УДК 62-19+004.942

А.Т. Нгуен, А.А. Ефремов

Компьютерное моделирование показателей нечеткой надежности

Изложены принципы создания компьютерного приложения, позволяющего определять основные показатели надежности технических систем при неполной или неточной информации об их элементах. Приведены формулы, использующие математический аппарат нечетких чисел и предназначенные для расчета нечеткой вероятности безотказной работы, интенсивности отказов, средней наработки до отказа и гамма-процентной наработки. Представлен алгоритм вычисления нечетких показателей надежности по известной схеме резервирования системы с использованием информации о параметрах моделей надежности элементов, часть которой представлена в виде нечетких чисел.

Ключевые слова: нечеткая надежность, нечеткое число, компьютерное моделирование.
doi: 10.21293/1818-0442-2016-19-1-57-62

С развитием и усложнением технических систем становятся все более актуальными вопросы оценки, анализа и повышения их надежности. Результат анализа надежности системы может быть неопределенным, что обусловлено нестационарными условиями работы самой системы, влиянием внешней среды и изменяющейся нагрузки на элементы системы. В таких случаях применяются методы анализа надежности в условиях неопределенности: робастные [1], интервальные [2] и байесовские [3]. Принимая во внимание неопределенность и неполноту сведений об условиях эксплуатации конкретных экземпляров изделий, представляется обоснованным использование моделей надежности с нечеткими параметрами [4].

В настоящей работе предлагается подход к созданию компьютерного приложения, позволяющего получать нечеткие оценки основных показателей надежности систем, исходя из следующих допущений:

- известна схема резервирования технической системы;
- известны законы распределения времени до отказа (модели надежности) каждого из элементов системы;
- некоторые (или все) параметры моделей надежности элементов представлены в виде нечетких чисел с разнообразными функциями принадлежности.

В процессе создания компьютерного приложения решаются следующие задачи:

- описание схемы резервирования системы;
- создание алгоритмов представления нечетких параметров распределений с разными видами функций принадлежности;
- получение трехмерных графиков функциональных зависимостей нечетких показателей надежности с возможностью визуализации сечений указанных функций по координатным осям;
- оценка нечеткой средней наработки на отказ системы в целом;
- дефаззификация полученных в результате работы приложения нечетких показателей надежности.

Основные показатели надежности

При анализе надежности основным показателем часто выбирается *вероятность безотказной работы* (ВБР), определяемая как вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта (элемента или системы) не возникает [5]:

$$P(t)=\Pr\{T\geq t\},\ t\geq 0; \qquad (1)$$

где T – случайная наработка до отказа объекта, $P(t)$ – ВБР.

Такой выбор обусловлен, во-первых, тем, что ВБР является комплементарной к функции $F(t)$ распределения времени до отказа объекта:

$$P(t)=1-F(t),$$

что позволяет применять методы теории вероятностей при анализе надежности. Во-вторых, остальные показатели надежности определяются через ВБР [6]: *интенсивность отказов* объекта равна

$$\Lambda(t)=-\frac{P'(t)}{P(t)}, \qquad (2)$$

а *средняя наработка до отказа* определяется как

$$T_{cp}=\int_0^\infty P(t)dt. \qquad (3)$$

Широко используемый для планирования профилактических ремонтов показатель *гамма-процентная наработка на отказ* ($T_{\gamma\%}$) также определяется через функцию ВБР, исходя из условия

$$P(T_{\gamma\%})=\frac{\gamma}{100},$$

где γ – значение ВБР, выраженное в процентах [5]. Иными словами,

$$T_{\gamma\%}=\arg\left(P(t)=\frac{\gamma}{100}\right). \qquad (4)$$

Основы расчета ВБР системы

В случаях когда известна ВБР элементов системы, ВБР системы в целом можно получить с помощью последовательно-параллельного упрощения блок-схемы надежности [5, 6], анализируя схему резервирования элементов. В общем этот подход заключается в получении эквивалентной ВБР для элементов, участвующих в типовом соединении.

Так, для элементов, соединенных *последовательно* в смысле надежности, эквивалентная ВБР определяется как произведение ВБР элементов:

$$P_{\text{пос}}(t)=\prod_{i=1}^{k} P_i(t), \qquad (5)$$

а для случая *параллельного нагруженного (горячего) резервирования*

$$P_{\text{гор}}(t)=1-\prod_{i=1}^{k}\left(1-P_i(t)\right), \qquad (6)$$

где $P_i(t)$ – ВБР i-го элемента, k – количество элементов в соединении [5].

В случае *параллельного ненагруженного (холодного) резервирования* эквивалентную ВБР можно определить только при допущении, что все элементы, входящие в соединение, равнонадежны, а также что интенсивность отказов этих элементов постоянна ($\Lambda_i(t)=\lambda=\text{const.}$), т.е. справедлива экспоненциальная модель надежности [6]. Тогда

$$P_{\text{хол}}(t)=e^{-\lambda t}\cdot\sum_{i=0}^{k-1}\frac{(\lambda t)^i}{i!}. \qquad (7)$$

Еще одной схемой резервирования, широко применяющейся в технических системах, является *мажоритарное резервирование* k из n ($n=2k-1$, k = 2, 3, …) [6]. Расчет эквивалентной ВБР в этом случае также предполагает, что все элементы в соединении равнонадежны ($P_i(t)=P(t)$). Тогда

$$P_{\text{маж}}(t)=\sum_{i=k}^{n}\frac{n!}{i!(n-i)!}P^i(t)\left[1-P(t)\right]^{n-i}. \qquad (8)$$

Понятие нечеткого числа

ВБР элементов системы, использующиеся в (5)–(8), можно представить в виде $P_i(t,\mathbf{\Theta}_i)$, где $\mathbf{\Theta}_i=\{\theta_{i,1},\ldots,\theta_{i,p}\}$ – вектор параметров модели надежности i-го элемента. В случае, когда хотя бы один из параметров является нечетким числом, мы будем говорить о нечетком векторе $\tilde{\mathbf{\Theta}}$ и о функции $\tilde{P}_i(t,\tilde{\mathbf{\Theta}}_i)$, принимающей нечеткие значения в моменты времени t. ВБР системы, в которой хотя бы для одного элемента $\mathbf{\Theta}_i=\tilde{\mathbf{\Theta}}_i$, также принимает нечеткие значения [4].

Напомним, что *нечетким числом* $\tilde{A}=\{(x,\mu_A(x))\,|\,x\in\mathbb{R}\}$ называется нечеткое подмножество универсального множества действительных чисел, функция принадлежности (ФП) которого $\mu_A(x):\mathbb{R}\to[0;1]$ удовлетворяет следующим условиям [7]:

- непрерывность;
- нормальность: $\sup\limits_{x\in\mathbb{R}}(\mu_A(x))=1$;
- выпуклость

$$\mu_A(y)\geq\min\{\mu_A(x),\mu_A(z)\},\ x\leq y\leq z.$$

Основанием (носителем) нечеткого числа $\tilde{A}$ называется такое подмножество множества действительных чисел, для которого $\mu_A(x)>0$ [8], т.е.

$$\text{supp}(\tilde{A})=[S_L,S_R]:\mu_A(x)>0,\forall x\in[S_L,S_R].$$

Аналогично *ядром* нечеткого числа $\tilde{A}$ называется такое подмножество множества действительных чисел, для которого $\mu_A(x)=1$ [8], т.е.

$$\ker(\tilde{A})=[K_L,K_R]:\mu_A(x)=1,\forall x\in[K_L,K_R].$$

Таким образом, нечеткое число $\tilde{A}$ определяется четверкой характерных точек:

$$\tilde{A}=\langle S_L,K_L,K_R,S_R\rangle. \qquad (9)$$

Однако нечеткое число будет полностью определяться (9) только в том случае, когда известен вид ФП. При создании компьютерного приложения использовались ФП LR-типа, определяемые следующим выражением [9]:

$$\mu_A(x)=\begin{cases} f_L(x), & x\in[S_L,K_L);\\ 1, & x\in[K_L,K_R];\\ f_R(x), & x\in(K_R,S_R];\\ 0, & x\notin[S_L,S_R]. \end{cases} \qquad (10)$$

Выражение (10) позволяет получать разнообразные ФП, в том числе широко используемые треугольные, трапецеидальные и кусочно-непрерывные полиномиальные [9].

Альфа-сечением нечеткого числа $\tilde{A}$ (или *сечением уровня* α) называется подмножество множества действительных чисел, для которого $\mu_A(x)\geq\alpha$ [7], т.е.

$$\begin{cases} \tilde{A}[\alpha]=[L_\alpha,R_\alpha]:\mu_A(x)\geq\alpha,\forall x\in[L_\alpha,R_\alpha];\\ L_\alpha=\arg\{f_L(x)=\alpha\},\ x\in[S_L,K_L);\\ R_\alpha=\arg\{f_R(x)=\alpha\},\ x\in(K_R,S_R]. \end{cases} \qquad (11)$$

Определение нечетких показателей надежности

Пусть система состоит из k элементов с известными ВБР $P_i(t,\mathbf{\Theta}_i), i=1,\ldots,k$, где $\mathbf{\Theta}_i=\{\theta_{i,1},\ldots,\theta_{i,p_i}\}$, p_i – количество параметров модели надежности i-го элемента. Тогда ВБР системы будет представлять собой некоторую зависимость от функций ВБР ее элементов:

$$P_S(t,\mathbf{\Theta}_S)=\Phi\left[P_1(t,\mathbf{\Theta}_1),\ldots,P_k(t,\mathbf{\Theta}_k)\right],$$

где вектор $\mathbf{\Theta}_S$ есть объединение векторов $\mathbf{\Theta}_1,\ldots,\mathbf{\Theta}_k$, а зависимость $\Phi[\mathbf{Z}]$ определяется схемой резервирования системы и формулами (5)–(8). Предположим, что хотя бы один элемент вектора $\mathbf{\Theta}_S$ является нечетким числом в соответствии с выражениями (9)–(10). В этом случае ВБР системы

$\tilde{P}_S(t, \tilde{\mathbf{\Theta}}_S)$ будет принимать нечеткие значения в любой момент времени t.

Обозначим через $n = \sum_{i=1}^{k} p_i$ количество элементов в векторе $\mathbf{\Theta}_S$. Пусть r элементов среди них являются нечеткими ($1 \le r \le n$). В соответствии с [7] α-сечения нечетких параметров $\tilde{\theta}_j$ $(j = 1, 2, ..., r)$ представляют собой интервалы

$$\tilde{\theta}_j[\alpha] = \left[\underline{\theta}_j^{\alpha}, \overline{\theta}_j^{\alpha}\right],$$

где $\underline{\theta}_j^{\alpha}, \overline{\theta}_j^{\alpha}$ – левая и правая границы α-сечения нечеткого параметра $\tilde{\theta}_j$. Сформируем двухэлементные множества, содержащие эти границы:

$$\mathbf{\Psi}_{j,\alpha} = \left\{\underline{\theta}_j^{\alpha}, \overline{\theta}_j^{\alpha}\right\},\ 1 \le j \le r.$$

Элементами декартового произведения $\mathbf{D}_\alpha = \mathbf{\Psi}_{1,\alpha} \times \mathbf{\Psi}_{2,\alpha} \times ... \times \mathbf{\Psi}_{r,\alpha}$ являются кортежи $d_\alpha = \left(\psi_{1,\alpha}, \psi_{2,\alpha}, ..., \psi_{r,\alpha}\right)$, представляющие всевозможные комбинации из левых и правых границ α-сечений нечетких параметров $\tilde{\theta}_j$ [4]. В соответствии с альфа-уровневым принципом обобщения Заде [8] и формулами (1)–(3) получаем значения нечетких показателей надежности, определяемых через α-сечения для заданных уровней α в произвольные моменты времени.

Так, границы α-сечения ВБР системы $\tilde{P}\left(\tau, \tilde{\mathbf{\Theta}}_S\right)_\alpha = \left[\underline{P_\alpha(\tau)}, \overline{P_\alpha(\tau)}\right]$ в произвольный момент времени τ будут определяться следующими выражениями:

$$\begin{cases} \underline{P_\alpha(\tau)} = \inf\limits_{D_\alpha} P\left(\tau, d_\alpha\right); \\ \overline{P_\alpha(\tau)} = \sup\limits_{D_\alpha} P\left(\tau, d_\alpha\right). \end{cases} \qquad (12)$$

Используя (2) и (3), получим для момента времени τ границы α-сечения интенсивности отказов системы:

$$\begin{cases} \underline{\Lambda_\alpha(\tau)} = -\left.\dfrac{\underline{P'_\alpha(t)}}{\underline{P_\alpha(t)}}\right|_{t=\tau}; \\ \overline{\Lambda_\alpha(\tau)} = -\left.\dfrac{\overline{P'_\alpha(t)}}{\underline{P'_\alpha(t)}}\right|_{t=\tau} \end{cases} \qquad (13)$$

и для нечеткой средней наработки до отказа:

$$\begin{cases} \underline{T_{\text{ср}}[\alpha]} = \int\limits_0^\infty \underline{P_\alpha(t)} dt; \\ \overline{T_{\text{ср}}[\alpha]} = \int\limits_0^\infty \overline{P_\alpha(t)} dt. \end{cases} \qquad (14)$$

Аналогично, используя (4), определяются границы α-сечения нечеткой гамма-процентной наработки для заданного в процентах уровня γ:

$$\begin{cases} \underline{T_{\gamma\%}[\alpha]} = \arg\left(\underline{P_\alpha(t)} = \dfrac{\gamma}{100}\right); \\ \overline{T_{\gamma\%}[\alpha]} = \arg\left(\overline{P_\alpha(t)} = \dfrac{\gamma}{100}\right). \end{cases} \qquad (15)$$

Определяемые через (12) и (13) функции $\tilde{P}_S(t, \tilde{\mathbf{\Theta}}_S)$ и $\tilde{\Lambda}_S(t, \tilde{\mathbf{\Theta}}_S)$ в каждый момент времени t принимают нечеткие значения так же, как и нечеткие значения средней наработки до отказа $\tilde{T}_{cp}$ и гамма-процентной наработки $\tilde{T}_{\gamma\%}$. Для решения задач анализа надежности систем может потребоваться перейти к обычным, «четким» значениям этих показателей, т.е. провести процедуру *дефаззификации* [8]. Выбор метода дефаззификации во многом определяется условиями конкретной задачи, однако в большинстве случаев применим метод центра тяжести [10], согласно которому «четкое» значение A^* нечеткого числа $\tilde{A} = \left\{\left(x, \mu_A(x)\right) | x \in \mathbb{R}\right\}$ определяется выражением

$$A^* = \frac{\int\limits_{-\infty}^{\infty} x \cdot \mu_A(x) dx}{\int\limits_{-\infty}^{\infty} \mu_A(x) dx}. \qquad (16)$$

Компьютерное моделирование

Для решения задачи компьютерного моделирования нечетких показателей надежности необходимо представить в удобном для обработки виде исходные данные о системе, а именно:

- информацию о моделях надежности элементов;
- значения «четких» параметров моделей надежности;
- характерные точки нечетких параметров;
- вид ФП нечетких параметров;
- информацию о связях между элементами, определяющую схему резервирования системы.

Представляется целесообразным разделить информацию об элементах и информацию о схеме резервирования системы; для удобства компьютерной обработки данных эту информацию предлагается хранить в табличной (матричной) форме.

Пусть система, выбранная для моделирования, состоит из k элементов, модели надежности которых $w_i, i = 1, 2, ..., k$ выбираются из множества $\mathbf{\Xi} = \{1, 2, ..., q\}$ (здесь каждый элемент множества соответствует определенной заранее модели надежности элемента). Для модели i-го элемента известно количество параметров $p_i \in \{1, 2, ..., s\}$, которые могут быть нечеткими. Нечеткий параметр $\tilde{\theta}_{i,j}$ ($j \in \{1, 2, ..., p_i\}$) i-го элемента задается четырьмя характерными точками (9) и типом ФП $m_{i,j} \in \mathbf{M} = \{0, 1, ..., z\}$ (здесь каждый элемент множества соответствует определенному заранее типу ФП). Для параметров, не являющихся нечеткими, предлагается задавать тип ФП «0», а значения всех четырех характерных точек равными значению самого параметра. Таким образом, матрица, содержащая информацию об элементах системы, задается в виде

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} \mathbf{W} & \mathbf{\Omega}_1 & \ldots & \mathbf{\Omega}_s \end{pmatrix},$$

где $\mathbf{W}$ – вектор-столбец, содержащий элементы $w_i, i = 1,2,\ldots,k$, определяющие модели надежности i-го элемента, $\mathbf{\Omega}_j$ – матрицы размера $k \times 5$:

$$\mathbf{\Omega}_j = \begin{pmatrix} m_{1,j} & A_{1,j} & B_{1,j} & C_{1,j} & D_{1,j} \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ m_{k,j} & A_{k,j} & B_{k,j} & C_{k,j} & D_{k,j} \end{pmatrix},$$

задающие тип ФП и характерные точки для нечетких значений j-х параметров ($j = 1,2,\ldots,s$) моделей надежности элементов:

$$\tilde{\theta}_{i,j} = \langle A_{i,j}, B_{i,j}, C_{i,j}, D_{i,j} \rangle.$$

В случаях, когда количество параметров в модели надежности i-го элемента меньше s, соответствующая строка матрицы $\mathbf{\Omega}_j$ заполняется нулями.

Информация о схеме резервирования системы должна содержать указания на содержащиеся в системе типовые соединения элементов, расчет ВБР для которых осуществляется с помощью (5)–(8), а также на соединения самих блоков в структуры более высокого уровня. Представляется удобным записывать подобную информацию в табличном виде по следующим правилам:

1) каждая строка таблицы соответствует одному типовому блоку элементов;

2) первый столбец таблицы содержит уникальные буквенно-цифровые обозначения типовых блоков элементов. При этом каждому типу соединения должна однозначно соответствовать буква из заранее определенного списка. Например, обозначения *S*, *P*, *C*, *M* определяют соответственно последовательное соединение элементов, параллельное «горячее», «холодное» и мажоритарное резервирование;

3) во втором и последующих столбцах таблицы приведены обозначения элементов, участвующих в данном соединении;

4) если элементом типового соединения является сложный блок, его структура должна быть описана выше.

К примеру, на рис. 1 изображена блок-схема надежности некоторой системы, состоящей из шести элементов, в которой используются последовательные соединения элементов, а также «горячее» и «холодное» резервирование.

Заданная в подобной форме информация о составляющих систему элементах и схеме резервирования позволяет получить нечеткие значения показателей надежности системы. Ниже приведены шаги алгоритма вычисления нечеткой ВБР системы:

1) задать предельное время моделирования T_{MAX} и шаг времени $\Delta\tau$. Расчет значений нечеткой ВБР будет производиться в моменты времени $\tau_i = i\Delta\tau, i = 0,1,\ldots,n, n = \dfrac{T_{\mathrm{MAX}}}{\Delta\tau}$;

2) задать значение приращения по степени принадлежности $\Delta\alpha$. Расчет значений нечеткой ВБР будет производиться для α-сечений уровней $\alpha_j = j\Delta\alpha, j = 0,1,\ldots,m, m = \dfrac{1}{\Delta\alpha}$;

3) для каждой пары (τ_i, α_j) с помощью (5)–(12) и данных об элементах и структуре системы получаем значения $\underline{p_{i,j}}$ и $\overline{p_{i,j}}$ нижних и верхних границ α-сечения нечеткой ВБР. Сохраняем эти значения в матрицах $\underline{\mathbf{P}_S}$ и $\overline{\mathbf{P}_S}$;

4) упорядоченные тройки чисел $(\tau_i, \alpha_j, \underline{p_{i,j}})$ и $(\tau_i, \alpha_j, \overline{p_{i,j}})$ являются координатами точек, используемых для построения трехмерной поверхности, представляющей собой график функции нечеткой ВБР системы (рис. 2).

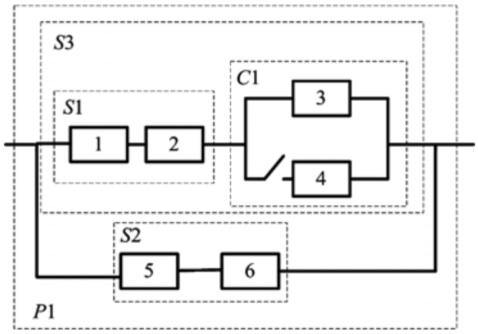

Рис. 1. Пример блок-схемы надежности

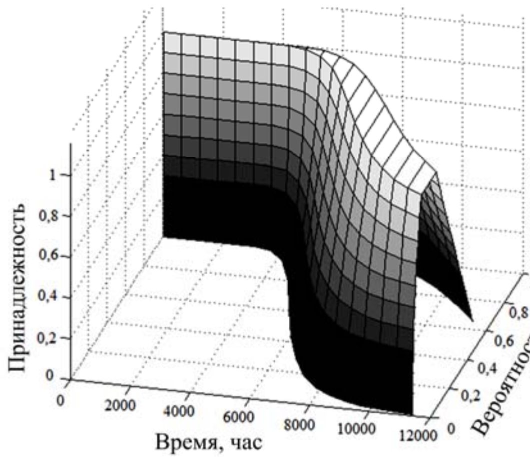

Рис. 2. Пример нечеткой ВБР

В таблице приведено описание структуры резервирования этой системы.

Пример описания структуры системы

Наименование блока	Компоненты блока	
	1	2
*S*1	*e*1	*e*2
*S*2	*e*5	*e*6
*C*1	*e*3	*e*4
*S*3	*S*1	*C*1
*P*1	*S*3	*S*2

Сечение полученного графика плоскостью $x = \tau_i$ дает возможность определить нечеткое значение ВБР для момента времени τ_i (рис. 3). Данные, необходимые для построения этого графика, содержатся в i-х строках матриц $\underline{\mathbf{P}_S}$ и $\overline{\mathbf{P}_S}$.

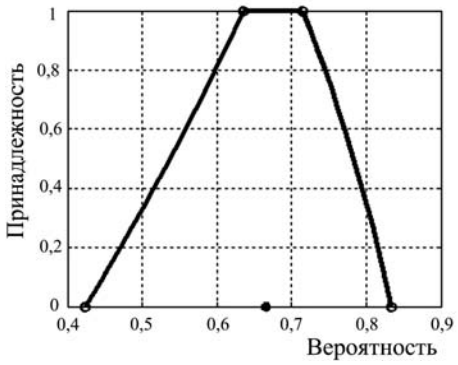

Рис. 3. Пример нечеткого значения ВБР

Сечение графика нечеткой ВБР (см. рис. 2) плоскостью $y = \gamma/100$ дает возможность определить нечеткое значение гамма-процентной наработки (рис. 4).

Для построения подобного графика необходимо в матрицах $\underline{\mathbf{P}_S}$ и $\overline{\mathbf{P}_S}$ определить значения (τ_i, α_j), которым, согласно (15), будут соответствовать значения $\underline{p_{i,j}} = \gamma/100$ и $\overline{p_{i,j}} = \gamma/100$. На практике для определения моментов времени, соответствующих заданным значениям $\gamma/100$ и α_j, может потребоваться процедура интерполяции [11].

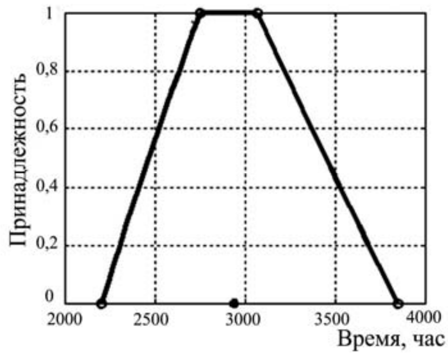

Рис. 4. Пример нечеткого значения гамма-процентной наработки

Наконец, рассекая график нечеткой ВБР плоскостью $z = \alpha_j$, можно получить границы α-сечений, в пределах которых находится значение ВБР с уровнем принадлежности не менее α_j (рис. 5).

Аналогичным образом проводится процедура вычисления значений нечеткой интенсивности отказов системы. Основным отличием в этом случае является использование численных методов дифференцирования [11], необходимого для использования в (13). График нечеткой интенсивности отказов представлен на рис. 6.

Определение нечеткой средней наработки до отказа в соответствии с (14) по данным, записанным в матрицах $\underline{\mathbf{P}_S}$ и $\overline{\mathbf{P}_S}$, требует использования численных методов интегрирования, например методом трапеций [11]. Примерный вид нечеткого значения средней наработки до отказа представлен на рис. 7.

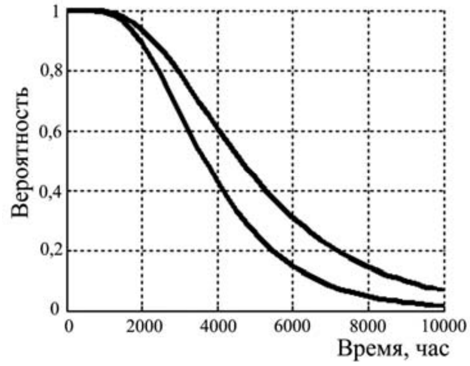

Рис. 5. Пример построения границ α-сечения нечеткой ВБР

Данные, необходимые для построения рис. 5, содержатся в j-х столбцах матриц $\underline{\mathbf{P}_S}$ и $\overline{\mathbf{P}_S}$.

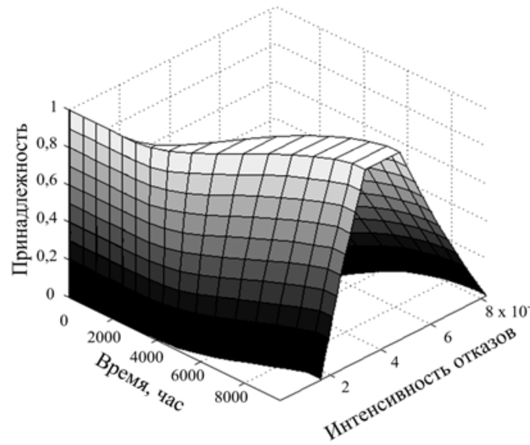

Рис. 6. Пример нечеткой интенсивности отказов

Полученные в результате компьютерного моделирования нечеткие значения показателей надежности систем могут быть подвергнуты процедуре дефаззификации согласно (16). Также при создании компьютерного приложения возможно предусмотреть опцию выбора метода дефаззификации [10].

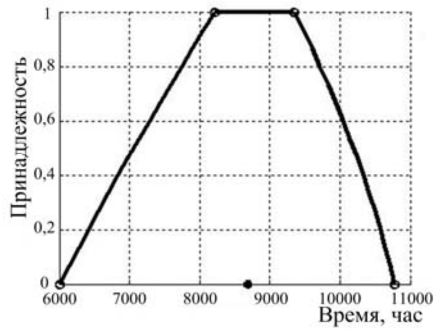

Рис. 7. Пример нечеткого значения средней наработки до отказа

На рис. 3, 4 и 7 результаты дефаззификации нечетких значений соответствующих показателей надежности отмечены точками на оси абсцисс.

Заключение

Рассмотренный в данной работе подход позволяет создать приложение для расчета и анализа эксплуатационной надежности технических систем в случаях, когда информация об элементах системы является неточной или неполной. Это особенно актуально для систем, подверженных переменной нагрузке либо в условиях изменяющихся параметров внешней среды, т.е. для систем, функционирующих в реальных условиях. Параметры моделей надежности элементов систем в таких случаях подвержены непредсказуемым колебаниям. Влияние разнообразных факторов на надежность систем может быть как благоприятным, так и негативным.

Выбор математического аппарата нечетких множеств, в частности нечетких чисел, позволяет также учитывать значения параметров, определенных на основе экспертных оценок.

Результаты работы компьютерного приложения, созданного на основе принципов, изложенных в данной работе, могут быть использованы для анализа эксплуатационной надежности систем, при проектировании, а также для определения оптимальных сроков планово-профилактических ремонтов [12].

Литература

1. Huang D. Robust control for uncertain networked control systems with random delays / D. Huang, S.K. Nguang. – Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. – 159 p.

2. Utkin L.V. Computing system reliability given interval-valued characteristics of the components / L.V. Utkin, I.O. Kozine // Reliable Computing. – 2005. – Vol. 11, Iss. 1. – P. 19–34.

3. Уткин Л.В. Интервальные байесовские модели надежности программ с использованием неоднородных процессов Пуассона / Л.В. Уткин, С.И. Затенко // Труды 13-й Междунар. науч.-практ. конф. «Системный анализ в проектировании и управлении». – СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2009. – С. 184–185.

4. Ефремов А.А. Вычисление нечеткой вероятности безотказной работы систем с нечеткими параметрами моделей надежности // Доклады ТУСУРа. – 2015. – № 2(36). – С. 136–140.

5. Острейковский В.А. Теория надежности: учеб. для вузов / В.А. Острейковский. – М.: Высшая школа, 2003. – 463 с.

6. Черкесов Г.Н. Надежность аппаратно-программных комплексов: учеб. пособие / Г.Н. Черкесов. – СПб.: Питер, 2005. – 479 с.

7. Buckley J.J. Simulating fuzzy systems / J.J. Buckley. – Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005. – 208 p.

8. Zhang H. Fuzzy modeling and fuzzy control / H. Zhang, D. Liu. – Boston: Birkhäuser, 2006. – 416 p.

9. Ефремов А.А. О применении кусочно-непрерывных функций к заданию функций принадлежности нечетких чисел (L-R)-типа / А.А. Ефремов, А.М. Кориков [Электронный ресурс] // Вестник науки Сибири. – 2011. – №1(1). – С. 340-343. – Режим доступа: http://sjs.tpu.ru/journal/article/view/70/117, свободный (дата обращения: 12.01.2016).

10. Harris J. Fuzzy logic applications in engineering science / J. Harris. – Dordrecht: Springer Netherlands, 2006. – 216 p.

11. Кочегуров А.И. Теория и реализация задач вычислительной математики в пакете MathCad: учеб. пособие / А.И. Кочегуров, Е.А. Кочегурова. – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – 124 с.

12. Кориков А.М. Эксперимент в научном исследовании // Доклады ТУСУРа. – 2015. – № 2(36). – С. 148–154.

Нгуен Ань Ту
Аспирант каф. автоматики и компьютерных систем (АиКС) Института кибернетики
Национального исследовательского
Томского политехнического университета
Тел.: +7-952-157-48-78
Эл. почта: nguyenanhtu789@gmail.com

Ефремов Александр Александрович
Ассистент каф. АиКС
Тел.: +7-906-957-09-18
Эл. почта: alexyefremov@tpu.ru

Nguyen A.T., Yefremov A.A.

Computer modeling of fuzzy reliability measures

The article enunciates development principles for a computer application, allowing estimation of basic reliability measures of technical system when the data on its components is incomplete or imprecise. The introduced formulae, based on fuzzy numbers apparatus, allow evaluating fuzzy counterparts of system reliability, failure rate, mean time to failure and reliable life. Authors propose major steps for the algorithm of fuzzy reliability measures evaluation, provided that system redundancy architecture is known and at least part of components' reliability model parameters are represented as a fuzzy numbers.

Keywords: fuzzy reliability, fuzzy number, computer modeling.