper introduces criteria for the appropriateness of the introduction of diagnostic and troubleshooting systems with relating to diagnosing systems and the context of their use.*

**Keywords:** *complex socio-technical systems, event modeling, risk management.*

---

---

**Введение.** В настоящее время существует множество различных по принципам функционирования и системным подходам систем диагностики – от простых механических датчиков до сложных экспертных систем. Эти системы, как правило, предназначены для поиска устранения неисправностей и восстановления работоспособности сложных организационно-технических систем (СОТС) [1-7].

Однако оценка эффективности таких систем диагностики может представлять собой проблему, не имеющую готового аналитического решения, поскольку нарушения работоспособности СОТС представляют собой комплекс сложных взаимосвязанных труднопрогнозируемых событий [8; 9].

При этом восстановление частичной или полной работоспособности СОТС происходит в условиях жесткого дефицита времени, так как бездействие вышедшей из строя системы спустя определенный промежуток времени может повлечь за собой наступление гораздо более серьезных последствий.

Ситуация часто усугубляется тем, что потеря работоспособности СОТС происходит в ситуации «когнитивного затемнения», когда доступная оперативная информация о вышедших из строя объектах неполна, недоступна либо отсутствует в принципе [10].

Целесообразность использования систем диагностики и поиска неисправностей определяется эффективностью этих систем с точки зрения времени восстановления функционирования СОТС.

При этом эффективность оказывается в прямой зависимости от контекста использования систем диагностики: времени постановки первичной гипотезы о неисправности, времени подтверждения гипотезы о неисправности, времени устранения неисправности и временного запаса до наступления вторичных последствий [11].

**Постановка задачи.** Целью настоящего исследования являлась выработка методов оценки эффективности функционирования систем диагностики и поиска неисправностей при восстановлении работоспособности СОТС, выбор критериев эффективности процесса диагностики и поиска неисправностей СОТС, построение модели процесса диагностики и поиска неисправностей СОТС, моделирование процессов диагностики и поиска неисправностей с различными стратегиями и контекстными характеристиками поиска, определение параметров, влияющих на эффективность внедрения и использования систем диагностики и поиска неисправностей.

1. Парадигмы моделирования событийных процессов

Моделирование событийно-ориентированных процессов, в частности процесса поиска, диагностики и устранения неисправностей, представляет собой сложную и ресурсоемкую задачу.

---

---

В качестве возможного решения, как правило, используется один из трех основных подходов или их комбинация [12]:

1. Активно-ориентированная парадигма.
2. Событийно-ориентированная парадигма.
3. Процесс-ориентированная парадигма.

При этом моделирование разделяется на «повторяемые эксперименты» и анализ временных областей, или «эксперименты, протяженные во времени».

Одним из примеров модели может быть анализ обслуживания очередей заявок на ремонт, при котором заявки поступают в случайное время, и время их обслуживания тоже является случайной функцией.

В таких условиях время между началом работы и ее выполнением будет случайной функцией, коррелирующей с экспоненциальным или другим распределением [13].

При активно-ориентированной парадигме модельное время разделяется на небольшие интервалы – значительно меньшие, чем временной интервал происходящих событий. Для событий, имеющих разброс примерно в 20 секунд, рекомендуемый временной шаг может составлять 0.001 секунды. В каждый момент времени моделирующая программа отслеживает состояние всех процессов в системе, проверяет возможное завершение каждого из них и перераспределяет занятость различных систем.

Недостаток активно-ориентированной парадигмы – в неэкономном использовании вычислительных ресурсов. Большая часть времени уходит на запросы состояния системы (из-за малого интервала времени проверок в 90 % случаев неинформативные), что приводит к тому, что большую часть времени модель функционирует вхолостую. Это серьезно осложняет исследование, т. к. часто симуляция должна захватывать большие промежутки времени.

Событийно-ориентированная парадигма формализует иной подход. Набор событий хранится в виде событийного стека. Каждое новое событие что-то изменяет в стеке, при этом, возможно, генерируется новое событие. Программный код каждый раз проверяет стек событий и представляет системные часы на время, когда должно произойти следующее по очереди событие.

Процесс-ориентированная парадигма использует концепцию многопоточных вычислений. Организация работы с процессами в такой модели происходит по тем же принципам, что и работа с процессами в семействе операционных систем стандарта POSIX. Более того, некоторые модели используют механизм работы, основанный на unix-подобном взаимодействии процессов. Однако программные реализации таких моделей достаточно тяжело создавать и поддерживать.

---

---

**Решение задачи.** В рамках исследования модель СОТС представлена в виде множества взаимосвязанных материальных объектов (технических средств и персонала, обеспечивающего их функционирование и применение по назначению).

Каждому материальному объекту соответствует виртуальный узел модели, который имеет свои индивидуальные характеристики. Исследование проводилось путем моделирования поиска и устранения неисправностей с использованием событийно-ориентированной парадигмы.

1. Описание модели

Разработанная модель включает в себя четыре основных компонента:

1. Иерархическая человеко-машинная модель организационно-технической системы, которая представлена как взаимодействие технических и организационных объектов, связанных между собой связями различного характера. В модели СОТС представлена в виде направленного графа, в котором вершины представляют собой технические и организационные объекты, а ребра – связи между объектами.

Каждый объект СОТС в рамках модели характеризуется следующими величинами:

- временем на верификацию гипотезы о неработоспособности объекта;
- временем на восстановление работоспособности объекта;
- временем наступления вторичных последствий и оценкой риска наступления этих последствий.

Все это – случайные величины, которые в зависимости от системы могут определяться различными по характеристикам распределениями (нормальное, Вейбулла разных порядков).

В упрощенной модели они представлены математическим ожиданием.

2. Система диагностики – встроенная в модель либо подключенная к ней через аппаратно-программный интерфейс.

Модель представлена как система, которая на основании доступной информации генерирует вектор гипотез ( $d_1, d_2, \dots, d_N$ ) о возможном местонахождении неисправной технической единицы.

Такой вектор гипотез может быть постоянным либо рекурсивным – меняющимся в зависимости от системной информации и информации, полученной от менеджера рисков.

В соответствии со стандартом ISO [5] гипотезы представляются в виде байесовских коэффициентов уверенности в работоспособности того или иного блока.

3. Менеджер рисков, который на основе гипотез о неисправностях, понимания внутренних взаимосвязей в СОТС и оценки рисков занимается последовательной диагностикой и восстановлением работоспособ-

ности объектов СОТС – самостоятельно либо на основе вектора гипотез системы диагностики.

4. Событийный стенд-процессор, который управляет работой модели и системным временем. Он включает в себя следующие функциональные модули:

- модуль генерации потока событий неисправностей на основе заданных распределений;
- модуль работы с модельными часами;
- модуль управления процессами модели в зависимости от происходящих событий;
- модуль сбора и оценки информации.

*Моделирование и результаты.* Моделирование проводилось для систем различной сложности (от 1 до 100 объектов), с различными распределениями стратегий поиска неисправностей, при этом время диагностики  $T_{diag}$  и время устранения неисправностей  $T_{repair}$  предполагалось равным для всех объектов системы.

Для каждой из исследуемых моделей было принято, что выход из строя хотя бы одного объекта приводит к выходу из строя всей СОТС.

При этом возникает ситуация «когнитивного затемнения», в которой система диагностики выдвигает гипотезу о неисправности одного из объектов. Далее затрачивается время  $T_{diag}$  на проверку истинности гипотезы.

Если объект действительно неисправен, то моделируется процесс его исправления.

При этом к общему времени устранения неисправности добавляется время  $T_{repair}$  на ремонт объекта.

Если гипотеза ошибочная, то система диагностики выдвигает следующую гипотезу, которая снова проверяется. И так далее, пока неисправный объект не будет обнаружен.

В качестве характеристики эффективности системы диагностики использовался «коэффициент попаданий»:

$$K_{diag} = \frac{N_{diag}}{N_{fail}},$$

где  $N_{diag}$  – число попыток диагностики;

$N_{fail}$  – число неверных гипотез о неисправности.

Чем ближе  $k_{diag}$  к нулю, тем хуже работает стратегия поиска (больше попыток диагностики на один сбой).

Чем лучше система, тем ближе  $k_{diag} \rightarrow 1$  (обнаружение с первого раза).

Кроме «коэффициента попаданий» использовался также «коэффициент простоя», характеризующий эффективность устранения неисправностей по времени и равный

$$k_{stop} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{fail}} (T_{repair}^i + \sum_{j=1}^{N_{diag}} T_{diag}^{ij})}{T_{full}},$$

где  $T_{repair}^i$  – время, затраченное на ремонт объекта  $i$ , вышедшего из строя;

$T_{diag}^{ij}$  — время, затраченное на проверку гипотезы  $i$  о неисправности объекта  $j$ .

При этом, чем ближе  $k_{stop}$  к 1 – тем больше время, затраченное на поиск неисправности и ремонт объекта, и тем хуже работает система диагностики.

В качестве системы диагностики использовались блоки, осуществляющие стратегии слепого и направленного поиска.

Слепой поиск был выбран в качестве нормирующего уровня для моделей направленного поиска. Для слепого поиска были исследованы стратегии случайного (с выбыванием продиагностированных элементов) и последовательного (от 1 до N) переборов.

Направленный поиск использовался при байесовских коэффициентах уверенности в исправности объекта, равных в среднем 0.2, 0.5 и 0.9.

## 2. Результаты моделирования

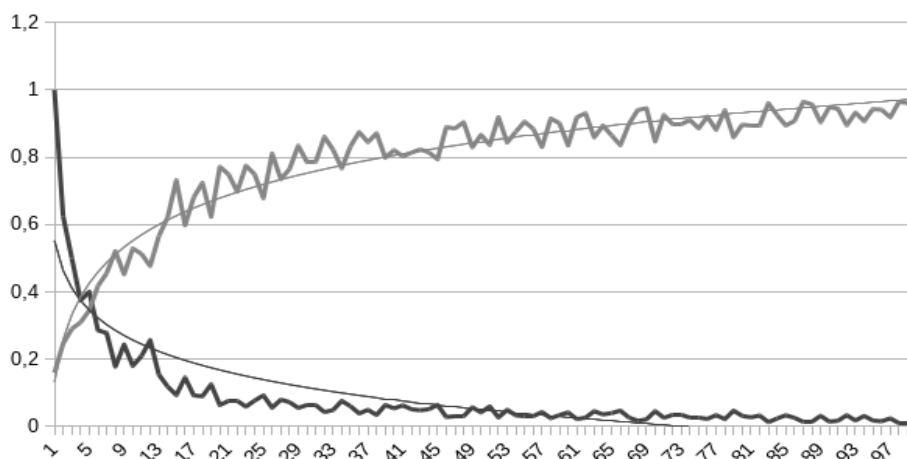
Ниже приведены графики зависимости величин коэффициентов попадания и коэффициентов простоя от количества объектов исследуемой модели для различных поисковых стратегий диагностических блоков. График коэффициента попаданий везде обозначен черным цветом, а график коэффициента простоя – серым.

Результаты слепого поиска приведены в виде графиков на рис. 1, 2.

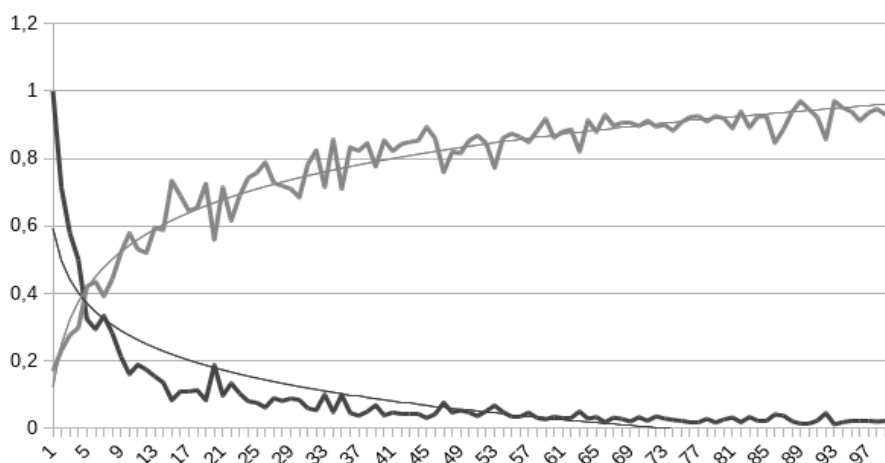
Хорошо видно, что случайный и последовательный варианты поиска не имеют особых преимуществ друг перед другом.

Стратегия слепого поиска хорошо работает для небольшого числа объектов (в рассматриваемой модели – до 6 объектов).

С ростом числа объектов эффективность поиска падает – для 100 объектов время простоя было близким к общему времени работы модели.



*Рис. 1. Результаты моделирования стратегии случайного поиска*



*Рис. 2. Результаты моделирования стратегии последовательного поиска*

Результаты направленного поиска приведены ниже на рис. 3, 4.

Результаты моделирования показывают, что стратегия направленного поиска работает оптимальнее, чем слепой поиск даже при низких значениях коэффициентов уверенности. Эффективность стратегии направленного поиска растет с увеличением сложности системы и количества диагностируемых объектов. При этом направленный поиск для систем с небольшим числом объектов не улучшает качество и скорость поиска неисправностей, но приводит к общему усложнению системы и в некоторых случаях может даже замедлить поиск неисправностей (если учитывать в модели время на принятие решения по каждому случаю диагностики).

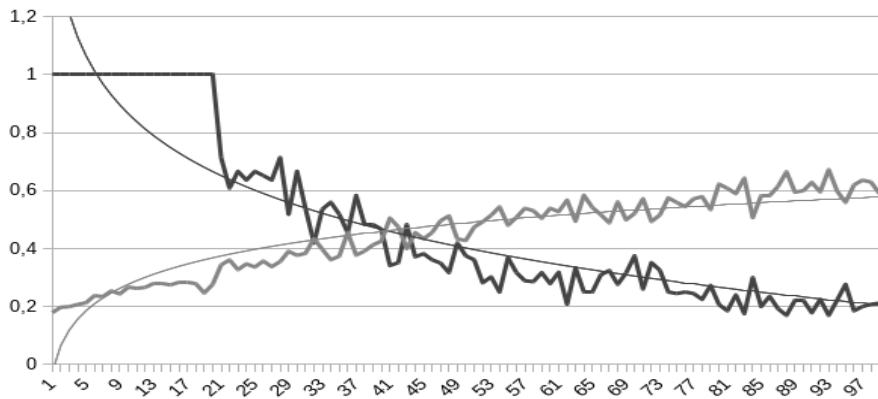


Рис. 3. Результаты моделирования стратегии направленного поиска для коэффициента 0.5

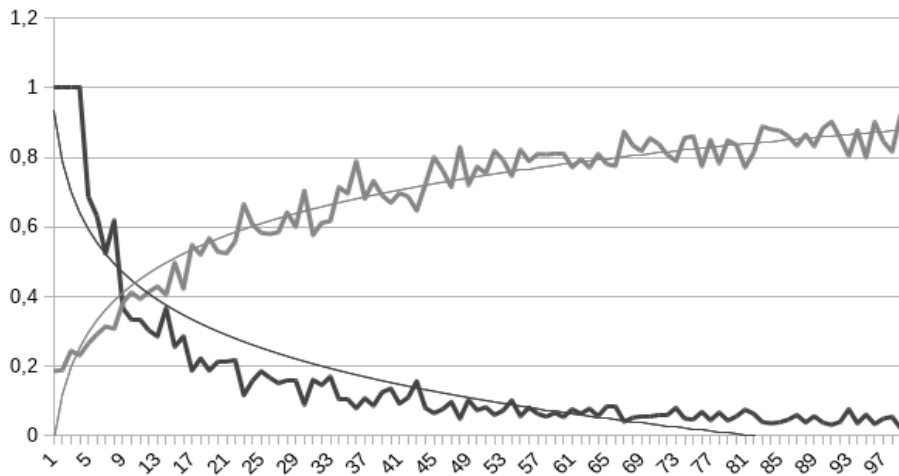


Рис. 4. Результаты моделирования стратегии направленного поиска для коэффициента 0.9

Анализ результатов моделирования позволил выделить три основных параметра, определяющих эффективность внедрения и использования систем диагностики неисправностей:

- сложность диагностируемой СОТС.
- количество доступной информации о состоянии СОТС.
- возможность управления СОТС.



**Выводы.** В статье были предложены методы, критерии и модель оценки эффективности поиска неисправностей в СОТС.

Все это позволило:

- Проследить динамику восстановления работоспособности СОТС для различных сценариев и систем диагностики.
- Оценить эффективность системы диагностики с точки зрения затрат времени на поиск и диагностику неисправностей СОТС.
- Определить параметры, влияющие на эффективность внедрения и использования систем диагностики и поиска неисправностей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Соловьёв И.В. *Общие принципы управления сложной организационно-технической системой* / И.В. Соловьёв // ПНиО. – 2014. – № 2 (8). – С.21-27.
2. Вычужанин В.В. *Повышение эффективности эксплуатации судовой системы комфортного кондиционирования воздуха при переменных нагрузках: Монография* / В.В. Вычужанин. – Одесса: ОНМУ, 2009. – 206 с.
3. Вычужанин В.В. *Гибридные экспертные системы для противоаварийного управления сложными техническими объектами* / В.В. Вычужанин, С.Н. Коновалов // Вісник Одеського національного морського університету: Зб. наук. праць. – 2017. – № 2 (51). – С. 165-178.
4. Рудниченко Н.Д. *Оценки структурного и функционального рисков сложных технических систем* / Н.Д. Рудниченко, В.В. Вычужанин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. Інформаційні технології. Системи управління. – 2014. – Т.1. – № 2(67). – С. 18-22.
5. Вычужанин В.В. *Метод управления рисками судовых сложных технических систем* / В.В. Вычужанин, Н.Д. Рудниченко // Проблеми техніки. – 2014. – № 2. – С. 138-142.
6. Вычужанин В.В. *Технические риски сложных комплексов функционально взаимосвязанных структурных компонентов судовых энергетических установок* / В.В. Вычужанин, Н.Д. Рудниченко // Вісник Одеського національного морського університету: Зб. наук. праць. – 2014. – Вып. 2(40). – С. 68-77.
7. Бойко В.Д. *Модель оценки живучести судовых технических систем* / В.Д. Бойко, В.В. Вычужанин. // Вісник Миколаївського кораблебудівного університету. – 2012. – № 3. – С. 62-67.
8. Кузнецов П.Д. *Интеллектуальное многоцелевое управление* / П.Д. Кузнецов // Госсоветник. – 2014. – № 4 (8). – С.65-68.

9. Акопов А. С. *Имитационное моделирование: учебник и практикум для академического бакалавриата* / А.С. Акопов. – М.: Изд-во Юрайт, 2014. – 389 с.
10. Черкесов Г.Н. *Методы и модели оценки живучести сложных систем* / Г.Н. Черкесов. – М.: Знание, 1987. – 32 с.
11. *Risk management: principles and guidelines: ISO 31000:2009* – Geneva: International Organization for Standardization, 2009. – 29 p.
12. Matloff N. *Introduction to discrete-event simulation and the simpy language* / N. Matloff // Dept of Computer Science. University of California at Davis. Retrieved on August. – 2008. – Т. 2. – Р. 209.
13. Кельтон В. *Имитационное моделирование* / В. Кельтон, А. Лоу. – Классика CS. – СПб.: Питер, 2004. – 847 с.

Стаття надійшла до редакції 05.09.2017