УДК 629.78

А. П. АЛПАТОВ, В. Т. МАРЧЕНКО, П. П. ХОРОЛЬСКИЙ, Н. П. САЗИНА, Л. Г. ЖУКОВА

ОБ ОДНОМ МЕТОДИЧЕСКОМ ПОДХОДЕ К РЕШЕНИЮ ПРОБЛЕМЫ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ РИСКОВ ПРОЕКТОВ ПО СОЗДАНИЮ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ (ЧАСТЬ I)

Институт технической механики
Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины,
ул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Днепр, Украина; e-mail: pkorol@ukr.net

Метою роботи є розробка теоретичної основи для створення методичного та програмно-алгоритмічного забезпечення проведення кількісної оцінки ризиків проектів зі створення нових зразків ракетно-космічної техніки, обумовлених наявністю факторів невизначеності. Приведений методичний підхід кількісної оцінки ризиків являє собою синтез математичного моделювання невизначеностей та імітаційного моделювання. Математичне моделювання невизначеностей побудовано на основі теорії нечітких множин, теорії можливостей та методів прогнозування на основі часових рядів.

У цій частині статті наведені загальні теоретичні положення для кількісної оцінки ризиків зазначених проектів та теоретичні основи моделювання невизначеності ретроспективних вхідних даних за виробами-аналогами.

Практичне застосування наведених результатів дозволить істотно підвищити якість техніко-економічного обґрунтування проектів зі створення нових зразків вітчизняної ракетно-космічної техніки.

Целью работы является разработка теоретической основы для создания методического и программно-алгоритмического обеспечения проведения количественной оценки рисков проектов по созданию новых образцов ракетно-космической техники, обусловленных наличием факторов неопределенности. Приведенный методический подход количественной оценки рисков представляет собой синтез математического моделирования неопределенностей и имитационного моделирования. Математическое моделирование неопределенностей построено на основе теории нечетких множеств, теории возможностей и методов прогнозирования на основе временных рядов.

В этой части статьи приведены общие теоретические положения для количественной оценки рисков указанных проектов и теоретические основы моделирования неопределенности ретроспективных исходных данных по изделиям-аналогам.

Практическое применение приведенных результатов позволит существенно повысить качество технико-экономического обоснования проектов по созданию новых образцов отечественной ракетно-космической техники.

The aim of this work is to construct a theoretical basis for the development of methods, algorithms, and software for quantitative assessment of new space hardware development project risks that are due to uncertainty factors. The presented methodological approach to quantitative risk assessment is a synthesis of mathematical uncertainty modeling and simulation modeling, the former being constructed on the basis of the fuzzy set theory, the possibility theory, and time series forecasting methods.

This part of the paper (Part I) presents a general theory for quantitative assessment of space hardware development project risks and theoretical basics for retrospective source data uncertainty modeling by counterpart products.

A practical implementation of the presented results will make it possible to significantly improve the quality of the feasibility study of new home space hardware development projects.

***Ключевые слова**: количественная оценка рисков, математическое моделирование неопределенностей, метод имитационного моделирования, методическое и программно-алгоритмическое обеспечение, ракетно-космическая техника, факторы неопределенности.*

Введение. Решения о целесообразности реализации научно-технических проектов, то есть возможности проведения опытно-конструкторских работ (ОКР) по созданию новых образцов ракетно-космической техники (РКТ), принимается, зачастую, на основе материалов технико-экономического обоснования с использованием критериев "выгоды–затраты" или "затраты–эффективность" при отсутствии даже грубых количественных оценок рисков.

Инновационные проекты по созданию новых образцов РКТ относятся к категории проектов наиболее высокого риска.

Из анализа публикаций в журналах "Проблемы анализа рисков" (РФ), "Управление риском" (РФ) и других открытых источников информации [1] по вопросам теории и практики количественной оценки рисков следует, что основными методами количественной оценки рисков инновационных проектов являются следующие: статистические методы, экспертные оценки, экспертно-аналитические методы, метод сценариев, метод использования аналогов, анализ целесообразности затрат, метод имитационного моделирования.

Основным недостатком перечисленных выше методов (кроме последнего) является необходимость наличия большого объема однородных достоверных статистических данных или же использование субъективных вероятностей. Кроме того, в этих методах используются упрощенные аналитико-вероятностные модели, которые построены на субъективных вероятностях.

Применение метода имитационного моделирования существенно снижает требования к объему и достоверности исходной статистической информации, а также минимизирует влияние субъективного фактора на результаты оценки рисков.

Метод имитационного моделирования обеспечивает наиболее точное выполнение количественной оценки рисков по созданию образцов новой техники, так как позволяет учесть весь диапазон неопределенности исходных данных (ретроспективных и перспективных) и достаточно правдоподобно моделировать динамический процесс создания, производства и эксплуатации образцов новой техники.

Применение для оценки рисков метода имитационного моделирования весьма затруднительно по причине сложности моделирования случайных и неопределенных величин, которые являются переменными имитационной модели, и корреляции между этими величинами. Кроме того, имитационный метод требует достаточно детальной и полной аналитической модели реализации проекта.

Для научно-технических проектов по созданию технически сложных образцов новой техники разработка полной и точной аналитической модели является достаточно трудной задачей. Особенно это касается моделирования неопределенности параметров и переменных модели.

Из практики принятия решений, реализация которых будет происходить в будущем, именно неопределенность информации, которая используется при проведении технико-экономического обоснования проектов, порождает неопределенность конечных результатов и, следовательно, риск фактического удорожания проекта, снижение фактического полезного эффекта (доходов и выгод), срыва сроков реализации проекта.

При наличии достаточного объема однородной статистической информации неопределенность исходных данных может моделироваться вероятностными методами, что дает возможность получить вероятностную оценку риска (возможное отклонение конечных результатов от ожидаемых значений и соответствующие этим отклонениям вероятности).

В силу особенностей изделий и систем РКТ[1] однородная статистическая информация по аналогам практически отсутствует: имеет место весьма огра-

---

[1] Каждое изделие и система РКТ является уникальным и технически сложным объектом, длительность ОКР составляет несколько лет, производство и эксплуатация осуществляются в течение 10 – 15 лет.

ниченный объем неоднородной статистической информации, которая, как правило, не может считаться достоверной (точной).

На сегодняшний день даже для инвестиционных проектов еще не сложилась общепринятая теория количественной оценки рисков и не определена единая система базовых понятий в части риска и неопределенности [1] – [3].

Что касается теории количественной оценки рисков создания авиационной и ракетно-космической техники, то она находится в начальной стадии развития: в открытых источниках имеются всего лишь несколько публикаций [4] – [7].

Впервые в Украине на практике выполнена инженерная оценка риска проекта по созданию изделия РКТ на этапе выпуска технического проекта на космический аппарат (КА) "Січ-2М" (2016 г.). При этом выполнена только качественная оценка влияния факторов риска на конечные результаты ОКР.

Экспертами был определен состав факторов риска и выполнена оценка влияния этих факторов на величину ожидаемого полезного эффекта по двум показателям: "серьезность фактора" и "вероятность возникновения риска" [8].

Лингвистическая переменная "серьезность фактора" оценивалась по пятиуровневой шкале: <незначительная, значительная, большая, критическая, катастрофическая>, а лингвистическая переменная "вероятность возникновения риска" оценивалась по уровням: <минимальная, низкая, средняя, высокая, максимальная>.

Общая оценка уровня риска проекта оценивалась одним параметром с двумя дискретными значениями: <риск приемлемый, риск неприемлемый>. Вероятностная оценка этих двух качественных значений не проводилась.

Выполнить более корректную инженерную оценку риска разработчик технического проекта не имел возможности, т. к. на сегодня не созданы даже методические основы количественной оценки рисков инновационных проектов создания уникальных, технически сложных и дорогостоящих образцов новой техники, неотъемлемым атрибутом которых является выполнение ОКР.

Как отмечалось выше, наиболее корректным (по критерию точности и полноты) методом количественной оценки рисков является метод компьютерного имитационного моделирования, который позволяет получать распределения затрат и доходов от реализации проекта на основе аналитических (математических) моделей с неопределенными значениями переменных и параметров.

Создание имитационной модели для решения задачи количественной оценки рисков научно-технических проектов по созданию и применению изделий и систем РКТ сводится к решению следующих задач:

– построение аналитической модели ожидаемых затрат и полезного эффекта (доходы, экономические выгоды), а также оценки сроков разработки и технического уровня;

– определение диапазонов изменения переменных аналитической модели и формальное описание закона изменения этих переменных внутри диапазонов (моделирование неопределенностей);

– компьютерная реализация имитационной модели.

Задача построения аналитических моделей затрат и полезного эффекта является достаточно сложной, т. к. для инновационных проектов, содержащих ОКР, она относится к классу трудно формализуемых. Однако эта задача не является проблемной [9], [10].

Задача моделирования неопределенностей переменных и параметров аналитической модели на сегодня является проблемной в силу приведенных выше особенностей создания изделий и систем РКТ.

Задача компьютерной реализации имитационной модели в условиях наличия широкого спектра стандартного программного обеспечения не является трудно разрешимой.

Таким образом, решение проблемной задачи корректной оценки рисков проектов по созданию новых изделий и систем РКТ сводится к решению более узкой проблемы, которая заключается в решении задачи моделирования (формального описания) факторов неопределенности. Решение этой задачи позволит сформировать корректный методический подход к решению задачи количественной оценки рисков проектов по созданию новых изделий и систем РКТ.

1 Основные термины и определения. На сегодняшний день отсутствует не только единая теория количественной оценки рисков, но и общепринятая терминология по теории риска. Применительно к системам вооружения и военной техники описание понятий неопределенности и риска приведено в [4], а при проектировании авиационной техники – в [7]. Однако приведенные в этих работах определения недостаточно четкие. Поэтому ниже приведены определения основных терминов теории риска, исходя из особенностей реализации проектов по созданию новых изделий и систем РКТ. Это существенно упрощает процесс формального описания неопределенности и рисков.

Понятие неопределенности сформировано на основе терминов и определений, приведенных в [11], путем их незначительной модификации, исходя из особенностей проектов по созданию новых изделий и систем РКТ.

Неопределенность – это недостаточность информации о вероятностях будущих событий, неполнота и неточность ретроспективной информации (данных) по проектам-аналогам.

Использование при расчетах ожидаемых технико-экономических показателей неопределенных (недетерминированных) исходных данных обуславливает неопределенность значений этих показателей, а следовательно, является причиной возможного риска.

Определение термина риск заимствовано из [3] с некоторым уточнением термина меры риска. Согласно [3], риск – это неопределенность будущих результатов, связанная с принятием решений, реализация которых проводится с течением времени. Количественно риск трактуется как вероятность потерь (ущерба) и размера этих потерь (ущерба). Приведенные определения риска наиболее полно отражают концептуальную суть риска реализации инвестиционных проектов, когда решения принимаются в условиях стохастической неопределенности.

Для технически сложных и уникальных проектов, какими являются проекты по созданию новых изделий и систем РКТ, определение меры риска, приведенное в [3], не приемлемо, так как имеющаяся неопределенность не может быть формально описана методами теории вероятности из-за отсутствия даже минимально необходимого объема однородных статистических данных.

По этой причине в настоящей работе за количественную меру возможного риска принято определение, приведенное в [12]: уровень риска – это количественная мера возможных отклонений в негативную сторону значений фактических технико-экономических показателей от значений номинальных (наиболее ожидаемых) показателей.

Мера возможности (как и вероятностная мера) принимает значения на числовом интервале $[0,1]$, однако не обладает частотно-статистическими свойствами.

Как правило, изделия и системы РКТ имеют двойное назначение. Для проектов создания и применения новых изделий и систем РКТ двойного назначения, наиболее значимыми являются такие риски [13]:

– экономический;

– технический;

– временной.

Экономический риск включает:

– риск увеличения расходов на выполнение ОКР;

– риск снижения прямого (коммерческого) дохода (чистый дисконтированный доход) от использования результатов ОКР;

– риск снижения непрямых доходов и величины дополнительных выгод.

Технический риск – это возможное ухудшение фактических тактико-технических характеристик новых образцов РКТ по сравнению с необходимыми характеристиками (снижение технического уровня).

Временной риск – это возможное невыполнение запланированной длительности ОКР.

В формализованном представлении уровень риска можно записать как:

$$R_1 = \langle Z_Ф - Z_Н ,\ P_Z \rangle, \quad R_2 = \langle ПЕ_Н - ПЕ_Ф ,\ P_{ПЕ} \rangle,$$
$$R_3 = \langle ТУ_Н - ТУ_Ф ,\ P_{ТУ} \rangle, \quad R_4 = \langle T_Ф - T_Н ,\ P_T \rangle, \qquad (1)$$

где R_1 – уровень риска увеличения затрат; $Z_Ф$ – возможные будущие фактические затраты на реализацию проекта; $Z_Н$ – номинальные (наиболее ожидаемые) затраты на реализацию проекта; P_Z – количественная мера оценки превышения $Z_Ф$ относительно $Z_Н$; R_2 – уровень риска уменьшения величины полезного эффекта; $ПЕ_Ф$ – возможная величина фактического полезного эффекта; $ПЕ_Н$ – ожидаемая номинальная величина полезного эффекта; $P_{ПЕ}$ – количественная мера оценки снижения $ПЕ_Ф$ относительно $ПЕ_Н$; R_3 – уровень риска снижения технического уровня; $ТУ_Ф$ – возможный фактический технический уровень нового образца РКТ; $ТУ_Н$ – требуемый технический уровень нового образца РКТ; $P_{ТУ}$ – количественная мера оценки снижения $ТУ_Ф$ относительно $ТУ_Н$; R_4 – уровень риска увеличения длительности ОКР; $T_Ф$ – возможная фактическая длительность ОКР; $T_Н$ – требуемая длительность ОКР; P_T – количественная мера оценки превышения $T_Ф$ относительно $T_Н$.

2 Методический подход к моделированию неопределенности. Входящие в состав уравнений (1) переменные Z, $ПЭ$, $ТУ$ и T описываются системой нелинейных детерминированных уравнений, однако переменные и параметры, входящие в эти уравнения (кроме требуемых тактико-технических характеристик нового образца), являются недетерминированными величинами.

В обобщенном виде уравнения имеют вид:

$$Z = F_Z(X, Q),\ ПЭ = F_{ПЭ}(Y, Q),\ ТУ = F_{ТУ}(Q),\ T = F_T(X, Q), \qquad (2)$$

где $X = \{x_i\}$ – множество переменных, которые являются результатом обработки ретроспективной информации об изделиях-аналогах, $i = 1,2,...,N_x$; $Y = \{y_j\}$ – множество прогнозных данных, которые определяют эффективность применения новых образцов РКТ, $j = 1,2,...,N_y$; $Q = \{q_k\}$ – множество требуемых тактико-технических характеристик создаваемого нового образца РКТ, $k = 1,2,...,N_q$.

Уравнения (2) являются экономической моделью создания и целевого применения новых образцов РКТ.

Переменные множеств $x_i \in X$ и $y_j \in Y$ являются неопределенными величинами, которые не могут быть описаны методами теории вероятностей. Результаты расчетов, полученные по соотношениям (2), также будут неопределенными величинами.

Детализация аналитических уравнений $Z = F_Z(X, Q)$ и $ПЭ = F_{ПЭ}(Y, Q)$ приведена в [9], математическая модель $ТУ = F_{ТУ}(Q)$ для оценки технического уровня приведена в [10]. Математическая модель оценки длительности ОКР $T = F_T(X, Q)$ может быть построена на основе методологии PERT (модель расчета затрат времени на выполнение ОКР в условиях неопределенности).

Методический подход к математическому описанию неопределенности переменных модели (2), содержащихся в множествах X и Y, приведен ниже.

3 Методический подход к математическому описанию неопределенности переменных экономической модели инновационного проекта создания новых образцов РКТ. Вопросы моделирования неопределенностей в экономических процессах наиболее полно рассмотрены в [11], [14]. На сегодняшний день для математического описания неопределенностей в экономических моделях используются вероятностные, нечеткие и интервальные методы.

В большинстве научных публикаций для оценки рисков неопределенность моделируется с применением вероятностно-статистических методов или методов, построенных на субъективной вероятности.

В основе имитационной модели лежат аналитико-вероятностные модели. Методы построения аналитико-вероятностных моделей подробно описаны в учебной литературе, например в [15], [16]. Не проблемным является также вопрос создания компьютерной имитационной модели, так как сегодня для этого имеется широкий набор программных средств.

Величина риска потерь и соответствующая ей количественная мера возможности могут быть определены соотношениями:

$$R_{ПЕ} = ПЕ(M^*) - ПЕ(M),\ P_{ПЕ} \approx \frac{N_1(M, M^*)}{N},$$

где $R_{ПЕ}$ – возможная величина снижения полезного эффекта из-за наличия факторов риска (в том числе возможных аварийных ситуаций); $ПЕ(M^*)$ –

величина ожидаемого полезного эффекта для множества номинальных (наиболее ожидаемых) значений входных данных (M^*) – базовый вариант; $ПЕ(M)$ – величина возможного полезного эффекта с учетом факторов риска; $N_1(M, M^*)$ – количество случаев, которые могут возникнуть в процессе проведения компьютерных экспериментов, при которых $R_{ПЕ} \leq Q_З$; N – общее количество компьютерных экспериментов; $Q_З$ – значение допустимой величины снижения полезного эффекта.

По аналогичной алгоритмической схеме вычисляются уровни риска увеличения затрат на ОКР, снижения технического уровня и увеличения длительности ОКР.

Основным достоинством имитационной модели является относительно высокая точность оценки рисков, а основной недостаток – необходимость определять закон вероятности распределения случайных величин.

Однако применить аналитико-вероятностный подход к оценке рисков проектов по созданию новых образцов РКТ по объективным причинам невозможно, в основном из-за уникальности этих образцов.

Ряд авторов для моделирования неопределенностей используют интервальные методы [17], [18].

Использование интервальных методов возможно, если построена аналитическая модель экономического процесса, а для всех переменных модели известны четкие числа значений границ интервалов изменения, однако закон изменения внутри интервала неизвестен.

В обобщенном виде суть метода интервалов состоит в следующем:

– для заданных граничных значений переменных модели вычисляются два значения экономического показателя $P_Э$:

а) пессимистическое $P_{Эpes}$, которое соответствует наихудшему сочетанию факторов;

б) оптимистическое $P_{Эopt}$ – для наиболее благоприятного сочетания факторов;

– для известных значений $P_{Эpes}$ и $P_{Эopt}$ определяется наиболее ожидаемое значение экономического показателя $P_Э$ по формуле Гурвица:

$$P_Э = \lambda P_{Эpes} + (1-\lambda) P_{Эopt},$$

где λ – показатель степени пессимизма-оптимизма – определяется методом экспертных оценок.

Оценка величины риска экономических потерь $\Delta P_Э$ вычисляется по формуле:

$$\Delta P_Э = \left| P_{Эpes} - P_Э \right| = (1-\lambda) \left| P_{Эpes} - P_{Эopt} \right|.$$

Использование метода интервалов позволяет выполнить количественную оценку возможных экономических потерь, однако не позволяет оценить меру вероятности возникновения этих потерь.

Основное достоинство метода – его простота, а к недостаткам относятся: высокий уровень субъективизма при определении границ интервалов изменения переменных модели и выбора значения показателя оптимизма-пессимизма, низкая точность количественной оценки рисков.

Методы нечетких (расплывчатых) множеств для оценки рисков используются крайне редко [17], [19]. При этом используются простые математические модели описания экономических процессов, а в качестве исходных данных используется информация, подготовленная путем экспертных оценок.

Основными (базовыми) объектами теории нечетких множеств являются: лингвистическая переменная[2] lv , нечеткие числа[3] ch и функция принадлежности[4] $\mu(x)$, $x \in A$ [20].

На нечетком множестве определены логические операции (для лингвистических переменных) и арифметические операции (для нечетких чисел). Для каждого вида операций определены правила преобразования функций принадлежности. Кроме того, на нечетком множестве введена (строго не обоснованная) операция дефазификации, которая позволяет выполнить преобразование нечеткого множества в четкое число. Внешне эта операция напоминает операцию нахождения математического ожидания на множестве случайных чисел. Однако эта операция не может считаться тождественной (с математической точки зрения).

Основное достоинство метода нечетких множеств – это возможность оценки рисков трудно формализируемых экономических процессов и незначительный объем вычислений.

Основной недостаток – велика роль субъективного фактора, низкая точность количественной оценки рисков.

Таким образом, для обеспечения относительно высокой точности определения уровня риска проектов по созданию и применению новых образцов РКТ необходима разработка аналитико-нечеткой математической модели экономического процесса, которая была бы гомоморфной аналитико-вероятностной модели без использования достаточно полного объема однородной статистической информации.

Анализ литературных источников по моделированию трудно формализуемых процессов и систем показал, что построение аналитико-нечеткой математической модели, которая была бы гомоморфной аналитико-вероятностной моделью, возможно при условии комбинированного применения методов теории нечетких множеств, интервальных методов и методов теории возможностей [21], при некоторой трансформации принятого определения меры распределения возможностей.

Изначально теория возможностей возникла как расширение теории нечетких множеств [21]. В течение последних двух десятилетий стала развиваться ветвь теории возможностей как альтернатива теории вероятностей.

Как известно, вероятностная мера $P_r(A_i)$ представляет собой частоту появления некоторого события A_i в длительной серии независимых повторных испытаний в неизменных условиях.

---

[2] Лингвистическая переменная – переменная, значениями которой могут быть слова или словосочетания естественного или искусственного языка.

[3] Нечеткое число – действительное число, сопровождающееся словами "около" или "примерно равно", которое представляется нечетким множеством на множестве действительных чисел.

[4] Функция принадлежности $\mu(x)$ – невероятностная субъективная мера степени принадлежности элемента x нечеткому множеству, которая определяется в результате опроса экспертов.

Мера возможности $P_{os}(A_i)$ не имеет событийно-частотной интерпретации, однако позволяет оценить реальность появления события A_i исходя из наличия опытных фактов, принятых гипотез и логических суждений.

Формально мера возможности события A_i может быть записана следующим образом:

$$P_{os}(A_i):F(\Omega)\to[0{,}1],\ A_i\subset\Omega,\ \Omega=(\bigcup_{i=1}A_i)\cup\varnothing,\ P_{os}(\Omega)=1,\ P_{os}(\varnothing)=0,$$

где Ω – множество всех возможных событий, включая пустое множество $\varnothing$; $F(\Omega)$ – отображение элементов множества Ω на замкнутый интервал $[0{,}1]$.

Каждому событию A_i ставится в соответствие число $0\le P_{os}(A_i)\le 1$.

Теория возможностей построена на следующих основных аксиомах [21]:

1) аксиома монотонности по включению – если событие A влечет за собой появление события B (т. е. $A\subseteq B$), тогда выполняется условие

$$P_{os}(A)<P_{os}(B); \qquad (3)$$

2) аксиома объединения

$$\forall A\ и\ \forall B\subset\Omega\Rightarrow P_{os}(A\cup B)\ge\max\{P_{os}(A),P_{os}(B)\}; \qquad (4)$$

3) аксиома пересечения

$$\forall A\ и\ B\in\Omega\Rightarrow P_{os}(A\cap B)\le\min\{P_{os}(A),P_{os}(B)\}; \qquad (5)$$

4) аксиома положительности меры – $P_{os}(A)\ge 0$;

5) аксиома объединения двух противоположных событий A и $\overline{A}$ – $P_{os}(A\cup\overline{A})\ge 1$.

В работах [22], [23] доказано, что теория вероятностей является частным случаем теории возможностей. Тогда, используя условия (3) – (5), можно минимизировать различие теории вероятностей и теории возможностей.

Из выражения (4) следует, что нижней границей величины $P_{os}(A\cup B)$ является величина $\max\{P_{os}(A),P_{os}(B)\}$, а верхней границей – величина $P_{os}(A)+P_{os}(B)$ при $A\cap B=\varnothing$.

Из выражения (5) следует, что верхней границей величины $P_{os}(A\cap B)$ служит $\min\{P_{os}(A),P_{os}(B)\}$, а нижней границей – величина $P_{os}(A)\cdot P_{os}(B)$.

Нижняя граница выражения $P_{os}(A\cup\overline{A})$ равна 1.

С учетом приведенных верхних и нижних границ выражения (4) – (5) можно преобразовать к виду

$$\begin{gathered}P_{os}(A\cup B)\le P_{os}(A)+P_{os}(B),\\ P_{os}(A\cap B)\ge P_{os}(A)\cdot P_{os}(B),\\ P_{os}(A\cup\overline{A})=1.\end{gathered} \qquad (6)$$

Из уравнений (3) и (6) следует, что функция распределения возможностей может быть достаточно близкой к функции распределения вероятностей, т. е.

$$P_{os}(A) - P_r(A) \approx 0. \quad (7)$$

Условие (7) можно считать корректным, если нет требования, чтобы значения вероятности относились к элементарным событиям [21].

Функция $P_{os}(x)$ ($x \in [a,b]$), удовлетворяющая условиям (3), (6) и (7), является функцией распределения уровня доверия к значениям переменной *x*, и в соответствии с [19] такая функция обозначается $P_b(x)$.

Для непрерывных величин $x \in [a,b]$ выполняется условие

$$P_{os}(x) \geq P_b(x) \geq P_r(x). \quad (8)$$

Условие (8) позволяет моделировать неопределенность переменных математической модели (2), которые обладают свойством быть измеримыми, с помощью функции распределения доверия $P_b(x)$.

Неопределенность числовых констант модели (2) удобно моделировать общепринятыми методами для нечетких чисел с функцией принадлежности $\mu_A(x)$, где A – множество нечетких значений константы [19].

Элементы множества A и функция принадлежности $\mu_A(x)$ строятся экспертами на основе имеющейся информации. Неопределенность в принципе измеримых величин, которые используются в модели (2), моделируется с помощью нечетких числовых переменных и, как правило, с трапециевидной или треугольной функцией принадлежности.

В редких случаях используются сигмовидные функции. Для моделирования корреляционных связей между переменными (при условии отсутствия необходимого объема однородной статистической информации) уровень корреляции λ целесообразно представить в форме лингвистической переменной в виде шкалы Харрингтона [24] (см. табл. 1).

Таблица 1 – Шкала Харрингтона

Лингвистическая переменная λ (термы)	Нечеткое значение λ
очень высокий	0,8 – 1,0
высокий	0,64 – 0,8
средний	0,37 – 0,64
низкий	0,2 – 0,37
очень низкий	0,0 – 0,2

Общепринятая функция принадлежности $\mu(\lambda)$ лингвистической переменной λ имеет вид (рис. 1).

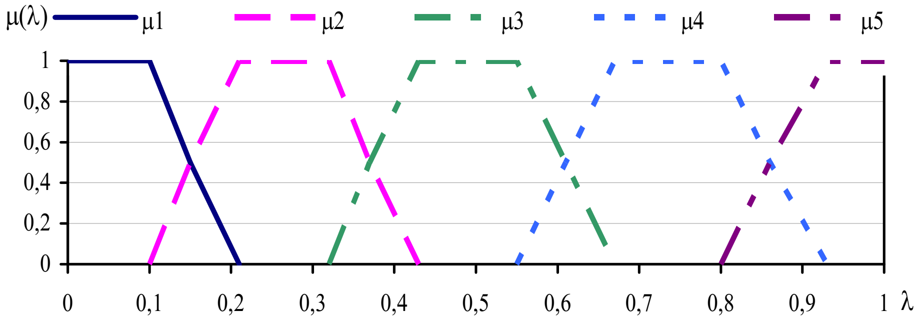

Рис. 1 – Функции принадлежности лингвистической переменной λ

Как видно на рис. 1, функции принадлежности $\mu_1(\lambda)$ и $\mu_5(\lambda)$ состоят из двух прямых, а функции принадлежности $\mu_2(\lambda)$, $\mu_3(\lambda)$ и $\mu_4(\lambda)$ состоят из трех прямых.

Общая функция принадлежности $\mu\ (\lambda)$ определяется выражением [19]

$$\mu\ (\lambda_i, \lambda_{(i+1)}) = \max\{\mu_i(\lambda), \mu_{(i+1)}(\lambda)\}.$$

Для выбора общего вида функции плотности распределения доверия к значениям неопределенной величины $x \in [a,b]$ воспользуемся особенностью технико-экономических показателей: стохастическая неопределенность технико-экономических показателей лучше всего моделируется распределением [25]

$$f(x,\alpha,\beta) = \frac{(\alpha+\beta+1)!}{\alpha!\cdot\beta!} x^{\alpha}(1-x)^{\beta},\ 0 < x < 1,\ \alpha,\beta \geq -1. \qquad (9)$$

От интервала $[0,1]$ простым линейным преобразованием легко перейти к интервалу $[a,b]$. Варьируя значениями параметров α и β, можно выразить практически все применяемые на практике стохастические распределения.

Функция $f(x,\alpha,\beta)$ симметричная относительно средины интервала $[a,b]$ только если $\alpha = \beta$.

Метод построения β-распределения приведен в [26].

Исходными данными для построения β-распределения являются два нечетких интервала d_1 и d_2, $d_2 \subset d$ с нечеткими границами γ_{11}, γ_{12} для интервала d_1 и γ_{21}, γ_{22} для интервала d_2, $d_1 = [a,b]$.

Определение нечетких чисел γ_{ij}, $(i,j = 1,2)$ проводится экспертами на основе информации, содержащейся в базе знаний[5] по рассматриваемой проблеме.

Основным элементом информационной базы данных (БД) является информационная единица (IE):

$$IE = \langle N, Z_n, UD, NVu, II \rangle,$$

где N – название величины; Z_n – численное значение величины; UD – уровень доверия (величина отклонений влево ($\Delta Z_{пл}$) и вправо ($\Delta Z_{пп}$) от значения Z_n,%); NVu – название информационной единицы верхнего уровня (куда входит величина Z_n); II – источник информации (название, год возникновения информации).

В качестве функции принадлежности нечеткого числа θ на практике чаще всего используется треугольная функция $\theta\ (\theta_1, \theta_0, \theta_2)$, где θ_0 – наиболее возможное значение нечеткого числа, θ_1 – левая граница значений нечеткого числа θ (в % по отношению к величине θ_0), θ_2 – правая граница значений нечеткого числа (в % по отношению к величине θ_0).

Значения параметров $(\theta_1, \theta_0, \theta_2)$ определяются экспертами на основе данных базы знаний.

---

[5] База знаний содержит информацию по определенной предметной области (информационная база данных) и правила логико-математической обработки информации, содержащейся в информационной базе данных.

Приведенные выше методы моделирования нечетких величин в полном объеме позволяют описать нечеткие ретроспективные данные и частично прогнозные данные.

Выводы. Статья посвящена разработке теоретических основ количественной оценки рисков реализации проектов по созданию новых образцов ракетно-космической техники. Приведенный в работе методический подход количественной оценки рисков представляет собой синтез математического моделирования неопределенностей и имитационного моделирования. Математическое моделирование неопределенностей построено на основе теории нечетких множеств, теории возможностей и методов прогнозирования на основе временных рядов.

В этой части статьи приведены общие теоретические положения для количественной оценки рисков указанных проектов и теоретические основы моделирования неопределенности ретроспективных исходных данных по изделиям-аналогам.

Во второй части статьи будут представлены теоретические основы моделирования неопределенности перспективных (прогнозных) исходных данных, а также обобщенный алгоритм решения задач оценки рисков проектов по созданию новых образцов ракетно-космической техники.

1. *Брюховецкая Н. Е., Педерсен И. А.* Исследование сущности инновационного риска и подходов к его оценке. Механізм регулювання економіки. 2011. № 3. С. 64–70.
2. *Быков А. А.* О проблемах методического обеспечения оценки риска. Проблемы анализа рисков. 2008. Т. 5, № 2. С. 4–7.
3. *Быков А. А., Порфирьев Б. Н.* Об анализе риска, концепциях и классификации рисков. Проблемы анализа рисков. 2006. № 4. С. 319–337.
4. *Лавринов Г. А., Подольский А. Г.* Содержание понятий неопределенности и риска в области формирования и реализации планов развития вооружения и военной техники. Вооружение и экономика. 2010. № 1 (9). С. 53–59.
5. *Лутай А. Н.* Оценка риска проекта по созданию нового образца авиационной техники с использованием прецендентного подхода. Авиационно-космическая техника и технология. 2010. № 5 (72). С. 105–112.
6. *Латкин М. А., Илюшко В. М.* Оценка длительности и стоимости проектов с учетом негативного воздействия рисков. Авиационно-космическая техника и технология. 2008. № 3 (50). С. 94–98.
7. *Спицин А. Г., Лавринов А. Г., Хмелевой В. В.* Анализ рисков в проектировании авиационной техники. Вооружение и экономика. 2011. № 3 (15). С. 35–44.
8. Технический проект опытно-конструкторской работы "Аппарат космический "Січ-2М". Пояснительная записка. Часть 11. Технико-экономические показатели создания космического аппарата и наземного вспомогательного оборудования / ГП "КБ "Южное" - 2017. (исх.311/1096 от 02.03.2017).
9. *Пилипенко О. В., Переверзев Е. С., Алпатов А. П., Марченко В. Т., Печеневская О. К., Хорольский П. П.* Эффективность научно-технических проектов и программ. Днепропетровск: Пороги, 2008. 509 с.
10. *Марченко В. Т., Петляк Е. П., Сазина Н. П., Хорольский П. П.* О новом методе оценки технического уровня космических аппаратов дистанционного зондирования земли. Техническая механика. 2017. № 2. С. 41–50.
11. *Вартанян В. М., Ревенко Д. С., Лыба В. А.* Неопределенность в экономических процессах: факторы возникновени и методы ее описания. Економіка та управління підприємствами машинобудівної галузі: проблеми теорії та практики. 2009. № 2 (6). С. 4–12.
12. *Алпатов А. П., Марченко В. Т., Сазина Н. П., Хорольский П. П.* Методология проведения технико-экономического обоснования проектов создания новых образцов космической техники. Техническая механика. 2015. № 3. С. 3–17.
13. *Алпатов А. П., Марченко В. Т., Хорольський П. П., Сазіна Н. П.* Методологічні аспекти фінансово-економічного обґрунтування концептуальних завдань космічної галузі. Космічна наука і технологія. 2014. Т. 20, № 6 (91). С. 49–59.
14. *Турко Д. А.* Учет условий неопределенности и риска в процессе решений в сфере наукоемкого высокотехнологического производства. Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. 2009. № 43. С. 180–187.
15. *Емельянов А. А., Власова Е. А., Дума Р. В.* Имитационное моделирование экономических процессов: учебное пособие. М.: Финансы и статистика, 2002. 368 с.

16. *Хахулин Г. Ф.* Основы конструирования имитационных моделей: учебное пособие. М.: НТК Поток, 2002. 222 с.
17. *Смоляк С. А.* Оценка эффективности инвестиционных проектов в условиях риска и неопределенности. Теория ожидаемого эффекта. Центральный экономико-математический институт РАН. М.: Наука, 2002. 181 с.
18. *Савилов С. И.* Проблемы учета интервальной неопределенности при оценке эффективности инвестиционных проектов в нестационарной экономике России. Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2015. № 30. С.48–47.
19. *Зак Ю. А.* Принятие решения в условиях нечетких и размытых данных: Fuzzy-технолгии. М.: Книжный дом ЛИБРОКОМ, 2013. 352 с.
20. *Штовба С. Д.* Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику. URL: http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/index.php.
21. *Дюбуа Д., Прад А.* Теория возможностей. Приложения к представлению знаний в информатике: пер. с фр. М.: Радио и связь, 1990. 288 с.
22. *Пытьев Ю. П.* Возможность. Элементы теории и ее применения. М.: Эдиториал УРСС, 2000. 192 с.
23. *Пытьев Ю. П.* О стохастических модулях возможности. Интеллектуальные системы. 2001. Т. 6, вып. 1–4. С. 25–62.
24. *Ларичев В. Н.* Теория и методы принятия решений. М.: Логос, 2000. 296 с.
25. *Грицюк С. Н., Мирзоева Е. В., Лысенко В. В.* Математические методы и модели в экономике: учебник. Ростов н/Д: Феникс, 2007. 348 с.
26. *Марченко В. Т., Сюткина-Доронина С. В., Сазина Н. П.* Об одном методе моделирования неопределенностей технико-экономических данных в задачах оценивания научно-технических проектов. Техническая механика. 2016. № 2. С. 137–146.

Получено 15.02.2018,
в окончательном варианте 28.02.2018