МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ РИСКОВ

К ВОПРОСУ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ

А.Ю. Лабинский, кандидат технических наук, доцент.
Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России

Рассмотрены особенности расчета надежности элементов системы с использованием нечеткой логики. Расчет надежности выполнялся с использованием системы нечеткого вывода с нечеткими функциями принадлежности. Рассмотрены системы с последовательно и параллельно соединенными элементами.

Ключевые слова: нечеткие множества второго порядка, нечеткие функции принадлежности, нечеткое моделирование, система нечеткого вывода, компьютерная программа, математическая модель

THE PROBLEM OF USE THE FUZZY LOGIC FOR CALCULATION THE RELIABILITY OF THE COMPLEX SYSTEM

A.Yu. Labinskiy.
Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia

This article presents the problem of using the fuzzy logic for calculation the reliability of the complex system. The reliability calculation work with use fuzzy output system with fuzzy membership functions. The mathematical model use the fuzzy control.

Keywords: fuzzy sets type-2, fuzzy membership functions, fuzzy simulation, fuzzy output system, computing program, mathematical model

В теории надежности сложных систем широкое распространение получили логико-вероятностные методы (ЛВМ), изложенные в трудах И.А. Рябинина [1]. При моделировании надежности функционирования таких систем обычно рассматривают два типа событий: первый тип – возникновение отказов, второй тип – обнаружение и устранение отказов. Для описания событий первого типа используют аппарат булевой алгебры [2]. События второго типа моделируются на основе алгоритмов функционирования системы [3].

В общем виде закон надежности, описывающий вероятность события, при котором элемент будет работать безотказно в течение времени t, может быть представлен в виде: $P(t)=\exp[-\int_0^t \lambda(t)\,dt]$. Здесь $\lambda(t)$ – интенсивность отказов, определяемая как среднее число отказов элемента в единицу времени.

Если интенсивность отказов принять постоянной величиной, то закон надежности будет экспоненциальный: $P(t)=\exp[-\lambda*t]$.

Вид экспоненциального закона распределения вероятности безотказной работы элемента представлен на рис. 1.

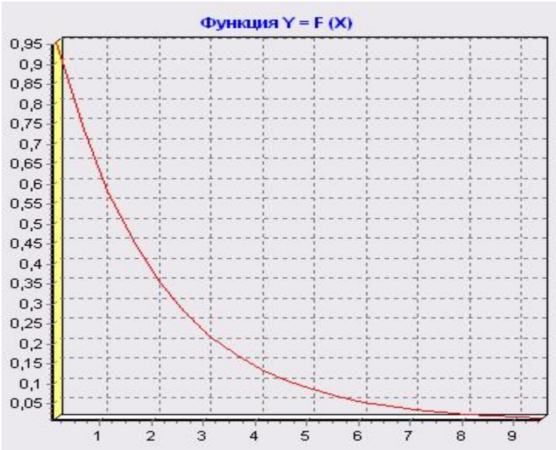

Рис. 1. **Экспоненциальный закон распределения**

Функция распределения времени безотказной работы элемента при экспоненциальном законе надежности будет иметь вид: $F(t)=1-\exp[-\lambda*t]$. Плотность распределения времени безотказной работы элемента при экспоненциальном законе надежности будет иметь вид: $f(t)=\lambda*\exp[-\lambda*t]$.

Среднее время безотказной работы элемента при экспоненциальном законе надежности можно определить по формуле: $T_{cp}=\int_o^\infty t*f(t)\,dt=\int_o^\infty p(t)\,dt=1/\lambda$.

Экспоненциальное распределение характеризуется постоянством интенсивности отказов: $\lambda(X)=1/X_{cp}$, где X_{cp} – математическое ожидание экспоненциального закона распределения. Тогда вероятность безотказной работы элемента, плотность распределения времени безотказной работы и интенсивность отказов элемента можно вычислить по формулам:

$$P(X)=\exp[-X/X_{cp}];\ f(X)=(1/X_{cp})*\exp[-X/X_{cp}];\ \lambda(X)=1/X_{cp.}.$$

Дисперсия экспоненциального распределения может быть определена по формуле:

$$D(X)=1/[\lambda^2(X)].$$

Оценка параметров экспоненциального распределения по выборочным данным может быть произведена по формуле:

$$\lambda(X)=1/[(1/n)*\Sigma_{i=1}^{n} X_i).$$

Определение параметров и выбор закона распределения времени безотказной работы элемента могут быть выполнены формальными методами. Если коэффициент вариации измеряемого признака X близок к единице, кривая распределения плотности вероятности убывает со временем, а интенсивность отказов элемента колеблется около горизонтальной прямой, то можно предположить, что закон надежности будет экспоненциальный.

После того как выбран закон распределения, можно рассчитать его параметры. За исходные данные можно принять эмпирические значения интенсивностей отказов $\lambda(X)$. Для этих значений определяются математическое ожидание X_{cp} и коэффициент вариации. На основании полученных значений параметров распределения решение о выборе экспоненциального закона распределения времени безотказной работы элемента либо принимается, либо отвергается.

Использование теории нечеткой логики обеспечивает необходимую степень достоверности получаемых результатов, так как данная теория позволяет производить оценку надежности элементов системы в условиях многофакторности и неопределенности посредством методологии системного анализа нечеткой логики.

Система нечеткого вывода реализует процесс получения нечетких заключений о надежности объекта на основе нечетких условий или предпосылок, представляющих собой информацию о текущем состоянии объекта [4]. В последние 10 лет появилось много публикаций, посвященных использованию нечеткой логики для расчета надежности.

Как отмечается в работе [5], традиционная теория надежности основана на двух предположениях: предположении о бинарных состояниях системы – система работоспособна или неработоспособна и предположении о том, что поведение системы полностью характеризуется в контексте вероятностных измерений. Однако ввиду неточности и неполноты исходных данных, оценка точных значений вероятности становится во многих системах затруднительной. Поэтому в работе [5] выдвигаются два новых предположения: предположение о том, что в любой момент времени система может находиться в одном из двух состояний: нечеткое состояние работоспособности или нечеткое состояние неработоспособности и предположение о том, что поведение системы может быть полностью охарактеризовано в контексте измерения возможностей.

В работе [6] для анализа надежности нечетких систем использованы интервальные зависимости. С помощью теоретических исследований и вычислительных экспериментов показано, что такой подход является более общим. В данной работе представлен новый метод анализа надежности нечеткой системы с использованием упрощенных арифметических операций над нечеткими числами вместо сложных интервальных нечетких арифметических операций или сложных алгебраически расширенных нечетких чисел. Понятие «нечетких множеств» расширено размытыми множествами или нечеткими множествами второго порядка, которые были предложены основоположником нечеткой логики Лотфи Заде еще в 1975 г.

Нечеткие множества второго порядка (Fuzzy Sets Type-2, FS Type-2) являются, по существу, «нечеткими нечеткими» множествами, в которых степень принадлежности (Membership Function, MF) – это нечеткое множество первого порядка (Fuzzy Sets Type-1, FS Type-1). В работе [7] было дано описание нечеткого множества второго порядка с помощью нижней (LMF) и верхней (UMF) функций принадлежности. Каждая из этих функций может быть представлена в виде нечеткого множества первого порядка. Интервал между этими двумя функциями представляет собой след неопределенности (Footprint Of Uncertainly, FOU), который и является главной характеристикой нечеткого множества второго порядка (FS Type-2). Добавление нечеткости в функцию принадлежности позволяет учесть неполноту и неточность исходных данных.

При использовании функций принадлежности первого типа (FM-1), характерном для нечетких множеств первого порядка, нужно задавать четкие значения точек, начиная с которых степень принадлежности начинает быть отличной от нуля. При задании таких границ FM экспертом возможно накопление ошибок из-за не включения точек, расположенных около границ функции принадлежности и находящихся под сомнением. Размытие границ функций принадлежности является переходом от FM-1 к FM-2. Вид функции принадлежности второго типа представлен на рис. 2.

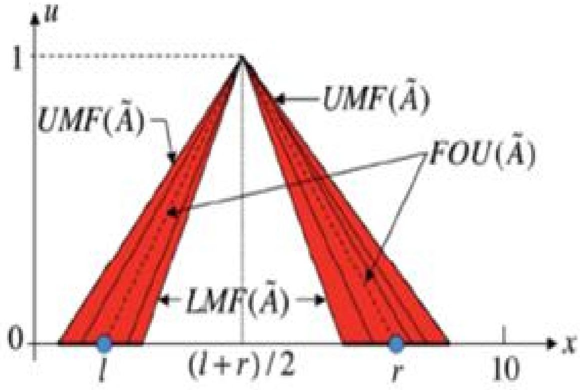

Рис. 2. **Функция принадлежности второго типа (MF-2)**

Во многих работах, посвященных анализу надежности нечетких систем, обсуждаются вопросы выполнения арифметических операций между различными типами размытых множеств. Однако по-прежнему при анализе надежности нечетких систем предполагается, что надежность всех компонентов системы представлена одним и тем же видом функции принадлежности.

В работе [8] разработано унифицированное описание показателей надежности нечетких систем с размытыми границами и различными видами функций принадлежности и представлен алгоритм выполнения различных арифметических операций между разными типами размытых множеств, а также представлены результаты анализа нечеткой надежности элементов систем, состоящих из последовательных, параллельных, параллельно-последовательных и последовательно-параллельных элементов.

Моделирование процесса расчета надежности

В данной работе использование нечеткой логики для расчета надежности элементов нечеткой системы демонстрируется на примере расчета надежности системы, состоящей из трех элементов, соединенных между собой последовательно или параллельно, а также системы из пяти элементов. Так как отказ системы с последовательно соединенными элементами наступает при отказе хотя бы одного элемента, для определения вероятности безотказной работы системы можно воспользоваться теоремой умножения вероятностей:

$$R_c = R_1 * R_2 * R_3 * \ldots * R_N = \Pi_{i=1}{}^{N} R_i.$$

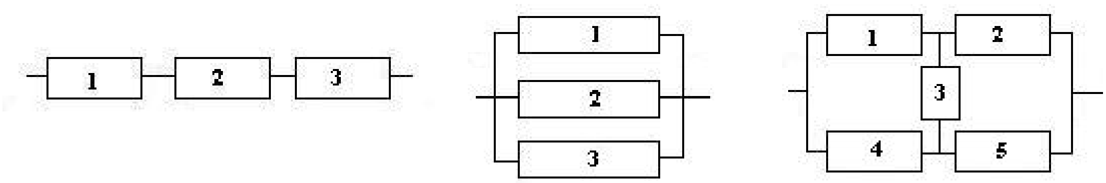

Рис. 3. **Схема соединения элементов системы**

Вероятность безотказной работы системы с параллельно соединенными элементами равна:

$$R_c = 1 - (1-R_1)*(1-R_2)*(1-R_3)*\ldots*(1-R_N) = 1 - \Pi_{i=1}{}^{N} (1-R_i).$$

Исходные данные для расчета представлены в табл. 1.

Таблица 1

Тип соединения	Варианты расчета	Элементы системы			Система R_c
		R1	R2	R3	
Последовательное	1	0,5	0,5	0,5	0,125
Последовательное	2	0,7	0,7	0,7	0,340
Последовательное	3	0,9	0,9	0,9	0,730
Параллельное	1	0,1	0,1	0,1	0,27
Параллельное	2	0,3	0,3	0,3	0,66
Параллельное	3	0,5	0,5	0,5	0,88

Вероятность безотказной работы системы из пяти элементов равна:

$$R_c=R_1*R_2+(1–R_1)*R_4*R_5+R_1*(1–R_2)*R_4*R_5+R_1*(1–R_2)*R_3*(1–R_4)*R_5+(1–R_1)*R_2*R_3*R_4*(1–R_5).$$

Исходные данные для расчета системы из пяти элементов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Варианты расчета	Элементы системы					Система R_c
	R1	R2	R3	R4	R5	
1	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,14
2	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,27
3	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
4	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,73
5	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,91

Фаззификацию входной переменной осуществим с помощью функции принадлежности μ(x) типа кривой Гаусса:

$$\mu(x)=\exp[-(x-c)^2/(2*\sigma^2).$$

Параметры данной функции имеют следующие значения:
– математическое ожидание $c=R_i$;
– дисперсия σ=0,15.

Фаззификацию выходной переменной осуществим с помощью функции принадлежности μ(x) треугольного типа. Вид функций принадлежности представлен на рис. 4.

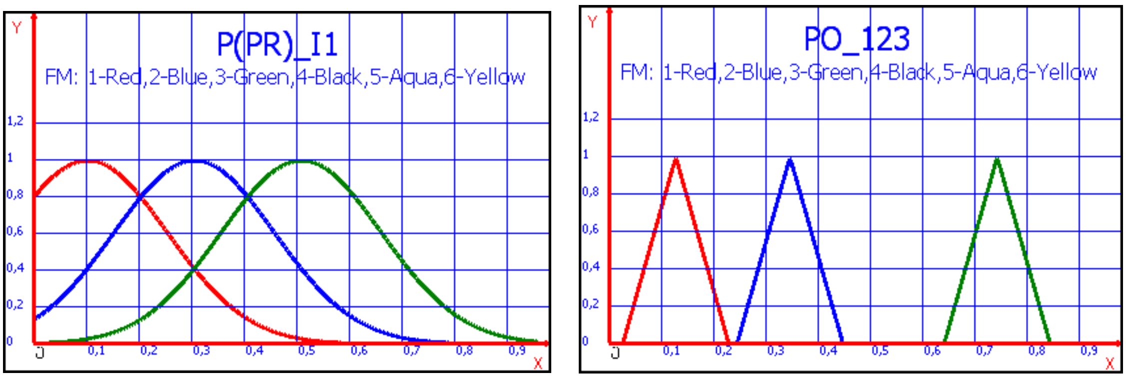

Рис. 4. **Функции принадлежности входной и выходной переменных**

В случае использования нечетких функций принадлежности вид функций размывается и добавляется след неопределенности (рис. 5).

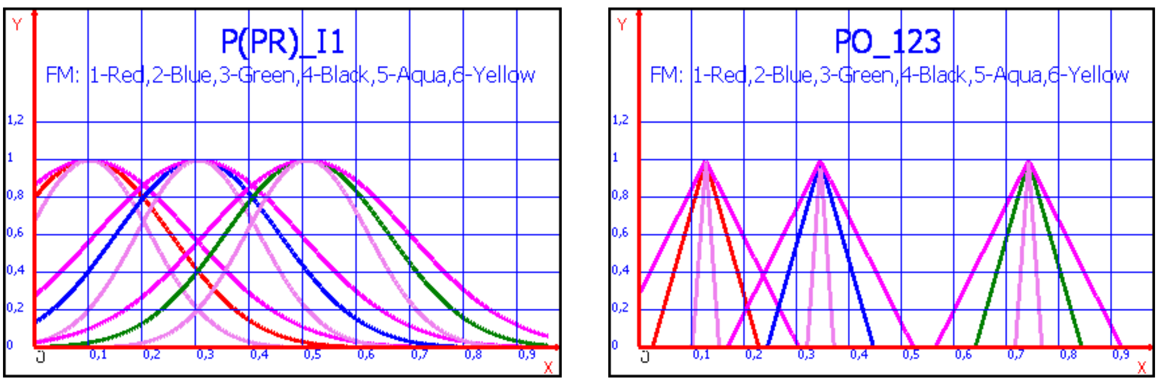

Рис. 5. **Вид нечетких функций принадлежности**

Расчет надежности системы с использованием нечеткой логики производился с использованием системы нечеткого вывода, описанной в работе [9]. Результаты расчета представлены на рис. 6–8.

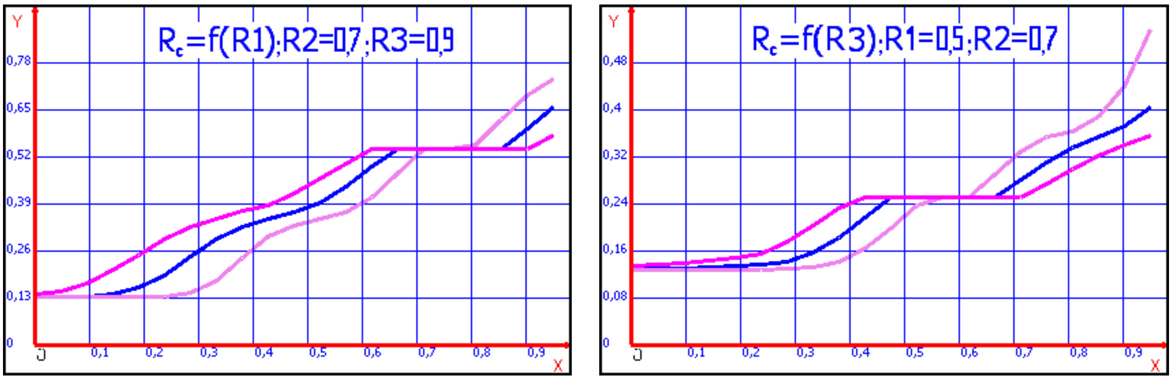

Рис. 6. **Расчет надежности системы последовательных элементов**

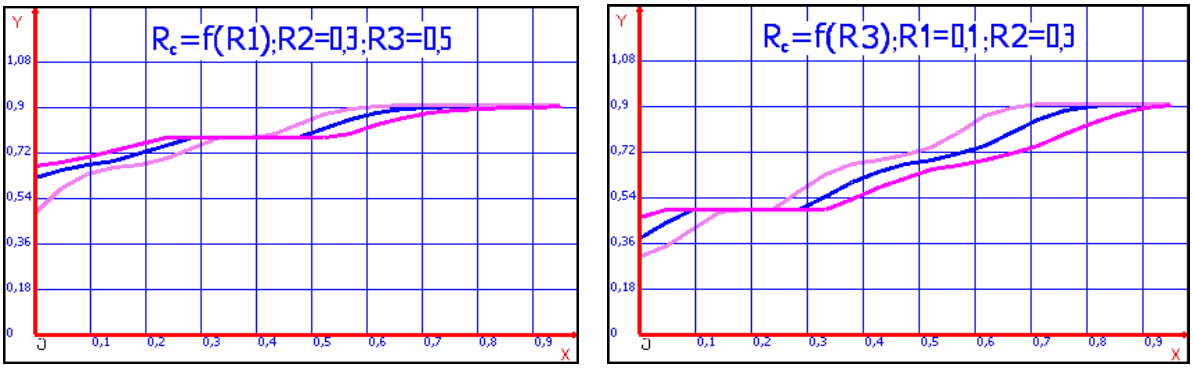

Рис. 7. **Расчет надежности системы параллельных элементов**

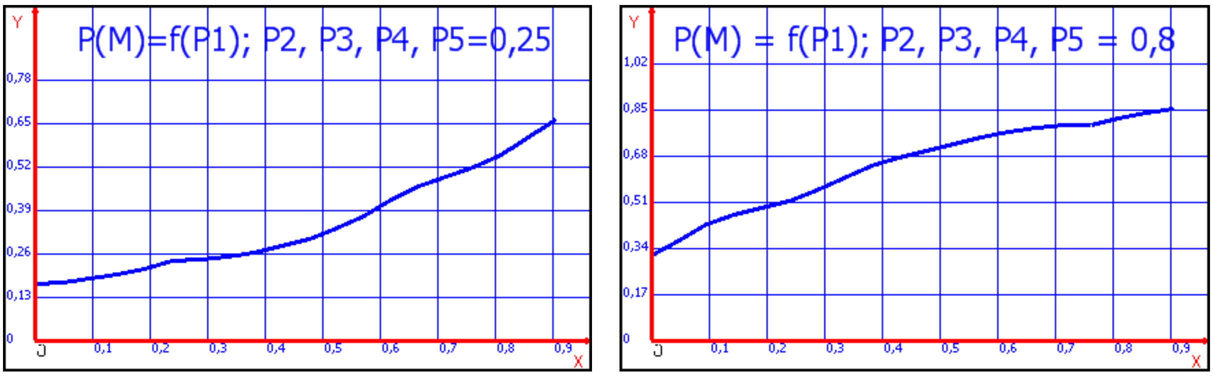

Рис. 8. **Расчет надежности системы из пяти элементов**

Моделирование расчета надежности элементов систем с помощью нечеткой логики происходит с заданием интервала возможных значений (интервала неопределенности) вероятностей безотказной работы элементов. Поэтому в результате моделирования может быть получен диапазон возможных значений вероятности безотказной работы системы в зависимости от средних значений вероятностей безотказной работы элементов.

Литература

1. Рябинин И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. СПб.: СПб ун-т, 2007.

2. Ротштейн А.П. Нечетко-алгоритмический анализ надежности сложных систем // Кибернетика и системный анализ. 2011. № 6.

3. Мацкевич Д.О. Надежность информационных систем центров обработки данных // Информкурьер-связь (ИКС). 2012. № 4.

4. Ротштейн А.П. Оценка нечеткой надежности элементов систем // Надежность. 2014. № 4.

5. Kumar A. Fuzzy System Reliability Using Different Types of Vague Sets // Int. Journal of Applied Science and Engineering. 2008. № 6.

6. Chang J.R. The reliability of general vague fault-tree analysis of weapon systems fault diagnosis // Soft Computting. 2006. № 10.

7. Karnik N.N., Mendel J.M., Liang Q. Type-2 Fuzzy Logic Systems // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. 1999. Vol. 7. No. 6.

8. Жуковицкий И.В., Косолапов А.А., Михалев А.И. Методика оценки надежности нечетких систем // Автоматические системы управления на транспорте. 2012. № 2.

9. Лабинский А.Ю., Уткин О.В. Система нечеткого вывода с нечеткими функциями принадлежности // Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петерб. ун-та ГПС МЧС России». 2016. № 1. С. 68–73.