

Экспертная система технико-экономической оценки целесообразности применения технологии цифровых двойников на различных этапах жизненного цикла аварийно-спасательной техники

ISSN 1812-5220

© Проблемы анализа риска, 2024

Дурнев Р.А.,

Российская академия
ракетных и артиллерийских
наук,
107564, Россия, г. Москва,
1-я Мясниковская ул., д. 3,
стр. 3

Жданенко И.В.*,

Всероссийский научно-
исследовательский институт
по проблемам гражданской
обороны и чрезвычайных
ситуаций МЧС России
(федеральный центр науки и
высоких технологий),
121352, Россия, г. Москва,
ул. Давыдовская, д. 7

Свиридок Е.В.,

Российская академия
ракетных и артиллерийских
наук,
107564, Россия, г. Москва,
1-я Мясниковская ул., д. 3,
стр. 3

Аннотация

В статье рассмотрен методический подход к решению задачи технико-экономического обоснования целесообразности применения технологии цифровых двойников на различных этапах жизненного цикла аварийно-спасательной техники, основанный на методе анализа иерархий, позволяющий получить ситуационную уникальную оценку, основывающуюся на конкретных характеристиках аварийно-спасательной техники, параметрах технологического и производственного процесса. Кроме экспертного характера, такая оценка характеризуется еще и значительной неопределенностью, не имеющей статистического (вероятностного) характера (что впрочем, свойственно для многих явлений экономики), имеющих ярко выраженную качественную природу.

Для выбора способов учета этой неопределенности необходимо отметить, что с учетом экспертного и неопределенного характера технико-экономической оценки целесообразности применения технологии цифровых двойников наиболее пригодным являются различные экспертные системы знаний, основанные на теории нечетких множеств.

Ключевые слова: технологии цифровых двойников; метод анализа иерархий; аварийно-спасательная техника; теория нечетких множеств.

Для цитирования: Дурнев Р.А., Жданенко И.В., Свиридок Е.В. Экспертная система технико-экономической оценки целесообразности применения технологии цифровых двойников на различных этапах жизненного цикла аварийно-спасательной техники // Проблемы анализа риска. 2024. Т. 21. № 2. С. 42–53.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Expert System of Technical and Economic Assessment the Feasibility of Using Digital Twins Technology at Various Stages of the Life Cycle Emergency Rescue Equipment

Roman A. Durnev,
Russian Academy of Missile and Artillery Sciences,
1-ya Myasnikovskaya str., 3/3,
Moscow, 107564, Russia

Irina V. Zhdanenko*,
Federal State Budgetary Establishment "All-Russian Scientific Research Institute for Civil Defence and Emergencies of the EMERCOM of Russia" (Federal Science and High Technology Center),
Davydkovskaya str., 7, Moscow, 121352, Russia

Ekaterina V. Sviridok,
Russian Academy of Missile and Artillery Sciences,
1-ya Myasnikovskaya str., 3/3,
Moscow, 107564, Russia

Abstract

The article discusses a methodological approach to solving the problem of technical and economic justification of the feasibility of using digital twin technology at various stages of the life cycle of emergency rescue equipment, based on the method of hierarchy analysis, which allows to obtain a unique situational assessment based on specific characteristics of emergency rescue equipment, technological and production process parameters. In addition to the expert character, such an assessment is also characterized by significant uncertainty, which does not have a statistical (probabilistic) character (which, however, is typical for many economic phenomena), which have a pronounced qualitative nature. To choose ways to account for these uncertainties, it should be noted that, taking into account the expert and uncertain nature of the technical and economic assessment of the feasibility of using digital twins technology, various expert knowledge systems based on.

Keywords: digital twin technologies; hierarchy analysis method; emergency rescue equipment; fuzzy set theory.

For citation: Durnev R.A., Zhdanenko I.V., Sviridok E.V. Expert system of technical and economic assessment the feasibility of using digital twins technology at various stages of the life cycle emergency rescue equipment // Issues of Risk Analysis. 2024;21(2):42–53. (In Russ.).

The authors declare no conflict of interest.

Содержание

Введение
1. Этапы нечеткого вывода
2. Алгоритмы нечеткого вывода
Заключение
Список источников

Введение

Очевидно, методический подход к решению задачи технико-экономического обоснования целесообразности применения технологии цифровых двойников (ТЦД) на различных этапах жизненного цикла аварийно-спасательной техники (АСТ), основанный на методе анализа иерархий (МАИ), позволяет получить ситуационную уникальную оценку, основывающуюся на конкретных характеристиках АСТ, параметрах технологического и производственного процесса [1]. В случае изменения этих факторов такую оценку, в том числе и попарное сравнение вариантов, параметров и показателей в соответствии с [1], нужно проводить заново.

В целях исключения повторного трудоемкого процесса попарных сравнений путем использования знаний высококлассных, а значит, и труднодоступных экспертов, а также придания методическому подходу обобщенного характера, предполагающего его многократное использование при любых изменениях параметров, показателей и т.п., требуется разработка научно-методического аппарата, позволяющего в значительной степени автоматизировать этот процесс, т.е. минимизировать влияние человеческого фактора.

1. Этапы нечеткого вывода

Для такой относительно молодой и бурно развивающейся предметной области, как «цифровые объекты и процессы» вряд ли в ближайшее время будут получены обоснованные технико-экономические нормативы. Поэтому использования мнений экспертов в принципе не удастся избежать. Но эти оценочные мнения возможно получить единожды на достаточно длительный период и потом их использовать при решении рассматриваемой задачи.

Кроме этого, еще необходимо отметить и ярко выраженный, неопределенный характер такой оценки, не имеющей статистической (вероятностной) природы (что впрочем, присуще для многих явлений экономики).

Возможные виды неопределенности, влияющие на рассматриваемые процессы автоматизации, показаны на рис. 1 [2].

Такая составляющая неопределенности, как неизвестность, связана с отсутствием исходных данных на начальном этапе решения, например, до получения конкретных характеристик опытного образца изделия.

Недостоверность определяется тем, что собрана не вся возможная или необходимая информация, а



Рис. 1. Виды неопределенности, подлежащие учету при автоматизации

Figure 1. Types of uncertainty to be considered during automation

есть только приближенные описания элементов или ряд элементов задачи описан по аналогии или опыту.

Неоднозначность характеризуется тем, что вся возможная информация собрана, но полностью определенное описание не получено или не может быть получено. При этом такая ее составляющая, как физическая неопределенность, связана с наличием в окружающей среде нескольких возможностей, которые случайным образом становятся действительностью (стохастические факторы) или неточностью измерений (погрешностью), выполняемых физическими приборами.

Лингвистическая неопределенность основана на необходимости оперирования конечным числом слов и структур фраз (полученных путем опроса мнений специалистов в различных областях) для описания за конечное время бесконечно сложного мира.

Омонимия связана с наличием одинаково пишущихся и звучащих слов с разной семантикой (коса — песчаная, инструмент для покоса, вид прически; автомат — вид автоматического устройства в системе управления производством или обиходное обозначение автоматического оружия).

Нечеткость определяется тем, что качественным значениям слов нередко придают различное количественное содержание. Например, незначительное повышение производительности труда — это 5, 10 или 15%?

Прагматическая неопределенность хорошо знакома тем, кто пытался дать формулировку какому-либо новому понятию, т.е. определенно описать его с помощью уже известных, но также не вполне «определенных» терминов (например, понятий «знание», «материя» и др.).

И, наконец, семантическая неопределенность значений фраз связана с богатством любого языка, возможностью фигурально выражаться, приводить метафоры, неточные фразы для более точного описания действительности, выражать свои эмоции (различные элементы профессионализмов, жаргонизмов, еще не введенных в широкий научный оборот понятий).

Для выбора способов учета этих неопределенностей необходимо отметить, что с учетом экспертного и неопределенного характера технико-экономической оценки целесообразности применения ТЦД наиболее пригодными являются различные экспертные системы знаний, основанные на теории нечетких множеств

(ТНМ). Сама эта теория является обобщением классической теории множеств (положенной в основу всей современной математики) на случай различного рода физических, лингвистических и других неопределенностей [3].

В общем виде нечетким множеством A , определенным на области X , является множество пар:

$$A = \{(\mu_A(x), x)\}, \forall x \in X, \quad (1)$$

где для каждого элемента $x \in X$ степень μ_A его принадлежности множеству A задается с помощью функции принадлежности $\mu_A(x)$, равной:

$$\mu_A(x) \in [0, 1] \text{ или } \mu_A: X \rightarrow [0, 1]. \quad (2)$$

При этом значения функций принадлежности μ_A , соответствующие какому-то числу от 0 до 1, характеризуют степень экспертной уверенности в том, что элемент x принадлежит множеству A .

Нечеткая переменная определяется как кортеж — $\langle \alpha, X, A \rangle$, где α — это название нечеткой переменной. Лингвистическая переменная также определяется как кортеж [2] — $\langle \beta, T, X, G, M \rangle$, где: β — название лингвистической переменной, T — множество значений (термов), каждое из которых представляет собой наименование нечеткой переменной, G — синтаксические процедуры, позволяющие генерировать из множества T новые, осмысленные в рассматриваемом контексте значения для данной лингвистической переменной (например, генерировать значение «очень высокая скорость» от значения «высокая скорость»).

M — семантическая процедура, которая позволяет поставить в соответствие каждому новому значению лингвистической переменной, получаемому с помощью процедуры G , осмысленное содержание посредством формирования соответствующего нечеткого множества. Например, при наличии нескольких условий, связанных логическим оператором «И» (пересечение ($\cap$), логическое произведение нечетких множеств), типа: (условие 1) И (условие 2), в рамках процедуры M используется оператор произведения (PROD) [4]:

$$\mu_{Y_1 \cap Y_2}(x) = \mu_{Y_1}(x) \cdot \mu_{Y_2}(x), \quad (3)$$

где:

$\mu_{Y_1}(x)$ — функции принадлежности нечеткого множества первого условия;

$\mu_{y_2}(x)$ — функции принадлежности нечеткого множества второго условия.

При наличии нескольких условий, связанных логическим оператором «ИЛИ» (объединение (U), логическая сумма нечетких множеств), типа: (условие 1) ИЛИ (условие 2), используется оператор максимума (MAX):

$$\mu_{y_1 \cup y_2}(x) = \max(\mu_{y_1}(x), \mu_{y_2}(x)). \quad (4)$$

Говоря о применении ТНМ, в том числе ее составной части, применяемой в экспертных системах нечеткой логики, чаще всего имеют в виду системы нечеткого вывода. Эти системы предназначены для преобразования значений входных переменных процесса оценки в выходные переменные на основе использования нечетких правил продукций. Для этого системы нечеткого вывода должны содержать базу правил нечетких продукций и реализовывать нечеткий вывод заключений на основе посылок или условий, представленных в форме нечетких лингвистических высказываний.

Основными этапами нечеткого вывода являются (рис. 2):

- формирование базы правил систем нечеткого вывода;

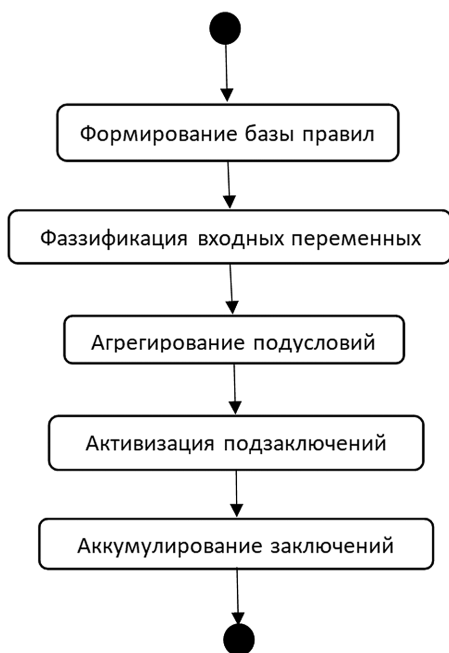


Рис. 2. Основные этапы нечеткого вывода

Figure 2. Main steps of fuzzy inference

- фаззификация входных переменных;
- агрегирование подусловий в нечетких правилах продукций;
- активизация или композиция подзаключений в нечетких правилах продукций;
- аккумуляция заключений нечетких правил продукций.

База правил систем нечеткого вывода предназначена для формального представления эмпирических знаний экспертов в той или иной проблемной области. В системах нечеткого вывода используются правила нечетких продукций, в которых условия и заключения сформулированы в терминах нечетких лингвистических высказываний рассмотренных выше видов. Совокупность таких правил будем далее называть базами правил нечетких продукций.

База правил нечетких продукций представляет собой конечное множество правил нечетких продукций, согласованных относительно используемых в них лингвистических переменных. Наиболее часто база правил представляется в форме структурированного текста:

$$\begin{aligned}
 &\text{ПРАВИЛО}_1: \\
 &\text{ЕСЛИ "Условие}_1\text{" ТО "Заключение}_1\text{"}(F_1) \\
 &\text{ПРАВИЛО}_2: \\
 &\text{ЕСЛИ "Условие}_2\text{" ТО "Заключение}_2\text{"}(F_2) \quad (5) \\
 &\text{ПРАВИЛО}_n: \\
 &\text{ЕСЛИ "Условие}_n\text{" ТО "Заключение}_n\text{"}(F_n).
 \end{aligned}$$

Здесь через (5–1) обозначены коэффициенты определенности или весовые коэффициенты соответствующих правил. Эти коэффициенты могут принимать значения из интервала [0,1]. В случае если эти весовые коэффициенты отсутствуют, удобно принять, что их значения равны единице.

Согласованность правил относительно используемых лингвистических переменных означает, что в качестве условий и заключений правил могут использоваться только нечеткие лингвистические высказывания, при этом в каждом из нечетких высказываний должны быть определены функции принадлежности значений терм-множества для каждой из лингвистических переменных.

Говоря о входных и выходных лингвистических переменных, следует отметить, что в системах

нечеткого вывода лингвистические переменные, которые используются в нечетких высказываниях подусловий правил нечетких продукций, часто называют входными лингвистическими переменными, а переменные, которые используются в нечетких высказываниях подзаклучений правил нечетких продукций, часто называют выходными лингвистическими переменными.

В контексте нечеткой логики под фаззификацией понимается не только отдельный этап выполнения нечеткого вывода, но и собственно процесс или процедура нахождения значений функций принадлежности нечетких множеств (термов) на основе обычных (не нечетких) исходных данных. Фаззификацию еще называют введением нечеткости.

Целью этапа фаззификации является установление соответствия между конкретным (обычно — численным) значением отдельной входной переменной системы нечеткого вывода и значением функции принадлежности соответствующего ей терма входной лингвистической переменной. После завершения этого этапа для всех входных переменных должны быть определены конкретные значения функций принадлежности по каждому из лингвистических термов, которые используются в подусловиях базы правил системы нечеткого вывода.

Агрегирование представляет собой процедуру определения степени истинности условий по каждому из правил системы нечеткого вывода.

Активизация в системах нечеткого вывода представляет собой процедуру или процесс нахождения степени истинности каждого из подзаклучений правил нечетких продукций.

Аккумуляция в системах нечеткого вывода представляет собой процедуру или процесс нахождения функции принадлежности для каждой из выходных лингвистических переменных.

Дефаззификация в системах нечеткого вывода представляет собой процедуру или процесс нахождения обычного (не нечеткого) значения для каждой из выходных лингвистических переменных. Цель дефаззификации заключается в том, чтобы, используя результаты аккумуляции всех выходных лингвистических переменных, получить обычное количественное значение каждой из выходных переменных. Поэтому дефаззификацию называют также приведением к четкости. Для этого могут

быть использованы различные формулы, например центра тяжести:

$$y = \frac{\int_{\text{Min}}^{\text{Max}} x \cdot \mu(x) dx}{\int_{\text{Min}}^{\text{Max}} \mu(x) dx}, \quad (6)$$

где:

y — результат дефаззификации;

x — переменная, соответствующая выходной лингвистической переменной ω ;

$\mu(x)$ — функция принадлежности нечеткого множества, соответствующего выходной переменной ω после этапа аккумуляции;

Min и Max — левая и правая точки интервала носителя нечеткого множества рассматриваемой выходной переменной ω .

2. Алгоритмы нечеткого вывода

Рассмотренные выше этапы нечеткого вывода могут быть реализованы неоднозначным образом, поскольку включают в себя отдельные параметры, которые должны быть фиксированы или специфицированы. Тем самым выбор конкретных вариантов параметров каждого из этапов определяет некоторый алгоритм, который в полном объеме реализует нечеткий вывод в системах правил нечетких продукций. К настоящему времени предложено несколько алгоритмов нечеткого вывода.

Алгоритм Мамдани является одним из первых, который нашел применение в системах нечеткого вывода. Формально алгоритм Мамдани включает нижеуказанные этапы:

- формирование базы правил систем нечеткого вывода. Особенности формирования базы правил совпадают с рассмотренными выше процессами при описании этого этапа;
- фаззификация входных переменных. Особенности фаззификации совпадают с рассмотренными выше процессами при описании данного этапа;
- агрегирование подусловий в нечетких правилах продукций. Для нахождения степени истинности условий каждого из правил нечетких продукций используются парные нечеткие логические операции. Те правила, степень истинности которых отлична от нуля, считаются активными и используются для дальнейших расчетов;
- активизация подзаклучений в нечетких правилах продукций. Для сокращения времени вывода

учитываются только активные правила нечетких продуктов;

- аккумуляция заключений нечетких правил продуктов. Осуществляется для объединения нечетких множеств, соответствующих термам подзаключений, относящихся к одним и тем же выходным лингвистическим переменным;

- дефаззификация выходных переменных. Традиционно используется формула центра тяжести.

Алгоритм Сугено (Sugeno) может быть определен в соответствии с нижеприведенными этапами:

- формирование базы правил систем нечеткого вывода. В базе правил используются только правила нечетких продуктов в форме:

$$\begin{aligned} &\text{ПРАВИЛО:} \\ &\text{ЕСЛИ “}\beta_1 \text{ есть } \alpha\text{” И “}\beta_2 \text{ есть } \alpha\text{” ТО “}w = \\ &= \varepsilon_1 \cdot a_1 + \varepsilon_2 \cdot a_2. \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ — некоторые весовые коэффициенты. При этом значение выходной переменной w в заключении определяется как некоторое действительное число;

- фаззификация входных переменных. Особенности фаззификации совпадают с рассмотренными выше процессами при описании этого этапа;

- агрегирование подусловий в нечетких правилах продуктов. Для нахождения степени истинности условий всех правил нечетких продуктов, как правило, используется логическая операция min-конъюнкция. Те правила, степень истинности условий которых отлична от нуля, считаются активными и используются для дальнейших расчетов;

- активизация подзаключений в нечетких правилах продуктов. Для этого находят значения степеней истинности всех заключений правил нечетких продуктов и осуществляется расчет обычных (не нечетких) значений выходных переменных каждого правила;

- аккумуляция заключений нечетких правил продуктов. Фактически отсутствует, поскольку расчеты осуществляются с обычными действительными числами;

- дефаззификация выходных переменных. Используется модифицированный вариант по формуле центра тяжести.

С учетом вышесказанного, а также основных параметров и показателей, определенных ранее, экспертная система технико-экономической оценки

целесообразности применения ТЦД на различных этапах жизненного цикла изделий, в том числе АСТ, будет двухстадийная. На первой стадии входными лингвистическими переменными будут:

а) для выходной переменной — «снижение себестоимости АСТ»:

- сокращение издержек по оплате труда;
- сокращение затрат на подготовку персонала;
- сокращение объемов различных мероприятий, в т.ч. испытаний;

- сокращение времени подготовки производства;
- сокращение простоев оборудования;
- сокращение ремонтных расходов;
- сокращение расходов на хранение и другие мероприятия;

б) для выходной переменной — «улучшение качества АСТ»:

- сокращение количества брака;
- снижение риска ошибок персонала;
- повышение уровня автоматизации;
- повышение компетентности персонала;
- улучшение качества испытаний;
- улучшение взаимодействия между структурными подразделениями;

в) для выходной переменной — «увеличение объема (интенсивности) производства АСТ»:

- увеличение производительности труда;
- сокращение времени выпуска изделия;
- расширение рынка реализации;
- повышение безопасности производства;
- сокращение времени вывода на рынок.

На второй стадии входными лингвистическими переменными для единственной выходной переменной «Обобщенный показатель технико-экономической эффективности жизненного цикла АСТ» будут:

- снижение себестоимости АСТ;
- улучшение качества АСТ;
- увеличение объема (интенсивности) производства АСТ.

Функции принадлежности для входных и выходных переменных можно определять исходя из статистики (при наличии), а также экспертным путем. Область определения таких функций может принадлежать натуральным шкалам, отражающим специфику рассматриваемых показателей и параметров, или назначаться в относительных единицах (в долях от 1 или в %). Так, например, сокращение затрат на

подготовку персонала может измеряться в часах или рублях, а также в долях от полных временных и финансовых затрат на указанное мероприятие. Очевидно, что на первоначальном этапе для выяснения характера зависимости показателей от параметров, обобщенного показателя от частных показателей могут приниматься относительные единицы шкалирования оси абсцисс.

Форма самих функций принадлежности может быть представлена с незначительной потерей точности в «линейно-кусочном» образе — треугольном или трапециoidalном.

Импликации для входных и выходных функций принадлежности могут задаваться в следующем виде, например:

ЕСЛИ снижение себестоимости АСТ *низкое* и улучшение качества АСТ *низкое* и увеличение объема (интенсивности) производства АСТ *низкое*, **ТО** обобщенный показатель технико-экономической эффективности жизненного цикла АСТ *низкий*;

ЕСЛИ снижение себестоимости АСТ *среднее* и улучшение качества АСТ *среднее* и увеличение объема (интенсивности) производства АСТ *среднее*, **ТО** обобщенный показатель технико-экономической эффективности жизненного цикла АСТ *средний*;

ЕСЛИ снижение себестоимости АСТ *высокое* и улучшение качества АСТ *высокое* и увеличение объема (интенсивности) производства АСТ *высокое*, **ТО** обобщенный показатель технико-экономической эффективности жизненного цикла АСТ *высокий*.

Пример нечеткого вывода для оценки зависимости обобщенного показателя технико-экономической эффективности жизненного цикла АСТ от снижения себестоимости, улучшения качества и увеличения объема (интенсивности) производства АСТ, выполненный с использованием приложения Fuzzy Logic Designer в программном продукте MATLAB R2022a, показан на рис. 4 (вторая стадия). Буквами обозначены виды окон:

- а) формирования системы нечеткого вывода;
- б) функции принадлежности входной нечеткой переменной (улучшение качества АСТ);
- в) функции принадлежности выходной нечеткой переменной (обобщенный показатель технико-экономической эффективности жизненного цикла АСТ);
- г) импликаций для входных и выходных функций принадлежности;

д) результатов нечеткого вывода применительно к правилам;

е) поверхности, отражающей зависимость «обобщенный показатель технико-экономической эффективности жизненного цикла АСТ» от показателей «снижение себестоимости АСТ» и «увеличение объема (интенсивности) производства АСТ».

Для первой стадии система нечеткого вывода будет несколько сложнее в связи с большим количеством входных переменных. Но методические основы остаются прежними. В таблице приведены результаты оценки значений выходной переменной «снижение себестоимости АСТ» от значений входных переменных: «сокращение издержек по оплате труда», «сокращение затрат на подготовку персонала», «сокращение объемов различных мероприятий, в т.ч. испытаний» и других. На рисунке 4 скриншоты окон правил перехода от входных к выходной переменной (а) и одной из реализаций сочетаний значений входных и выходных нечетких переменных (б) (соответствует последнему столбцу табл.).

Для рассматриваемого двухстадийного этапа нечеткого логического вывода в рамках предлагаемой экспертной системы позволит получить:

- значения промежуточных нечетких переменных (ранее названных показателями) в зависимости от различных сочетаний значений соответствующих нечетких входных переменных (ранее названных параметрами);
- значения обобщенного показателя ТЭО в зависимости от промежуточных нечетких переменных (показателей) определяемых, в свою очередь, различными сочетаниями значений соответствующих нечетких входных переменных (параметров).

Предложенная экспертная система на начальном этапе своего развития может пополняться данными, полученными от специалистов различных предприятий, которые будут уточнять функции принадлежности (для различных входных и выходных нечетких переменных) и правила (импликации), оперирующими этими переменными. В дальнейшем, по мере накопления опыта, функции принадлежности могут определяться с использованием статистических данных, характеризующих различные эффекты от внедрения технологий специализированных цифровых двойников.

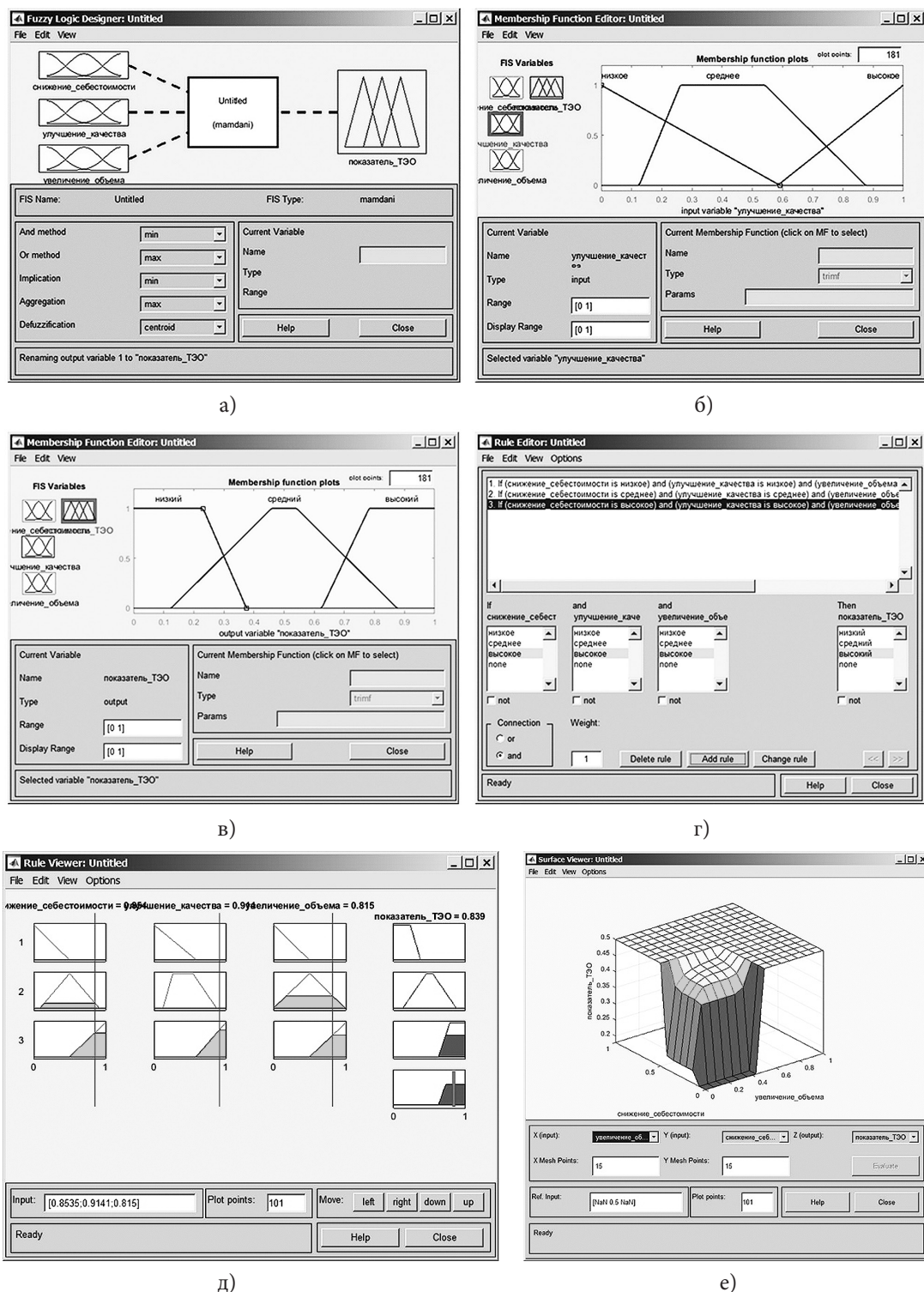


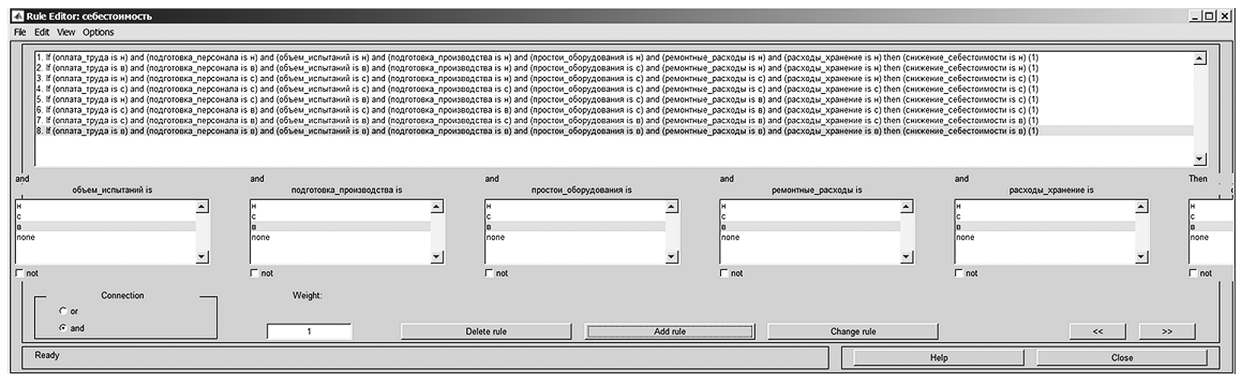
Рис. 3. Графические элементы оценки зависимости обобщенного показателя ТЭО от снижения себестоимости, улучшения качества и увеличения объема (интенсивности) производства АСТ

Figure 3. Graphical elements of assessment of dependence of generalized TEE indicator on cost reduction, quality improvement and increase of AST production volume (intensity)

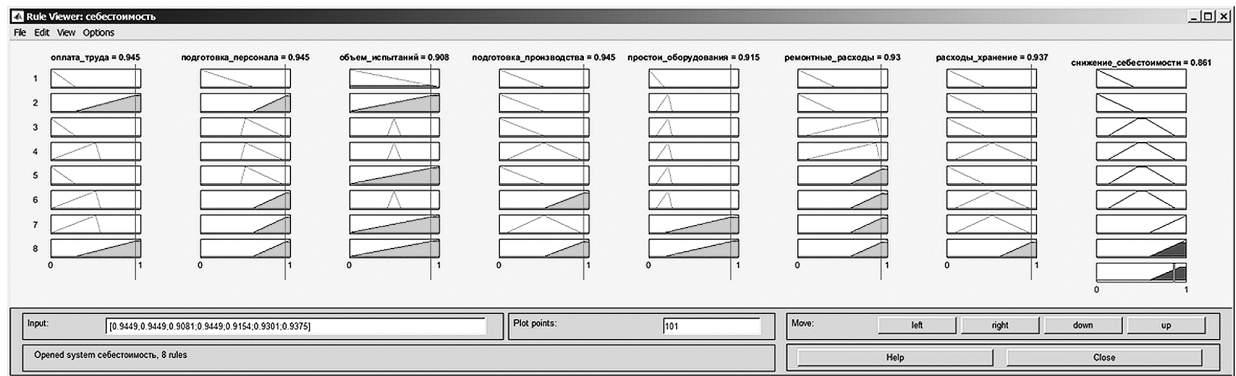
Таблица. Результаты оценки значений выходной переменной «снижение себестоимости АСТ» от значений входных переменных

Table. Results of evaluation of output variable values «cost reduction of emergency response equipment» from input variable values

Наименования нечетких переменных	Значения нечетких переменных		
	для 1-го сочетания	для 2-го сочетания	для n-го сочетания
сокращение издержек по оплате труда	0,194	0,540	0,945
Сокращение затрат на подготовку персонала	0,084	0,504	0,945
Сокращение объемов различных мероприятий, в т.ч. испытаний	0,136	0,563	0,908
Сокращение времени подготовки производства	0,136	0,518	0,945
Сокращение простоев оборудования	0,058	0,592	0,915
Сокращение ремонтных расходов	0,066	0,592	0,930
Сокращение расходов на хранение и другие мероприятия	0,075	0,533	0,937
Снижение себестоимости АСТ	0,177	0,500	0,861



а)



б)

Рис. 4. Скриншоты окон правил перехода от входных к выходной переменной (а) и одной из реализаций сочетаний значений входных и выходных нечетких переменных (б)

Figure 4. Screenshots of the windows of the rules for switching from input to output variable (a) and one of the implementations of combinations of values of input and output fuzzy variables (b)

Заключение

Все выше сказанное дает нам возможность сделать следующие выводы:

1. В целях снижения трудоемкости процесса оценки влияния ТЦД, а также придания методическому подходу к этой оценке обобщенного характера, предполагающего его многократное использование при любых изменениях параметров, показателей и т.п., требуется разработка научно-методического аппарата, позволяющего в значительной степени автоматизировать этот процесс, т.е. минимизировать влияние человеческого фактора.

2. С учетом экспертного и неопределенного характера технико-экономической оценки целесообразности применения ТЦД наиболее пригодными для решения этой задачи являются различные экспертные системы.

3. Экспертная система технико-экономической оценки целесообразности применения ТЦД на различных этапах жизненного цикла изделий, в том числе АСТ, будет двухстадийная. На первой стадии значения показателей будут определяться в зависимости от различных сочетаний значений соответствующих параметров. На второй стадии значения обобщенного показателя ТЭО будут находиться в зависимости от значений показателей.

4. Предложенная экспертная система на начальном этапе своего развития может пополняться данными, полученными от специалистов различных предприятий, которые будут уточнять функции принадлежности (для различных входных и выходных нечетких переменных) и правила (импликации), оперирующими этими переменными. В дальнейшем, по мере накопления опыта, функции принадлежности могут определяться с использованием статистических данных, характеризующих различные эффекты от внедрения технологии цифровых двойников.

5. Применение экспертных систем позволит повысить обоснованность и снизить трудоемкость технико-экономической оценки целесообразности применения ТЦД на различных этапах жизненного цикла АСТ.

Список источников [References]

1. Дурнев Р.А., Жданенко И.В., Свиридок Е.В. Техно-экономическое обоснование целесообразности применения технологии цифровых двойников на различных этапах

жизненного цикла аварийно-спасательной техники // Проблемы анализа риска. 2024. Т. 21. № 1. С. 78–90 [Durnev R. A., Zhdanenko I. V., Sviridok E. V. Feasibility study the feasibility of using digital twins technology at various stages of the life cycle emergency rescue equipment // Issues of Risk Analysis. 2024;21(1):78–90. (In Russ.)]

2. Борисов А.Н., Крумберг О.А., Федоров И.П. Принятие решений на основе нечетких моделей: Примеры исполз. / А.Н. Борисов, О.А. Крумберг, И.П. Федоров; Риж. техн. ун-т. Рига: Зинатне, 1990. 184 с. [Borisov A. N., Krumberg O. A., Fedorov I. P. Making decisions based on fuzzy models: Examples of uses / A. N. Borisov, O. A. Krumberg, I. P. Fedorov; Rige. technical un-t. Riga: Zinatne, 1990. 184 p. (In Russ.)]
3. Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. [пер. с англ.] М.: Мир. 1976. 165 с. [Zade L. A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning. M.: Mir. 1976. 165 p.]
4. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб: БХВ-Петербург, 2005. 736 с. [Leonenkov A. V. Fuzzy modeling in MATLAB and fuzzyTECH environment. St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2005. 736 p.]
5. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление / А. Пегат; пер. с англ. А. Г. Подвесовского, Ю. В. Тюменцева; под ред. Ю. В. Тюменцева. 2-е изд. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. 2013. 798 с. [Piegat A. Fuzzy modeling and control / A. Piegat; transl. from Engl. A. G. Podvesovsky, Yu. V. Tyumentseva; ed. Yu. V. Tyumentseva 2nd ed. M.: BINOM. The laboratory is known. 2013. 798 p.]

Сведения об авторах

Дурнев Роман Александрович: академик Российской академии ракетных и артиллерийских наук, доктор технических наук, доцент, первый вице-президент, ФГБУ «Российская академия ракетных и артиллерийских наук»

Количество публикаций: более 302

Область научных интересов: социальные технологии управления риском ЧС, прогнозирование развития системы вооружения

Контактная информация:

Адрес: 107564, г. Москва, 1-я Мясниковская ул., дом 3, стр. 3

rdurnev@rambler.ru

Жданенко Ирина Васильевна: старший научный сотрудник ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России» (федеральный центр науки и высоких технологий)

Количество публикаций: более 108

Область научных интересов: анализ рисков

Контактная информация:

Адрес: 121352, г. Москва, ул. Давыдовская, дом 7
izhdanenko@yandex.ru

Свиридок Екатерина Викторовна: кандидат технических наук, член-корреспондент, заместитель руководителя се-

кретариата Совета главных конструкторов по системе вооружения сухопутной составляющей сил общего назначения ФГБУ «Российская академия ракетных и артиллерийских наук»

Количество публикаций: более 49

Область научных интересов: анализ рисков на взрыво- и химически опасных предприятиях, программно-целевое планирование развития военной и специальной техники

Контактная информация:

Адрес: 107564, г. Москва, 1-я Мясниковская ул., дом 3, стр. 3
svkate1@rambler.ru

Статья поступила в редакцию: 09.02.2024

Одобрена после рецензирования: 20.03.2024

Принята к публикации: 21.03.2024

Дата публикации: 26.04.2024

The article was submitted: 09.02.2024

Approved after reviewing: 20.03.2024

Accepted for publication: 21.03.2024

Date of publication: 26.04.2024