

НАДЕЖНОСТНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ПЕРФЕКТНОСТИ

Аннотация. Предложен метод ранжирования вариантов условий деятельности человека, влияющих на надежность его действий, без трудоемкого вычисления вероятности ошибки. В основу метода положены специально введенное понятие нечеткой перфектности и теория принятия решений в условиях нечеткости. Показано, что данный метод можно использовать как самостоятельно, так и в сочетании с известным CREAM-методом определения класса надежности на основе качественных оценок условий деятельности. Продемонстрировано совпадение результатов, полученных предложенным методом нечеткой перфектности и на основе вероятностей ошибочных действий.

Ключевые слова: условия деятельности, вероятность ошибки человека, нечеткий логический вывод, нечеткая перфектность, пересечение нечетких критериев.

ВВЕДЕНИЕ

Причинами многих аварий в транспортных, промышленных и других человеко-машинных системах являются ошибки человека, вероятность появления которых зависит от факторов, определяющих условия его деятельности: организации рабочего места, профессионализма, интенсивности работы, степени усталости и др.

Оптимальный выбор условий деятельности, которые минимизируют вероятность ошибки человека, — важнейшая часть процесса проектирования человеко-машинной системы. Чтобы сформулировать эту проблему в терминах классического математического программирования, необходимо определить:

- управляемые переменные, которыми являются условия деятельности человека;
- целевую функцию, связывающую вероятность ошибки человека с оценками условий его деятельности;
- ограничения на допустимые значения условий деятельности, соответствующих имеющимся ресурсам.

Основные трудности в реализации такого подхода состоят в том, что, во-первых, многие условия деятельности человека оцениваются экспертами с точки зрения качества и, во-вторых, область допустимых значений этих оценок может не иметь четких границ.

Вследствие указанных трудностей в практике проектирования широко применяется метод проб и ошибок, принятый в системном анализе [1]: предложенный вариант оценивается, затем в него вносятся улучшающие его изменения и он снова оценивается и т.д.

Нелинейный характер зависимости вероятности ошибки от влияющих факторов и необходимость обработки экспертной информации обуславливают использование в моделировании аппарата нечетких правил [2], являющихся универсальным аппроксиматором нелинейных функций. Наиболее полно такой подход реализован в нечетком CREAM-методе [3, 4], который применяется для анализа надежности деятельности человека в системах с повышенной опасностью (транспорт, ядерная энергетика и т.п.). В основу нечеткого CREAM-метода положен базовый CREAM-метод [5], определяющий класс вероятности ошибки по количеству условий деятельности, влияющих на повышение и понижение надежности действий человека.

Недостатком нечеткого CREAM-метода [3, 4] является его высокая трудоемкость, связанная с необходимостью использования огромного количества правил, которые могут быть противоречивыми. Кроме того, имеется важная причина, ставящая под сомнение возможность прогнозирования точного значения вероятности ошибки человека, — принцип несовместимости (incomparability) [2], согласно которому высокая точность вступает в противоречие с высокой сложностью вследствие субъективизма в оценках условий деятельности.

В настоящей статье предложен метод выбора условий деятельности, не требующий прогнозирования вероятности ошибки человека. Данный метод основан на теории принятия решений в условиях неопределенности [6] и специально введенных критериях нечеткой перфектности условий деятельности.

Статья организована следующим образом. В разд. 1 рассмотрены существующие подходы к оценке надежности действий человека и основные положения CREAM-метода. В разд. 2 описан метод нечеткой перфектности, предназначенный для выбора условий деятельности без трудоемкого расчета вероятности ошибки. В разд. 3 даны примеры применения метода нечеткой перфектности для ранжирования различных сценариев на этапе проектирования условий деятельности. В разд. 4 приведено сравнение результатов оценок условий деятельности, полученных нечетким CREAM-методом и методом нечеткой перфектности.

1. ИЗВЕСТНЫЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ НАДЕЖНОСТИ ДЕЙСТВИЙ ЧЕЛОВЕКА И CREAM-МЕТОД

На рис. 1 показаны стратегии проектирования с использованием и без использования вероятности ошибки, где M — модель прогнозирования вероятности ошибки q в зависимости от вектора X оценок условий деятельности человека.

Для построения зависимости «условие деятельности (вход) – вероятность ошибки (выход)» можно использовать различные методы эмпирического моделирования (empirical modeling), т.е. извлечения закономерностей из наблюдений: регрессионный анализ, нейронные сети, нечеткие правила «IF – THEN» и др. В исследованиях о надежности человеко-машинных систем [7] применялись методы планирования эксперимента и регрессионные модели: полиномиальные [8] и нелинейные функциональные [9, 10]. Нечеткая логика [2] активно использовалась в теории надежности с конца прошлого века [11–14]. В работе [12] для оценки надежности действий человека-оператора предлагалось использовать нечеткое число вида: $[\underline{P}, \bar{P}, L]$, где \underline{P} и \bar{P} — нижняя и верхняя оценки вероятности ошибки соответственно, L — лингвистический терм (низкий, средний, высокий и т.п.), указывающий уровень (класс) вероятности ошибки в интервале ее потенциальных значений $[\underline{P}, \bar{P}]$. Значение термина L выводилось из нечеткой базы знаний типа: «IF обученность оператора высокая and напряженность работы ниже средней, and усталость низкая, THEN вероятность ошибки низкая». Аналогичные идеи используются в нечетком CREAM-методе [3, 4], в котором нечеткие правила «IF <условия деятельности>, THEN <класс вероятности ошибки>» генерируются на основе базового CREAM-метода [5], а нечеткий логический вывод с дефаззификацией (defuzzification) выполняется по схеме Мамдани [15].

1.1. Классы надежности. Базовый CREAM-метод [5] — классификатор, в котором вероятность ошибки человека-оператора q относится к одному из четырех классов надежности c_j на основе экспертных оценок девяти влияющих факторов x_i . Классам надежности, приведенным в табл. 1, соответ-

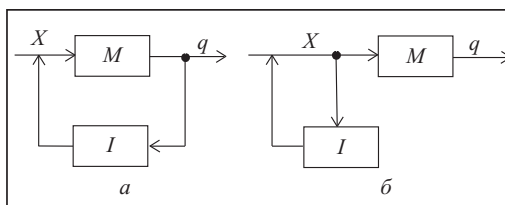


Рис. 1. Стратегии проектирования с использованием (а) и без использования (б) вероятности ошибки

Таблица 1

Класс надежности	Стиль управления	Способность предвидеть ситуацию	Вероятность ошибки	Интервал вероятности ошибки
c_1	Беспорядочный	Не имеется	Очень высокая	$1 \cdot 10^{-1} < q < 1 \cdot 10^0$
c_2	Оппортунистический	Низкая	Высокая	$1 \cdot 10^{-2} < q < 0.5 \cdot 10^{-1}$
c_3	Тактический	Средняя	Средняя	$1 \cdot 10^{-3} < q < 1 \cdot 10^{-1}$
c_4	Стратегический	Высокая	Низкая	$0.5 \cdot 10^{-5} < q < 1 \cdot 10^{-2}$

ствуют стили управления объектом (control mode), способности человека предвидеть развитие ситуации и последствия выполненных действий, вероятности ошибки и их интервалы.

В классе c_1 человек-оператор абсолютно не способен контролировать ситуацию, его действия беспорядочны (scramble), т.е. случайны, и значение вероятности ошибки может достигать единицы.

В классе c_2 оператор пытается приспособиться к текущей ситуации и может предвидеть ее развитие лишь на один шаг вперед, поэтому вероятность ошибки достаточно высока.

В классе c_3 оператор предвидит развитие ситуации на несколько шагов вперед и надежность его действий выше, чем в двух предыдущих классах.

В классе c_4 оператор предвидит развитие ситуации на много шагов вперед, что соответствует наибольшей надежности управления объектом.

1.2. Влияющие факторы и CREAM-диаграмма. Факторы, влияющие на надежность действий человека, в CREAM-методе определяются общими условиями его деятельности (common performance conditions, CPC) [5]. В табл. 2 приведены условия деятельности человека с лингвистическими терминами для их оценки, каждому из которых соответствует основание функции принадлежности и влияние на надежность: понижающее (-), повышающее (+) или незначительное (0).

Для оценки класса надежности в конкретном сценарии используется CREAM-диаграмма (рис. 2): $c_j = \varphi(N_-, N_+)$, где N_- и N_+ — суммы факторов, понижающих (-) и повышающих (+) надежность соответственно.

Пусть некоторый сценарий S задается следующей комбинацией значений термов:

$$S = (x_1 = X_{12}) \text{ and } (x_2 = X_{22}) \text{ and } (x_3 = X_{32}) \text{ and } (x_4 = X_{42}) \text{ and } (x_5 = X_{51}) \\ \text{and } (x_6 = X_{63}) \text{ and } (x_7 = X_{72}) \text{ and } (x_8 = X_{83}) \text{ and } (x_9 = X_{93}),$$

где X_{12} и X_{51} — негативные влияния и X_{63} и X_{83} — позитивные влияния, т.е. $N_- = 2$, $N_+ = 2$. Согласно CREAM-диаграмме (см. рис. 2) сценарию S соответствует класс надежности c_2 (оппортунистический), т.е. IF S , THEN $q \in c_2$.

Общее число правил типа «IF <ситуация>, THEN <класс надежности>», генерируемых с помощью CREAM-диаграммы (см. рис. 2), составляет $N = 4^3 \cdot 3^6 = 46653$.

1.3. Нечеткий CREAM-метод. Приведенный CREAM-метод [3, 4] позволяет оценивать вероятность q ошибки человека-оператора для фиксированного вектора влияющих факторов (x_1, \dots, x_9) . В этом случае вероятность q и факторы x_i рассматриваются как лингвистические переменные, которые оцениваются нечеткими терминами с помощью треугольных [3] или колоколообразных [4] функций принадлежности. Нечеткими терминами для переменной q являются классы c_1, \dots, c_4 (см. табл. 1), заданные на интервалах (универсальных множествах), а нечеткие термы для переменных x_i приведены в табл. 2. Все переменные x_i , кроме x_7 , оцениваются в интервалах $[0, 100]$. Переменная x_7 (время суток) оценивается в интервале $[0, 24]$.

Таблица 2

Условие деятельности	Влияющий фактор, x_i	Уровень (нечеткий терм)	Обозначение терма	Основание функции принадлежности	Влияние на надежность
Адекватность организации	x_1	Недостаточная	X_{11}	0–25	–
		Неэффективная	X_{12}	10–60	–
		Эффективная	X_{13}	40–90	0
		Очень эффективная	X_{14}	70–100	+
Условия труда	x_2	Недопустимые	X_{21}	0–30	–
		Допустимые	X_{22}	20–80	0
		Благоприятные	X_{23}	70–100	+
Человеко-машинный интерфейс	x_3	Неприемлемый	X_{31}	0–25	–
		Допустимый	X_{32}	10–60	0
		Адекватный	X_{33}	40–90	0
		Поддерживающий	X_{34}	70–100	+
Доступность процедур/планов	x_4	Неприемлемая	X_{41}	0–30	–
		Приемлемая	X_{42}	20–80	0
		Хорошая	X_{43}	70–100	+
Число одновременных целей	x_5	Выше допустимого	X_{51}	0–30	–
		Допустимое	X_{52}	20–80	0
		Ниже допустимого	X_{53}	70–100	0
Допустимое время	x_6	Постоянно неадекватное	X_{61}	0–30	–
		Временно неадекватное	X_{62}	20–80	0
		Адекватное	X_{63}	70–100	+
Время суток	x_7	Ночь	X_{71}	0–11	–
		День	X_{72}	8–20	0
		Ночь	X_{73}	16–24	–
Обучение и опыт	x_8	Неадекватные	X_{81}	0–30	–
		Ограниченные	X_{82}	20–80	0
		Адекватные	X_{83}	70–100	+
Взаимодействие в группе	x_9	Недостаточное	X_{91}	0–25	–
		Неэффективное	X_{92}	10–60	0
		Эффективное	X_{93}	40–90	0
		Очень эффективное	X_{94}	70–100	+

Пусть k_j — число правил в классе c_j , которые пронумерованы так: $j1, j2, \dots, jk_j, j=1, \dots, 4$. Систему нечетких правил для зависимости вероятности ошибки q от влияющих факторов x_i можно записать в формате [16]:

$$\begin{aligned}
 & \text{IF } (x_1 = a_1^{j1}) \text{ and } (x_2 = a_2^{j1}) \dots \text{ and } (x_9 = a_9^{j1}), \\
 & \text{or } (x_1 = a_1^{j2}) \text{ and } (x_2 = a_2^{j2}) \dots \text{ and } (x_9 = a_9^{j2}), \\
 & \dots \\
 & \text{or } (x_1 = a_1^{jk_j}) \text{ and } (x_2 = a_2^{jk_j}) \dots \text{ and } (x_9 = a_9^{jk_j}), \\
 & \text{THEN } q = c_j,
 \end{aligned}$$

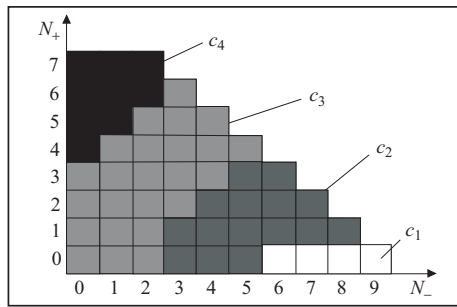


Рис. 2. CREAM-диаграмма

где a_i^p — нечеткий терм (см. третий столбец табл. 2), которым оценивается переменная x_i в строке с номером $p = k_j$.

Используя замены $\text{and} \rightarrow \min$, $\text{or} \rightarrow \max$ и процедуру дефаззификации (defuzzification) методом центра тяжести, получаем Мамдани-аппроксиматор [15] зависимости ошибки q^* от влияющих факторов x_i :

$$q^* = \frac{\int_0^1 \mu_c(q) \cdot q \cdot dq}{\int_0^1 \mu_c(q) \cdot dq}, \quad (1)$$

$$\mu_c(q) = \max \begin{cases} \min [w_1, \mu^{c_1}(q)], \\ \dots \\ \min [w_4, \mu^{c_4}(q)], \end{cases} \quad w_j = \max \begin{cases} \min [\mu^{j1}(x_1), \dots, \mu^{j1}(x_9)], \\ \dots \\ \min [\mu^{jk_j}(x_1), \dots, \mu^{jk_j}(x_9)], \end{cases}$$

где $\mu^{c_j}(q)$ — функция принадлежности вероятности ошибки q к классу надежности c_j , $\mu^P(x_i)$ — функция принадлежности фактора x_i к нечеткому терму $p = k_j$, $i = 1, \dots, 9$, $j = 1, \dots, 4$.

Недостатком нечеткого CREAM-метода [3, 4] является высокая трудоемкость вычисления вероятности ошибки вследствие необходимости использования большого количества правил. Последние генерируются с помощью CREAM-диаграммы (см. рис. 2) и могут содержать несовместимые комбинации значений факторов (т.е. термов). Например, нелогично иметь адекватность организации (см. табл. 2) очень эффективную ($x_1 = X_{14}$) и условия труда недопустимые ($x_2 = X_{21}$), число одновременных целей выше допустимого ($x_5 = X_{51}$) и допустимое время адекватное ($x_6 = X_{63}$) и т.п.

2. МЕТОД НЕЧЕТКОЙ ПЕРФЕКТНОСТИ

2.1. Перфектность как критерий. Для оценки качества условий деятельности используем нечеткий терм, который будем называть перфектностью. В общем случае нечеткая перфектность переменной величины x определяется функцией принадлежности $\pi(x) \in [0, 1]$, которая характеризует степень близости значения этой переменной к некоторому идеалу: 0 — наименьшая перфектность, 1 — наибольшая перфектность.

Синонимом понятия нечеткая перфектность является терм нечеткая правильность, для которого функции принадлежности рассмотрены в [17]. Варианты нечетких границ между перфектными и неперфектными значениями произвольной переменной x показаны на рис. 3, где по мере увеличения значения x происходят переходы:

— от абсолютной неперфектности $x < a_1$ к абсолютной перфектности $x > a_2$ (см. рис 3, а);

— от абсолютной перфектности $x < b_1$ к абсолютной неперфектности $x > b_2$ (см. рис 3, б);

— от абсолютной неперфектности $x < d_1$ к абсолютной перфектности $d_2 < x < d_3$ и обратно к абсолютной неперфектности $x > d_4$ (см. рис 3, в).

Перфектность условий деятельности (см. табл. 2), используемых в CREAM-методологии, опишем следующими простыми функциями принадлежности (рис. 4):

$$\pi(x_i) = \text{для } x_i \in [0, 100], \quad i = 1, \dots, 9 \quad (i \neq 7), \quad (2)$$

$$\pi(x_7) = \begin{cases} \frac{x_7}{8} & \text{для } x_7 \in [0, 8], \\ 1 & \text{для } x_7 \in [8, 16], \\ \frac{24-x_7}{8} & \text{для } x_7 \in [16, 24]. \end{cases} \quad (3)$$

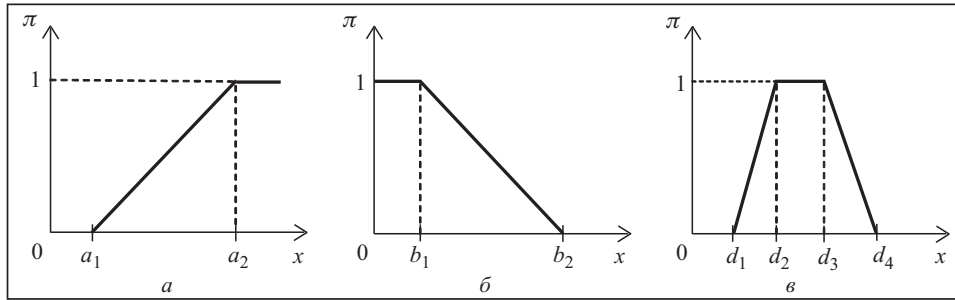


Рис. 3. Варианты нечетких границ между совершенными и несовершенными значениями переменной

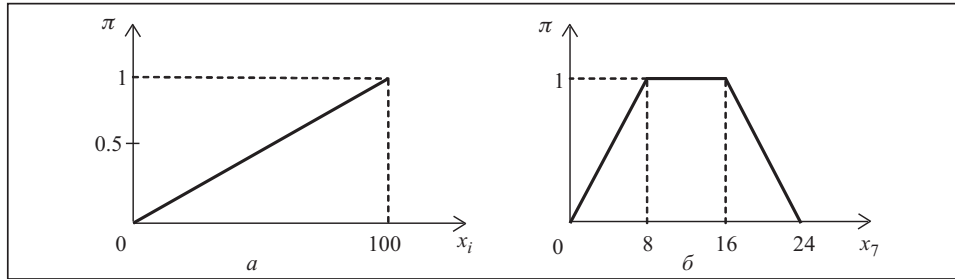


Рис. 4. Функции принадлежности для нечеткой совершенности условий деятельности

При выборе этих моделей предполагалось, что для всех условий деятельности, кроме времени суток x_7 , принадлежность к терму «совершенно» линейно возрастает с увеличением значения переменной x_i , $i = 1, \dots, 9$ ($i \neq 7$) (см. рис. 4, а), и что наиболее благоприятное для надежной работы время суток x_7 в интервале от восьми до шестнадцати часов (см. рис. 4, б).

2.2. Правило сравнения сценариев. Пусть $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$ — множество сценариев, подлежащих сравнению относительно надежности действий человека. Условия деятельности в каждом сценарии $s_j \in S$ характеризуются вектором $(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{9j})$, где x_{ij} — оценка i -го условия деятельности в сценарии $s_j \in S$, $i = 1, \dots, 9$, $j = 1, \dots, m$.

Для сравнения сценариев из множества S используем множество критериев $C = \{C_1, C_2, \dots, C_9\}$, где C_i — совершенность i -го условия деятельности из табл. 2.

Каждый критерий C_i представим в виде нечеткого множества в универсальном множестве сценариев $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$:

$$C_i = \left\{ \frac{\pi(x_{i1})}{s_1}, \frac{\pi(x_{i2})}{s_2}, \dots, \frac{\pi(x_{im})}{s_m} \right\}, \quad (4)$$

где $\pi(x_{ij})$ — уровень совершенности i -го условия деятельности в сценарии $s_j \in S$, который вычисляется с помощью функций принадлежности (2) и (3). Согласно принципу Беллмана–Заде [6] наилучший сценарий следует искать внутри пересечения \cap нечетких множеств-критериев (4)

$$S_{\text{opt}} \in D = C_1 \cap C_2 \cap \dots \cap C_9, \quad (5)$$

т.е. наилучший сценарий является одновременно лучшим по всем критериям C_i , $i = 1, \dots, 9$.

В приложениях нечеткой логики чаще используются замены типа [2]: $\cap \rightarrow \min$ (стандартное пересечение) и $\cap \rightarrow \cdot$ (алгебраическое произведение). В теории принятия решений в условиях нечеткости [6] применяется замена $\cap \rightarrow \min$. Поэтому нечеткое множество (4) выглядит так:

$$D = \left\{ \frac{\min [\pi(x_{11}), \dots, \pi(x_{91})]}{s_1}, \frac{\min [\pi(x_{12}), \dots, \pi(x_{92})]}{s_2}, \dots, \frac{\min [\pi(x_{1m}), \dots, \pi(x_{9m})]}{s_m} \right\}, \quad (6)$$

а в качестве наилучшего решения нужно выбирать сценарий S_{opt} с максимальным уровнем перфектности $\pi(S_{\text{opt}}) = \max_{j=1, \dots, m} \min [\pi(x_{1j}), \dots, \pi(x_{9j})]$. Отсюда следует правило сравнения условий деятельности.

Пусть сравниваются два сценария: $s_j \in S$ и $s_k \in S$, с известными векторами оценок условий деятельности (x_{1j}, \dots, x_{9j}) и (x_{1k}, \dots, x_{9k}) и неизвестными вероятностями ошибочных действий человека q_j и q_k соответственно. Тогда с учетом (6) правило сравнения выглядит так:

$$\text{IF } \min [\pi(x_{1j}), \dots, \pi(x_{9j})] > \min [\pi(x_{1k}), \dots, \pi(x_{9k})], \text{ THEN } q_j < q_k. \quad (7)$$

Недостаток замены $\cap \rightarrow \min$, принятой в [6], состоит в том, что операция \min не позволяет моделировать рост перфектности сценария условий деятельности в целом при увеличении перфектности некоторых из них. Например, $\min(0.7, 0.7) = \min(0.7, 0.8) = \min(0.7, 0.9)$, однако $0.7 \cdot 0.7 < 0.7 \cdot 0.8 < 0.7 \cdot 0.9$. Поэтому вместо замены $\cap \rightarrow \min$ следует пользоваться заменой $\cap \rightarrow \cdot$ (алгебраическое произведение). В этом случае нечеткое множество потенциально допустимых решений имеет вид

$$D = \left\{ \frac{[\pi(x_{11})] \cdot \dots \cdot \pi(x_{91})]}{s_1}, \frac{[\pi(x_{12})] \cdot \dots \cdot \pi(x_{92})]}{s_2}, \dots, \frac{[\pi(x_{1m})] \cdot \dots \cdot \pi(x_{9m})]}{s_m} \right\}, \quad (8)$$

и вместо (7) правило сравнения сценариев определяется соотношением

$$\text{IF } [\pi(x_{1j}) \cdot \pi(x_{2j}) \cdot \dots \cdot \pi(x_{9j})] > [\pi(x_{1k}) \cdot \pi(x_{2k}) \cdot \dots \cdot \pi(x_{9k})], \text{ THEN } q_j < q_k, \quad (9)$$

которое можно трактовать как аналог последовательной схемы в вероятностной теории надежности.

2.3. Учет важности условий деятельности. В подразд. 2.2 рассмотрен случай, когда критерии перфектности условий деятельности (4) имеют одинаковую важность. Согласно [18] для учета важности нечетких критериев необходимо использовать сжатие (concentration) и растяжение (dilation) функций принадлежности.

Если критерий C_i имеет вес $\alpha_i \geq 0$, то согласно [18] соотношение (5) необходимо преобразовать к виду

$$D = (C_1)^{\alpha_1} \cap (C_2)^{\alpha_2} \cap \dots \cap (C_9)^{\alpha_9}, \quad (10)$$

где

$$(C_i)^{\alpha_i} = \left\{ \frac{[\pi(x_{i1})]^{\alpha_i}}{s_1}, \frac{[\pi(x_{i2})]^{\alpha_i}}{s_2}, \dots, \frac{[\pi(x_{im})]^{\alpha_i}}{s_m} \right\}. \quad (11)$$

Для вычисления весов α_i воспользуемся методом наихудшего случая [19].

Пусть R_1, R_2, \dots, R_9 — ранги критериев C_1, C_2, \dots, C_9 . Будем полагать, что чем больше вес критерия, тем выше его ранг, т.е. имеет место соотношение

$$\frac{\alpha_1}{R_1} = \frac{\alpha_2}{R_2} = \dots = \frac{\alpha_l}{R_l} = \dots = \frac{\alpha_9}{R_9}. \quad (12)$$

Пусть C_l — наименее важный критерий с весом α_l и рангом R_l . Пользуясь соотношением (12), выражаем все веса α_i через отношение рангов:

$$\alpha_1 = \alpha_l \frac{R_1}{R_l}, \alpha_2 = \alpha_l \frac{R_2}{R_l}, \dots, \alpha_9 = \alpha_l \frac{R_9}{R_l}. \quad (13)$$

Согласно [18] сумма весов равна количеству критериев (в рассматриваемом случае — девяти), т.е. $\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_9 = 9$. С учетом этого из (13) получаем

$$\alpha_l = \frac{9}{\frac{R_1}{R_l} + \frac{R_2}{R_l} + \dots + \frac{R_9}{R_l}}. \quad (14)$$

Соотношения (14) и (13) позволяют вычислять искомые веса критериев на основе экспертной информации о сравнении важности (рангов) всех критериев R_i с наименее важным критерием R_l по девятибалльной шкале Саати [20]:

$$\frac{R_i}{R_l} = \begin{cases} 1, & \text{если важности критериев } C_i \text{ и } C_l \text{ совпадают,} \\ 3, & \text{если } C_i \text{ немного важнее, чем } C_l, \\ 5, & \text{если } C_i \text{ важнее, чем } C_l, \\ 7, & \text{если } C_i \text{ значительно важнее, чем } C_l, \\ 9, & \text{если } C_i \text{ абсолютно важнее, чем } C_l, \\ 2, 4, 6, 8 & \text{— промежуточные значения.} \end{cases}$$

3. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА НЕЧЕТКОЙ ПЕРФЕКТНОСТИ

3.1. Описание задачи. Рассмотрим случай, который произошел с пассажиром А, когда он имел реальный шанс опоздать на авиарейс.

По расписанию вылет должен был состояться в 1³⁰ ночи. За сутки до вылета пассажир А зарегистрировался на рейс через Internet и получил сообщение, что посадка в самолет состоится у выхода № 8. За два часа до вылета пассажир А прошел все этапы контроля и расположился в зале ожидания у выхода № 8. За 45 мин до вылета пассажир А обнаружил, что еще лишь двое пассажиров ожидают посадки на его рейс у выхода № 8. Он пытался найти информацию о вылете, но информационное табло находилось вне поля зрения. За 15 мин до вылета пассажиру А случайно удалось встретить служащую аэропорта, которая после звонка по телефону сообщила, что посадка состоится у другого выхода. В результате пассажиру А пришлось бежать с ручной кладью более 10 мин, что негативно отразилось на его самочувствии.

3.2. Исходные условия деятельности. Экспертные оценки условий деятельности пассажира А на уровнях, принятых в CREM-методе (см. табл. 2), представлены в табл. 3. Количество условий, оказывающих позитивное (+) и негативное (–) влияния на надежность действий человека составляет $N_+ = 1$ и $N_- = 5$. Согласно CREM-диаграмме (см. рис. 2) это соответствует классу надежности c_2 (оппортунистический).

Таблица 3

Условие деятельности	Качественная оценка и основание функции принадлежности	Влияние на надежность
Адекватность организации	Неэффективная 10–60	–
Условия труда	Допустимые 20–80	0
Человеко-машинный интерфейс	Неприемлемый 0–25	–
Доступность процедур/планов	Неприемлемая 0–30	–
Число одновременных целей	Допустимое 20–80	0
Допустимое время	Адекватное 70–100	+
Время суток	Ночь 0–11	–
Обучение и опыт	Неадекватные 0–30	–
Взаимодействие в группе	Неэффективное 10–60	0

Таблица 4

Влияющий фактор, x_i	Количественные оценки исходных условий деятельности для сценария s_i				
	s_1	s_2	s_3	s_4	s_5
x_1	35	30	40	35	45
x_2	50	45	55	40	60
x_3	12	7	17	5	15
x_4	15	10	20	15	15
x_5	50	45	55	60	40
x_6	85	80	75	85	75
x_7	1^{30}	1^{30}	1^{30}	19^{00}	7^{00}
x_8	15	10	20	15	25
x_9	35	30	40	70	45

Качественные оценки (уровни) условий деятельности, приведенные в табл. 3, могут иметь различные количественные значения из допустимых интервалов. Поэтому, оставаясь в одном и том же классе надежности c_2 , можно генерировать различные сценарии, отличающиеся вероятностями ошибки человека.

Покажем, что пользуясь методом нечеткой перфектности, предложенным в разд. 3, можно ранжировать генерируемые сценарии без вычисления вероятности ошибки. Отметим, что разработка методов количественной оценки условий деятельности и связанных с этим затрат в настоящей статье не рассматривается. Предполагается, что такие оценки задаются экспертами.

В табл. 4 представлены количественные оценки, соответствующие интервалам из табл. 3, для пяти сценариев. Ранжирование первых трех сценариев очевидно: s_3 — наилучший, s_2 — наихудший, т.е. для вероятностей ошибки человека имеет место неравенство $q_3 < q_1 < q_2$. Однако аналогичное неравенство для сценариев s_4 и s_5 неочевидно, поскольку ни один из этих сценариев не является лучшим по всем критериям.

Подставив данные из табл. 4 в функции принадлежности (2) и (3), запишем нечеткие множества (4):

$$\begin{aligned}
 C_1 &= \{0.35/s_1, 0.3/s_2, 0.4/s_3, 0.35/s_4, 0.45/s_5\}, \\
 C_2 &= \{0.5/s_1, 0.45/s_2, 0.55/s_3, 0.4/s_4, 0.6/s_5\}, \\
 C_3 &= \{0.12/s_1, 0.07/s_2, 0.17/s_3, 0.05/s_4, 0.15/s_5\}, \\
 C_4 &= \{0.15/s_1, 0.1/s_2, 0.2/s_3, 0.15/s_4, 0.15/s_5\}, \\
 C_5 &= \{0.5/s_1, 0.45/s_2, 0.55/s_3, 0.6/s_4, 0.4/s_5\}, \\
 C_6 &= \{0.85/s_1, 0.8/s_2, 0.75/s_3, 0.85/s_4, 0.75/s_5\}, \\
 C_7 &= \{0.19/s_1, 0.19/s_2, 0.19/s_3, 0.63/s_4, 0.88/s_5\}, \\
 C_8 &= \{0.15/s_1, 0.1/s_2, 0.2/s_3, 0.15/s_4, 0.25/s_5\}, \\
 C_9 &= \{0.35/s_1, 0.3/s_2, 0.4/s_3, 0.7/s_4, 0.45/s_5\}.
 \end{aligned}$$

Множество потенциально допустимых решений (8) имеет вид

$$D = \left\{ \frac{0.13 \cdot 10^{-4}}{s_1}, \frac{0.19 \cdot 10^{-5}}{s_2}, \frac{0.47 \cdot 10^{-4}}{s_3}, \frac{0.35 \cdot 10^{-4}}{s_4}, \frac{0.18 \cdot 10^{-3}}{s_5} \right\}.$$

Откуда для вероятностей ошибок с учетом (9) получаем неравенство

$$q_5 < q_3 < q_4 < q_1 < q_2, \tag{15}$$

т.е. s_5 — наилучший сценарий, а s_2 — наихудший. Таким образом, формально подтверждается очевидный рейтинг сценариев s_1, s_2 и s_3 , а также устанавливается неочевидное ранее преимущество s_5 над s_4 .

Для учета важности условий деятельности будем полагать, что известны следующие экспертные оценки: наименее важным условием деятельности является время суток C_7 , а также $\frac{R_1}{R_7} = 2, \frac{R_2}{R_7} = 1, \frac{R_3}{R_7} = 1, \frac{R_4}{R_7} = 1, \frac{R_5}{R_7} = 7, \frac{R_6}{R_7} = 1, \frac{R_7}{R_7} = 1, \frac{R_8}{R_7} = 3, \frac{R_9}{R_7} = 1$.

Пользуясь формулами (14) и (13), получаем

$$\alpha_7 = \frac{9}{\sum_{i=1}^9 R_i / R_7} = \frac{9}{2+1+1+1+7+1+1+3+1} = 0.5, \quad \alpha_1 = \alpha_7 \cdot \frac{R_1}{R_7} = 0.5 \cdot 2 = 1,$$

$$\alpha_2 = \alpha_7 \cdot \frac{R_2}{R_7} = 0.5 \cdot 1 = 0.5, \quad \alpha_3 = \alpha_4 = \alpha_6 = \alpha_7 = \alpha_9 = \alpha_2 = 0.5,$$

$$\alpha_5 = \alpha_7 \cdot \frac{R_5}{R_7} = 0.5 \cdot 7 = 3.5, \quad \alpha_8 = \alpha_7 \cdot \frac{R_8}{R_7} = 0.5 \cdot 3 = 1.5.$$

С учетом этих весов нечеткие критерии (11) имеют вид

$$(C_1)^1 = \{0.35/s_1, 0.3/s_2, 0.4/s_3, 0.35/s_4, 0.45/s_5\},$$

$$(C_2)^{0.5} = \{0.71/s_1, 0.67/s_2, 0.74/s_3, 0.63/s_4, 0.78/s_5\},$$

$$(C_3)^{0.5} = \{0.35/s_1, 0.27/s_2, 0.41/s_3, 0.22/s_4, 0.39/s_5\},$$

$$(C_4)^{0.5} = \{0.39/s_1, 0.32/s_2, 0.45/s_3, 0.38/s_4, 0.38/s_5\},$$

$$(C_5)^{3.5} = \{0.09/s_1, 0.06/s_2, 0.12/s_3, 0.17/s_4, 0.04/s_5\},$$

$$(C_6)^{0.5} = \{0.92/s_1, 0.89/s_2, 0.87/s_3, 0.92/s_4, 0.87/s_5\},$$

$$(C_7)^{0.5} = \{0.43/s_1, 0.43/s_2, 0.43/s_3, 0.79/s_4, 0.94/s_5\},$$

$$(C_8)^{1.5} = \{0.06/s_1, 0.03/s_2, 0.09/s_3, 0.06/s_4, 0.13/s_5\},$$

$$(C_9)^{0.5} = \{0.59/s_1, 0.55/s_2, 0.63/s_3, 0.84/s_4, 0.67/s_5\}.$$

Пересечение (10) этих нечетких множеств с использованием замены $\cap \rightarrow \cdot$ (алгебраическое произведение) образует нечеткое множество

$$D = \left\{ \frac{0.43 \cdot 10^{-4}}{s_1}, \frac{0.66 \cdot 10^{-5}}{s_2}, \frac{0.14 \cdot 10^{-3}}{s_3}, \frac{0.11 \cdot 10^{-3}}{s_4}, \frac{0.15 \cdot 10^{-3}}{s_5} \right\},$$

из которого следует неравенство (15) для вероятностей ошибки в различных сценариях. Таким образом, учет важности условий деятельности не изменяет рейтинги рассматриваемых сценариев.

3.3. Улучшение условий деятельности. Пусть для повышения надежности действий человека решено улучшить три условия деятельности: адекватность организации, человеко-машинный интерфейс, обучение и опыт. Качественные оценки улучшенных условий деятельности показаны в табл. 5, из которой видно, что количество позитивных (+) и негативных (–) влияний на надежность теперь составляет $N_+ = 4$ и $N_- = 3$. Согласно CREAM-диаграмме (см. рис. 2) это соответствует классу надежности c_3 (тактический).

Предположим, что, исходя из имеющихся ресурсов, внутри класса c_3 можно реализовать три сценария улучшения условий деятельности: s_6, s_7 и s_8 . Количественные оценки для этих сценариев представлены в табл. 6. Нечеткое множество (8), полученное с помощью (2) и (3) для исходных данных из табл. 6, имеет вид

$$D = \left\{ \frac{0.24 \cdot 10^{-2}}{s_6}, \frac{0.42 \cdot 10^{-2}}{s_7}, \frac{0.46 \cdot 10^{-3}}{s_8} \right\}.$$

Таблица 5

Условие деятельности	Качественная оценка и основание функции принадлежности	Влияние на надежность
Адекватность организации	Очень эффективная 70–100	+
Условия труда	Допустимые 20–80	0
Человеко-машинный интерфейс	Поддерживающий 70–100	+
Доступность процедур/планов	Неприемлемая 0–30	–
Число одновременных целей	Допустимое 20–80	–
Допустимое время	Адекватное 70–100	+
Время суток	Ночь 0–11	–
Обучение и опыт	Адекватные 70–100	+
Взаимодействие в группе	Неэффективное 10–60	0

Таблица 6

Влияющий фактор, x_j	Количественные оценки улучшенных условий деятельности для сценария s_j		
	s_6	s_7	s_8
x_1	72	75	90
x_2	40	50	30
x_3	85	95	80
x_4	20	15	5
x_5	70	25	60
x_6	90	85	75
x_7	4 ⁰⁰	8 ⁰⁰	2 ⁰⁰
x_8	75	80	95
x_9	20	50	40

Отсюда следует неравенство для вероятностей ошибки $q_7 < q_6 < q_8$, т.е. s_7 — наилучший сценарий, а s_8 — наихудший.

Приведенные примеры показывают, что метод нечеткой перфектности, предложенный в разд. 3, можно применять как самостоятельно, так и в сочетании с CREAM-методом [5].

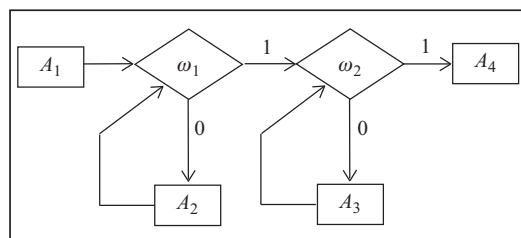


Рис. 5. Алгоритм надежного проектирования условий деятельности

Алгоритм надежного проектирования условий деятельности, использующий два метода, представлен на рис. 5, где A_1 — оценка класса надежности действий человека при исходных условиях его деятельности CREAM-методом; ω_1 — проверка условия: «имеется ли возможность повышения класса надежности?»

(1 — имеется, 0 — не имеется); A_2 — ранжирование вариантов повышения класса надежности CREAM-методом; ω_2 — проверка условия: «имеется ли возможность улучшения условия деятельности внутри класса надежности?» (1 — имеется, 0 — не имеется); A_3 — ранжирование вариантов улучшения условий деятельности внутри класса методом нечеткой перфектности; A_4 — фиксация результатов проектирования условий деятельности.

Заметим, что условия ω_1 и ω_2 проверяются с учетом стоимостных ограничений.

5. СРАВНЕНИЕ МЕТОДА НЕЧЕТКОЙ ПЕРФЕКТНОСТИ С НЕЧЕТКИМ CREAM-МЕТОДОМ

Возникает вопрос: совпадают ли результаты ранжирования сценариев методом нечеткой перфектности с аналогичными результатами, полученными на основе вероятностей ошибок человека? Для ответа на него воспользуемся вероятностями ошибок, найденных в [3] нечетким CREAM-методом с помощью формулы (1) для пяти сценариев. Эти результаты приведены в табл. 7, где согласно вероятностям ошибок s_{10} — наилучший сценарий, а s_{12} — наихудший, т.е. для вероятностей ошибки имеет место неравенство

$$q_{10} < q_9 < q_{11} < q_{13} < q_{12}. \quad (16)$$

Подставляя исходные данные из табл. 7 в функции принадлежности (2) и (3), получаем нечеткое множество допустимых решений (8) в виде

$$D = \left\{ \frac{0.97 \cdot 10^{-3}}{s_9}, \frac{0.43 \cdot 10^{-1}}{s_{10}}, \frac{0.15 \cdot 10^{-3}}{s_{11}}, \frac{0.25 \cdot 10^{-11}}{s_{12}}, \frac{0.87 \cdot 10^{-9}}{s_{13}} \right\}.$$

Отсюда следует, что наибольшую перфектность имеет сценарий s_{10} , которому соответствует наименьшая вероятность ошибки q_{10} . Далее в порядке убывания перфектности идут сценарии $s_9, s_{11}, s_{13}, s_{12}$, которым соответствуют вероятности ошибок $q_9, q_{11}, q_{13}, q_{12}$. Таким образом, для вероятностей ошибок имеет место неравенство (16), что свидетельствует о совпадении результатов ранжирования сценариев нечетким CREAM-методом [3] и методом нечеткой перфектности.

Таблица 7

Влияющий фактор, x_i	Результаты применения нечеткого CREAM-метода для сценария s_i с вероятностью ошибки q				
	s_9 $q = 1.0 \cdot 10^{-2}$	s_{10} $q = 9.81 \cdot 10^{-4}$	s_{11} $q = 6.33 \cdot 10^{-2}$	s_{12} $q = 2.02 \cdot 10^{-1}$	s_{13} $q = 1.91 \cdot 10^{-1}$
x_1	22	90	15	10	10
x_2	30	90	17	10	12
x_3	40	90	38	10	12
x_4	50	90	42	10	14
x_5	60	90	78	10	15
x_6	70	90	45	10	16
x_7	4	12	22	2	20
x_8	50	90	56	10	18
x_9	70	90	78	10	20

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вероятность ошибочных действий является объективной основой проектирования условий деятельности, влияющих на надежность действий человека. Прогнозирование вероятности ошибки является сложной проблемой эмпирического моделирования, которая требует достоверной обучающей выборки и большого числа экспертных правил: IF <условия деятельности>, THEN <вероятность ошибки>.

Для снижения трудоемкости моделирования предложено сравнивать проекты условий деятельности не по вероятности ошибки, а по уровню их перфектности. Это дает возможность на основе единственного правила, аналогичного последовательной схеме расчета надежности, связать перфектность системы условий деятельности с перфектностью каждого из условий. Совпадение результатов ранжирования различных сценариев на основе вероятностей ошибки человека и предложенным методом нечеткой перфектности позволяет рекомендовать этот метод для экспресс-анализа вариантов на этапе проектирования условий деятельности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глушков В.М. Введение в АСУ. Киев: Техника, 1974, 320 с.
2. Zadeh L. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning. Part 1 and 2. *Information Science*. 1975. Vol. 8. P. 199–249; P. 301–357.
3. Konstandinidou M., Nivolianitou Z., Kiranoudis C. and Markatos N. A fuzzy modeling application of CREAM methodology for human reliability analysis. *Reliability Engineering and System Safety*. 2006. Vol. 91, Iss. 6. P. 706–716.
4. Marseguerra M., Zio Enrico, Librizzi M. Human reliability analysis by fuzzy “CREAM”. *Risk Analysis*. 2007. Vol 27, N 1. P. 137–154.
5. Hollnagel E. Cognitive reliability and error analysis method (CREAM). Amsterdam: Elsevier Science Ltd., 1998. 302 p.
6. Bellman R.E., Zadeh L.A. Decision making in a fuzzy environment. *Management Science*. 1970. Vol. 17. P. 141–164.
7. Губинский А.И. Надежность и качество функционирования эргатических систем. Ленинград: Наука, 1982. 270 с.
8. Губинский А.И., Евграфов В.Г. Эргономическое проектирование судовых систем управления. Ленинград: Судостроение, 1977. 234 с.
9. Ротштейн А.П., Кузнецов П.Д. Проектирование бездефектных человеко-машинных технологий. Киев: Техника, 1992. 180 с.
10. Информационно-управляющие человеко-машинные системы: исследование, проектирование, испытание. Под ред. Губинского А.И., Евграфова В.Г. Москва: Машиностроение, 1993. 528 с.
11. Cay K.-Y. Introduction to fuzzy reliability. Dordrecht: Kluwer Academia Publishers, 1996. 311 p.
12. Rotshtein A. Fuzzy reliability analysis of man-machine systems. In: *Reliability and Safety Analyses under Fuzziness*. Onisawa T., Kasprzyk J. (Eds.). Studies in Fuzziness, Vol. 4. Physica-Verlag, A. Springer-Verlag Company, 1995. P. 43–60.
13. Уткин Л.В., Шубинский И.Б. Нетрадиционные методы оценки надежности информационных систем. Санкт-Петербург: Любавич, 2000. 173 с.
14. Onisawa T. An application of fuzzy concepts to modeling of reliability analysis. *Fuzzy Sets and Systems*. 1990. Vol. 37. P. 267–286.
15. Mamdani E. Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. *Proc. IEE*. 1974. Vol. 121, N 12. P. 1585–1588.
16. Rotshtein A. Design and tuning of fuzzy rule-based systems for medical diagnosis. Chapter 9. In: *Fuzzy and Neuro-Fuzzy Systems in Medicine*. Teodorescu H., Kandel A., Jain L.C. (Eds.). Boca Raton, FL: CRC Press, USA, 1998. P. 243–280.

17. Ротштейн А.П. Алгебра алгоритмов и нечеткая логика в анализе надежности систем. *Известия РАН. Теория и системы управления*. 2010. № 2. С. 87–99.
18. Yager R.R. Fuzzy decision-making including unequal objectives. *Fuzzy Sets and Systems*. 1978. N 1. P. 87–95.
19. Ротштейн А.П. Нечеткий многокритериальный выбор альтернатив: метод наихудшего случая. *Известия РАН. Теория и системы управления*. 2009. № 3. С. 51–55.
20. Саати Т.Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий. Москва: Радио и связь, 1989. 316 с.

Надійшла до редакції 05.12.2017

О.П. Ротштейн
НАДІЙНІСНЕ ПРОЕКТУВАННЯ УМОВ ДІЯЛЬНОСТІ ЛЮДИНИ
НА ОСНОВІ НЕЧІТКОЇ ПЕРФЕКТНОСТІ

Анотація. Запропоновано метод ранжирування умов діяльності, які впливають на надійність, без трудомісткого обчислення ймовірності похибки. Метод базується на спеціально введеному понятті нечіткої перфектності та теорії прийняття рішень в умовах нечіткості. Показано, що запропонований метод можна використовувати як самостійно, так і разом з відомим CREAM-методом визначення класу надійності на основі якісних оцінок умов діяльності. Продемонстровано збіг результатів, отриманих запропонованим методом нечіткої перфектності і на основі ймовірностей помилкових дій.

Ключові слова: умови діяльності, ймовірність помилки людини, нечітке логічне виведення, нечітка перфектність, перетин нечітких критеріїв.

A. Rotshtein
RELIABILITY-BASED DESIGN OF HUMAN PERFORMANCE CONDITIONS
USING FUZZY PERFECTION

Abstract. A method is proposed for selection of performance conditions that affect the human reliability without time-consuming calculation of the probability of human error. This method is based on the specially introduced concept of fuzzy perfection and theory of decision-making under fuzziness. It is shown that the proposed method can be used both independently and together with the well-known CREAM method of determining the reliability class based on cognitive assessments of human performance conditions.

Keywords: performance conditions, probability of human error, fuzzy logic inference, fuzzy perfection, intersection of fuzzy criteria.

Ротштейн Александр Петрович,
 доктор техн. наук, профессор Академического центра Lev — Иерусалимский технологический колледж, Израиль, e-mail: rothstei@g.jct.ac.il.