

## ЭКОНОМИКА И МЕНЕДЖМЕНТ

УДК 658.6

В.В. Мирошников, Н.М. Борбаць, О.А. Горленко

### РАЗВИТИЕ FMEA-АНАЛИЗА НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕОРИИ НЕЧЁТКИХ МНОЖЕСТВ

Рассмотрено проведение анализа видов и последствий потенциальных дефектов на основе применения теории нечётких множеств. Предложены термины соответствующих лингвистических переменных. Приведён пример расчёта приоритетного числа риска на основе математических действий с нечёткими числами.

Ключевые слова: FMEA, нечёткие множества, лингвистические переменные, нечёткий логический вывод.

Одним из распространенных методов обеспечения и повышения качества разрабатываемых технических объектов, направленных на предотвращение появления дефектов (несоответствий) и снижение негативных последствий от них, является анализ видов и последствий потенциальных дефектов (FMEA – Potential Failure Mode and Effects Analysis) [1]. В зарубежных компаниях FMEA уже более полувека применяется при изготовлении любых видов сложных технических объектов, начиная с космической и военной техники и заканчивая бытовыми приборами. Метод может применяться как при разработке новой продукции и технологии её производства, так и для совершенствования уже запущенных в производство изделий. Подход, заложенный в основу FMEA, соответствует закону прогрессивной конструктивной эволюции, согласно которому переход к новым образцам техники может быть осуществлён через выявление и устранение дефектов (недостатков) в существующем поколении технических объектов [2].

В соответствии с методикой FMEA [1] анализ проводится специальной группой экспертов (FMEA-командой), которая использует в своей работе метод мозгового штурма. В ходе анализа для конкретного технического объекта или производственного процесса определяют все возможные виды дефектов. Для всех выявленных видов потенциальных дефектов определяют их последствия и оценивают баллом значимости  $S$ , который изменяется от 1 для наименее значимых по ущербу дефектов до 10 – для наиболее значимых.

Также для каждого дефекта определяют потенциальные причины и для каждой причины экспертно устанавливают балл возникновения  $O$ , который изменяется от 1 для самых редко возникающих дефектов до 10 – для дефектов, возникающих практически всегда. После этого определяют балл обнаружения  $D$  для каждого дефекта в ходе предполагаемого изготовления. Балл обнаружения изменяется от 10 для практически необнаруживаемых дефектов (причин) до 1 – для практически достоверно обнаруживаемых.

После получения экспертных оценок  $S$ ,  $O$  и  $D$  вычисляют комплексный риск дефекта в виде приоритетного числа риска (ПЧР):

$$\text{ПЧР} = S \cdot O \cdot D. \quad (1)$$

Затем составляют перечень дефектов / причин, для которых рассчитанное значение ПЧР превышает заранее установленное граничное значение  $\text{ПЧР}_{\text{гр}}$ . Именно для них в дальнейшем и проводят доработку конструкции и/или производственного процесса.

При этом несмотря на то, что вероятность возникновения дефекта может определяться на основе имеющихся статистических данных по аналогичным объектам (процессам) или с помощью принятых в расчётах надёжности методов [3], в итоге она всё равно выражается в виде ранга (балла)  $O$ . Однако, как известно из метрологии [4], баллы пред-

ставляют собой лишь обозначения реперных точек на шкале порядка, и поэтому с ними не следует проводить какие-либо математические операции, вследствие чего формула (1) является некорректной.

Тем не менее необходимость использования формулы (1) связана с особенностями метода. Во-первых, как уже отмечалось, анализ проводится группой экспертов, использующих свои знания и опыт, а также информацию, которая во многих случаях не может быть выражена в строгой количественной форме. Во-вторых, результат анализа должен быть представлен в виде некоторого комплексного показателя, характеризующего критичность потенциального дефекта и указывающего на необходимость улучшения объекта анализа. В качестве такого показателя и используется ПЧР. Для разрешения этой проблемной ситуации авторами предлагается применить теорию нечётких множеств при проведении FMEA с последующей дефазсификацией результата анализа.

Пусть  $A$  – случайное событие, состоящее в появлении какого-либо дефекта исследуемого объекта. Однако в отличие от традиционного теоретико-вероятностного подхода вероятность  $P[A]$  события  $A$  будет рассматриваться как лингвистическая переменная, т.е. переменная, значениями которой являются слова или предложения естественного или искусственного языка [5]. Таким образом,  $P[A]$  есть лингвистическая вероятность события  $A$ . Базовой переменной для лингвистической вероятности  $P$  является переменная  $p$ , принимающая значения из универсального множества  $U$ , которое представляет собой единственный интервал  $[0, 1]$ .

Формально любая лингвистическая переменная описывается пятёркой параметров [6]:

$$(X, T, U, G, M),$$

где  $X$  – имя переменной;  $T$  – терм-множество, каждый элемент которого задаётся нечётким множеством на универсальном множестве  $U$ ;  $G$  – синтаксическое правило, порождающее названия термов;  $M$  – семантические правила, задающие функции принадлежности нечётких термов, порождённых синтаксическим правилом  $G$ .

Таким образом, для рассматриваемой лингвистической переменной «вероятность появления дефекта» ( $P$ ) необходимо задать терм-множество, а также сформулировать синтаксическое и семантические правила.

В соответствии с методикой проведения FMEA целесообразно задать следующее терм-множество для описания вероятности возникновения дефекта:

$$T(P) = \text{вероятно} + \text{достаточно вероятно} + \text{вполне вероятно} + \\ + \text{более или менее вероятно} + \text{не очень вероятно} + \\ + \text{маловероятно} + \text{крайне маловероятно} + \\ + \text{совсем невероятно},$$

где терм «вероятно» является первичным термом, а синтаксическое правило  $G$  является простейшим – новые термы получаются с использованием соответствующих квантификаторов.

Так как каждый терм представляет собой название соответствующего нечеткого подмножества универсального множества  $U$ , то для первичного терма необходимо задать функцию принадлежности. При этом, как известно, вопрос о методах построения функций принадлежности является самым уязвимым для критики местом всей теории нечётких множеств [7].

Наиболее часто функции принадлежности строятся на основе экспертных оценок. При этом можно выделить два метода [6]:

- метод на основе статистической обработки оценок группы экспертов;
- метод на основе парных сравнений, выполненных одним экспертом.

Так как анализ по методу FMEA осуществляется специально подобранной группой экспертов, то целесообразным является применение первого метода, когда членам FMEA-команды перед началом анализа предлагается задать функции принадлежности первичных термов. В этом случае каждый из экспертов заполняет специальную анкету (табл. 1) с использованием бинарных оценок  $b_{j,i} \in \{0; 1\}$ , где 1 указывает на наличие у  $i$ -го элемента универсального множества  $U$  свойств  $j$ -го нечёткого множества, а 0 – на их отсутствие.

Таблица 1

Анкета для экспертного построения функции принадлежности терма «вероятно»

Терм	Интервалы вероятностей														
	0,25 -0,30	0,30 -0,35	0,35 -0,40	0,40 -0,45	0,45 -0,50	0,50 -0,55	0,55 -0,60	0,60 -0,65	0,65 -0,70	0,70 -0,75	0,75 -0,80	0,80 -0,85	0,85 -0,90	0,90 -0,95	0,95 -1,00
вероятно															

По результатам анкетирования степени принадлежности нечеткому множеству  $A_j$  рассчитываются по формуле

$$\mu_{A_j}(u_i) = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m b_{j,i}^k \quad (2)$$

где  $m$  – общее количество экспертов;  $b_{j,i}^k$  – оценка наличия у  $i$ -го элемента свойств  $j$ -го нечёткого множества, проставленная  $k$ -м экспертом.

В качестве примера в табл. 2 приведены результаты оценок, выполненных пятью экспертами, для построения функции принадлежности рассматриваемого терма.

Таблица 2

Результаты опроса экспертов

Эксперт	Терм	Интервалы вероятностей														
		0,25 -0,30	0,30 -0,35	0,35 -0,40	0,40 -0,45	0,45 -0,50	0,50 -0,55	0,55 -0,60	0,60 -0,65	0,65 -0,70	0,70 -0,75	0,75 -0,80	0,80 -0,85	0,85 -0,90	0,90 -0,95	0,95 -1,00
1	вероятно	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
2	вероятно	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
3	вероятно	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
4	вероятно	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
5	вероятно	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	

Результаты обработки экспертных оценок приведены в табл. 3. Числа над штриховой линией соответствуют количеству голосов, отданных экспертами за принадлежность нечёткому подмножеству соответствующего элемента универсального множества, а под линией – степени принадлежности, вычисленные по формуле (2). График функции принадлежности приведён на рис. 1.

Таблица 3

Результаты обработки экспертных оценок

Терм	Интервалы вероятностей														
	0,25 -0,30	0,30 -0,35	0,35 -0,40	0,40 -0,45	0,45 -0,50	0,50 -0,55	0,55 -0,60	0,60 -0,65	0,65 -0,70	0,70 -0,75	0,75 -0,80	0,80 -0,85	0,85 -0,90	0,90 -0,95	0,95 -1,00
вероятно	0	0	1	3	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	0,0	0,0	0,2	0,6	0,8	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Для практических целей функцию принадлежности первичного термина удобно задать в параметрическом виде с помощью гауссовой функции вида

$$\mu(u) = \exp\left(-\frac{(u - b)^2}{2c^2}\right),$$

где  $b$  – координата максимума;  $c$  – коэффициент концентрации.

Тогда в качестве аппроксимации функции принадлежности термина «вероятно», полученной экспертным методом, может быть использована функция, задаваемая выражением

$$\mu_{\text{«вероятно»}}(p) = \begin{cases} \exp\left(-\frac{(p - 0,5)^2}{0,0134}\right) & \text{при } p < 0,5, \\ 1 & \text{при } p \geq 0,5, \end{cases}$$

при параметрах  $b = 0,5$  и  $c = 0,082$ . Результат аппроксимации приведен на рис. 1.

В первом приближении семантические правила  $M$  могут быть заданы в виде, приведённом в табл. 4.

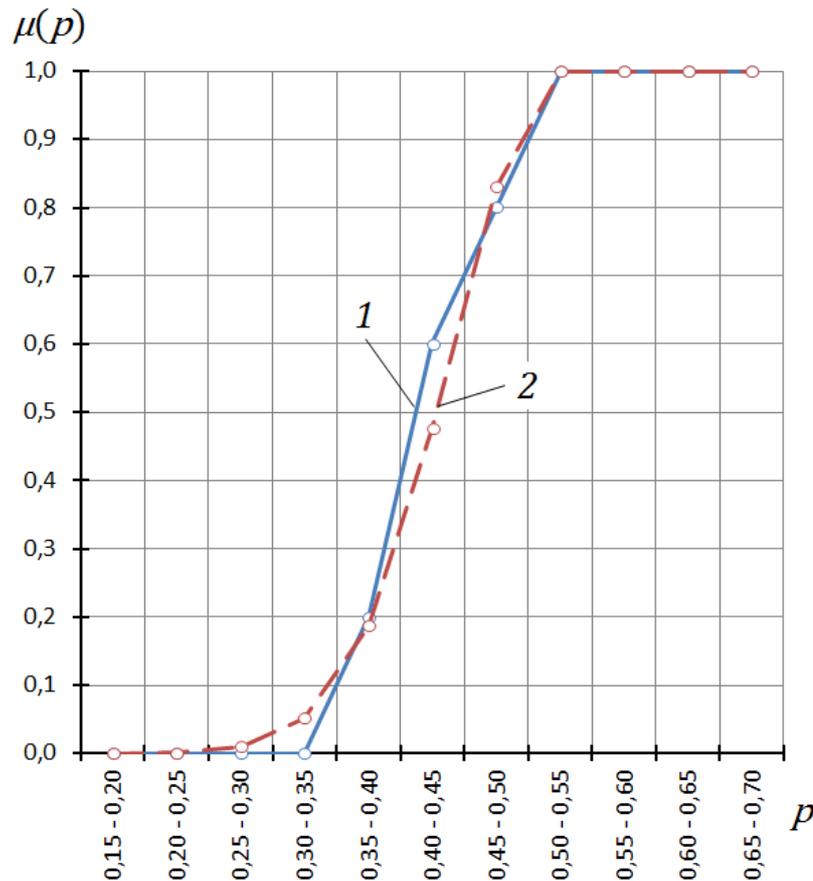


Рис. 1. График функции принадлежности термина «вероятно», построенный экспертным методом (1), и её аппроксимация параметрической функцией (2)

Таблица 4

Семантические правила для лингвистической переменной  
«вероятность появления дефекта»

Квантификатор	Параметры $b_j$ и $c_j$ по отношению к параметрам $b$ и $c$ функции принадлежности первичного термина	Область значений базовой переменной
Достаточно $A$	$b_j = b/2; c_j = c - 0,01$	$[0, 1]$
Вполне $A$	$b_j = b/4; c_j = c - 0,03$	$[0, 1]$
Более или менее $A$	$b_j = b/40; c_j = c/20$	$[0, 1]$
Не очень $A$	$b_j = b/1000; c_j = c/500$	$[0, 1]$
Мало $A$	$b_j = b/7500; c_j = c/2000$	$[0, 1]$
Крайне мало $A$	$b_j = b/75000; c_j = c/15000$	$[0, 1]$
Совсем не $A$	$b_j = b/750000; c_j = c/150000$ $\mu(p) = 1$	$[b_j, 1]$ $[0, b_j]$

Графики функций принадлежности термов «вероятно», «достаточно вероятно» и «вполне вероятно» приведены на рис. 2. Соотношения между вероятностями дефекта по методологии FMEA и предлагаемыми лингвистическими вероятностями приведены в табл. 5.

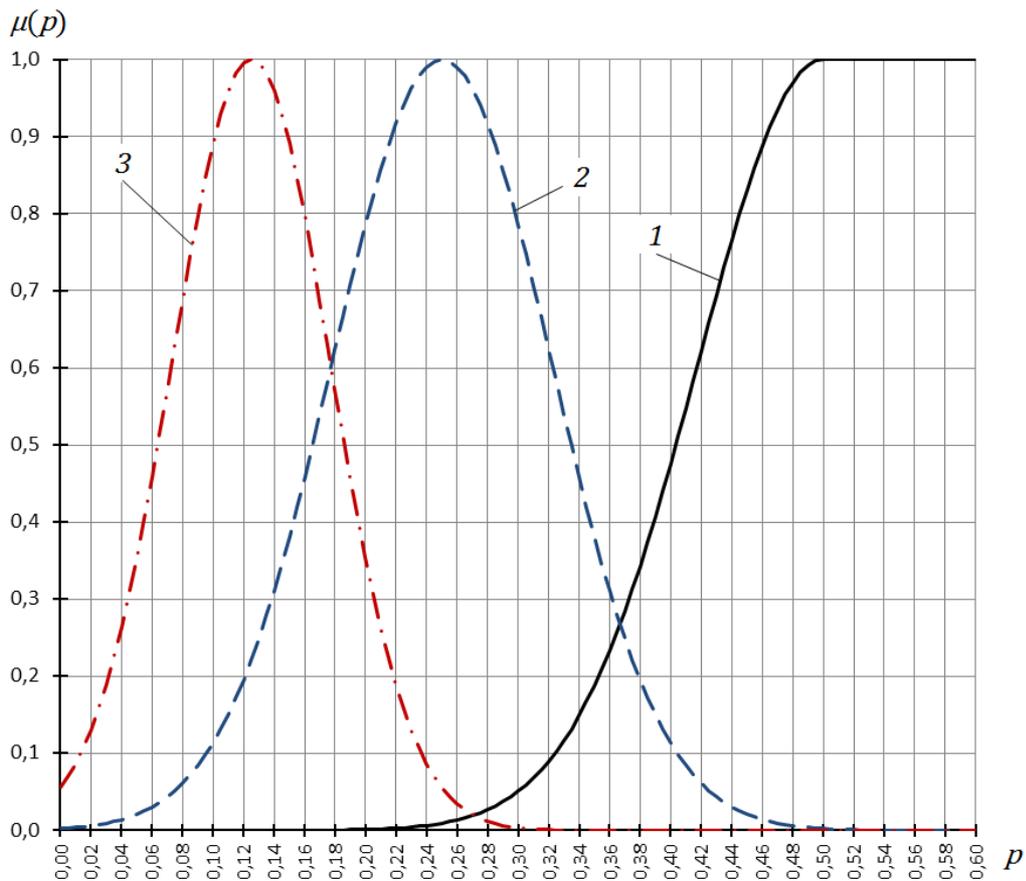


Рис. 2. Графики функций принадлежности термов «вероятно» (1), «достаточно вероятно» (2) и «вполне вероятно» (3)

Таблица 5

## Соотношения между вероятностями дефекта по методологии FMEA и значениями лингвистической переменной «вероятность появления дефекта»

Вероятность дефекта по методологии FMEA	Возможная частота дефекта	Балл <b>0</b>	Значение лингвистической переменной	Носитель нечёткого множества
Очень высокая: дефект почти неизбежен	Более 1 из 2	10	Вероятно	[0,5,1]
	>> 1 из 3	9	Достаточно вероятно	0,25
Высокая: повторяющиеся дефекты	Более 1 из 8	8	Вполне вероятно	0,125
	>> 1 из 20	7		
Умеренная: случайные дефекты	Более 1 из 80	6	Более или менее вероятно	0,0125
	>> 1 из 400	5	Не очень вероятно	0,0005
	>> 1 из 2000	4		
Низкая: относительно мало дефектов	Более 1 из 15000	3	Маловероятно	$6,67 \cdot 10^{-5}$
	>> 1 из 150000	2	Крайне маловероятно	$6,67 \cdot 10^{-6}$
Малая: дефект маловероятен	Менее 1 из 1500000	1	Совсем невероятно	$[0,6,67 \cdot 10^{-7}]$

Аналогичным образом для оценки значимости последствий дефекта предлагается использовать лингвистическую переменную «последствия»( $S$ ) с терм-множеством

$T(S) =$  катастрофические + достаточно катастрофические +  
+ крайне тяжелые + тяжелые + достаточно тяжелые + слабые +  
+ очень слабые + незначительные + очень незначительные +  
+ отсутствуют,

где термины «катастрофические», «тяжёлые», «слабые» и «незначительные» являются первичными.

В качестве универсального множества базовой переменной  $s$  лингвистической переменной «последствия» также используем единичный интервал  $[0,1]$ . Функции принадлежности первичных термов переменной  $S$  задаются выражениями

$$\begin{aligned} \mu^{\text{катастрофические}}(s) &= \exp\left(-\frac{(s-1)^2}{0,0098}\right); \\ \mu^{\text{тяжелые}}(s) &= \exp\left(-\frac{(s-0,7)^2}{0,0098}\right); \\ \mu^{\text{слабые}}(s) &= \exp\left(-\frac{(s-0,5)^2}{0,0098}\right); \\ \mu^{\text{незначительные}}(s) &= \exp\left(-\frac{(s-0,3)^2}{0,0098}\right). \end{aligned}$$

Для построения функций принадлежности составных термов предлагается использовать семантические правила, приведённые в табл. 6. При этом для составного термина «отсутствуют» функция принадлежности определяется соотношением

$$\mu^{\text{отсутствуют}}(s) = \mu^{\text{катастрофические}}(1-s).$$

Таблица 6

## Семантические правила для лингвистической переменной «последствия»

Квантификатор	Параметр $b_j$ по отношению к параметру $b$ функции принадлежности первичного терма
Крайне $A$	$b_j = b + 0,1$
Достаточно $A$ Очень $A$	$b_j = b - 0,1$

Для оценки обнаружения потенциальных причин или механизма и последующего вида дефекта при контроле вначале экспертам необходимо задать функции принадлежности первичных термов лингвистической переменной «вероятность обнаружения» ( $Q$ ). При этом, как и в двух предыдущих случаях, базовая переменная  $q$  принимает значения из единичного интервала  $[0, 1]$ .

В качестве терм-множества данной лингвистической переменной в первом приближении предлагается использовать следующее:

$T(Q) = \text{достоверно} + \text{более или менее достоверно} +$   
 $+ \text{очень вероятно} + \text{вероятно} + \text{более или менее вероятно} +$   
 $+ \text{маловероятно} + \text{очень маловероятно} + \text{невозможно},$

где термы «достоверно» и «вероятно» являются первичными термами.

Функции принадлежности первичных термов могут быть заданы выражениями вида

$$\mu_{\text{«достоверно»}}(q) = \exp\left(-\frac{(q-1)^2}{0,02}\right);$$

$$\mu_{\text{«вероятно»}}(q) = \exp\left(-\frac{(q-0,5)^2}{0,045}\right).$$

В качестве семантических правил для получения функций принадлежности составных термов предлагается использовать правила, приведённые в табл. 7. Кроме того, функция принадлежности терма «невозможно» связана с функцией принадлежности терма «достоверно» соотношением

$$\mu_{\text{«невозможно»}}(q) = \mu_{\text{«достоверно»}}(1 - q).$$

Однако в связи с тем, что в соответствии с методикой FMEA оценка вероятности обнаружения дефектов должна принимать большие значения для малых вероятностей и малые для больших, для дальнейшего использования целесообразно перейти к лингвистической переменной «вероятность необнаружения»  $D$  с базовой переменной  $d \in [0, 1]$ . При этом, так как событие, состоящее в обнаружении дефекта, и событие, состоящее в его необнаружении, являются несовместными и единственно возможными, т.е. образуют полную группу событий, базовые переменные соответствующих лингвистических переменных должны быть связаны соотношением

$$d = 1 - q. \quad (3)$$

В качестве термов лингвистической переменной  $D$  предлагается использовать термы, противоположные по смыслу термам переменной  $Q$  (табл. 8). Тогда с учётом соотношения (3) функции принадлежности термов лингвистической переменной  $D$  могут быть найдены из соотношения

$$\mu_D(d) = \mu_Q(1 - q).$$

Таблица 7

Семантические правила для лингвистической переменной  
«вероятность обнаружения»

Квантификатор	Параметры $b_j$ и $c_j$ функции принадлежности составного термина по сравнению с параметрами $b$ и $c$ функции принадлежности первичного термина
Более или менее $A$	$b_j = b - 0,1; c_j = 1,5c$
Мало $A$	$b_j = 0,5b; c_j = 0,7c$
Очень $A$	$b_j = 1,4b; c_j = 0,7c$

Таблица 8

Соотношения между терминами лингвистических переменных  
«вероятность обнаружения» и «вероятность необнаружения»

Терм лингвистической переменной $Q$	Терм лингвистической переменной $D$
невозможно	абсолютная
очень маловероятно	очень высокая
маловероятно	высокая
более или менее вероятно	более или менее высокая
вероятно	умеренная
очень вероятно	низкая
более или менее достоверно	очень низкая
достоверно	нулевая

Таким образом, при применении теории нечётких множеств алгоритм проведения ФМЕА-анализа остаётся неизменным, только тяжесть последствий отказа (дефекта), вероятность его появления и обнаружения оценивают, используя термины соответствующих лингвистических переменных. После этого определяется приоритетное число риска на основе применения  $\alpha$ -уровневого принципа обобщения [6].

Каждый терм следует рассматривать как нечёткое число, соответствующее максимуму его функции принадлежности. Каждое такое нечёткое число задаётся множеством  $\alpha\alpha$ -сечений:

$$\tilde{x} = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} (\underline{x}_\alpha, \bar{x}_\alpha),$$

где  $\underline{x}_\alpha, \bar{x}_\alpha$  – соответственно минимальное и максимальное значения нечёткого числа  $\tilde{x}$  на  $\alpha$ -уровне. Количество  $\alpha$ -уровней выбирается в зависимости от требуемой точности вычислений.

При этом необходимо учитывать, что универсальное множество для всех рассматриваемых лингвистических переменных и связанных с ними нечётких множеств представляет собой единичный интервал, т.е.  $U = [0, 1]$ , следовательно, накладываются ограничения

$$\underline{x}_\alpha \geq 0; \bar{x}_\alpha \leq 1. \tag{4}$$

При нарушении этих условий следует принимать  $\underline{x}_\alpha = 0$  и  $\bar{x}_\alpha = 1$ .

В этом случае приоритетное число риска будет представлять собой результат вычисления чёткой функции от нечётких аргументов, т.е.

$$ПЧР = y = f(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3) = \tilde{x}_1 \tilde{x}_2 \tilde{x}_3,$$

где  $\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3$  – нечёткие числа, соответствующие оценкам тяжести последствий, вероятности появления и вероятности обнаружения дефекта.

Результатом функции  $y$  будет нечёткое число

$$\tilde{y} = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} (\underline{y}_\alpha, \bar{y}_\alpha),$$

где  $\underline{y}_\alpha$  и  $\bar{y}_\alpha$  в соответствии с правилами выполнения арифметических операций для положительных нечётких чисел будут определяться из соотношений

$$\underline{y}_\alpha = \underline{x}_{1\alpha} \underline{x}_{2\alpha} \underline{x}_{3\alpha}; \quad \bar{y}_\alpha = \bar{x}_{1\alpha} \bar{x}_{2\alpha} \bar{x}_{3\alpha}.$$

В качестве итогового значения ПЧР может быть использован результат дефаззификации полученного нечёткого множества  $\tilde{y}$  (например, методом центра тяжести). Так как, по определению множества  $\alpha$ -уровня,

$$\mu_{\tilde{y}}(u) \geq \alpha, \quad \forall u \in [\underline{y}_\alpha, \bar{y}_\alpha],$$

и  $\tilde{y}$  представляет собой дискретное множество (число дискрет определяется числом  $\alpha$ -уровней), то дефаззификацию можно выполнить по формуле

$$\text{ПЧР} = \frac{\sum_{i=1}^k u_i \mu_{\tilde{y}}(u_i)}{\sum_{i=1}^k \mu_{\tilde{y}}(u_i)}, \quad (5)$$

где  $k$  – выбранное количество  $\alpha$ -уровней.

Найденное значение ПЧР следует сравнить с граничным из диапазона от **0,0047** до **0,0059**. Данные значения выбраны по аналогии с традиционным методом FMEA – как соответственно **1/100** и **1/80** части от максимально возможного значения ПЧР, которое составляет **0,472**.

Рассмотрим применение предлагаемого подхода к проведению FMEA на следующем примере, приведённом в ГОСТ Р 51814.2 – 2001. В результате работы FMEA-команды над совершенствованием конструкции нагнетательного шланга для автомобиля, соединяющего насос с рулевым гидроусилителем, был составлен протокол анализа, фрагмент которого приведён в табл. 9. Этот же фрагмент протокола анализа, но заполненный в соответствии с предлагаемым подходом приведён в табл. 10.

Для того чтобы найти значение приоритетного числа риска для каждой причины потенциального дефекта, необходимо разложить нечёткие множества, соответствующие каждой из оценок, по множествам уровня  $\alpha$ . Для первой строки табл. 10 это означает нахождение корней следующих трёх уравнений:

$$s^2 - 2s + 1 + 0,0098 \ln(\alpha) = 0;$$

$$d^2 - 2d + 1 + 0,02 \ln(\alpha) = 0;$$

$$p^2 - 0,25p + 0,015625 + 0,00540 \ln(\alpha) = 0.$$

Решения указанных уравнений для уровней  $\alpha = 0,1; 0,2 \dots 1$  с учётом ограничений (4) приведены в табл. 11.

В качестве значения ПЧР принимаем центр тяжести нечёткого числа  $\tilde{y}$ , который находим по формуле (5):

$$\text{ПЧР}_1 = \frac{0,009 \cdot 0,1 + 0,023 \cdot 0,2 + \dots + 0,237 \cdot 0,1}{0,1 + 0,2 + \dots + 0,2 + 0,1} \approx 0,120.$$

Аналогичным образом можно найти значения ПЧР для двух других причин потенциального дефекта, которые равны соответственно  $\text{ПЧР}_2 = 0,070$  и  $\text{ПЧР}_3 = 0,142$ . Все три значения ПЧР превосходят значение критической границы  $\text{ПЧР}_{\text{кр}} = 0,0047$ , что свидетельствует о необходимости улучшения конструкции объекта анализа. При этом можно заметить, что по предлагаемой методике  $\text{ПЧР}_3 > \text{ПЧР}_1$ , в отличие от традиционного подхода к FMEA (табл. 11). Это можно объяснить тем, что оценка вероятности возникновения дефекта в предлагаемом подходе имеет больший вес, чем две другие оценки.

Таблица 9

## Фрагмент протокола анализа по ГОСТ Р 51814.2

Вид потенциального дефекта	Последствия потенциального дефекта	Балл <i>S</i>	Потенциальная причина дефекта	Балл <i>O</i>	Первоначально предложенные меры по обнаружению дефекта	Балл <i>D</i>	ПЧР
Течь в соединении	1. Загрязнение окружающей среды	10	1. Разрушение седла соединения	8	Визуально	9	720
	2. Снижение эффективности рулевого управления	8	2. Отклонение геометрии трубки шланга или седла	7	Специальные измерители	6	420
	3. Снижение удобства управления	7	3. Затруднён доступ к накидной гайке в автомобиле	9	Динамометрический ключ	7	630

Таблица 10

## Фрагмент протокола анализа по предлагаемой методике

Вид потенциального дефекта	Последствия потенциального дефекта	Тяжесть последствий	Потенциальная причина дефекта	Вероятность возникновения	Первоначально предложенные меры по обнаружению дефекта	Вероятность не обнаружения
Течь в соединении	1. Загрязнение окружающей среды	Катастрофические	1. Разрушение седла соединения	Вполне вероятно	Визуально	Абсолютная
	2. Снижение эффективности рулевого управления	Крайне тяжёлые	2. Отклонение геометрии трубки шланга или седла	Вполне вероятно	Специальные измерители	Более или менее высокая
	3. Снижение удобства управления	Тяжёлые	3. Затруднён доступ к накидной гайке в автомобиле	Достаточно вероятно	Динамометрический ключ	Высокая

Таблица 11

Приближенные разложения нечётких множеств, соответствующих термам лингвистических переменных *S*, *P* и *D*, по множествам уровня  $\alpha$ 

Уровень $\alpha$	Границы множеств $\alpha$ -уровней оценки <i>s</i>		Границы множеств $\alpha$ -уровней оценки <i>p</i>		Границы множеств $\alpha$ -уровней оценки <i>d</i>		Границы множеств $\alpha$ -уровней функции $\bar{y}$	
	$\underline{x}_1$	$\bar{x}_1$	$\underline{x}_2$	$\bar{x}_2$	$\underline{x}_3$	$\bar{x}_3$	$\underline{y}$	$\bar{y}$
0,1	0,850	1,000	0,013	0,237	0,785	1,000	0,009	0,237
0,2	0,874	1,000	0,032	0,218	0,821	1,000	0,023	0,218
0,3	0,891	1,000	0,044	0,206	0,845	1,000	0,033	0,206
0,4	0,905	1,000	0,055	0,195	0,865	1,000	0,043	0,195
0,5	0,918	1,000	0,064	0,186	0,882	1,000	0,052	0,186
0,6	0,929	1,000	0,072	0,178	0,899	1,000	0,061	0,178
0,7	0,941	1,000	0,081	0,169	0,916	1,000	0,070	0,169
0,8	0,953	1,000	0,090	0,160	0,933	1,000	0,080	0,160
0,9	0,968	1,000	0,101	0,149	0,954	1,000	0,093	0,149
1,0	1,000	1,000	0,125	0,125	1,000	1,000	0,125	0,125

Таблица 12

## Фрагмент протокола анализа после улучшения по предлагаемой методике

Вид потенциального дефекта	Последствия потенциального дефекта	Тяжесть последствий	Потенциальная причина дефекта	Вероятность возникновения	Первоначально предложенные меры по обнаружению дефекта	Вероятность не обнаружения
Течь в соединении	1. Загрязнение окружающей среды	Катастрофические	1. Разрушение седла соединения	Маловероятно	Визуально	Очень низкая
	2. Снижение эффективности рулевого управления	Крайне тяжёлые	2. Отклонение геометрии трубки шланга или седла	Крайне маловероятно	Специальные измерители	Очень низкая
	3. Снижение удобства управления	Тяжёлые	3. Затруднён доступ к накидной гайке в автомобиле	Крайне маловероятно	Динамометрический ключ	Очень низкая

Фрагмент протокола анализа после внесения изменений в конструкцию объекта, заполненный в соответствии с предлагаемым подходом, приведён в табл. 12. Рассчитанные по предлагаемой методике значения **ПЧР** соответственно составили  $1,29 \cdot 10^{-5}$ ,  $1,27 \cdot 10^{-6}$  и  $1,12 \cdot 10^{-6}$ , что намного меньше значения критической границы.

Несмотря на кажущуюся сложность вычислений, предлагаемый подход вполне может быть реализован на практике с помощью простейших программных средств. При этом введение элементов теории нечётких множеств в процедуру FMEA позволяет перейти к такому мощному средству принятия решений, как нечёткий логический вывод, который представляет собой аппроксимацию зависимости «входы – выходы» на основе лингвистических высказываний «если – то» и логических операций над нечёткими множествами.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ Р 51814.2 – 2001. Системы качества в автомобилестроении. Метод анализа видов и последствий потенциальных дефектов. – М.: Стандартиформ, 2006. – 19 с.
- Розенталь, Р. Мировой и российский опыт развития FMEA / Р. Розенталь // Стандарты и качество. – 2010. – №4. – С. 54 – 56.
- ГОСТ 27.310 – 95. Надёжность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения. – Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1997. – 12 с.
- Шишкин, И.Ф. Теоретическая метрология. Ч. 1. Общая теория измерений: учеб. для вузов / И.Ф. Шишкин. – 4-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Питер, 2010. – 192 с.
- Заде, Л. Понятие лингвистической переменной и её применение к принятию приближенных решений: [пер. с англ.] / Лотфи Заде. – М.: Мир, 1976. – 167 с.
- Штовба, С.Д. Проектирование нечётких систем средствами MATLAB / С.Д. Штовба. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 288 с.
- Коньшева, Л.К. Основы теории нечётких множеств: учеб. пособие / Л.К. Коньшева, Д.М. Назаров. – СПб.: Питер, 2011. – 192 с.

Материал поступил в редколлегию 25.07.14.