УДК 629.78

В. Т. МАРЧЕНКО, С. В. СЮТКИНА-ДОРОНИНА, Н. П. САЗИНА

ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ДАННЫХ В ЗАДАЧАХ ОЦЕНИВАНИЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ПРОЕКТОВ

Целью статьи является изложение формализованного метода моделирования неопределенности числовых исходных данных, используемого при расчетах технико-экономических параметров научно-технического проекта и реализация этих моделей в виде компьютерных программ.

Предложен метод формального описания (моделирования) неопределенности исходных данных. Описаны основные положения, лежащие в основе моделирования неопределенности числовых данных. Представлена логическая схема алгоритма построения функции принадлежности.

Построение формализованной модели неопределенности нечетких чисел, входящих в аналитические выражения для расчета показателей эффективности научно-технических проектов по созданию ракетно-космических систем, дает возможность существенно снизить трудоемкость подготовки исходных данных при использовании компьютерного имитационного моделирования для количественной оценки уровня риска реализации проектов и повысить качество результатов технико-экономического обоснования.

Метою статті є викладення формалізованого методу моделювання невизначеності числових вихідних даних, який використовується при розрахунках техніко-економічних параметрів науково-технічних проектів та реалізація цих моделей у вигляді комп'ютерних програм.

Запропоновано метод формального опису (моделювання) невизначеності вихідних даних. Описано основні положення, що лягли в основу моделювання невизначеності вихідних даних. Представлено логічну схему алгоритму побудови функції приналежності.

Створення формалізованої моделі невизначеності нечітких чисел, що входять до аналітичних виразів для розрахунку показників ефективності науково-технічних проектів зі створення ракетно-космічних систем, надає можливість суттєво знизити трудоємність підготовки вихідних даних при використанні комп'ютерного імітаційного моделювання для кількісного оцінювання рівня ризику реалізації проектів та підвищити якість результатів техніко-економічного обгрунтування.

The paper presents a formalized method of the simulation of uncertainties of the numerical reference data applicable to calculations of the technical and economical parameters of a research project and realization of these models in the form of computer programs.

A method of a formal description (simulation) of uncertainty of the reference data is proposed. The major concepts for simulating uncertainties of the numerical data are described. A logical system of an algorithm for constructing the membership function is presented

Constructing the formalized model of uncertainty of the odd numbers of analytical expressions for calculating the indices of efficiency of research projects on creation of the rocket and space systems makes possible significant decreasing a labor-intensive preparation of the reference data in the computer simulation for the quantitative estimation of a risk level of projects and upgrading the quality of the results of the technical feasibility.

***Ключевые слова**: неопределенность исходных данных, моделирование неопределенности, функция принадлежности, бета-распределение, показатели эффективности научно-технических проектов.*

Постановка задачи. Качество технико-экономического обоснования научно-технических проектов по созданию новых образцов ракетно-космической техники (РКТ) определяется в основном тем, насколько корректно учтена при проведении технико-экономических расчетов неопределенность[1] используемых исходных данных (ИД). Система показателей эффективности проектов создания ракетно-космических систем (как технических систем "двойного" назначения) приведена в [1]. В качестве основных показателей эффективности проектов создания ракетно-космической техники целесообразно использовать следующие показатели:

– коэффициент выгод-затрат ($k_{\hat{A}\zeta}$);

[1] Неопределенность исходных данных – неполнота, неточность, недостоверность, случайность, отсутствие ИД.

– приведенный индекс доходности ($I_{ÄÏ}$);

– интегральный показатель технической эффективности ($k_{ÒÅ}$);

$$
\begin{aligned}
k_{ÂÇ} &= \frac{\times ÄÄ + Í\ Ä + ÄÂ}{ÄÑÈ}, \\
I_{ÄÏ} &= \frac{\times ÄÄ}{ÄÑÈ \cdot (1 - \eta_{Í\ ÁÎ})}, \\
k_{ÒÅ} &= \alpha_{Ò} \cdot k_{ÒÓ}, \\
\times ÄÄ &= \sum_{i=1}^{T_k} \frac{ÂÄ(t_i) - Ç(t_i)}{\prod_{k=0}^{i} (1 - \delta(t_i))^k},
\end{aligned}
\qquad (1)
$$

где $\times ÄÄ$ – чистый дисконтированный доход; $Í\ Ä$ – непрямой (косвенный) доход, часть прибыли субъектов хозяйственной деятельности, полученная за счет использования космических технологий (сельское и лесное хозяйство, геологоразведка, картография и т. д.); $ÄÑÈ$ – дисконтированная стоимость инвестиций; $\eta_{Í\ ÁÎ}$ – удельный вес использования технического ресурса ракетно-космических комплексов и космических систем в интересах национальной безопасности и обороны; $\alpha_{Ò}$ – эмпирический коэффициент пропорциональности; $k_{ÒÓ}$ – показатель технического уровня ракеты-носителя (РН) или космического аппарата (КА) по отношению к лучшим мировым образцам (характеризует совершенство нового образца техники и его потенциальную конкурентоспособность на мировом рынке); $ÂÄ(t_i)$ – валовый доход от производства и использования ракетно-космических систем на i-ый момент времени (год, квартал, месяц); $Ç(t_i)$ – понесенные затраты на i-ый момент времени; $\delta(t_i)$ – норма дисконта на i-ый момент времени; $ÄÂ$ – дополнительные экономические выгоды за счет:

– трансфера созданных в процессе выполнения опытно-конструкторских работ (ОКР) новых конструкций и технологий для производства продукции широкого потребления;

– экономии государственных средств, необходимых для обеспечения современного уровня безопасности и обороны страны, за счет использования космических технологий;

– возможных дополнительных экономических выгод государства, которые могут быть получены за счет принятия эффективных государственных управленческих решений на основе достоверной космической информации;

– недопущения убытков государства от возможных техногенных и природных катаклизмов за счет широкого использования космической и навигационной информации;

– снижения экологического ущерба за счет оперативного выявления негативных изменений экологического состояния окружающей среды;

– экономии государственных средств, необходимых для поддержания геополитического имиджа страны;

– экономической выгоды Украины в сфере международного сотрудничества в целях будущего промышленного использования космического пространства.

Наиболее существенное влияние на расчетные значения технико-экономических показателей общегосударственных научно-технических проектов по созданию новых образцов РКТ оказывает ретроспективная (ИД прошлых периодов времени) и перспективная неопределенность (прогнозные ИД).

Ретроспективные ИД – это, в основном, технико-экономические параметры изделий-аналогов. Прогнозные ИД – это прогнозные параметры мирового рынка ракетно-космической техники и услуг, информация о потенциальных конкурентах, надежность функционирования изделий РКТ и их техническая эффективность.

Неопределенность ретроспективных данных обусловлена прежде всего тем, что ключевые технико-экономические параметры реализованных проектов по изделиям-аналогам, такие как себестоимость разработки и изготовления новых образцов РКТ, удельный вес материальных и трудовых затрат в себестоимости являются закрытыми данными фирм-разработчиков изделий РКТ. В редких случаях эти данные имеют конфиденциальный характер. Для внешнего мира, как правило, известна лишь коммерческая цена космической продукции и услуг.

Неопределенность прогнозных ИД обусловлена отсутствием необходимого объема достоверной статистической информации, на основе которой строятся прогнозы, а также тем, что применительно к проектам создания РКТ требуется большая глубина прогноза (более 10 лет). Таким образом, неопределенность ИД, используемых при технико-экономических расчетах, является в большей степени объективным, чем субъективным фактором.

Неопределенность ИД является основной причиной того, что фактические технико-экономические показатели научно-технических проектов по созданию новых образцов РКТ будут тоже неопределенными величинами, которые можно интерпретировать как случайные величины с неизвестными законами распределения, а денежные потоки будут случайными функциями с неизвестными математическим ожиданием, дисперсией и корреляционной функцией.

Случайный характер будущих фактических технико-экономических показателей обуславливает риски успешности реализации научно-технического проекта.

В результате случайного характера конечных фактических технико-экономических параметров может реализоваться случай, когда не будут достигнуты желаемые конечные результаты: затраты превысят запланированное финансирование, коммерческий и общий полезный эффекты могут быть значительно ниже желаемых, в самом худшем случае проект может быть убыточен. Отклонение в худшую сторону будущих фактических технико-экономических параметров научно-технического проекта от величины запланированных (желаемых) и вероятностная мера такого отклонения представляют уровень риска проекта.

Из приведенного выше следует, что для обеспечения приемлемого для принятия решения качества технико-экономического обоснования технических проектов по созданию ракетно-космических систем необходимо учиты-

вать (путем моделирования) неопределенность данных, используемых в технико-экономических расчетах.

1. Существующие методы моделирования неопределенностей в технико-экономических расчетах. По результатам анализа публикаций, приведенных в журналах " Проблемы анализа риска" и "Управление риском", существующие на сегодня методы моделирования неопределенностей числовых данных можно объединить в четыре группы:

а) стохастические, или вероятностно-статистические методы;

б) интервальные;

в) нечетко-интервальные;

г) субъективно вероятностные.

Стохастический, или вероятностно-статистический метод: используется для моделирования неопределенности значений параметров и переменных путем построения функций распределения плотности вероятности. Такой вид моделирования неопределенности – наиболее удобный для определения уровня риска проекта путем проведения компьютерного моделирования. Использование вероятностно-статистического метода при моделировании сложных технических инвестиционных и, тем более, инновационных проектов практически невозможно, так как для большинства проектов имеющиеся статистические данные весьма незначительны и не обладают достаточной достоверностью, а в ряде случаев отсутствуют вообще.

Интервальный метод предлагает знание нижней и верхней границы изменения неопределенных параметров и переменных, при этом статистическая функция распределения значений параметров и переменных неизвестна. Использование интервального метода позволяет определить границы возможных значений технико-экономических показателей, однако не предоставляет возможности оценить уровень риска проекта.

Нечетко-интервальный метод использует формализм теории нечетких чисел, определяемый функцией принадлежности. Этот метод моделирования неопределенности широко используется при оценке эффективности инвестиционных проектов. Трудности использования этого метода заключаются в необходимости построения функций принадлежности с использованием экспертных методов. Кроме того, функция принадлежности не обладает свойствами вероятностной меры, поэтому ее использование в процессе имитационного моделирования хода инвестиционного проекта затруднительно.

Метод субъективной вероятности - построение экспертами субъективной функции распределения. Как правило, в качестве функции плотности вероятности используется функция Гаусса, а параметры распределения определяются экспертно-аналитическим путем. Такой метод моделирования неопределенности удобен для выполнения компьютерного моделирования, однако обладает высоким уровнем субъективизма и в сложных имитационных моделях достаточно трудоёмок.

На сегодняшний день наиболее эффективным (с точки зрения учета полноты и динамики изменения факторов, определяющих технико-экономические показатели) методом для оценки уровня риска сложных технических проектов является метод компьютерного имитационного моделирования.

В процессе реализации этого метода производится расчет основных технико-экономических показателей для различного допустимого сочетания

значений исходных данных, которые обладают свойствами неопределенности. Таким образом, задача оценки уровня риска сводится к задаче моделирования неопределенности ИД, используемых для вычисления входящих в правые части уравнений (1) переменных. Обобщенная математическая зависимость этих переменных от исходных данных имеет вид:

$$Q_p = F_p\left(RI, PI, \left\{\tau_q\right\}\right), \qquad (2)$$

$$Q_p \in \left\{\times ÄÄ, Í\ Ä, ÄÂ, ÄÑÈ, ÁÄ(t_i), Ç(t_i)\right\},$$

где $F_p\left(RI, PI, \left\{\tau_q\right\}\right)$ – известная функциональная зависимость; RI – множество ретроспективных исходных данных; PI – множество перспективных (прогнозных) исходных данных; $\left\{\tau_q\right\}$ – основные тактико-технические характеристики новых изделий РКТ, созданных в результате выполнения опытно-конструкторской работы.

На сегодня основная трудность и сложность реализации метода имитационного моделирования для оценки уровня риска сложного технического проекта заключается в том, что модели неопределенности исходных данных формируются "вручную" экспертами.

Целью этой статьи является изложение формализованного метода моделирования неопределенности, используемого при расчетах технико-экономических параметров научно-технического проекта, и реализация моделей в виде компьютерных программ.

2. Метод формального описания (моделирования) неопределенности исходных данных. Приведенные ниже основные положения моделирования неопределенности числовых данных сформированы на основе результатов анализа имеющихся ограниченных и неоднородных статистических данных по технико-экономическим показателям завершенных и эксплуатируемых ракетно-космических систем. Влияние неоднородности статистических данных было сведено к минимуму путем приведения технико-экономических параметров к индексным величинам. Из анализа результатов ОКР по существующим аналогам ракетно-космических систем следует:

а) область возможных значений технико-экономических параметров ракетно-космических систем ограничена как снизу, так и сверху;

б) индекс роста затрат I_z для подавляющего большинства проектов создания ракетно-космических систем (РКС) больше 1:

$$I_z = \frac{Z_f - Z_p}{Z_p}, \qquad (3)$$

где Z_f – фактические затраты на реализацию проекта; Z_p – плановые (ожидаемые) затраты, рассчитанные по определенным исходным данным на ранних этапах ОКР (случаи, когда $I_z < 1$, не были обнаружены);

в) индекс полезного эффекта $\left(I_{pe}\right)$, как правило, меньше 1:

$$I_{pe} = \frac{P_{ef} - P_{ep}}{P_{ep}}, \qquad (4)$$

где P_{ef} – величина фактического полезного эффекта от реализации ОКР; P_{ep} – величина планового (ожидаемого) полезного эффекта, рассчитанная по усредненным исходным данным на этапе выполнения ОКР.

Из фактов а) – в) следует, что даже в идеальном случае (обеспечена достаточность и однородность статистических данных) неопределенность данных могла бы быть промоделирована только с использованием двухпараметрической функции вида β-распределения $f(\alpha, \beta, x)$.

Важной особенностью функции типа β-распределения является то, что, варьируя параметрами α и β, можно генерировать значительное число функций различного вида.

Из анализа публикаций в журналах "Управление риском" и "Проблемы анализа риска" следует, что наиболее перспективным на сегодня методом моделирования неопределенности числовых данных является функция принадлежности (весовая функция) нечеткого числового множества $\mu_Q(x)$, где Q – нечеткое множество. На практике, при моделировании неопределенности набора числовых параметров, функция $\mu_Q(x)$ формируется экспертами в "ручном режиме". Такой подход к построению функции принадлежности нечетких числовых множеств при моделировании таких сложных технических проектов, как создание и эксплуатация ракетно-космических систем, неприемлем по следующим основным причинам:

1) в процессе выполнения расчетов ожидаемых технико-экономических показателей проектов создания систем РКТ используется значительное число неопределенных (нечетких) данных (исчисляемое сотнями). Формирование в "ручном режиме" функции принадлежности по каждому нечеткому числу представляет собой достаточно трудоемкую задачу;

2) велико влияние субъективного фактора на результаты конечных расчетов.

Приведенные негативные факторы 1) и 2) могут быть устранены, если на экспертов возложить только функцию определения нижней (a_{min}) и верхней a_{max} границ возможных значений нечетких чисел и определения интервала $[b_{min}, b_{max}] \subset [a_{min}, a_{max}]$, где "наиболее вероятно" может находиться нечеткое число. На основе только этих границ по специальному алгоритму, реализованному в виде компьютерной программы, автоматически можно построить функции принадлежности для каждого нечеткого числа.

Для уменьшения уровня субъективности при определении интервалов $[a_{min}, a_{max}]$ и $[b_{min}, b_{max}]$ экспертам предоставляется специальным образом обработанная технико-экономическая информация по изделиям-аналогам:

– полученная из различных источников и в различное время технико-экономическая информация приводится к экономическим условиям страны на момент начала выполнения расчетов;

– проводится качественная оценка уровня достоверности информации по каждому источнику ее получения;

– оценивается состояние производственно-технологической и экспериментальной базы в стране на момент начала проведения расчетов исходя из заданных тактико-технических характеристик новой ракетно-космической системы или изделия РКТ.

Построенные экспертами интервалы $[a_{min}, a_{max}]$ и $[b_{min}, b_{max}]$ по каждому нечеткому числу являются исходными данными для автоматического построения функций принадлежности $\mu_Q(x)$, $Q = [a_{min}, a_{max}]$.

Построенную функцию принадлежности $\mu_Q(x)$ будем использовать в дальнейшем как качественную меру того, что нечеткая величина q примет значение $q = x$ с уровнем возможности $\mu_Q(x = q)$.

3. Логическая схема алгоритма построения функции принадлежности. Исходя из приведенных в подразделе 2 исходных положений, будем искать функцию принадлежности в следующем виде:

$$\mu_Q(x) = A \cdot Z^{\alpha-1}(x) \cdot (1 - Z(x))^{\beta-1}, \qquad (5)$$

$$Z(x) = \frac{x - a_{min}}{a_{max} - a_{min}},$$

где A – нормирующий множитель.

Задача сводится к определению параметров α, β, A в (5), которые должны выбираться при обеспечении унимодальности функции $\mu_Q(x)$.

Для вычисления параметров α и β выполним следующие действия:

1. Исходя из условия унимодальности функции принадлежности построим вспомогательную функцию $g(x)$ как линейную комбинацию гауссовых функций вида:

$$f(x) = \frac{1}{\alpha\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x - m}{\alpha}\right)^2\right],$$

где параметры α и m – вещественные числа.

Тогда функция $g(x)$ будет иметь следующий вид:

$$g(x) = \gamma_0 f_0(x) + \sum_{i=1}^{k} \gamma_i f_i(x),$$

$$\gamma_0 + \sum_{i=1}^{k} \gamma_i = 1.$$

2. Вычислим параметры $m_0, d_0, \gamma_0, k,\ m_i, d_i, \gamma_i$:

$$m_0 = \frac{a_{min} + a_{max}}{2},$$

$$d_0 = \frac{a_{max} - a_{min}}{2 \cdot n(\varepsilon)},$$

$$\gamma_0 = \frac{b_{max} - b_{min}}{a_{max} - a_{min}},$$

$$n(\varepsilon): \quad 1 - \int_{a_{min}}^{a_{max}} f_0(x)\,dx = \varepsilon.$$

Из стандартизованных таблиц нормированной функции Гаусса следует, что если $n(\varepsilon) = 4$, то $\varepsilon \le 0{,}00005$; если $n(\varepsilon) = 3$, то $\varepsilon \le 0{,}0015$. Примем $\varepsilon = 0{,}00005$, тогда $n(\varepsilon) = 4$.

$$d_i = d = \min\left\{\frac{b_{max} - b_{min}}{2 \cdot n(\varepsilon)};\quad \frac{b_{min} - a_{min}}{2 \cdot n(\varepsilon)};\quad \frac{a_{max} - b_{max}}{2 \cdot n(\varepsilon)}\right\},$$

$$k = \left]\frac{b_{max} - b_{min}}{d}\right[,$$

где $]\cdots[$ – операция выделения целой части.

Если $b_{min} - a_{min} < a_{max} - b_{max}$, то

$$m_i = b_{min} + \frac{2i-1}{2} \cdot d, \quad i = 1, 2, ..., (k-1),$$

$$m_k = \frac{b_{max} + a_{min} + (k-1) \cdot d}{2},$$

$$\gamma_1 = (1 - \gamma_0) \cdot \left(\frac{1}{k} + \frac{1}{2k^2}\right),$$

$$\gamma_2, ..., \gamma_{(k-1)} = (1 - \gamma_0) \cdot \frac{1}{k},$$

$$\gamma_k = (1 - \gamma_0) \cdot \left(\frac{1}{k} - \frac{1}{2k^2}\right).$$

Если $a_{max} - b_{max} \le b_{min} - a_{min}$, то:

$$m_i = b_{max} - \frac{2(k-1)+1}{2} \cdot d, \quad i = 2, 3, ..., k,$$

$$m_1 = \frac{a_{min} + b_{max} - (k-1) \cdot d}{2},$$

$$\gamma_1 = (1 - \gamma_0) \cdot \left(\frac{1}{k} - \frac{1}{2k^2}\right),$$

$$\gamma_2,\ldots,\gamma_{(k-1)} = (1-\gamma_0)\cdot\frac{1}{k},$$

$$\gamma_k = (1-\gamma_0)\cdot\left(\frac{1}{k}+\frac{1}{2k^2}\right).$$

3. Вычислим интегралы:

$$J_1 = \int_{a_{min}}^{a_{max}} x\cdot g(x)dx,$$

$$J_2 = \int_{a_{min}}^{a_{max}} (x-J_1)^2\cdot g(x)dx.$$

4. Выполним линейное преобразование:

$$J_{1Z} = \frac{J_1 - a_{min}}{a_{max}-a_{min}},$$

$$J_{2Z} = \frac{J_2}{(a_{max}-a_{min})^2}.$$

5. Определим параметры α и β из соотношений:

$$J_{1Z} = \frac{\alpha}{\alpha+\beta},$$

$$J_{2Z} = \frac{\alpha\cdot\beta}{(\alpha+\beta)^2(\alpha+\beta+1)}.$$

6. Вычислим значение нормирующего параметра A в уравнении (5):

$$A = \frac{1}{\int_0^1 Z^{\alpha-1}\cdot(1-Z)^{\beta-1}\cdot dz}.$$

7. Выполним обратное преобразование:

$$x = z\cdot(a_{max}-a_{min})+a_{min},\quad z\in[0,1].$$

Таким образом, функция $\mu_Q(x)$, которая описывает неопределенность (нечеткость) числового параметра q, построена.

4. Пример практического применения формализованной модели. Необходимо получить функцию принадлежности эксперта в виде бета-распределения, построенного на основе нормальных законов распределения случайных величин оцениваемого параметра x.

Эксперт установил вероятный диапазон значений (a,b) и наиболее вероятный диапазон значений (c,d) оцениваемого параметра x:

$$[a=2;\ c=10;\ d=14;\ b=18].$$

Компьютерная модель, реализующая описанный в статье алгоритм, находит параметры кривой плотности бета-распределения $\gamma = 7,219; \eta = 4,947$ по найденному математическому ожиданию $m = 0,593$ и найденной дисперсии $D = 0,018$ суммарной плотности нормального распределения и строит плотность бета распределения в диапазоне $(0 \le x \le 1)$ с заданным шагом интегрирования $\Delta = 0,001$ (рис. 1).

Рис. 1 – Полученная плотность бета-распределения вероятности

В результате, компьютерная модель строит функцию принадлежности эксперта в указанном диапазоне $[a;b]$ через плотность бета-распределения в диапазоне $[0;1]$ и определяет числовые характеристики функции принадлежности эксперта в диапазоне $[a;b]$ с заданным шагом интегрирования $\Delta = 0,001$: математическое ожидание $m = 11,488$; дисперсия $D = 4,597$; среднее квадратичное отклонение $\sigma = 2,144$; характеристика асимметрии $s_k = -0,195$; величина x, в которой плотность вероятности максимальна $moda = 11,792$ (рис. 2).

Рис. 2 – Полученная функция принадлежности эксперта

Выводы. Построение формализованной модели неопределенности нечетких чисел, входящих в аналитические выражения для расчета показателей эффективности научно-технических проектов по созданию ракетно-космических систем, представляет возможность существенно снизить трудоемкость подготовки исходных данных при использовании компьютерного имитационного моделирования для определения количественной оценки уровня риска реализации проектов и повысить качество их технико-экономического обоснования.

1. Эффективность научно-технических проектов и программ : монография / *О. В. Пилипенко, Е. С. Переверзев, А. П. Алпатов, В. Т. Марченко, О. К. Печеневская, П. П. Хорольский*. – Днепропетровск : Пороги, 2008. – 509 с.

Институт технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины, Днепропетровск

Получено 12.05.2016, в окончательном варианте 23.05.2016