

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАВИСИМЫХ ОТКАЗОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА

Запропоновано моделі залежних відмов технічних об'єктів на базі хвильового підходу.

Предложены модели зависимых отказов технических объектов на базе волнового подхода.

Dependent failure models of technical objects on the basis of wave approach are suggested.

Исследования показывают, что зачастую причинами чрезвычайных происшествий являются зависимые отказы элементов технических объектов. В государственном стандарте Украины 2860-94 «Надежность техники. Термины и определения» зависимый отказ определяется как «отказ объекта, вызванный прямо или косвенно отказом или неисправностью другого объекта» [1]. Уточним данное определение следующим образом: «Зависимый отказ – это отказ элемента, вызванный прямо или косвенно отказом или неисправностью другого элемента системы», сосредотачивая, таким образом, внимание на внутренней природе события.

Основной задачей математического моделирования зависимых отказов является создание моделей, адекватных вероятностным процессам функционирования исследуемых реальных технических объектов и систем, а именно – учет взаимосвязей между отказами их элементов. Исследование этих математических моделей, в конечном счете, служит разработке методов анализа и синтеза этих систем, назначение которых – выработка конкретных рекомендаций по повышению надежности [3].

В данном случае речь идет о надежности технического объекта при чрезвычайных событиях [2], когда возникающая цепь зависимых отказов элементов может привести не только к отказу всего объекта, но и к более существенным последствиям.

Итак, рассмотрим общую схему зависимого отказа (рис. 1).

Отказ одного элемента с вероятностью p_0 не вызывает отказов других элементов; с вероятностью p_1 вызывает отказ одного элемента; с вероятностью p_2 – одновременный отказ двух элементов и т.д.; с вероятностью p_{n-1} – отказ оставшихся элементов системы.

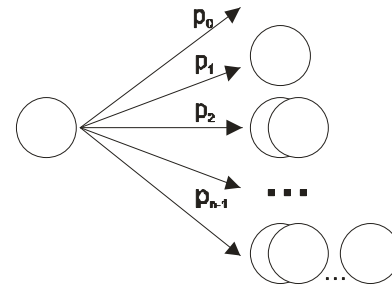


Рис. 1

Суммарная вероятность:

$$\sum_{i=0}^{n-1} p_i = 1.$$

Вероятность возникновения зависимого отказа:

$$P = \sum_{i=0}^{n-1} p_i - p_0,$$

$$P = 1 - p_0.$$

Вероятность возникновения отказа двух и более элементов:

$$P = \sum_{i=0}^{n-1} p_i - \sum_{k=0}^1 p_k,$$

$$P = 1 - (p_0 + p_1).$$

Таким образом, очевидно, что зависимый отказ, как правило, влечет за собой отказ группы элементов. В итоге количество вышедших из строя элементов при таком отказе лавинообразно возрастает, что приводит к выходу из строя значительной части или всей системы. Последствия могут быть разнообразны. Они зачастую влекут за собой значительные затраты на ремонт и восстановление системы, на ликвидацию повреждений систем, работающих совместно с данной, на устранение вреда, нанесенного окружающей среде. Как правило, их

ликвидация превышает затраты на техническое обслуживание и ремонт во много раз.

Рассмотрим подробнее распространение отказов по системе. Оно происходит не хаотично. Траектории движения определяются наличием функциональных взаимосвязей между элементами системы. Таким образом, отказ одного элемента может повлечь за собой отказы только связанных с ним элементов. При создании математической модели целесообразно рассматривать так называемые «поколения» или «волны» распространения зависимых отказов.

К первой волне будем относить набор элементов, которые напрямую связаны с первопричиной (независимо отказавшим элементом). Второе поколение (волна) – множество элементов, непосредственно связанных с элементами первого поколения.

Таким образом, получаем ветвящийся процесс распространения отказов элементов системы.

Рассмотрим следующий пример. Пусть система состоит из 10 элементов с такими взаимосвязями:

$$x_1 = \{x_2, x_3, x_7\},$$

где отказ элемента x_1 влечет за собой отказ элементов x_2, x_3 , и x_7 ;

$$x_2 = \{x_5\},$$

$$x_3 = \{x_4, x_7\},$$

$$x_4 = \{x_8, x_9, x_{10}\},$$

$$x_5 = \{x_6, x_{10}\},$$

$$x_6 = \{\},$$

$$x_7 = \{x_3, x_8, x_9, x_{10}\},$$

$$x_8 = \{x_6\},$$

$$x_9 = \{x_1, x_2\},$$

$$x_{10} = \{x_5, x_6\}.$$

Волны зависимых отказов элементов показаны на рис. 2.

К первой волне относятся отказы элементов, функционально связанных с данным. Набор элементов на очередной волне напрямую зависит от множества элементов предыдущей волны (поколения).

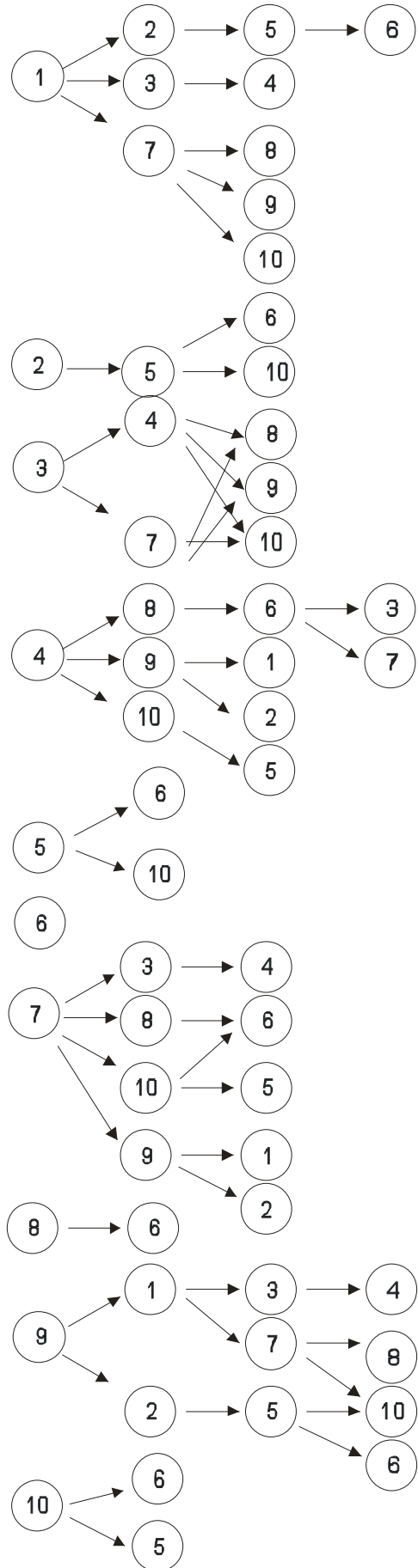


Рис. 2

Рассмотрим некоторые подходы математического моделирования зависимых отказов.

Детерминированный подход состоит в том, что отказ x_i -го элемента с необходимостью влечет за собой отказ взаимосвязанных с ним элементов.

Пусть Ω – множество всех элементов системы

$$\Omega = \{i : i \in 1..m\}.$$

Каждому элементу ставится в соответствие множество элементов $V_i(1)$ первого поколения отказов, т.е. множество функционально взаимосвязанных с ним элементов. Второе поколение или волна отказов определяется как набор всех подмножеств элементов, связанных с элементами первой волны:

$$V_i(2) = \bigcup_{j \in V_i(1)} V_j(j).$$

Номер последнего поколения отказов определяется из условия:

$$n : V_i(n) = \{\}.$$

Итоговый набор повреждений из-за отказа i -го элемента находится следующим образом:

$$A_i = \bigcup_{j \in V_i(1)}^n V_j(j).$$

В нашем примере волны отказов из-за отказа 1-го элемента выглядят следующим образом:

$$V_1(1) = \{x_2, x_3, x_7\},$$

$$V_1(2) = \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_8, x_9, x_{10}\},$$

$$V_1(3) = \{x_6\},$$

где $V_i(3)$ – последняя волна отказов.

Итоговый набор повреждений из-за отказа 1-го элемента будет иметь следующий вид:

$$A_1 = \{x_1\} \cup V_1(1) \cup V_1(2) \cup V_1(3),$$

$$A_1 = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}\}.$$

Таким образом, отказ элемента x_1 влечет за собой отказ всех элементов технической системы.

Аналогично рассчитываются повреждения, вызванные отказами других элементов системы.

Результаты отказа каждого элемента представлены в табл. 1.

Итоговый набор повреждений

i	A_i	$c(A_i)$
1	$\{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}\}$	К
2	$\{x_2, x_5, x_6, x_{10}\}$	А
3	$\{x_3, x_4, x_7, x_8, x_9, x_{10}\}$	А
4	$\{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}\}$	К
5	$\{x_5, x_6, x_{10}\}$	ПН
6	$\{x_6\}$	П
7	$\{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}\}$	К
8	$\{x_6, x_8\}$	ПН
9	$\{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}\}$	К
10	$\{x_5, x_6, x_{10}\}$	ПН

где i – номер элемента;

A_i – итоговое множество отказавших элементов;

$c(A_i)$ – затраты на ликвидацию последствий. $c(A_i)$ можно классифицировать следующим образом:

К – затраты на ликвидацию катастрофы [2]. Как правило, состоят из затрат на восстановление данной технической системы, совместно работающих систем, затрат на ликвидацию последствий для окружающей среды и прочих затрат.

А – затраты на ликвидацию аварии [2]. Аналогичны затратам на ликвидацию катастрофы. Однако последствия аварии возможно полностью устранить, в отличие от последствий катастрофы.

ПН – затраты на ликвидацию повреждений, ведущих к неисправности системы, т.е. к состоянию, в котором объект не способен выполнять хотя бы одну из заданных функций [1].

П – затраты на ликвидацию повреждений, ведущих к незначительной неисправности системы, т.е. неисправности, не нарушающей не одной из требуемых функций объекта [1]. Как правило, это затраты на ликвидацию дефектов или неисправностей, связанных с нарушением вспомогательной функции в результате повреждения.

Анализ таблицы показывает, что наиболее важными с позиции надежности в детерминированной задаче являются элементы x_1, x_4, x_7 и x_9 , т.к. отказ любого из них ведет к отказу всех элементов системы и, соответственно, к катастрофе. Таким образом, при планировании сроков и объемов работ по техническому обслуживанию и ремонту, прежде всего, необходимо контролировать надежность именно этих элементов.

Детерминированный подход позволил формализовать задачу распространения зависимых отказов элементов сложных технических систем.

Однако при описании реальных систем необходимо учитывать неопределенности, т.к. на практике отказ одного элемента не всегда вызывает цепную реакцию отказов.

Один из вариантов описания неопределенностей – вероятностный подход. Он заключается в следующем. Каждому элементу ставится в соответствие не только множество зависимых элементов, но и вероятность их отказа вследствие отказа данного элемента.

Преобразуем в соответствии с вероятностным подходом вышеописанный пример. Множество, поставленное в соответствие каждому элементу, примет следующий вид:

$$x_1 = \{p_1, x_2, x_3, x_7\},$$

$$x_2 = \{p_2, x_5\},$$

$$x_3 = \{p_3, x_4, x_7\},$$

$$x_4 = \{p_4, x_8, x_9, x_{10}\},$$

$$x_5 = \{p_5, x_6, x_{10}\},$$

$$x_6 = \{\},$$

$$x_7 = \{p_7, x_3, x_8, x_9, x_{10}\},$$

$$x_8 = \{p_8, x_6\},$$

$$x_9 = \{p_9, x_1, x_2\},$$

$$x_{10} = \{p_{10}, x_5, x_6\},$$

где p_i – вероятность отказа множества элементов, функционально связанных с i -тым элементом системы.

Конечные результаты отказа каждого элемента (итоговый набор повреждений) вычисляются и могут значительно отличаться от результатов детерминированной задачи, т.к. зависят от вероятностных характеристик.

Вероятностный подход позволяет находить следующие важные показатели надежности системы:

- вероятность наступления катастрофы (заключается в том, что все элементы системы откажут);

- вероятность наступления аварии (в том случае, когда большая часть элементов системы откажет);

- вероятности наступления неисправности системы;

- вероятности наступления незначительной неисправности.

Также одним из необходимых условий повышения надежности системы является нахождение критических элементов, отказ которых имеет наибольшую вероятность вызвать катастрофу. При создании математической модели один из вариантов решения этой задачи состоит в применении вероятностно-волнового подхода.

Зная наработку на отказ [1] каждого элемента, можно планировать сроки и объемы технического обслуживания и ремонта таким образом, чтобы вероятность отказа критических элементов была как можно меньше.

Рассмотренные модели демонстрируют преимущество волнового подхода математического описания процессов зависимых отказов. В дальнейшем возможно решение задачи минимизации затрат на содержание сложной технической системы при условии наличия зависимых отказов элементов.

Решение подобных задач имеет большое значение для всех отраслей промышленности, в особенности для транспорта и энергетики, где появление современных сложных технических систем приводит к необходимости разработки новых специфических математических методов теории надежности.

Сложность технических объектов и систем определяется ответственностью, сложностью и многообразием выполняемых функций [3]. Усложнение систем идет по различным направлениям: увеличение количества комплектующих деталей, усложнение внутренней структуры, определяющей характер соединения элементов и алгоритм их взаимодействия. Изучение зависимых отказов элементов является необходимым условием повышения надежности сложных технических объектов и систем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ДСТУ 2860-94 «Надійність техніки. Терміни та визначення» [Текст]. – Держстандарт України, 1995. – 91 с.
2. Петрашевський, О. Л. Положення про класифікацію транспортних подій на залізничному транспорті та метрополітенах України [Текст] / О. Л. Петрашевський. – 2002.
3. Ушаков, И. А. Построение высоконадежных систем [Текст] / И. А. Ушаков. – М.: Знание, 1974. – 64 с.

Поступила в редколлегию 15.07.2009.

Принята к печати 30.07.2009.