

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

УДК 004.02:510.5

А. А. КОСОЛАПОВ<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Електронні висчислювальні машини», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, 49010, г. Дніпропетровськ, Україна, тел./факс +38 (050) 575 05 32, ел. пошта akanarsky@mail.ru

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ НАДЁЖНОСТИ НЕЧЁТКИХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ РАЗМЫТЫХ МНОЖЕСТВ

**Цель.** Разработка методики расчёта надёжности нечетких систем с компонентами, параметры надежности которых описываются функциями принадлежности различного вида. **Методика.** Используется системный анализ известных подходов к оценке показателей надёжности нечётких систем с размытыми границами и различными видами функций принадлежности. **Результаты.** Предложено унифицированное описание и новый табличный алгоритм выполнения различных арифметических операций между разными видами расплывчатых множеств и разработаны табличные методы анализа надежности основных структур нечетких систем. **Научная новизна.** Введено обобщённое описание треугольных и трапециевидных функций принадлежности с размытыми границами в виде специальных кортежей  $\langle [a_1, b_{11}, b_{12}, c_1]; [a_2, b_{21}, b_{22}, c_2]; \mu_1, \mu_2 \rangle$ , получены аналитические выражения для табличного формирования графиков соответствующих функций и расчёта показателей надёжности нечётких систем сложной структуры: последовательных, с резервированием – параллельных, последовательно-параллельных, параллельно-последовательных. **Практическая значимость.** Полученные модели и табличные алгоритмы упрощают расчёты показателей надёжности сложных электронно-механических человеко-машинных систем автоматизации с нечёткими параметрами и размытыми границами.

**Ключевые слова:** нечеткая надежность; нечеткие множества; размытые множества; функция принадлежности истине (ФПИ); функция принадлежности лжи (ФПЛ); табличные модели

### Введение

Надежность является вероятностной характеристикой системы, которая показывает, будет ли система выполнять возложенные на неё функции. Традиционно, надежность системы полностью описывается в контексте вероятностных измерений, но это до тех пор, пока информация о событиях в системе является достоверной. В реальных системах информация часто неточна и зависит от лингвистического представления. В этих условиях во многих случаях получить оценки точного значения вероятности становится всё труднее и труднее. Для того, чтобы справиться с недостаточной информацией, используется нечеткий подход [1] для оценки аварийного (неработоспособного) состояния.

Д. Сингер [8] представил нечеткий подход для построения дерева отказов и анализа надёжности, в котором относительные частоты основных событий рассматриваются как нечеткие числа.

К. Кай [2] отметил, что традиционная теория

надежности основана на двух основных предположениях.

(А) Предположение о бинарных (двоичных) состояниях: система точно определяется двумя состояниями – работоспособна или неработоспособна.

(Б) Предположение о вероятностях: поведение системы полностью характеризуется в контексте вероятностных измерений.

Тем не менее, из-за неточности и неполноты исходных данных, оценка точных значений вероятности становится во многих системах затруднительной. Далее К. Кай представил новые два предположения.

(А') Предположение о нечётком состоянии: понимание отказа системы нельзя точно определить разумным путём. В любой момент времени система может находиться в одном из двух состояний: нечёткое состояние работоспособности или нечёткое состояние неработоспособности.

(Б') Предположение возможности: поведение системы может быть полностью охарактеризовано в контексте измерения возможностей.

## АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

К. Кай [1] представил следующие три формы «нечёткой теории надёжности».

(I) ProFuSt – теория надёжности: основана на предположениях вероятностей и нечетких состояний.

(II) PosBiSt – теория надёжности: основана на предположениях возможностей и бинарных состояний.

(III) PosFuSt – теория надёжности: основана на предположении возможностей и нечётких состояний.

С. Чень и Д. Мон [5] использовали интервальные зависимости для анализа надёжности нечетких системы. С помощью теоретических исследований и вычислительных экспериментов они показали, что предлагаемый ими подход является более общим по сравнению с методом А. Кумар [6].

С. Чэнь [3] представил новый метод анализа надёжности нечеткой системы с использованием упрощённых арифметических операций над нечеткими числами вместо сложных интервальных нечетких арифметических операций или сложных алгебраически расширенных нечетких чисел [6]. Далее С. Чэнь представил новый метод нечёткого анализа надёжности системы, основанный на упрощённых нечётких арифметических операциях на нечетких временных рядах с  $\alpha$ -отсечениями.

В. Гау и Д. Байер [5] расширили идею нечётких множеств размытыми множествами. С. Чен [3] предложил арифметические операции над размытыми множествами и на этой основе представил новый метод анализа надёжности нечеткой системы.

А. Кумар [6] расширил понятие треугольного размытого множества [1] идеей трапециевидных размытых множеств и предложил новые методы анализа надёжности нечёткой системы.

До сих пор в литературе обсуждаются вопросы выполнения арифметических операций между различными типами размытых множеств. Однако, по-прежнему при анализе надёжности нечётких систем предполагается, что представлена надёжность всех компонентов системы одним и тем же видом функции принадлежности [5]. Тем не менее, в практических задачах такая ситуация встречается редко. Следовательно, необходима методика, которая по-

зволяла бы находить надёжность нечетких систем с компонентами, которые имеют различные типы функций принадлежности.

### Цель работы

Разработка унифицированного описания показателей надёжности нечётких систем с размытыми границами и различными видами функций принадлежности в виде кортежа

$$\langle [a_1, b_{11}, b_{12}, c_1]; [a_2, b_{21}, b_{22}, c_2]; \mu_1, \mu_2 \rangle.$$

Для предложенной структуры кортежа рассматривается новый алгоритм выполнения различных арифметических операций между различными видами расплывчатых множеств и предлагаются табличные методы анализа надёжности различных нечетких систем. В исследовании обобщены известные работы в этой области [3-6, 9].

Для иллюстрации вышеизложенного подхода приведена оценка надёжности последовательной, параллельной, параллельно-последовательной и последовательно-параллельной нечетких систем, состоящих из четырех компонентов.

## 2. Краткий обзор размытых множеств

### 2.1. Употребление размытых множеств вместо нечетких

В процессе проектирования и технического перевооружения сортировочных станций, при использовании новых устройств, мы не можем в численном виде выразить их технические характеристики и влияние различных факторов на процесс функционирования сортировочной системы.

Эти факторы обычно имеют некоторую неопределенность, а языковые неточности в их определении связаны с нижеизложенными обстоятельствами.

Большинство систем управления на сортировочных станциях и горках являются слишком дорогими и сложными, и экспериментально измерить их характеристики в реальных условиях эксплуатации достаточно сложно. Это сопряжено с производственными потерями, поэтому пользуются экспертными оценками для выявления сбоев в системах. Однако, оценки экспертов обычно являются неопределенными,

## АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

и ситуации описываются различно синтаксическими конструкциями.

Нормальное или ненормальное состояние системы нельзя точно определить, потому что в ней реализуются функции при некоторых ограничениях и не гарантируется 100 %-ная полная надежность системы и её устройств.

Станционные системы автоматизации включают устройства, построенные на различной элементной базе - механические, релейные, электронные. Мы не можем исключить любую возможность сбоев системы, включая системы электроснабжения, природные условия и, конечно, человеческий фактор.

Поэтому предлагается использовать для анализа надежности нечетких систем автоматизации сортировочных станций размытые множества, которые помогут решить различные проблемы. В данном случае эксперты должны только указать диапазоны уровней доверия, соответствующие состояниям отказа в устройствах системы.

## 2.2. Определение размытых множеств

Пусть  $U$  будет некоторый универсум. Размытое множество  $\tilde{A}$  по множеству  $U$  характеризуется функцией принадлежности истине (ФПИ)  $t_{\tilde{A}}, t_{\tilde{A}}: U \rightarrow [0,1]$  и функцией принадлежности лжи (ФПЛ)  $f_{\tilde{A}}, f_{\tilde{A}}: U \rightarrow [0,1]$ . Если элемент множества  $U$  обозначим ' $u_i$ ', то тогда нижняя граница функции принадлежности, утверждающая истинность  $u_i$ , будет соответствовать  $t_{\tilde{A}}(u_i)$ , а нижняя граница отрицания  $u_i$ , соответствует  $f_{\tilde{A}}(u_i)$ .  $t_{\tilde{A}}(u_i)$  и  $f_{\tilde{A}}(u_i)$  связаны с реальными числами в интервале  $[0,1]$  со значением  $u_i$  из  $U$ , где  $t_{\tilde{A}}(u_i) + f_{\tilde{A}}(u_i) \leq 1$ . Размытое множество  $\tilde{A}$  на универсе  $U$  показано на рис. 1.

Если универс  $U$  является дискретным множеством, то размытое множество  $\tilde{A}$  на универсе  $U$  может быть представлено как

$$\tilde{A} = \sum_{i=1}^n [t_{\tilde{A}}(u_i), 1 - f_{\tilde{A}}(u_i)] / u_i, u_i \in U.$$

Если универс  $U$  является непрерывным множеством, то размытое множество  $\tilde{A}$  на универсе  $U$  может быть представлено как

$$\tilde{A} = \int_U [t_{\tilde{A}}(u_i), 1 - f_{\tilde{A}}(u_i)] / u_i, u_i \in U.$$

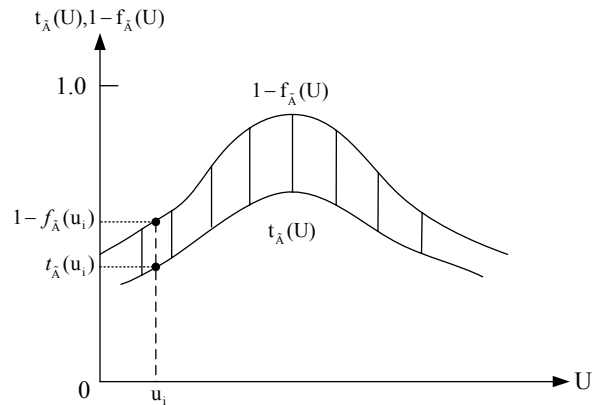


Рис. 1. Размытое множество

## 3. Алгоритм выполнения точных арифметических операций между разными типами размытых множеств

Сейчас в литературе не описаны алгоритмы выполнения арифметических операций между различными типами размытых множеств. В этой части мы рассмотрим алгоритм выполнения точных арифметических операций между различными типами размытых множеств  $\tilde{A}_1, \tilde{A}_2, \dots, \tilde{A}_n$  [6].

Для унификации описания разных треугольных и трапециевидных функций введём следующий кортеж:

$$\langle [a_1, b_{11}, b_{12}, c_1]; [a_2, b_{21}, b_{22}, c_2]; \mu_1, \mu_2 \rangle; \quad (1)$$

где  $a_1, b_{11}, b_{12}, c_1, a_2, b_{21}, b_{22}, c_2 \in U$  и  $\mu_1, \mu_2 \in [0,1]$ .

Он соответствует наиболее сложному виду трапециевидных функций с несовпадающими показателями надёжности в конечных и экстремальных точках. В случае треугольных функций  $b_{11} = b_{12}$  и  $b_{21} = b_{22}$  возможные варианты описания функций этим кортежем представлены в примерах и сведены в таблицу 1.

### Шаг 1

Найти значения:

$$\alpha_i = \sup_{i=0,1,\dots,n} (t_{\tilde{A}_i}(U)) = \max_{u_i \in U} \{t_{\tilde{A}_i}(u_i)\}$$

$$\beta_i = \sup_{i=0,1,\dots,n} (1 - f_{\tilde{A}_i}(U)) = \max_{u_i \in U} \{1 - f_{\tilde{A}_i}(u_i)\}$$

## АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

**Шаг 2**

Найти  $\forall i = 0, 1, 2, \dots, n$  значения

$$\alpha = \min(\alpha_i) \quad \text{и} \quad \beta = \min(\beta_i)$$

**Шаг 3**

Найти интервалы определённых значений  $t_{\tilde{A}_i}(U)$ , лежащих в диапазоне  $[0, \alpha]$ . Пусть интервал для  $t_{\tilde{A}_i}(U) = p$ , тогда  $0 \leq p \leq \alpha$  есть  $[u_{i1}, u_{i2}]$ , где  $u_{i1}, u_{i2} \in U$ .

**Шаг 4**

Найти интервалы определённых значений  $1 - f_{\tilde{A}_i}(U)$ , лежащих в диапазоне  $[0, \beta]$ . Пусть интервал для  $1 - f_{\tilde{A}_i}(U) = q$ ,  $0 \leq q \leq \beta$  есть  $[u'_{i1}, u'_{i2}]$ , где  $u'_{i1}, u'_{i2} \in U$ .

**Шаг 5**

Определим сложение, умножение и вычитание размытых множеств для  $t_{\tilde{A}}(U) = p$  как

$$\left[ \sum_{i=1}^n u_{i1}, \sum_{i=1}^n u_{i2} \right], \quad \left[ \prod_{i=1}^n u_{i1}, \prod_{i=1}^n u_{i2} \right] \quad \text{и}$$

$$\left[ u_{i1} - \left( \sum_{i=2}^n u_{i2} \right), u_{i2} - \left( \sum_{i=2}^n u_{i1} \right) \right] \text{ соответственно, где}$$

$\tilde{A}$  представляет получаемое размытое множество.

**Шаг 6**

Определим сложение, умножение и вычитание размытых множеств для  $1 - f_{\tilde{A}}(U) = q$  как

$$\left[ \sum_{i=1}^n u'_{i1}, \sum_{i=1}^n u'_{i2} \right], \quad \left[ \prod_{i=1}^n u'_{i1}, \prod_{i=1}^n u'_{i2} \right] \quad \text{и}$$

$$\left[ u'_{i1} - \left( \sum_{i=2}^n u'_{i2} \right), u'_{i2} - \left( \sum_{i=2}^n u'_{i1} \right) \right] \text{ соответственно.}$$

**Шаг 7**

Нарисовать функции принадлежности результирующих размытых множеств после нахождения интервалов для определённых значений  $p$  (включая 0 и  $\alpha$ ) и  $q$  (включая 0 и  $\beta$ ).

Введенная избыточность позволяет формализовать процесс вычисления результирующих показателей надёжности и построение соответствующих функций принадлежности по заданным значениям  $t_{\tilde{A}}(u_i)$  и  $1 - f_{\tilde{A}}(u_i)$ , то есть  $\mu_1$  и  $\mu_2$ .

Для левой (возрастающей) части функции

$$u_i = a_1 + \frac{t_{\tilde{A}}(u_i)(b_{11} - a_1)}{\alpha_i} \quad (2)$$

$$u_i = a_1 + \frac{(1 - f_{\tilde{A}}(u_i))(b_{11} - a_1)}{\beta_i} \quad (3)$$

Для правой (убывающей) части функции

$$u_i = c_2 - \frac{t_{\tilde{A}}(u_i)(c_2 - b_{22})}{\alpha_i} \quad (4)$$

$$u_i = c_2 - \frac{(1 - f_{\tilde{A}}(u_i))(c_2 - b_{22})}{\beta_i} \quad (5)$$

#### 4. Вычисления нечёткой надёжности последовательных, параллельных, параллельно-последовательных и последовательно-параллельных систем

Рассмотрим применение разработанного описания размытых нечётких множеств и предложенного алгоритма для анализа надёжности последовательных, параллельных, параллельно-последовательных и последовательно-параллельных нечётких систем, где параметры надёжности компонентов системы представлены различными типами размытых множеств, определяемых на универсе  $[0, 1]$ .

##### 4.1. Последовательная система

Рассмотрим последовательную систему, состоящую из  $n$  компонентов и представлена на рис. 2.

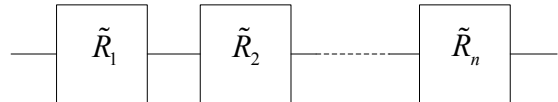


Рис. 2. Последовательная система

Нечёткая надёжность  $\tilde{R}_S = \bigotimes_{i=1}^n \tilde{R}_i$  последовательной системы, показанной на рис. 2, может быть рассчитана по алгоритму, описанному в разделе 3 для умножения, где  $\tilde{R}_i$  представляет надёжность  $i$ -ой компоненты.

##### 4.2. Параллельная система

Рассмотрим параллельную систему, состоящую из 'n' компонентов, показанных на рис. 3.

## АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

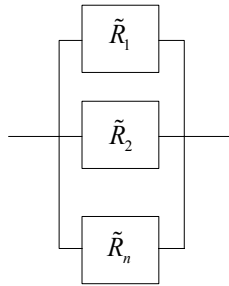


Рис. 3. Параллельная система

Нечёткая надёжность  $\tilde{R}_p = 1 \ominus \bigotimes_{i=1}^n (1 \ominus \tilde{R}_i)$  параллельной системы, приведенной на рис. 3, может быть рассчитана по алгоритму, приведенному в секции 3, с использованием операций умножения и вычитания, где  $\tilde{R}_i$  представляет надёжность  $i$ -ой компоненты.

#### 4.3. Параллельно-последовательная система

Рассмотрим параллельно-последовательную систему, состоящую из  $m$  ветвей, объединенных параллельно. В каждой ветви по  $n$  компонентов, как показано на рис. 4.

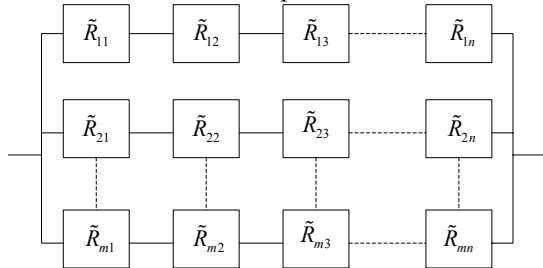


Рис. 4. Параллельно-последовательная система

Нечёткая надёжность

$$\tilde{R}_{PS} = 1 \ominus \bigotimes_{k=1}^m (1 \ominus (\bigotimes_{i=1}^n \tilde{R}_{ki}))$$

параллельно-последовательной системы может быть рассчитана по алгоритму, приведенному в секции 3, с помощью операций умножения и вычитания, где  $\tilde{R}_{ki}$  представляет надёжность  $i$ -ой компоненты ( $i=1,2,\dots,n$ ) в  $k$ -ой ветви ( $k=1,2,\dots,m$ ).

#### 4.4. Последовательно-параллельная система

Рассмотрим последовательно-параллельную систему, состоящую из  $n$  последовательных

подсистем, каждая из которых состоит из  $m$  параллельных компонентов (см. рис. 5).

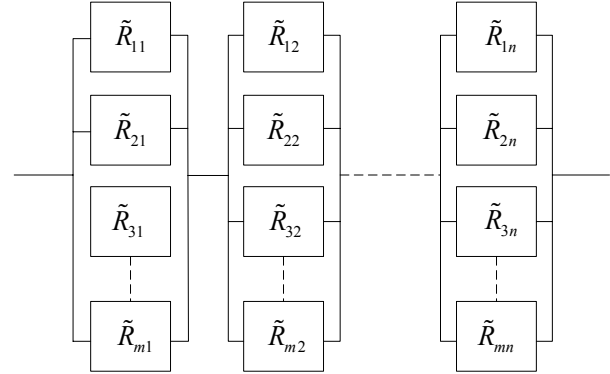


Рис. 5. Последовательно-параллельная система

Нечёткая надёжность

$$\tilde{R}_{SP} = \bigotimes_{k=1}^n (1 \ominus \bigotimes_{i=1}^m (1 \ominus \tilde{R}_{ik}))$$

последовательно-параллельной системы может быть рассчитана по алгоритму, описанному в секции 3, с помощью операций умножения и вычитания, где  $\tilde{R}_{ik}$  представляет надёжность  $i$ -ой компоненты ( $i=1,2,\dots,m$ ) в  $k$ -ой подсистеме ( $k=1,2,\dots,n$ ).

## 5. Примеры решения задач

Для иллюстрации рассмотренного алгоритма рассчитаем нечёткую надёжность последовательной системы  $\tilde{R}_S$  (рис. 6), параллельной системы  $\tilde{R}_p$  (рис. 7), параллельно-последовательной системы  $\tilde{R}_{PS}$  (рис. 8) и последовательно-параллельной системы  $\tilde{R}_{SP}$  (рис. 9), каждая из которых состоит из 4-х компонентов.



Рис. 6. Пример последовательной системы

Пусть надёжность компонентов представлена разными типами размытых множеств  $\tilde{R}_1, \tilde{R}_2, \tilde{R}_3$  и  $\tilde{R}_4$ , определёнными на универсе  $R$ , где  $R$  представляются размытыми параметрами надёжности на интервале  $[0,1]$ . Принятые значения  $\tilde{R}_1, \tilde{R}_2, \tilde{R}_3, \tilde{R}_4$  для вычисления сведены в таблицу 1 (с унифицированной записью кортежей), а функции принадлежности, описывающие  $\tilde{R}_1, \tilde{R}_2, \tilde{R}_3, \tilde{R}_4$ , показаны на рис. 10–13.

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

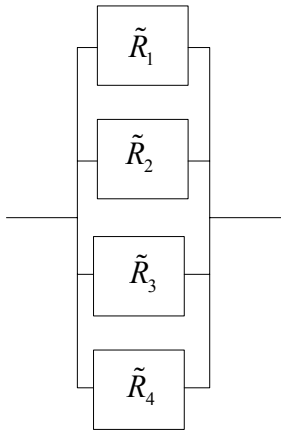


Рис. 7. Пример параллельной системы

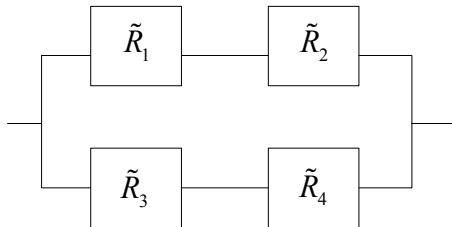


Рис. 8. Пример параллельно-последовательной системы

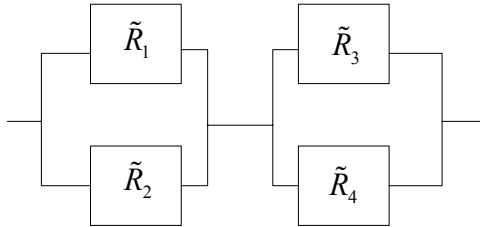


Рис. 9. Пример последовательно-параллельной системы

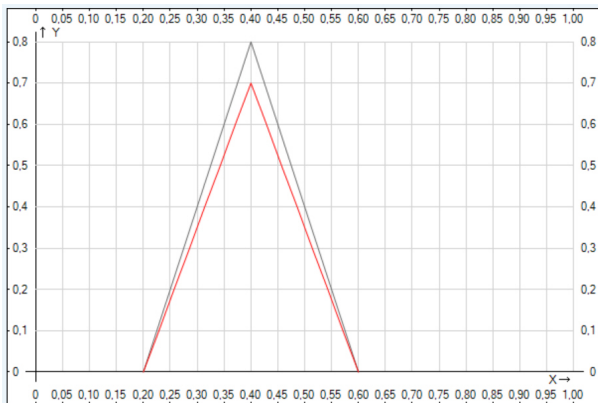


Рис. 10. Функция принадлежности  $\tilde{R}_1$

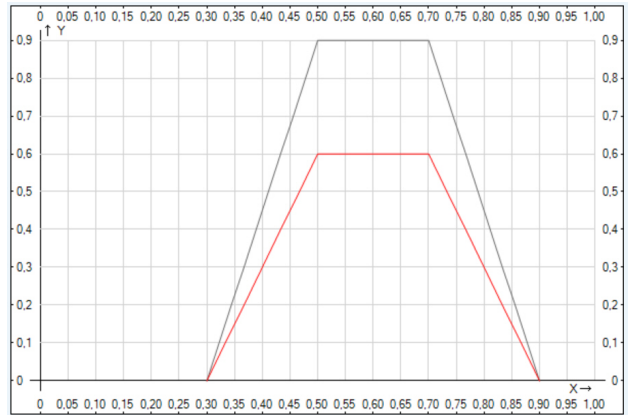


Рис. 11. Функция принадлежности  $\tilde{R}_2$

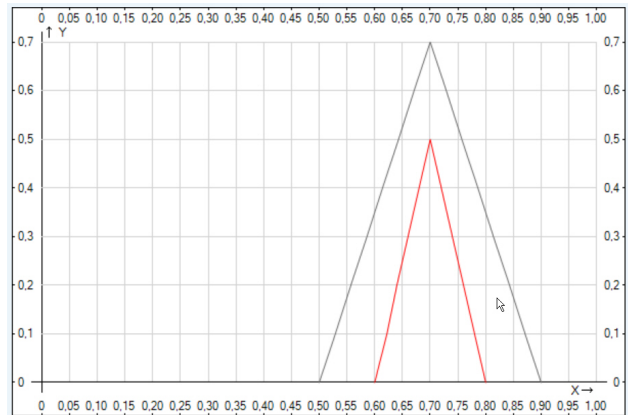


Рис. 12. Функция принадлежности  $\tilde{R}_3$

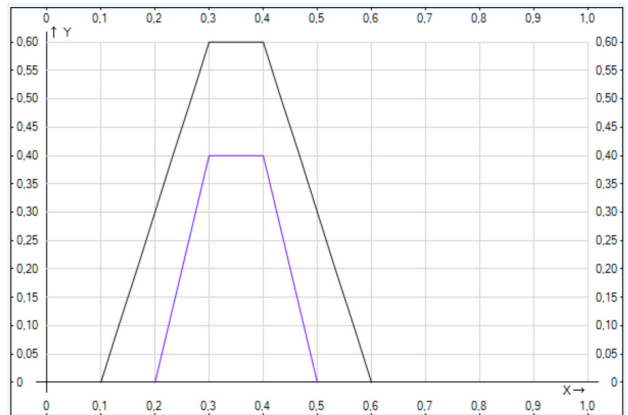


Рис. 13. Функция принадлежности  $\tilde{R}_4$

**Решение примеров**

**Шаг 1**

Находим значения  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \beta_1, \beta_2, \beta_3$  и  $\beta_4$  из заданных значений  $\tilde{R}_1, \tilde{R}_2, \tilde{R}_3$  и  $\tilde{R}_4$ :

$$\alpha_1 = 0.7, \alpha_2 = 0.6, \alpha_3 = 0.5, \alpha_4 = 0.4$$

$$\beta_1 = 0.8, \beta_2 = 0.9, \beta_3 = 0.7, \beta_4 = 0.6$$

Таблиця 1

| Нечёткая надёжность компонентов  |                                  |
|--|----------------------------------|
| Нечёткая надёжность $\tilde{R}_i$ $i$ -й компоненты  | Тип размытого множества          |
| $\tilde{R}_1 = \langle [(0.2, 0.4, 0.4, 0.6); (0.2, 0.4, 0.4, 0.6); 0.7; 0.8] \rangle$   | Треугольное                      |
| $\tilde{R}_2 = \langle [(0.3, 0.5, 0.7, 0.9); (0.3, 0.5, 0.7, 0.9); 0.6; 0.9] \rangle$   | Трапецевидное                    |
| $\tilde{R}_3 = \langle [(0.6, 0.7, 0.7, 0.8); (0.5, 0.7, 0.7, 0.9); 0.5; 0.7] \rangle$   | Треугольное                      |
| $\tilde{R}_4 = \langle [(0.2, 0.3, 0.4, 0.5); (0.1, 0.3, 0.4, 0.6); 0.4; 0.6] \rangle$   | Трапецевидное                    |
| Расчётная формула  | Тип структуры                    |
| $\tilde{R}_S = \tilde{R}_1 \otimes \tilde{R}_2 \otimes \tilde{R}_3 \otimes \tilde{R}_4$  | Последовательная                 |
| $\tilde{R}_P = 1 \ominus (1 \ominus \tilde{R}_1) \otimes (1 \ominus \tilde{R}_2) \otimes (1 \ominus \tilde{R}_3) \otimes (1 \ominus \tilde{R}_4)$                | Параллельная (с резервированием) |
| $\tilde{R}_{PS} = 1 \ominus (1 \ominus (\tilde{R}_1 \otimes \tilde{R}_2)) \otimes (1 \ominus (\tilde{R}_3 \otimes \tilde{R}_4))$                                 | Параллельно-последовательная     |
| $\tilde{R}_{SP} = 1 \ominus (1 \ominus \tilde{R}_1) \otimes (1 \ominus \tilde{R}_2) \otimes (1 \ominus (1 \ominus \tilde{R}_3) \otimes (1 \ominus \tilde{R}_4))$ | Последовательно-параллельная     |

**Шаг 2**

Находим  $\alpha = \min(0.7, 0.6, 0.5, 0.4) = 0.4$  и  $\beta = \min(0.8, 0.9, 0.7, 0.6) = 0.6$

**Шаг 3**

Вычисляем интервалы надёжности для всех компонентов, как точные значения  $t_{\tilde{R}_i}(R)$ , лежащие в диапазоне  $[0 \dots 0,4]$  (см. таблицу 2).

**Шаг 4**

Вычисляем интервалы надёжности для всех компонентов, как точные значения  $1 - f_{\tilde{R}_i}(R)$ , лежащие в диапазоне  $[0 \dots 0,6]$  (см. табл. 3). Полученные функции после выполнения шагов 3 и 4 показаны на рис. 14.

**Шаг 5**

Интервалы надёжности для последовательной, параллельной, параллельно-последовательной и последовательно-параллельной систем (см. рис. 6–9) можно вычислить с использованием таблиц 1, 2, 3 и алгоритма в секции 3 для точ-

ных значений  $t_{\tilde{R}_i}(R)$ , лежащих в диапазоне  $[0 \dots 0,4]$ . Полученные результаты приведены в табл. 4.

**Шаг 6**

Интервалы надёжности для последовательной, параллельной, параллельно-последовательной и последовательно-параллельной систем (см. рис. 6–9) можно вычислить с использованием таблиц 1, 2, 3 и алгоритма в секции 3 для точных значений  $1 - f_{\tilde{R}_i}(R)$ , лежащих в диапазоне  $[0 \dots 0,6]$ . Полученные результаты приведены в табл. 5.

**Шаг 7**

Функции принадлежности, представляющие нечёткую надёжность последовательной, параллельной, параллельно-последовательной и последовательно-параллельной систем (см. рис. 6-9) показаны на рис. 15.

Таблиця 2

**Интервалы надёжности для точных значений  $t_{\tilde{R}_i}(R)$** 

| Значение $t_{\tilde{R}_i}(R)$ | Интервалы надёжности $\tilde{R}_1$ | Интервалы надёжности $\tilde{R}_2$ | Интервалы надёжности $\tilde{R}_3$ | Интервалы надёжности $\tilde{R}_4$ |
|-------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 0                             | [0.200,0.600]                      | [0.300,0.900]                      | [0.600,0.800]                      | [0.200,0.500]                      |
| 0.1                           | [0.229,0.571]                      | [0.333,0.867]                      | [0.620,0.780]                      | [0.225,0.475]                      |
| 0.2                           | [0.257,0.543]                      | [0.367,0.833]                      | [0.640,0.760]                      | [0.250,0.450]                      |
| 0.3                           | [0.286,0.514]                      | [0.400,0.800]                      | [0.660,0.740]                      | [0.275,0.425]                      |
| 0.4                           | [0.314,0.486]                      | [0.433,0.767]                      | [0.680,0.720]                      | [0.300,0.400]                      |

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

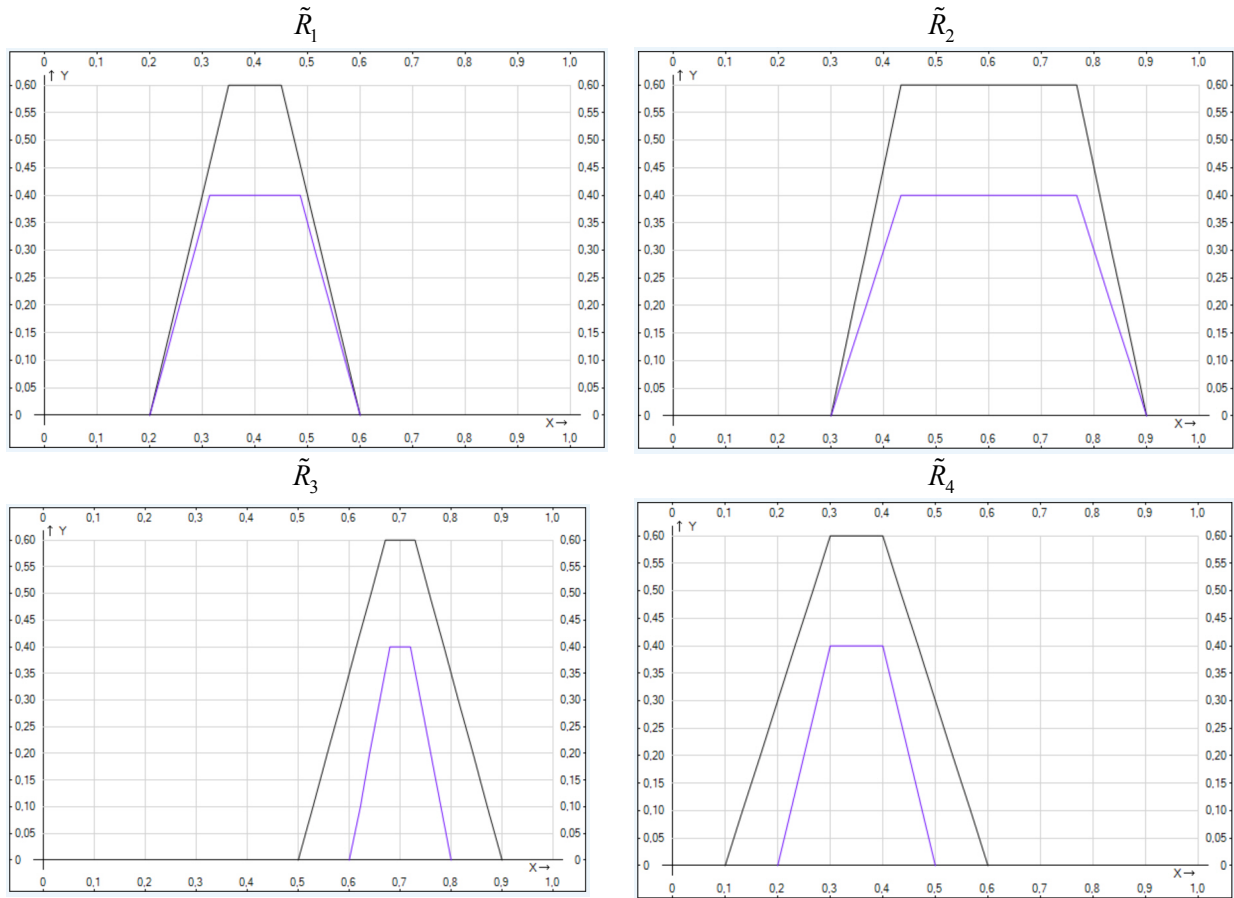


Рис. 14. Графики функций с  $\alpha$  - и  $\beta$  - отсечением

Таблица 3

Интервалы надёжности для точных значений  $1 - f_{\tilde{R}_i}(R)$

| Значения $1 - f_{\tilde{R}_i}(R)$ | Интервалы надёжности $\tilde{R}_1$ | Интервалы надёжности $\tilde{R}_2$ | Интервалы надёжности $\tilde{R}_3$ | Интервалы надёжности $\tilde{R}_4$ |
|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 0                                 | [0.200,0.600]                      | [0.300,0.900]                      | [0.500,0.900]                      | [0.100,0.600]                      |
| 0.1                               | [0.225,0.575]                      | [0.322,0.878]                      | [0.529,0.871]                      | [0.133,0.567]                      |
| 0.2                               | [0.250,0.550]                      | [0.344,0.856]                      | [0.557,0.843]                      | [0.167,0.533]                      |
| 0.3                               | [0.275,0.525]                      | [0.367,0.833]                      | [0.586,0.814]                      | [0.200,0.500]                      |
| 0.4                               | [0.300,0.500]                      | [0.389,0.811]                      | [0.614,0.786]                      | [0.233,0.467]                      |
| 0.5                               | [0.325,0.475]                      | [0.411,0.789]                      | [0.643,0.757]                      | [0.267,0.433]                      |
| 0.6                               | [0.350,0.450]                      | [0.433,0.767]                      | [0.671,0.729]                      | [0.300,0.400]                      |

Таблица 4

Интервалы надёжности для точных значений  $t_{\tilde{R}_i}(R)$

| Значения $t_{\tilde{R}_i}(R)$ | Интервалы надёжности $\tilde{R}_S$ | Интервалы надёжности $\tilde{R}_P$ | Интервалы надёжности $\tilde{R}_{PS}$ | Интервалы надёжности $\tilde{R}_{SP}$ |
|-------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 0                             | [0.007,0.216]                      | [0.821,0.996]                      | [0.173,0.724]                         | [0.299,0.864]                         |
| 0.1                           | [0.011,0.183]                      | [0.849,0.993]                      | [0.205,0.682]                         | [0.343,0.834]                         |
| 0.2                           | [0.015,0.155]                      | [0.873,0.990]                      | [0.239,0.640]                         | [0.387,0.802]                         |
| 0.3                           | [0.021,0.129]                      | [0.894,0.985]                      | [0.275,0.596]                         | [0.431,0.768]                         |
| 0.4                           | [0.028,0.107]                      | [0.913,0.980]                      | [0.312,0.553]                         | [0.474,0.732]                         |



АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

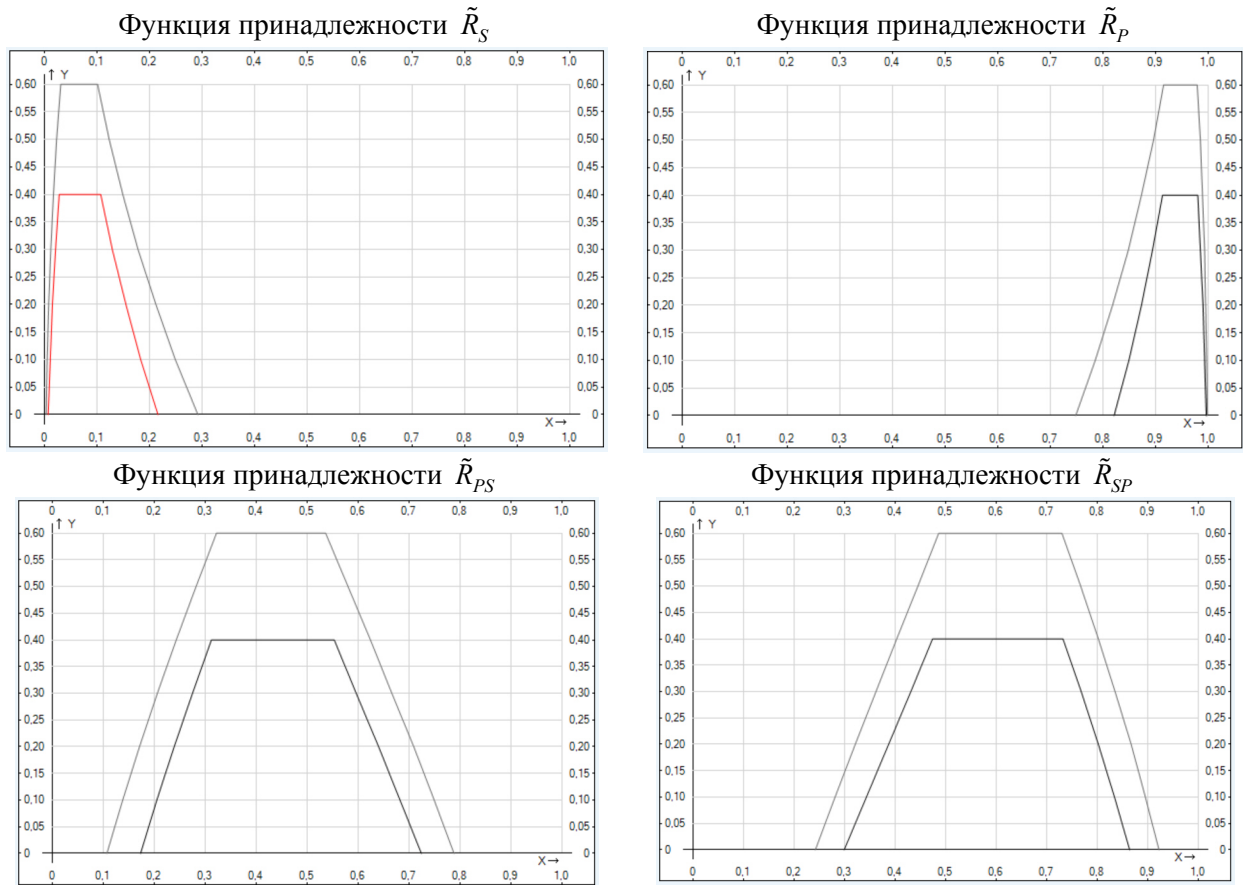


Рис. 15. Надёжность нечётких систем с размытыми надёжностными параметрами компонентов

Таблица 5

Интервалы надёжности для точных значений  $1 - f_{\tilde{R}_i}(R)$

| Значения $1 - f_{\tilde{R}_i}(R)$ | Интервалы надёжности $\tilde{R}_S$ | Интервалы надёжности $\tilde{R}_P$ | Интервалы надёжности $\tilde{R}_{PS}$ | Интервалы надёжности $\tilde{R}_{SP}$ |
|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 0                                 | [0.003,0.292]                      | [0.748,0.998]                      | [0.107,0.788]                         | [0.242,0.922]                         |
| 0.1                               | [0.005,0.249]                      | [0.785,0.997]                      | [0.138,0.749]                         | [0.281,0.895]                         |
| 0.2                               | [0.008,0.212]                      | [0.818,0.995]                      | [0.171,0.709]                         | [0.321,0.867]                         |
| 0.3                               | [0.012,0.178]                      | [0.848,0.993]                      | [0.206,0.666]                         | [0.362,0.835]                         |
| 0.4                               | [0.017,0.149]                      | [0.873,0.989]                      | [0.243,0.624]                         | [0.403,0.802]                         |
| 0.5                               | [0.023,0.123]                      | [0.896,0.985]                      | [0.282,0.580]                         | [0.445,0.767]                         |
| 0.6                               | [0.031,0.101]                      | [0.915,0.979]                      | [0.322,0.536]                         | [0.486,0.730]                         |

Автором разработаны электронные таблицы с унифицированным описанием компонентов структур (1) и расчётными формулами для обработки исходных данных (2), (3), (4), (5) и оценки показателей надёжности нечёткой системы (таблица 1) с размытыми границами.

**6. Выводы**

До сих пор в литературе не рассматривались

алгоритмы для выполнения арифметических операций между различными типами размытых множеств.

В этой статье предложен алгоритм для выполнения различных арифметических операций между разными типами размытых множеств, описанных унифицированным кортежем  $\langle [a_1, b_{11}, b_{12}, c_1]; [a_2, b_{21}, b_{22}, c_2]; \mu_1, \mu_2 \rangle$ . Новый подход был разработан для анализа нечеткой надежности последовательных, параллельных,

## АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

паралельно-последовательных и последовательно-паралельных систем автоматизации сортировочных станций и горок на сети железных дорог, которые содержат механизмы, релейные и электронные устройства, в которых работает оперативный персонал. В этих системах надежности компонентов могут быть описаны различными типами размытых множеств, поэтому предлагаемый подход и формализация построения функций принадлежности повышает гибкость и эффективность решения задач оценки надёжности больших систем. Предложенный алгоритм можно использовать для анализа надежности нечётких систем любой конфигурации.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Косолапов, А. А. Методика анализа надёжности нечётких систем с использованием теории размытых множеств / А. А. Косолапов // Современные направления теоретических и прикладных исследований 2013 : мат. междунар. науч.-практ. конф. – Одесса : КУПРИЕНКО, 2013. – С. 71–81.
2. Cai, K. Y. Possibistic reliability behavior of typical systems with two types of failures / K. Y. Cai, C. Y. Wen, M. L. Zhang // Fuzzy Sets and Systems. – 1991. – № 43, 1. – P. 17–32.
3. Chen, S. M. Analyzing fuzzy system reliability using interval valued vague set theory // International Journal of Applied Science and Engineering. – 2003. – № 1, 1. – P. 82–88.
4. Cheng, C. H. Fuzzy system reliability analysis by interval of confidence / C. H. Cheng, D. L. Mon // Fuzzy Sets and Systems. – 1993. – № 56, 1. – P. 29–35.
5. Gau, W. L. Interval valued vague sets / W. L. Gau, D. J. Buehrer // IEEE. Transactions on Systems Man and Cybernetics. – 1993. – № 23, 2. – P. 610–614.
6. Kumar, A. Fuzzy System Reliability Using Different Types of Vague Sets / A. Kumar, S. P. Yadav, S. Kumar // Int. Journal of Applied Science and Engineering. – 2008. – № 6, 1. – P. 71–83.
7. Mon, D. L. Fuzzy system reliability analysis for components with different membership functions / D. L. Mon, C. H. Cheng // Fuzzy Sets and Systems. – 1994. – № 64, 2. – P. 145–157.
8. Singer, D. A. Fuzzy set approach to fault tree and reliability analysis / D. A. Singer // Fuzzy Sets and Systems. – 1990. – № 34, 2. – P. 145–55.
9. The reliability of general vague fault-tree analysis of weapon systems fault diagnosis / Chang J. R., Chang K. H., Liao S. H., Cheng C. H. // Soft Computing. – 2006. – № 10. – P. 531–542.
10. Zadeh, L. A. Fuzzy sets / L. A. Zaden // Inform. Control. – 1965. – № 8, 3. – P. 338–353.

А. А. КОСОЛАПОВ<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Електронні обчислювальні машини», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпропетровськ, Україна, тел./факс +38 (050) 575 05 32, ел. пошта akanarsky@mail.ru

## МЕТОДИКА ОЦІНКИ НАДІЙНОСТІ НЕЧІТКИХ СИСТЕМ З ВИКОРИСТАННЯМ РІЗНИХ ВИДІВ РОЗМИТИХ МНОЖИН

**Мета.** Розробка методики розрахунку надійності нечітких систем із компонентами, параметри надійності яких описуються функціями приналежності різного виду. **Методика.** Системний аналіз відомих підходів до оцінки показників надійності нечітких систем із розмитими межами і різними видами функцій приналежності. **Результати.** Запропоновано уніфікований опис і новий табличний алгоритм виконання різних арифметичних операцій між різними видами розмитих множин, розроблені табличні методи аналізу надійності основних структур нечітких систем. **Наукова новизна.** Запропоновано узагальнений опис трикутних і трапецієподібних функцій приналежності з розмитими межами у вигляді спеціальних кортежів  $\langle [a_1, b_{11}, b_{12}, c_1]; [a_2, b_{21}, b_{22}, c_2]; \mu_1, \mu_2 \rangle$ , отримано аналітичні вирази для табличного формування графіків відповідних функцій і розрахунку показників надійності нечітких систем складної структури: послідовних, з резервуванням – паралельних, послідовно-паралельних, паралельно-послідовних. **Практична значимість.** Отримані моделі та табличні алгоритми спрощують розрахунки показників надійності складних електронно-механічних людино-машинних систем автоматизації із нечіткими параметрами і розмитими межами.

**Ключові слова:** нечітка надійність; нечіткі множини; розмиті множини; функція приналежності істині (ФПІ); функція приналежності хибності (ФПХ); табличні моделі

A. A. KOSOLAPOV<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. “Computer Engineering”, Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str. 2, 49010, Dnepropetrovsk, Ukraine, tel./ fax +38 (050) 575 05 32, e-mail akanarsky@mail.ru

## RELIABILITY OF FUZZY SYSTEMS EVALUATION METHODOLOGY USING DIFFERENT TYPES OF VAGUE SETS

**Purpose.** Development of the reliability calculating methodology of fuzzy systems with components, reliability parameters of which are described by the membership functions of various kinds. **Methodology.** Systematic analysis of the known approaches to the assessment of the reliability of fuzzy systems with vague boundaries and different kinds of membership functions. **Findings.** A unified description and the new tabular algorithm of various arithmetic operations run between the various types of fuzzy sets are proposed and tabular methods of reliability analysis of the basic structures of fuzzy systems are developed. **Originality.** A generalized description of triangular and trapezoid-shaped accessory functions of fuzzy boundaries in a special tuples is introduced  $\langle [a_1, b_{11}, b_{12}, c_1], [a_2, b_{21}, b_{22}, c_2], \mu_1, \mu_2 \rangle$ , analytical expressions for the formation of tabular schedules of their functions and the calculation of the reliability of fuzzy systems with complex structures are obtained: sequential, redundant - parallel, serial-parallel, parallel-serial. **The practical value.** The obtained models and tabular algorithms simplify the calculations of the reliability of complex electro-mechanical human-machine automation systems with fuzzy parameters and vague boundaries.

**Keywords:** fuzzy reliability; fuzzy sets; vague sets; membership function of true (MFT); membership function of lies (MFL); table models

### PREFERENCES

1. Kosolapov A.A. Metodika analiza nadezhnosti nechetkikh sistem s ispolzovaniyem teorii razmytykh mnozhestv [The method of fuzzy systems reliability analysis using fuzzy set theory]. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii “Sovremennyye napravleniya teoreticheskikh i prikladnykh issledovaniy ‘2013”* [Proc. of Int. Theoretical and Practical Conf. “Modern directions of theoretical and applied research ‘2013”]. Odessa, 2013, pp. 71-81.
2. Cai K.Y., Wen C.Y., Zhang M.L. Possibistic reliability behavior of typical systems with two types of failures. *Fuzzy Sets and Systems*, 1991, no. 43, 1, pp. 17-32.
3. Chen S.M. Analyzing fuzzy system reliability using interval valued vague set theory. *International Journal of Applied Science and Engineering*, 2003, no. 1, 1, pp. 82-88.
4. Cheng C.H., Mon D.L. Fuzzy system reliability analysis by interval of confidence. *Fuzzy Sets and Systems*, 1993, no. 56, 1, pp. 29-35.
5. Gau W.L., Buehrer D.J. Interval valued vague sets. *IEEE. Transactions on Systems Man and Cybernetics*, 1993, no. 23, 2, pp. 610-614.
6. Kumar A., Yadav S.P., Kumar S. Fuzzy System Reliability Using Different Types of Vague Sets. *Int. Journal of Applied Science and Engineering*, 2008, no. 6, 1, pp. 71-83.
7. Mon D.L., Cheng C.H. Fuzzy system reliability analysis for components with different membership functions. *Fuzzy Sets and Systems*, 1994, no. 64, 2, pp. 145-157.
8. Singer D.A. Fuzzy set approach to fault tree and reliability analysis. *Fuzzy Sets and Systems*, 1990, no. 34, 2, pp. 145-155.
9. Chang J.R., Chang K.H., Liao S.H., Cheng C.H. The reliability of general vague fault-tree analysis of weapon systems fault diagnosis. *Soft Computing*, 2006, no. 10, pp. 531-542.
10. Zadeh L.A. Fuzzy sets. *Inform. Control*, 1965, no. 8, 3, pp. 338-353.

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. И. В. Жуковицким (Украина); д.т.н., проф. А. И. Михалёвым (Украина)

Поступила в редакцию 20.03.2013

Принята к печати 05.04.2013