

Кобяков Александр Алексеевич – ОАО «Концерн «Гранит-Электрон»; e-mail: cri-granit@peterlink.ru; 191014, Санкт-Петербург, ул. Госпитальная, 3; зам. генерального директора.

Лапшин Кирилл Владимирович – e-mail: kir_i_k@mail.ru; начальник научно-исследовательской лаборатории.

Ипатов Олег Сергеевич – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого; e-mail: ipatov_os@spbstu.ru; 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29; помощник ректора; зав. кафедрой; д.т.н.; профессор.

Федоров Александр Михайлович – ОАО «Концерн «Океанприбор»; 197376, Санкт-Петербург, пр. Чкаловский, 46; зам. генерального директора.

Kobyakov Aleksandr Alekseevich – JSC «Concern «Granit-Electron»; e-mail: cri-granit@peterlink.ru; 3, Gospitalnaya street, St. Petersburg, 191014, Russia; deputy general director.

Lapshin Kirill Vladimirovich – e-mail: kir_i_k@mail.ru; head of the research laboratory.

Ipatov Oleg Sergeevich – St. Petersburg Peter the Great Polytechnic University; e-mail: ipatov_os@spbstu.ru; 29, Polytechnicheskaya street, St. Petersburg, 195251, Russia; head of software and hardware real time complexes; dr. of eng. sc.; professor.

Fedorov Aleksandr Mikhailovich – JSC «Concern «Oceanpribor»; 46, Chkalovskii pr., St. Petersburg, 197376, Russia; deputy general director.

УДК 004.054; 519.81

А.Е. Колоденкова, В.В. Коробкин, А.П. Кухаренко

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СОЗДАНИЯ И ОЦЕНКИ РЕАЛИЗУЕМОСТИ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ МЕХАТРОННЫХ КОМПЛЕКСОВ*

Рассматриваются ключевые понятия, используемые при моделировании процесса формирования требований к созданию информационно-управляющих систем (ИУС) мехатронных комплексов. Отмечено, что формирование требований к созданию ИУС мехатронных комплексов является сложной задачей, качественное решение которой обеспечивает основу управления процессом проектирования и гарантирует, что после завершения разработки система будет полностью удовлетворять потребностям заказчика. Представлена и описана обобщенная схема процесса формирования требований к созданию ИУС, позволяющая увидеть взаимосвязи каждого из подэтапов (выявление требований, анализ требований, документирование требований, проверка правильности требований и утверждение) данного процесса, а также влияние внешней среды на данный процесс, что особенно важно в предпроектных исследованиях. Для моделирования процесса формирования требований в условиях неопределенности предлагается использовать нечеткие временные сети Петри. Для снижения рисков, возникающих на начальных этапах жизненного цикла проекта по созданию ИУС, проводится многокритериальная оценка его реализуемости. Однако такая оценка затруднена наличием большого количества критериев, характеризующих технические, финансовые, экономические и коммерческие показатели разрабатываемого проекта по созданию ИУС. В связи с этим проблема многокритериальной оценки реализуемости проекта на сегодняшний день является актуальной. Анализ различных подходов к построению моделей многокритериального оценивания альтернатив проектов в условиях неопределенности показал, что параметры моделей достаточно часто

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 15-08-06129 А.

являются интервальными величинами, что связано с применением методов параметрической идентификации моделей, с помощью которых зачастую можно определить только область допустимых значений параметров и с существующим разбросом мнений при получении значений параметров у исполнителей проекта. В случае, когда исходные данные о создании информационно-управляющих систем являются нечеткими, предлагается применить метод многокритериального принятия решений, основанный на определении отношений между стратегиями и последующим их ранжированием в условиях интервальной неопределенности.

Информационно-управляющая система; нечеткие сети Петри; нечеткие исходные данные; оценка реализуемости проекта.

A.E. Kolodenkova, V.V. Korobkin, A.P. Kuharenko

MODELING OF THE PROCESSES OF CREATION AND ESTIMATION FEASIBILITY INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS MECHATRONIC COMPLEXES

Discusses key concepts used in the simulation formation of the requirements to creation information and control systems (ICS) of mechatronic systems. It is noted that the formation of the requirements for the creation of ICS mechatronic systems is a difficult task, a quality solution that provides a framework and process control design ensures that after the completion of the system will fully meet the needs of the customer. Presented and described generalized scheme of the formation requirements for co-building ICS, allowing to see the relationship of each sub-steps (identification of the requirements-formation, analysis of requirements, documentation requirements, validation of requirements and approval) of the process, and the impact environment on this process, which is especially important in the pre-trials. For the simulation of the formation of the requirements under uncertainty is proposed to use fuzzy time Petri net. To reduce the risks, fuss-penitent in the initial stages of the project life cycle to create ICS, held multi-criteria assessment of its feasibility. However, such an assessment is complicated by the presence of a large number criteria for defining the technical, financial, economic and commercial indicators developed by the project to create ICS. In connection with this problem of multi-criteria assessment of its feasibility of the project to date is relevant. Analysis of different approaches to the construction of models of multi-criteria evaluation of alternatives of projects under uncertainty showed that the parameters of the models often are interval values, which is associated with the use of methods of parametric identification of models with which you can often identify only the range of permissible values of parameters and with the existing range of opinions at receiving parameter values from the project executors. Where the source data for the establishment of ICS are not clear, it is proposed to apply the method of multi-criteria decision-making, based on the definition of the relationship between policies and their subsequent ranking under interval uncertainty.

Information management systems; fuzzy Petri nets; fuzzy basic data; design alternatives reality estimation.

Введение. Управление процессом разработки информационно-управляющих систем (ИУС) мехатронных комплексов с учетом современного уровня научно-технических достижений представляет собой одну из сторон проекта разработки систем, которая определяет успех или неудачу. Однако осуществить своевременный контроль за процессами создания ИУС нет возможности в связи с высокой стоимостью и трудоемкостью предпроектных исследований, которые часто в несколько раз превышают стоимость и трудоемкость разработки аппаратной части системы, в результате чего существует большая вероятность формирования ошибок, выявление которых представляет собой достаточно сложную задачу [1].

В связи с этим на ранних этапах жизненного цикла ИУС мехатронных комплексов для высокорисковых промышленных предприятий важная роль отводится, во-первых, моделированию процессов формирования требований к созданию ИУС, поскольку качество и своевременность сформированных требований зави-

сит от большого количества случайных факторов (нечеткость исходных данных, нехватка исполнителей требуемой квалификации, часто изменяющиеся требования заказчика и др.), которые усложняют принятие управленческих решений, а во-вторых, оценке реализуемости создания ИУС, направленной на недопущение провала проекта по созданию ИУС и снижение рисков его создания, а также на прогнозирование его стоимости и сроков создания [2, 3].

В настоящей работе рассматривается моделирование процесса формирования требований с использованием нечеткой сети Петри, а также оценка реализуемости создания ИУС с применением метода многокритериального принятия решений.

Ключевые понятия при моделировании процесса формирования требований к созданию информационно-управляющим системам. Формирование требований к созданию ИУС мехатронных комплексов является сложной задачей, качественное решение которой обеспечивает основу управления процессом проектирования и гарантирует, что после завершения разработки система будет полностью удовлетворять потребностям заказчика. Обобщенная схема процесса формирования требований к созданию ИУС для высокорисковых промышленных предприятий представлена на рис. 1. Здесь жизненный цикл создания ИУС [4–6] предлагается разделять на следующие этапы:

1) **Этап предпроектного исследования** предваряет инициацию работ над проектом. *Формирование требований к ИУС* включает выяснение области применения, описания системных сервисов, определение аппаратных ограничений системы и т.д.

2) **Этап проектирования и изготовления ИУС** включает определение состава системы, функциональности основных модулей, инструментальных средств и методик, выделение наиболее значимых рисков, всестороннее исследование функциональности разработанных модулей и системы в целом, степень соответствия разработанным требованиям.

3) **Этап ввода в эксплуатацию ИУС** включает в себя испытания ИУС и опытную эксплуатацию на месте применения.

4) **Этап эксплуатации ИУС** – применение системы для удовлетворения потребностей эксплуатирующей организации.

5) **Этап вывода из эксплуатации ИУС** позволяет вывести из эксплуатации и утилизировать систему.

Из рис. 1 видно, что все действия выполняются попеременно, поэтапно и повторяются. Формирование требований к созданию ИУС состоит из следующих подэтапов:

1) **Выявление требований.** Работая с заказчиками, руководитель проекта задает вопросы, получает ответы и *выявляет требования*.

2) **Анализ требований.** Обработав совместно с исполнителями полученную информацию, руководитель классифицирует ее по различным категориям и соотносит потребности заказчика с возможными требованиями к ИУС.

3) **Документирование требований.** Руководитель оформляет информацию от заказчика в виде документов, диаграмм и схем.

4) **Проверка правильности требований и утверждение.** Руководитель предлагает представителям заказчика и пользователей подтвердить, что написанный текст (алгоритм) точен и полон, и попросит исправить возможные ошибки.

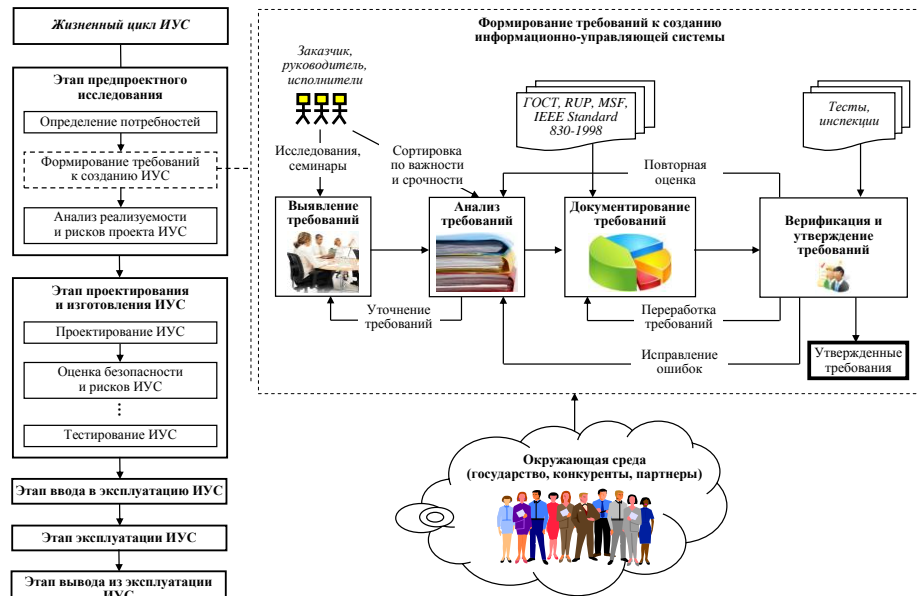


Рис. 1. Обобщенная схема процесса формирования требований к созданию информационно-управляющих систем для высокорисковых промышленных предприятий

Отметим, что из-за разнообразия проектов по созданию ИУС, шаблонного подхода к формированию требований не существует, а также процесс уточнение требований может выполняться при необходимости [7, 8].

Поскольку качество и своевременность сформированных требований к ИУС [9] зависит от большого количества случайных факторов (неполноты и неточности исходных данных, нехватки исполнителей требуемой квалификации, часто изменяющихся требования заказчика и др.), которые усложняют принятие управленческих решений, то необходимо применять методологии имитационного моделирования. Одним из перспективных вариантов формального описания и анализа имитационных моделей является использование методологии сетей Петри (СП). Далее рассматривается моделирование процесса формирования требований к созданию ИУС высокорисковых предприятий с использованием математического аппарата сетей Петри.

Моделирование процесса формирования требований к информационно-управляющим системам с помощью нечеткой временной сети Петри. Нечеткой временной сетью Петри типа C_{CTT} называется подкласс временных сетей, который определяется как [10]

$$C_{CTT} = (N, m_0, z_T, s_T),$$

где $N = (P, T, I, O)$ – структура нечеткой временной сети Петри, которая аналогична структуре ординарных СП и для которой $I: P \times T \rightarrow \{0, 1\}$ – входная функция переходов; $O: T \times P \rightarrow \{0, 1\}$ – выходная функция переходов; $m_0(m_1^0, m_2^0 \dots m_n^0)$ – вектор начальной маркировки, каждый компонент m_i^0 которого представляет собой трапециевидные нечеткие интервалы $M_{T_i} < a_{1i}, a_{2i}, a_{3i}, a_{4i} >_{T_i}$, где a_1 – нижние границы интервала (пессимистическая оценка), $[a_2, a_3]$ – интервалы наиболее ожи-

даемых (возможных) значений анализируемых параметров, a_4 – верхние границы интервала (оптимистическая оценка), $\forall i \in \{1, 2, \dots, n\}$; $z_T(z_1, z_2 \dots z_n)$ – вектор параметров временных задержек маркеров в позициях нечеткой временной сети Петри, каждый компонент z_i которого представляет собой трапециевидные нечеткие интервалы $Z_{T_i} \langle a_{1i}, a_{2i}, a_{3i}, a_{4i} \rangle_T, \forall i \in \{1, 2, \dots, n\}$; $s_T(s_1, s_2 \dots s_u)$ – вектор параметров времен срабатывания разрешенных переходов нечеткой временной сети Петри, каждый компонент s_j которого представляет собой трапециевидные нечеткие интервалы $S_{T_j} \langle a_{1j}, a_{2j}, a_{3j}, a_{4j} \rangle_T, \forall j \in \{1, 2, \dots, u\}$.

Далее представим процесс формирования требований к ИУС с помощью нечеткой временной сети Петри (рис. 2). Где под маркерами будем понимать требования, которые накапливаются (стоят в очереди).

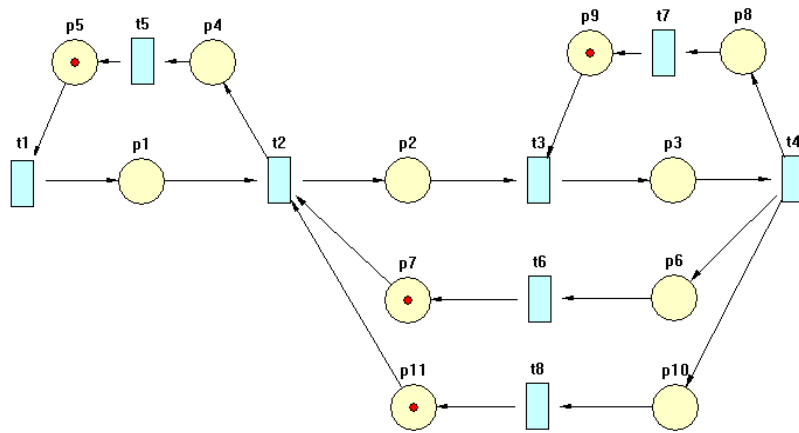


Рис. 2. Сеть Петри, моделирующая процесс формирования требований к созданию информационно-управляющих систем

Из рис. 2 видно, что модель содержит 11 позиций и 8 переходов: $P = \{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6, p_7, p_8, p_9, p_{10}, p_{11}\}, T = \{t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7, t_8\}$.

Элементами множества переходов P являются следующие события: p_1 – выявленные требования; p_2 – проанализированные требования; p_3 – задокументированные требования; p_4 – поступившие требования для уточнения; p_5 – уточненные требования; p_6 – поступившие требования для повторной оценки; p_7 – новая оценка требований; p_8 – поступившие требования для переработки; p_9 – переработанные требования; p_{10} – поступившие требования для исправления; p_{11} – исправленные требования.

Элементами множества позиций T являются следующие операции: t_1 – выявление требований; t_2 – анализ требований; t_3 – документирование требований; t_4 – проверка правильности требований и утверждение; t_5 – уточнение требований; t_6 – повторная оценка; t_7 – переработка требований; t_8 – исправление ошибок.

Предположим, что для СП, представленной на рис. 2, элементы вектора начальной маркировки заданы в виде трапециевидных нечетких интервалов: $m_5^0 = \langle 0, 1, 2, 3 \rangle, m_7^0 = \langle 1, 2, 3, 4 \rangle, m_9^0 = \langle 0, 1, 3, 4 \rangle, m_{11}^0 = \langle 0, 1, 2, 4 \rangle, m_1^0 = m_2^0 = m_3^0 = m_4^0 = m_6^0 = m_8^0 = m_{10}^0 = \langle 0, 0, 0, 0 \rangle$. Например, $m_5^0 = \langle 0, 1, 2, 3 \rangle$ означает, что возможность наличия одного маркера в начальной маркировке m_0 в позиции $p_5 \in P$ представляет собой трапециевидные нечеткие интервалы, для которого $a_1 = 0, a_2 = 1, a_3 = 2, a_4 = 3$. Остальные компоненты векторов интерпретируются аналогичным образом.

Время задержек маркеров задано в виде трапециевидных нечетких интервалов: $z_1 = \langle 3, 4, 6, 7 \rangle$, $z_2 = \langle 1, 2, 3, 4 \rangle$, $z_3 = \langle 2, 3, 4, 5 \rangle$, $z_4 = \langle 0, 1, 2, 4 \rangle$, $z_5 = \langle 0, 1, 2, 3 \rangle$, $z_6 = \langle 0, 1, 2, 4 \rangle$, $z_7 = \langle 0, 1, 2, 3 \rangle$, $z_8 = \langle 0, 1, 3, 6 \rangle$, $z_9 = \langle 0, 1, 2, 3 \rangle$, $z_{10} = \langle 0, 1, 3, 7 \rangle$, $z_{11} = \langle 0, 1, 2, 3 \rangle$.

Время срабатывания активных переходов задано в виде трапециевидных нечетких интервалов: $t_1 = \langle 0, 1, 2, 3 \rangle$, $t_2 = \langle 1, 2, 3, 4 \rangle$, $t_3 = \langle 1, 2, 3, 6 \rangle$, $t_4 = \langle 2, 3, 4, 6 \rangle$, $t_5 = \langle 1, 2, 3, 6 \rangle$, $t_6 = \langle 1, 2, 4, 5 \rangle$, $t_7 = \langle 1, 2, 5, 7 \rangle$, $t_8 = \langle 2, 3, 6, 8 \rangle$.

Причем время задержек маркеров и время срабатывания переходов могут выражаться в минутах, часах, днях.

Динамика изменения маркировок нечеткой временной сети Петри после момента ее запуска подчиняется правилам [11], отражающих специфику введенной нечеткости в начальную маркировку, во времена задержки маркеров в позициях и во времена срабатывания активных переходов.

Сеть Петри, представленная на рис. 2, обладает свойством *ограниченности* и *достижимостью тупиковой разметки*. Ограниченность является следствием безопасности (безопасное поступление требований, без потери вновь поступивших требований). Достижимость тупиковой разметки – это конечность функционирования структуры, т.е. процессы, обладающие данным свойством, рано или поздно перестанут функционировать. Таким образом, при формировании требований такое свойство должно отсутствовать, это продлит работу данного процесса без ошибок и зависаний.

Проблема борьбы с тупиками становится все более актуальной и сложной в настоящее время. При формировании требований к ИУС исполнители стараются проанализировать возможные нештатные ситуации, используя специальные модели и методы [12–14].

Оценка реализуемости проекта информационно-управляющих систем на основе метода многокритериального принятия решений. Многокритериальность является особенностью проектов по созданию ИУС мехатронных комплексов, при этом цели и критерии разрабатываемого проекта трудно сформулировать в четких терминах, т.е. имеет место неопределенность.

Анализ различных подходов к построению моделей многокритериального оценивания альтернатив проектов в условиях неопределенности показал, что параметры моделей (время выполнения проекта, объем работ по проекту, стоимость проекта и др.) достаточно часто являются интервальными величинами, что связано, во-первых, с применением методов параметрической идентификации моделей, с помощью которых зачастую можно определить только область допустимых значений параметров, а, во-вторых, с существующим разбросом мнений при получении значений параметров у исполнителей проекта.

Важнейшее место в современной науке о принятии решений занимают методы многокритериального принятия решений (*Multi-criteria decision-making*) (Analytic hierarchy process (AHP); ELECTRE; Grey relational analysis (GRA); Technique for the Order of Prioritisation by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) и др.[15, 16]), направленные на поддержку руководителей проектов, которые сталкиваются с множеством критериев и альтернатив.

В связи с этим к оценке реализуемости создания ИУС целесообразно применить метод «серого» реляционного анализа (GRA) [17–20], основанный на определении отношений между стратегиями и последующим их ранжированием в условиях интервальной неопределенности.

Заметим, что слово «серое» используется в случае, если исходная информация является неполной; «черное» – исходная информация полностью недоступна либо отсутствует; «белое» – исходная информация полностью доступна.

Пусть имеется ограниченное множество допустимых альтернатив разработки проекта $X = \{x_1, x_2, \dots, x_i\}$, где каждая альтернатива $x_i \in X$, $i = \overline{1; m}$ оценивается кортежем интервальных критериев $C = \langle c_j(x_i) \rangle$, $j = \overline{1; n}$. Ставится задача оценки альтернатив с возможностью последующего выбора приемлемой альтернативы разработки проекта.

Для решения данной задачи можно воспользоваться следующей *восьмиступенной процедурой*.

На *первом этапе* формируется «серая» матрица решений A на основе интервальных критериев

$$A = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{m1} & c_{m2} & \dots & c_{mn} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $c_j(x_i)$ – интервал j -го критерия i -й альтернативы.

Далее в контексте рассматриваемой задачи $c_j(x_i)$ для наглядности будем обозначать c_{ij} , $c_{ij} = [c_{ij}^-, c_{ij}^+]$.

На *втором этапе* осуществляется нормализация интервальных коэффициентов w_j^H относительной важности критериев на основе известного метода Саати:

$$w_j^H = \frac{w_j}{\sum_{j=1}^n w_j}, \quad j = \overline{1; n}, \quad (2)$$

где w_j – интервальный коэффициент относительной важности j -го критерия; $w_j^H = [\alpha_{j \min}, \alpha_{j \max}]$ – нормированный интервальный коэффициент относительной

важности j -го критерия. При этом полагается, что $\sum_{j=1}^n \alpha_{j \min} < 1$,

$\sum_{j=1}^n \alpha_{j \max} > 1$, иначе не выполняется ограничение $\sum_{j=1}^n \alpha_j = 1$ [6]. Здесь интер-

вальные коэффициенты относительной важности критериев могут быть сформированы на основе опроса мнения группы разработчиков.

На *третьем этапе* осуществляется нормализация матрицы (1), следовательно, получается матрица вида (3)

$$R^H = \begin{bmatrix} c_{11}^H & c_{12}^H & \dots & c_{1n}^H \\ c_{21}^H & c_{22}^H & \dots & c_{2n}^H \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{m1}^H & c_{m2}^H & \dots & c_{mn}^H \end{bmatrix}, \quad 0 < c_{ij}^H < 1, \quad (3)$$

где c_{ij}^H – нормированный интервал j -го критерия i -й альтернативы,

$$c_{ij}^H = \left[\frac{c_{ij}^-}{c_j^{\max}}, \frac{c_{ij}^+}{c_j^{\max}} \right], c_j^{\max} = \max_{1 \leq i \leq m} \{c_{ij}^+\}.$$

Важно подчеркнуть, что необходимость нормализации матрицы обусловлена тем, что численные значения критериев отличаются единицами измерения и порядком величин.

На четвертом этапе формируется взвешенная нормализованная «серая» матрица

$$F^H = \begin{bmatrix} f_{11}^H & f_{12}^H & \dots & f_{1n}^H \\ f_{21}^H & f_{22}^H & \dots & f_{2n}^H \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ f_{m1}^H & f_{m2}^H & \dots & f_{mn}^H \end{bmatrix}, i = \overline{1; m}, j = \overline{1; n},$$

где $F^H = ([f_{ij}^-, f_{ij}^+])_{m \times n}$, $[f_{ij}^-, f_{ij}^+] = [c_{ij}^-, c_{ij}^+] \cdot [\alpha_{j\min}, \alpha_{j\max}]$.

На пятом этапе определяется вектор последовательности номера ссылки U_0 в виде набора оптимальных взвешенных нормализованных значений интервала по каждому из критериев n

$$U_0 = ([u_0^-(1), u_0^+(1)], [u_0^-(2), u_0^+(2)], \dots, [u_0^-(n), u_0^+(n)]), \quad (4)$$

где $u_0^-(j) = \max_{1 \leq i \leq m} f_{ij}^-$, $u_0^+(j) = \max_{1 \leq i \leq m} f_{ij}^+$, $j = \overline{1; n}$.

На шестом этапе вычисляется «серый» реляционный коэффициент для каждой i -й альтернативы

$$\xi_{ij} = \frac{\min_i \min_j \Delta_{ij} + \rho \max_i \max_j \Delta_{ij}}{\Delta_{ij} + \rho \max_i \max_j \Delta_{ij}}, \quad (5)$$

где $\Delta_{ij} = [u_0^-(j), u_0^+(j)] - [f_{ij}^-, f_{ij}^+]$; ρ – коэффициент решения, $\rho \in [0; 1]$.

Следует отметить, что коэффициент решения может зависеть от фактических требований руководителя проекта и устанавливается обычно в 0,5.

На седьмом этапе вычисляется степень «серого» реляционного коэффициента для каждой i -й альтернативы

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \xi_{ij}. \quad (6)$$

На восьмом этапе определяется наилучшая альтернатива $r_i = \max_{1 \leq i \leq m} r_i$.

Пример. Пусть имеется четыре альтернативы (x_1, x_2, x_3, x_4) разработки проекта, описываемые совокупностью четырех критериев реализуемости: c_1 – время выполнения проекта, мес.; c_2 – стоимость проекта, тыс. руб.; c_3 – срок окупаемости, мес.; c_4 – вероятность успеха проекта. Ставится задача оценки альтернатив с возможностью последующего выбора приемлемой альтернативы разработки проекта по созданию ИУС.

Расчетные значения критериев для каждой альтернативы представлены в табл. 1.

На основе табл. 1 формируется «серая» матрица решений, представленная ниже.

$$A = \begin{bmatrix} [9,2, 9,9] & [640, 690] & [4, 4,9] & [0,8, 0,85] \\ [10,4, 11] & [650, 710] & [2, 2,5] & [0,75, 0,9] \\ [8,8, 9,5] & [620, 680] & [3,2, 3,5] & [0,7, 0,8] \\ [9,7, 10,5] & [730, 800] & [3, 3,3] & [0,82, 0,87] \end{bmatrix}.$$

Таблица 1

Расчетные значения критериев реализуемости альтернатив ИУС

Альтернативы проекта	Критерии реализуемости альтернатив			
	c_1	c_2	c_3	c_4
x_1	[9,2, 9,9]	[640, 690]	[4, 4,4]	[0,8, 0,85]
x_2	[10,4, 11]	[650, 710]	[2, 2,5]	[0,75, 0,9]
x_3	[8,8, 9,5]	[620, 680]	[3,2, 3,5]	[0,7, 0,8]
x_4	[9,7, 10,5]	[730, 800]	[3, 3,3]	[0,82, 0,87]

Далее осуществляется нормализация интервальных коэффициентов относительной важности критериев. Предположим, что основе опроса мнения группы разработчиков, известны следующие весовые коэффициенты относительной важности критериев в виде интервальных чисел:

$$w_1 = [3, 4], w_2 = [3, 4, 5], w_3 = [1, 2], w_4 = [2, 3],$$

тогда на основе соотношения (2) рассчитываются нормированные интервальные коэффициенты относительной важности критериев:

$$w_1'' = [0, 22, 0, 44], w_2'' = [0, 22, 0, 5], w_3'' = [0, 07, 0, 22], w_4'' = [0, 15, 0, 33].$$

Затем осуществляется нормализация матрицы A :

$$R^H = \begin{bmatrix} [0,84, 0,9] & [0,8, 0,86] & [0,9, 1] & [0,89, 0,94] \\ [0,95, 1] & [0,81, 0,89] & [0,45, 0,57] & [0,83, 1] \\ [0,8, 0,86] & [0,78, 0,85] & [0,73, 0,8] & [0,78, 0,89] \\ [0,88, 0,95] & [0,91, 0,1] & [0,68, 0,75] & [0,91, 0,97] \end{bmatrix},$$

$$c_1^{\max} = 11, c_2^{\max} = 800, c_3^{\max} = 4,4, c_4^{\max} = 0,9.$$

На основе матрицы (3) и нормированных интервальных коэффициентов относительной важности критериев w_j'' формируется взвешенная нормализованная «серая» матрица

$$F^H = \begin{bmatrix} [0,18, 0,4] & [0,18, 0,43] & [0,06, 0,22] & [0,13, 0,31] \\ [0,21, 0,44] & [0,18, 0,45] & [0,03, 0,13] & [0,12, 0,33] \\ [0,18, 0,38] & [0,17, 0,43] & [0,05, 0,18] & [0,12, 0,29] \\ [0,19, 0,42] & [0,2, 0,5] & [0,05, 0,17] & [0,14, 0,32] \end{bmatrix}.$$

Используя соотношение (4), определяется вектор последовательности номера ссылки U_0 :

$$U_0 = ([0,21, 0,44], [0,2, 0,5], [0,06, 0,22], [0,14, 0,33]).$$

Далее вычисляется «серый» реляционный коэффициент. Промежуточные расчеты вычисления ξ_{ij} представлены в табл. 2.

Предположим, что руководитель проекта назначил коэффициент решения $\rho = 0,5$, тогда на основании табл. 2 и соотношения (5) получим

$$\xi_1 = (0,53, 0,39, 1, 0,69); \xi_2 = (1, 0,47, 0,33, 1);$$

$$\xi_3 = (0,43, 0,39, 0,53, 0,53); \xi_4 = (0,69, 1, 0,47, 0,82).$$

Таблица 2

Промежуточные расчеты вычисления ξ_{ij}

	c_1	c_2	c_3	c_4	$\min_j \Delta_{ij}$	$\max_j \Delta_{ij}$
Δ_1	0,04	0,07	0	0,02	0	0,07
Δ_2	0	0,05	0,09	0	0	0,09
Δ_3	0,06	0,07	0,04	0,04	0,04	0,07
Δ_4	0,02	0	0,05	0,01	0	0,05
$\min_i \min_j \Delta_{ij}$					0	
$\max_i \max_j \Delta_{ij}$						0,09

Используя соотношение (6), рассчитывается степень «серого» реляционного коэффициента для каждой альтернативы: $r_1 = 0,65$; $r_2 = 0,7$; $r_3 = 0,47$; $r_4 = 0,75$, т.е. $x_4 > x_2 > x_1 > x_3$.

Таким образом, наилучшей альтернативой разработки проекта по созданию ИУС является альтернатива x_4 , за которой следует альтернатива x_2 .

Заключение. Таким образом, в настоящей работе для моделирования процесса формирования требований к созданию ИУС для высокорисковых промышленных предприятий предложено использовать нечеткую временную сеть Петри, позволяющую обнаруживать ошибки и «слабые места» в данном процессе, тем самым минимизируются затраты на их исправление. Для преодоления неопределенности на этапе предпроектного исследования для оценки реализуемости проекта по созданию ИУС предложено использовать метод «серого» реляционного анализа, позволяющего работать с пересекающимися интервалами критериев реализуемости альтернатив, что позволяет снизить риски, возникающие на начальных этапах жизненного цикла проекта по созданию ИУС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Каляев И.А., Коробкин В.В., Мельник Э.В., Хисамутдинов М.А.* Методы и средства повышения безопасности и сокращения времени операций с ядерным топливом на АЭС с реактором типа ВВЭР-1000. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2014. – 208 с.
2. *Липаев В.В.* Техничко-экономическое обоснование проектов сложных программных средств. – М.: СИНТЕГ, 2004. – 284 с.
3. *Липаев В.В.* Программная инженерия. Методологические основы: учебник. – М.: ГУ-ВШЭ, ТЕИС. 2006. – 603 с.
4. *Коробкин В.В., Колоденкова А.Е.* Один из подходов к оценке безопасности и рисков информационно-управляющих систем для атомных станций // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014: труды. URL: <http://vspu2014.ipu.ru/node/8581.pdf> (дата обращения: 15.10.2015).
5. ISO/IEC 1207:2008 System and software engineering – Software life cycle processes. SC7 System and Software Engineering, 2008.
6. ISO/IEC/IEEE 15288:2015 Systems and software engineering - System life cycle processes. SC7 System and Software Engineering, 2015.

7. *Avraham Shtub, Jonathan F. Bard, Shlomo Globerson*. Project Management: Processes, Methodologies, and Economics (2nd Edition) (Prentice-Hall International Series in Industrial and Systems Engineering), 2004.
8. *Lewis James P*. Fundamentals of Project Management. – American Management Association, 1997.
9. Principles of Project Management (Collected Handbooks from the Project Management Institute) Paperback – April 1, 1997. ISBN: 1880410303.
10. *Омаров О.М.* Теория вычислительных процессов и структур: Учебное пособие. – Махачкала: РИО ДГТУ, 2005. – 268 с.
11. *Леоненков А.В.* Нечеткое моделирование в среде Matlab и fuzzyTECH. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.
12. *Shannon, Robert E*. Systems simulation: the art and science. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1975.
13. *Asarin E., Bournez O., Dang T. and Maler O*. Reachability Analysis of Piecewise-Linear Dynamical Systems, in B. Krogh and N. Lynch (Eds.), Hybrid Systems: Computation and Control, 20-31, LNCS 1790, Springer, 2000.
14. *Arsham H., Feuerverger, A., McLeish, D., Kreimer J. and Rubinstein R*. Sensitivity analysis and the what-if problem in simulation analysis // Mathematical and Computer Modelling. – 1989. – No. 12 (1). – P. 193-219.
15. *Tabucannon, Mario T*. Multi Criteria Decision Making for Industry // Elsevier Publishers, 1988.
16. *Li D.F*. Fuzzy multiobjective many-Person decision makings and games, National Defense Industry Press, Beijing, 2003.
17. *Deng J.L*. Control problems of grey systems // Systems and Controls Letters. – 1982. – No. 5. – P. 288-294.
18. *Zhang J., Wu D., Olson D*. The method of grey related analysis to multiple attribute decision making problems with interval numbers // Mathematical and Computer Modelling. – 2005. – P. 991-998.
19. *Xu ZS*. Projection method for uncertain multi-attribute decision making with preference information on alternatives // Int. J. Info. Technol. Decis. Making. 2004. – No. 3 (3). – P. 429-434.
20. *Xu G., Yang Y.-P., Lu S.-Y., Li L. and X. Song*. Comprehensive Evaluation of Coal-fired Power Plants Based on Grey Relational Analysis and Analytic Hierarchy Process // Energy Policy. – 2011. – Vol. 5. – P. 39.

REFERENCES

1. *Kalyaev I.A., Korobkin V.V., Mel'nik E.V., Khisamutdinov M.A*. Metody i sredstva povysheniya bezopasnosti i sokrashcheniya vremeni operatsiy s yadernym toplivom na AES s reaktorom tipa VVER-1000 [The methods and means to improve safety and reduce the time of operation of nuclear fuel in nuclear power plants with VVER-1000]. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2014, 208 p.
2. *Lipaev V.V*. Tekhniko-ekonomicheskoe obosnovanie proektov slozhnykh programmnykh sredstv [Feasibility study of complex software projects]. Moscow: SINTEG, 2004, 284 p.
3. *Lipaev V.V*. Programmnaya inzheneriya. Metodologicheskie osnovy: Uchebnik [Software Engineering. Methodological bases: Textbook]. Moscow: GU-VShE, TEIS. 2006, 603 p.
4. *Korobkin V.V., Kolodenkova A.E*. Odin iz podkhodov k otsenke bezopasnosti i riskov informatsionno-upravlyayushchikh sistem dlya atomnykh stantsiy [One approach to the estimation of no-hazard and risk information and control systems for nuclear power plants], XII Vserossiyskoe sove-shchanie po problemam upravleniya VSPU-2014: trudy [XII All-Russian conference on governance VSPU 2014: Works]. Available at: <http://vspu2014.ipu.ru/node/8581.pdf> (accessed 15 October 2015).
5. ISO/IEC 1207:2008 System and software engineering – Software life cycle processes. SC7 System and Software Engineering, 2008.
6. ISO/IEC/IEEE 15288:2015 Systems and software engineering - System life cycle processes. SC7 System and Software Engineering, 2015.
7. *Avraham Shtub, Jonathan F. Bard, Shlomo Globerson*. Project Management: Processes, Methodologies, and Economics (2nd Edition) (Prentice-Hall International Series in Industrial and Systems Engineering), 2004.

8. *Lewis James P.* Fundamentals of Project Management. American Management Association, 1997.
9. Principles of Project Management (Collected Handbooks from the Project Management Institute) Paperback – April 1, 1997. ISBN: 1880410303.
10. *Omarov O.M.* Teoriya vychislitel'nykh protsessov i struktur: Uchebnoe posobie [Theory of computing processes and structures. Tutorial]. Makhachkala: RIO DGTU, 2005, 268 p.
11. *Leonenkov A.V.* Nechetkoe modelirovanie v srede Matlab i fuzzyTECH [Fuzzy modeling in Matlab and fuzzyTECH]. St. Petersburg: BKhV-Peterburg, 2005, 736 p.
12. *Shannon, Robert E.* Systems simulation: the art and science. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1975.
13. *Asarin E., Bournez O., Dang T. and Maler O.* Reachability Analysis of Piecewise-Linear Dynamical Systems, in B. Krogh and N. Lynch (Eds.), Hybrid Systems: Computation and Control, 20-31, LNCS 1790, Springer, 2000.
14. *Arsham H., Feuerverger, A., McLeish, D., Kreimer J. and Rubinstein R.* Sensitivity analysis and the what-if problem in simulation analysis, *Mathematical and Computer Modelling*, 1989, No. 12 (1), pp. 193-219.
15. *Tabucannon, Mario T.* Multi Criteria Decision Making for Industry, Elsevier Publishers, 1988.
16. *Li D.F.* Fuzzy multiobjective many-Person decision makings and games, National Defense Industry Press, Beijing, 2003.
17. *Deng J.L.* Control problems of grey systems, *Systems and Controls Letters*, 1982, No. 5, pp. 288-294.
18. *Zhang J., Wu D., Olson D.* The method of grey related analysis to multiple attribute decision making problems with interval numbers, *Mathematical and Computer Modelling*, 2005, pp. 991-998.
19. *Xu ZS.* Projection method for uncertain multi-attribute decision making with preference information on alternatives // *Int. J. Info. Technol. Decis. Making*, 2004, No. 3 (3), pp. 429-434.
20. *Xu G., Yang Y.-P., Lu S.-Y., Li L. and X. Song.* Comprehensive Evaluation of Coal-fired Power Plants Based on Grey Relational Analysis and Analytic Hierarchy Process, *Energy Policy*, 2011, Vol. 5, pp. 39.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н. А.А. Илюхин.

Колоденкова Анна Евгеньевна – Уфимский государственный авиационный технический университет; e-mail: anna82_42@mail.ru; 450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12; тел.: 83472730763; кафедра технологии машиностроения; к.т.н.; доцент.

Коробкин Владимир Владимирович – НИИ МВС ЮФУ; e-mail: vvk@mvs.sfedu.ru; 347922, г. Таганрог, ул. Чехова, 2; к.т.н.; главный конструктор по направлению; зав. лабораторией.

Кухаренко Анатолий Павлович – e-mail: ss@mvs.sfedu.ru; к.т.н.; доцент; заместитель директора.

Kolodenkova Anna Evgen'evna – Ufa State Aviation Technical University; e-mail: anna82_42@mail.ru; 12, K. Marksa street, Ufa, 450000, Russia; the department of engineering technology; cand. of eng. sc.; associate professor.

Korobkin Vladimir Vladimirovich – Kalyaev Scientific Research Institute of Multiprocessor Computer Systems; e-mail: vvk@mvs.sfedu.ru; 2, Chekhov street, Taganrog, 347922, Russia; cand. of eng. sc.; chief designer in the direction; head laboratory.

Kukharenko Anatoly Pavlovich – e-mail: ss@mvs.sfedu.ru; cand. of eng. sc.; associate professor; deputy director.