

РИСК-ОРИЕНТИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ СОЗДАНИЕМ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ИХ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

© 2021 Р. М. Вивчарь¹, А. И. Птушкин¹, Б. В. Соколов²✉

¹Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского МО РФ
ул. Ждановская, 13, 197198 Санкт-Петербург, Российская Федерация

²Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук
14 линия, 39, 199178 Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. В данной статье предлагается методология построения и использования имитационных моделей при разработке системы риск-ориентированного управления созданием организационно-технических систем (ОТС), функционирование и создание которых происходит в условиях неопределенности. При этом под риском понимается одно из свойств качества решения, принимаемого в ситуации с неопределёнными исходами, характеризующее возможность и последствия недостижения поставленных в нем целей. Отличительной чертой предложенной методологии является то, что она позволяет оценивать качество решений, принимаемых в ходе проектирования, выявлять, в случае необходимости, причины их неудовлетворительного качества и на этой основе разрабатывать корректирующие решения, направленные на устранение этих причин. Оценка качества управляющих решений, принимаемых при создании ОТС, проводится на основе анализа показателей совокупного риска, характеризующих степень недостижения целей этих решений. В качестве таких показателей используются вероятности недостижения целей, определенные в результате анализа плотностей вероятности параметров, характеризующих эти цели, которые получаются в результате имитационного моделирования функционирования ОТС, комплексно учитывающего воздействия на названные показатели всего множества нежелательных случайных факторов. Приведены результаты вычислительного эксперимента по оцениванию и коррекции показателей качества решений по созданию организационно-технической системы. Продемонстрировано, что, благодаря использованию возможностей имитационного моделирования процесса функционирования создаваемого объекта, можно организовать итерационный процесс управления целевым результатом его создания уже на стадии проектирования. Представленная методология построения и использования имитационных моделей для оценивания показателей качества управляющих решений позволяет не только оценить эти показатели, но и раскрывает механизм воздействия на них с целью устранения причин недостижения требуемого качества решения.

Ключевые слова: риск, риск-ориентированное управление, качество решений, имитационное моделирование, организационно-техническая система, система эксплуатации ракетно-космического комплекса, технологический процесс.

✉ Соколов Борис Владимирович
e-mail: sokolov_boris@inbox.ru



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Процессы создания любой организационно-технической системы (ОТС) всегда сопровождаются наличием большого числа различных неопределенностей, что в свою очередь ведет к тому, что каждое управляющее решение, принимаемое в этих условиях, будет связано с появлением риска, который характеризует возможность и последствия недостижения целей этого решения [1]. Поэтому при управлении этими процессами в настоящее время активно стал использоваться риск-ориентированный подход (РОП), заключающийся в оценивании каждого принимаемого решения с позиций риска. Рекомендации к применению РОП определены Постановлением Правительства РФ от 17 августа 2016 г. № 806 [2]. Такой подход уже активно применяется в системах управления качеством [3], в некоторых организациях и предприятиях [4], в приоритетных отраслях экономики, выполняющих Указ Президента Российской Федерации от 07.05.2018 №204 [5], а также в органах МЧС [6] и других надзорных организациях. Не оставлен он без внимания и за рубежом. Так НАСА активно использует риск-ориентированный подход при реализации многих программ и проектов в области авиации [7, 8].

Использование РОП позволит перейти к построению системы риск-ориентированного управления (РОУ) процессом создания ОТС и оценить качество решений, принимаемых на этом этапе жизненного цикла ОТС, используя показатели риска недостижения их целей.

Генеральная цель любого процесса создания ОТС складывается из множества различных подцелей, имеющих иерархическую структуру. При этом процесс достижения каждой цели находится под воздействием одного или нескольких нежелательных факторов. Под нежелательным фактором в дальнейшем будем понимать фактор, препятствующий достижению поставленных целей решения и обуславливающий возможность и последствия их недостижения.

Количество воздействующих на процесс достижения цели нежелательных факторов, а

также место цели в дереве целей в свою очередь обуславливают необходимость использования понятий одиночного и совокупного риска.

Одиночный риск — свойство качества решения, характеризующее возможность и последствия недостижения поставленных целей самого нижнего уровня, обусловленные воздействием только одного нежелательного фактора.

Совокупный риск — свойство качества решения, характеризующее возможность и последствия недостижения поставленных целей, обусловленные воздействием множества нежелательных факторов. Вероятности недостижения целей управляющих решений являются показателями их совокупного риска, который и характеризует качество решения.

Наиболее распространенными методами оценивания показателей совокупного риска являются экспертные методы [9–11]. Основные недостатки при использовании этих методов связаны с высокой сложностью отбора достаточного количества экспертов требуемой квалификации. Субъективизм присущий экспертным оценкам также обуславливает сложности, связанные с согласованием полученных данных, их анализом и интерпретацией.

Наряду с экспертными методами активно применяется метод, основанный на вероятностной оценке показателей риска (PRA — Probabilistic risk assessment) [12, 13]. Сущность этого подхода заключается в идентификации всех сценариев недостижения цели, определении вероятности их появления и возможных последствий. Основные трудности применения этого метода для оценивания показателей совокупного риска связаны с необходимостью определения условных вероятностей событий, входящих в сценарий недостижения цели, что для сложных систем практически невозможно.

Для преодоления названных трудностей, связанных с оцениванием показателей совокупного риска, предлагается применить имитационное моделирование. Возможности имитационного моделирования позволяют в качестве исходных данных задавать уже известные аналитические модели различных

событий, включенных в сценарии недостижения цели, алгоритмически описывать взаимосвязи между этими событиями и получать на выходе оценки характеристик риска, а также идентифицировать силу воздействия нежелательных факторов. Кроме того, использование имитационного моделирования позволяет осуществить прогноз и наблюдения за ходом процесса функционирования ОТС в течение длительного интервала времени. Еще одним преимуществом имитационного моделирования является сравнительная простота в получении оценки влияния неопределенности, вызванной неточностями задания входных параметров. В связи с этим на целесообразность применения имитационного моделирования для оценивания показателей совокупного риска обращается внимание в ряде научных работ и документах по стандартизации, например в [14–17].

Целью данной статьи является развитие методологии построения и использования имитационных моделей при разработке системы РОУ созданием ОТС, позволяющей оценивать качество, принимаемых при этом решений, выявлять, в случае необходимости, причины их неудовлетворительного качества и разрабатывать корректирующие решения, направленные на устранение этих причин.

1. МЕТОДОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ РЕШЕНИЙ

Качество управляющих решений, принятых в процессе создания ОТС, и ее возможностей управлять этим качеством, необходимо оценивать в процессе функционирования ОТС. Поэтому методологию построения имитационной модели, позволяющей решить эту задачу, рассмотрим на примере разработки имитационной модели функционирования ОТС, представляющей собой систему эксплуатации (СЭ) ракетно-космического комплекса (РКК) на этапе подготовки ракеты космического назначения (РКН) к пуску.

1.1. Этапы построения имитационной модели для управления качеством решений

Имитационная модель функционирования СЭ РКК, позволяющая организовать управление качеством решений, принимаемых при создании РКК, должна включать в себя:

- алгоритмы возможных сценариев недостижения целей управляющих решений;
- вероятностные модели событий, которые могут возникать в процессе реализации этих сценариев и влиять на ход их развития;
- алгоритмы выполнения принятых решений по управлению целевыми результатами (совокупным риском).

Процесс построения имитационной модели функционирования СЭ РКК включает в себя четыре этапа:

- построение дерева целей управляющего решения;
- выявление нежелательных факторов и разработка сценариев недостижения каждой цели решения;
- разработка моделей подпроцессов функционирования СЭ РКК и их агрегирование;
- оценка адекватности разработанной модели.

При этом в качестве подпроцессов функционирования СЭ РКК рассматривались такие технологические процессы (ТП) как подготовка РКН к пуску, обеспечение запасными частями (ЗЧ) оборудования РКК, включая их доставку, а также подготовка персонала.

1.1.1. Построение дерева целей управляющего решения

На первом этапе необходимо построить иерархию целей, на достижение которых должно быть направлено управляющее решение.

Генеральными целями управляющих решений, принятых в процессе создания СЭ РКК, являются обеспечение экономичности проведения и своевременности завершения ТП. Для достижения этих целей необходимо выполнить ряд подцелей, представленных на рис. 1.

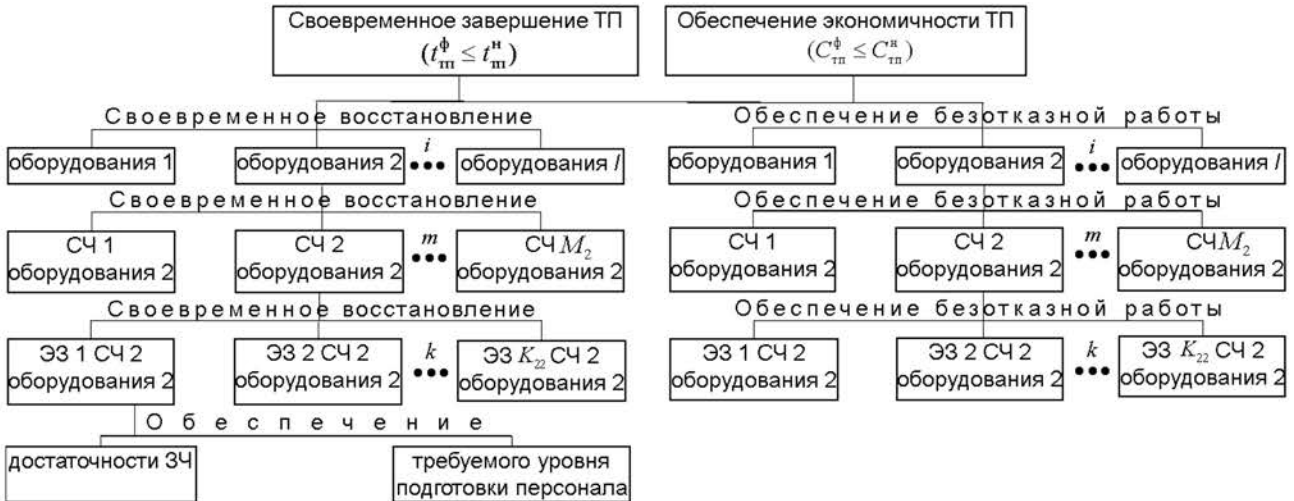


Рис. 1. Дерево целей, достижение которых необходимо для экономичного выполнения и своевременного завершения ТП

[Fig. 1. The tree of goals, the achievement of which is necessary for the economical implementation and timely completion of the TP]

На этом рисунке использованы следующие обозначения: i — вид оборудования, участвующий в ТП, $i = 1, I$; mi — количество типов составных частей (СЧ) i -го вида оборудования, участвующего в ТП, $m = 1, M_i$; kmi — количество типов элементов замены (ЭЗ) m -й СЧ i -го вида оборудования, участвующего в ТП, $k = 1, K_{mi}$; $t_m^ф$, $C_m^ф$ и $t_m^н$, $C_m^н$ — фактические и нормативные продолжительность ТП и объем, израсходованных на него финансовых ресурсов, соответственно.

1.1.2. Выявление нежелательных факторов и разработка сценариев недостижения каждой цели решения

На втором этапе разработки имитационной модели необходимо, прежде всего, выявить нежелательные факторы, оказывающие влияние на процесс достижения цели решения. В данном случае такими факторами являются: отказ оборудования, отсутствие необходимой для устранения этого отказа ЗЧ, невозможность доставки ЗЧ, недостаточная подготовка персонала к устранению отказа оборудования.

Далее необходимо построить дерево событий, отражающее результаты воздействия возможных сочетаний названных нежелательных факторов и характеризующее сово-

купность сценариев процесса недостижения каждой цели решения, начиная от целей нижнего уровня, и их последствия. На рис. 2 представлены эти сценарии для нижнего уровня целей рассматриваемого примера, которыми являются обеспечение безотказной работы ЭЗ, достаточности ЗЧ и требуемого уровня подготовленности персонала.

На этом рисунке использованы следующие обозначения: $P(A)$ — вероятность возникновения отказа оборудования; $P(A_1 | A)$, $P(A_2 | AA_1)$ — условные вероятности отсутствия ЗЧ и невозможности выполнения ее доставки соответственно; $t^л$ и $C^л$ — продолжительность и стоимость доставки ЗЧ соответственно; $P(A_3 | A)$ — вероятность того, что ТП будет выполняться недостаточно подготовленным персоналом; $t_{пп}^y$, $C_{пп}^y$ и $t_{ппп}^y$, $C_{ппп}^y$ — продолжительности и стоимости устранения отказа оборудования подготовленным и недостаточно подготовленным персоналом соответственно; $P_1^{сн}$, $P_2^{сн}$, ..., $P_5^{сн}$ — вероятности реализации сценариев.

1.1.3. Разработка моделей подпроцессов функционирования СЭ РКК и их агрегирование

Далее необходимо разработать модели подпроцессов функционирования СЭ РКК,

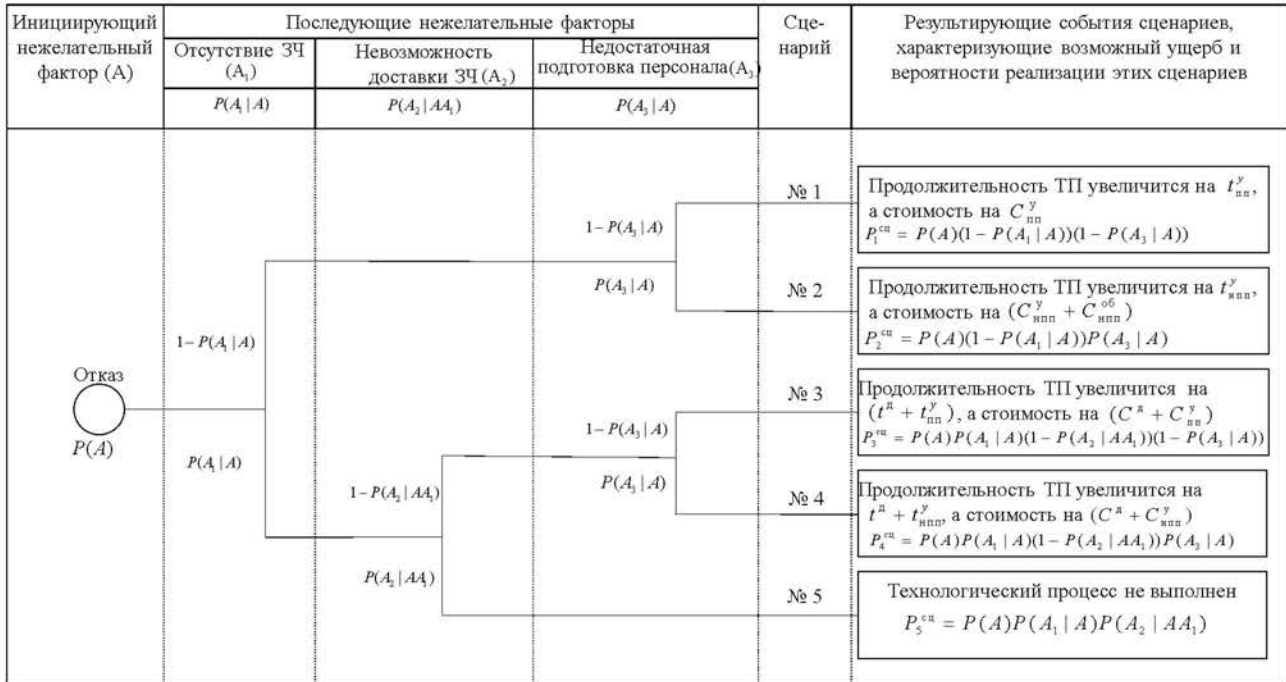


Рис. 2. Возможные сценарии недостижения целей
 [Fig. 2. Possible scenarios of failure to achieve goals]

в которых могут реализоваться события, входящие в состав дерева, представленного на рис. 2. Для рассматриваемого примера они будут представлены моделями выполнения ТП, обеспечения ЗЧ оборудования РКК и их доставки, подготовленности персонала. Входными данными для таких моделей должны быть параметры СЭ РКК, оказывающие влияние на проявление указанных нежелательных факторов. Результаты моделирования при этом должны давать информацию о возможности проявления нежелательных факторов и сопутствующем при этом ущербе. Такие модели могут быть как аналитическими, так и алгоритмическими.

Названные выше модели позволяют путем их агрегирования построить имитационную модель функционирования СЭ РКК, позволяющую оценить показатели качества управляющего решения, принимаемого в процессе ее создания. Для агрегирования моделей необходимо разработать алгоритмы взаимодействия между этими моделями в соответствии с выявленными на этапе 2 сценариями недостижения целей решения. Эти алгоритмы позволят учесть комплексное влияние на показатели качества управляющего решения

всех нежелательных факторов, что повысит адекватность оценки этих показателей.

Кроме того, при агрегировании моделей, необходимо предусмотреть возможность индикации проявления того или иного сценария недостижения цели, что позволит в результате моделирования определить условные вероятности проявления всех нежелательных факторов, а также вероятность появления каждого сценария и на основе этих вероятностей при необходимости сформировать мероприятия по управлению качеством решения.

Исходя из этого, была разработана имитационная модель функционирования СЭ РКК, структура которой представлена на рис. 3.

Входными данными этой модели являются $t_{тп}^{нач}$ — момент прихода заявки на проведение ТП, а также параметры СЭ РКК, оказывающие влияние на проявление названных в 2.1.1 нежелательных факторов и представленные в виде вектора, характеризующего параметры управляющего решения, принимаемого в процессе создания РКК ее СЭ

$$u = [\lambda_{kmi}, R_i, Y_i, L_{kmi}, c_{kmi}^a, d_{kmi}, z_{kmi}]^T, \quad (1)$$

где λ_{kmi} , $i = \overline{1, I}$, $m = \overline{1, M_i}$, $k = \overline{1, K_{mi}}$ — интенсивность отказов ЭЗ kmi -го типа; d_{kmi} и

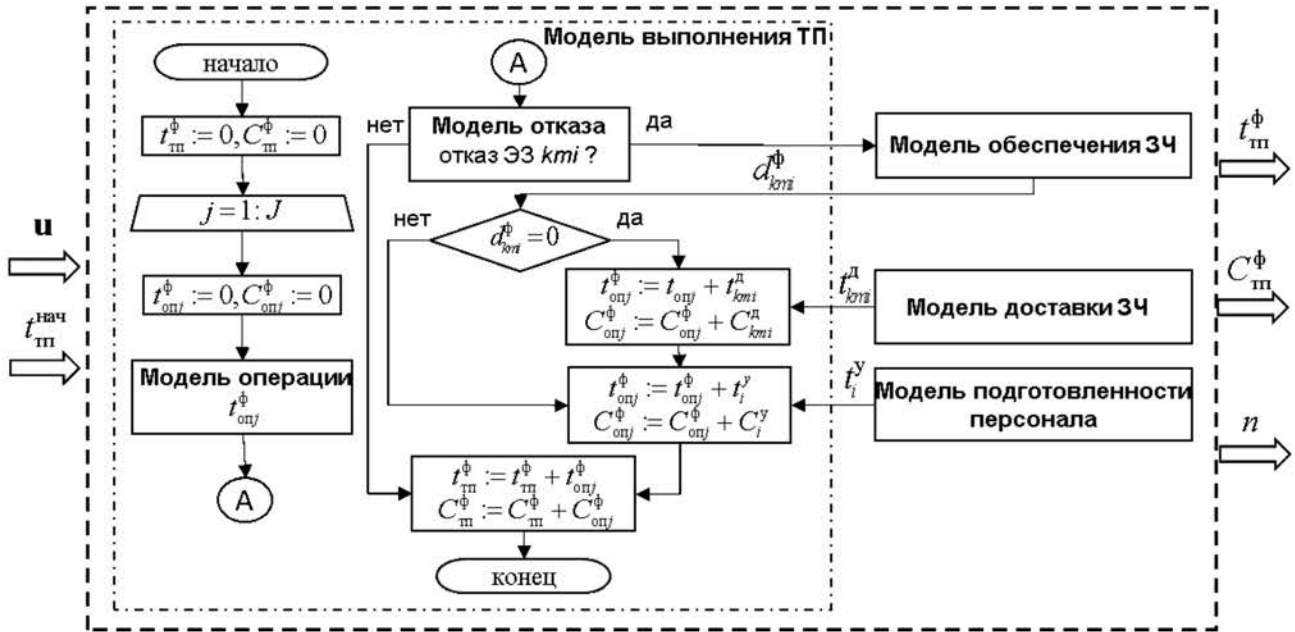


Рис. 3. Структура имитационной модели функционирования СЭ РКК: J — количество операций, входящих в ТП; $t_{опj}^{\phi}$, $C_{опj}^{\phi}$ — фактические продолжительность j -й операции и объем затрачиваемых на нее финансовых ресурсов

[Fig. 3. The structure of the simulation model of the functioning of the OS RSC; J — the number of operations included in the TP; $t_{опj}^{\phi}$, $C_{опj}^{\phi}$ — the actual duration of the j -th operation and the volume financial resources spent on it]

z_{kmi} — начальное количество ЗЧ и периодичность пополнения комплекта ЗИП ЭЗ kmi -го типа соответственно; L_{kmi} и c_{kmi}^{π} — параметры, характеризующие вариант доставки ЗЧ ЭЗ kmi -го типа; Y_i и R_i — параметры, характеризующие уровень подготовленности персонала к выполнению ТП и устранению отказов соответственно.

Выходными данными этой модели являются: фактические продолжительность ТП — $t_{тп}^{\phi}$ и объем израсходованных на него финансовых ресурсов — $C_{тп}^{\phi}$, а также номер сценария недостижения цели n , если такой проявился в процессе моделирования.

Данная модель, как было сказано выше, агрегирует в себе модели обеспечения запасными частями оборудования РКК и их доставки, выполнения технологического процесса и подготовленности персонала.

Модель обеспечения запасными частями оборудования является алгоритмической. Параметры d_{kmi} и z_{kmi} являются для нее входными. Она позволяет получить количество ЗЧ всех типов ЭЗ (d_{kmi}^{ϕ}), имеющееся в комплекте ЗИП, в любой момент времени.

Разработка моделей доставки ЗЧ, подготовленности персонала и выполнения ТП

При разработке этих моделей предполагалось, что случайные продолжительности доставки ЗЧ (t_{kmi}^{π}), устранения отказов оборудования (t_i^y), выполнения операции ($t_{опj}$), характеризуются бета-распределением, плотность вероятности которого определяется выражением [18]:

$$H(x) = H(x, x^{\min}, x^{\max}, \alpha, \beta) = \frac{(x - x^{\min})^{\alpha - 1} (x^{\max} - x)^{\beta - 1}}{B(\alpha, \beta) (x^{\max} - x^{\min})^{\alpha + \beta - 1}}, \quad (2)$$

где x — значение случайной величины; x^{\min} и x^{\max} — минимальное и максимальное значение случайной величины соответственно; α , β — параметры формы; $B(\alpha, \beta)$ — бета-функция.

Модель доставки ЗЧ позволяет оценить продолжительность этого процесса t_{kmi}^{π} . Ее входным параметром является вариант доставки ЗЧ, характеризующийся объемом затрачиваемых финансовых средств c_{kmi}^{π} и множеством $L_{kmi} = \{t_{kmi}^{\pi \min}, t_{kmi}^{\pi \max}, \alpha_{kmi}^{\pi}, \beta_{kmi}^{\pi}\}$, где

$t_{kmi}^{дмин}$ и $t_{kmi}^{дмакс}$ — минимальная и максимальная продолжительность доставки ЗЧ ЭЗ kmi -го типа соответственно.

Продолжительность процесса доставки ЗЧ t^k моделируется путем генерации случайного числа распределенного по закону (2) с параметрами L_{kmi} .

Модель подготовленности персонала представляет собой зависимость продолжительности устранения отказа оборудования t_i^y от уровня подготовленности персонала. Каждому уровню подготовленности соответствуют определённые значения параметров закона распределения времени устранения отказа, заданные множеством $R_i = \{t_i^{y мин}, t_i^{y макс}, \alpha_i^y, \beta_i^y\}$, $i = \overline{1, I}$, где $t_i^{y мин}$ и $t_i^{y макс}$ — минимальная и максимальная продолжительность устранения персоналом отказа оборудования i -вида.

Продолжительность устранения отказа оборудования t_i^y моделируется путем генерации случайного числа распределенного по закону (2) с параметрами R_i .

Объем затрачиваемых финансовых ресурсов на процесс устранения отказа зависит от времени устранения и определяется выражением

$$C^y = c_i t_i^y, \quad (3)$$

где c_i — стоимость одного часа работы персонала i -го вида оборудования.

Модель выполнения технологического процесса является алгоритмической, входными данными для нее являются λ_{kmi} и $t_{тп}^{нач}$. Модель включает в себя модель оборудования, участвующего в ТП, и модель операции, выполняемой с помощью этого оборудования.

Модель операции позволяет оценить продолжительность j -й операции $t_{оуj}$ без учета отказов оборудования. Эта продолжительность моделируется путем генерации случайного числа, распределенного по закону (2) с параметрами $Y_j = \{t_{оуj}^{мин}, t_{оуj}^{макс}, \alpha_{оуj}, \beta_{оуj}\}$, $j = \overline{1, J}$, где $t_{оуj}^{мин}$ и $t_{оуj}^{макс}$ — минимальная и максимальная продолжительность выполнения j -й операции.

В модели оборудования генерируется возможность наступления отказа ЭЗ kmi -го типа в любой момент выполнения ТП.

1.1.4. Оценка адекватности разработанной имитационной модели

Финальной стадией создания любой модели является проверка ее адекватности. Для проверки адекватности представленной имитационной модели был использован подход, представленный в [19] и заключающийся в оценивании меры близости результатов, полученных при моделировании (M), и результатов, полученных из статистических данных (Ob).

Для этого, используя исходные данные о параметрах реальной СЭ РКК, было проведено моделирование ее функционирования. На основе полученных в результате моделирования наиболее вероятных значениях $t_{тп}^{нвм}$ и $C_{тп}^{нвм}$, а также статистических данных о показателях процесса функционирования реальной СЭ РКК $t_{тп}^p$ и $C_{тп}^p$ были получены плотности вероятности мер близости $r_1 = |t_{тп}^{нвм} - t_{тп}^p|$, а $r_2 = |C_{тп}^{нвм} - C_{тп}^p|$.

В качестве меры адекватности разработанной имитационной модели была выбрана вероятность $Вер[r(Ob, M) \leq \varepsilon] \geq 1 - \delta$ [19], где ε — положительная величина, характеризующая точность модели; $(1 - \delta)$ — положительная величина, характеризующая достоверность модели; $r(Ob, M) = r_1(t_{тп}^{нвм}, t_{тп}^p) \vee r_2(C_{тп}^{нвм}, C_{тп}^p)$.

Если требуемые значения ε и δ для продолжительности ТП равны соответственно 0,5 ч. и 0,02, а для объема затрачиваемых на него финансовых ресурсов — 45 у.е. и 0,1, то вычисленные по полученным законам распределения мер близости вероятности $Вер[r_1(t_{тп}^{нвм}, t_{тп}^p) \leq 0,5] = 0,985$ и $Вер[r_2(C_{тп}^{нвм}, C_{тп}^p) \leq 45] = 0,91$ говорят о приемлемой адекватности разработанной имитационной модели функционирования СЭ РКК.

1.2. Методология использования имитационной модели функционирования СЭ РКК для управления качеством решений по ее созданию

1.2.1. Обработка результатов моделирования функционирования СЭ РКК и определение показателей качества управляющих решений

Обработка результатов многократной имитации процесса функционирования СЭ РКК путем статистического анализа позволяет получить законы распределения продолжительности выполнения ТП $t_{\text{тп}}^{\phi}$ и объема израсходованных на это финансовых ресурсов $C_{\text{тп}}^{\phi}$, условные вероятности проявления всех нежелательных факторов, а также вероятности проявления каждого сценария недостижения цели. На основе знания законов распределения $t_{\text{тп}}^{\phi}$ и $C_{\text{тп}}^{\phi}$ можно определить такие показатели качества решений по управлению процессом создания СЭ РКК, как: вероятность несвоевременного завершения ТП $P_1[t_{\text{тп}}^{\phi} > t_{\text{тп}}^{\text{н}}]$ и вероятность превышения объема израсходованных на его проведение финансовых ресурсов $P_2[C_{\text{тп}}^{\phi} > C_{\text{тп}}^{\text{н}}]$, являющиеся показателями совокупного риска.

Возможность одновременного получения значений показателей совокупного риска недостижения каждой цели решения является важным преимуществом использования методов имитации случайных процессов для моделирования функционирования ОТС.

Исходя из полученных показателей качества, управляющее решение \mathbf{u} может быть либо принято, если:

$$(P_1(\mathbf{u}) \leq P_1^{\text{пр}}) \wedge (P_2(\mathbf{u}) \leq P_2^{\text{пр}}) \quad (4)$$

где $P_1^{\text{пр}}$, $P_2^{\text{пр}}$ — приемлемые значения показателей качества решения, либо подвергнуто корректировке с целью выполнения условия (4).

1.2.2. Алгоритм коррекции управляющего решения

На первом шаге алгоритма необходимо определить наиболее критичный сценарий

недостижения цели решения. Определение такого сценария проводится путем сравнения соответствующих средних ущербов от недостижения целей при реализации сценариев. Наиболее критичным сценарием является тот, для которого значения средних ущербов от недостижения каждой цели будут максимальными. Средний ущерб $S_{n\zeta}$ от недостижения ζ -й цели при реализации n -го сценария определяется выражением:

$$S_{n\zeta} = P_n^{\text{сн}} \left(\sum_{\gamma=1}^{\Upsilon} x_{\gamma\zeta} / \Upsilon \right)^{-1}, \quad (5)$$

где $P_n^{\text{сн}}$ — вероятность реализации n -го сценария недостижения цели; $x_{\gamma\zeta}$ — фактическое значение последствий недостижения ζ -й цели; Υ — объем выборки значений последствий недостижения ζ -й цели при реализации n -го сценария.

Значение вероятности реализации n -го сценария недостижения цели и выборку значений последствий недостижения ζ -й цели при его реализации получаем из результатов имитационного моделирования процесса функционирования СЭ РКК. Для рассматриваемого нами примера $x_{\gamma 1} = t_{\text{тп}\gamma}^{\phi} - t_{\text{тп}}^{\text{н}}$, а $x_{\gamma 2} = C_{\text{оп}\gamma}^{\phi} - C_{\text{оп}}^{\text{н}}$.

На втором этапе алгоритма, зная наиболее критичный сценарий недостижения цели и полученные по результатам моделирования условные вероятности проявления нежелательных факторов, необходимо определить наиболее критичный нежелательный фактор. Таким фактором будет являться тот, для которого значение условной вероятности его проявления максимально. Полученная на этапе разработки имитационной модели информация о параметрах СЭ РКК, влияющих на проявление этого фактора, а также внешних факторов, ограничивающих возможности воздействия на некоторые управляемые параметры, позволит сузить область параметров управляющего решения, которыми необходимо управлять для достижения требуемого качества решения и получить скорректированное управляющее решение \mathbf{u}^k .

Представленная методология использования имитационной модели функционирования СЭ РКК для управления качеством реше-

ний по ее созданию может быть реализована в виде вычислительного комплекса, структура которого представлена на рис. 4.

Данный комплекс может являться составной частью автоматизированной системы риск-ориентированного управления процессом создания СЭ РКК. Представление вычислительного комплекса в виде совокупности универсальных блоков с различным математическим обеспечением позволит использовать его для обоснования управляющих решений по созданию различных ОТС.

Представленная методология построения и использования имитационных моделей для оценивания показателей качества управляющих решений позволяет не только оценить эти показатели, но и раскрывает механизм воздействия на них с целью достижения требуемого качества решения.

2. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Целью вычислительного эксперимента является получение ответа на вопрос: «Позволяет ли предложенное в процессе создания ОТС управляющее решение выполнить требование к показателям качества ее функционирования?». Предположим, что предложено решение, характеризующееся вектором (1), элементы которого имеют количественные значения, представленные в таблице 1, и заданы нормативные значения продолжительности ТП $t_{\text{тп}}^{\text{н}} = 6$ ч., объема финансовых ресурсов на его проведение $C_{\text{тп}}^{\text{н}} = 1000$ у.ед., а также приемлемые значения показателей качества управляющего решения $P_1^{\text{пр}} = 0,02$ и $P_2^{\text{пр}} = 0,04$.

Рассмотрим простейшую составную часть СЭ РКК, в которой оборудование состоит из двух типов СЧ, каждая из которых включает в себя по два типа ЭЗ, а подготовленность персонала задана параметрами закона распределения (2).

При обработке результатов моделирования функционирования ОТС были получены

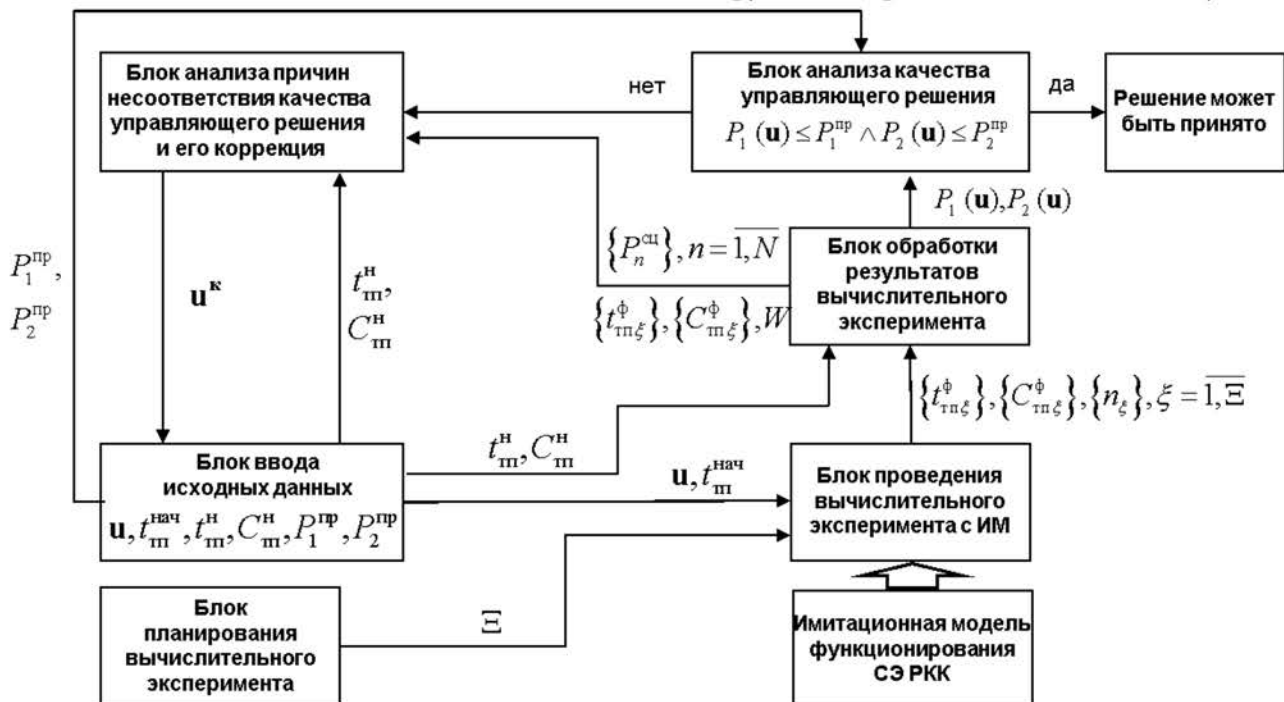


Рис. 4. Структура вычислительного комплекса обоснования управляющего решения по созданию СЭ РКК: W — множество условных вероятностей проявления нежелательных факторов; Ξ — количество прогонов имитационной модели

[Fig. 4. The structure of the computational complex for substantiating the control decision for the creation of the OS RSC; W — a set of conditional probabilities of the manifestation of undesirable factors; Ξ — the number of runs of the simulation model]

плотности вероятности продолжительности ТП $t_{\text{тп}}^{\Phi}$ и объема израсходованных на это финансовых ресурсов $C_{\text{тп}}^{\Phi}$, представленные на рис. 5, условные вероятности проявления всех нежелательных факторов $P(A) = 0,05$; $P(A/A_1) = 0,3; \dots$; $P(A_6/A_2A_3A_4) = 0,15$, а также вероятности реализации каждого сценария недостижения цели.

Исходя из полученных плотностей вероятности, были получены такие показатели качества решения, как $P_1(\mathbf{u}) = 0,031$ и $P_2(\mathbf{u}) = 0,048$. Так как эти показатели превышают приемлемые значения, то условие (4) не выполняется и требуется корректировка решения \mathbf{u} .

Для ее выполнения был применен алгоритм, приведенный в 1.2.2.

Были определены:

- наиболее критичный сценарий недостижения цели решения, характеризующийся появлением следующих нежелательных факторов: отказ второго ЭЗ первой СЧ оборудования, участвующего в ТП, отсутствие ЗЧ необходимой для его устранения, устранение отказа плохо подготовленным персоналом.

- наиболее критичные нежелательные факторы, такие как отказ ЭЗ второго типа СЧ

первого типа оборудования, участвующего в ТП, отсутствие ЗЧ, необходимой для устранения отказа, а также параметры ОТС, влияющие на их появление: λ_{21} , d_{21} и z_{21} .

– единственно доступный управляемый параметр — количество ЗЧ d_{21} .

Было сформировано скорректированное управляющее решение \mathbf{u}^* , характеризующееся увеличенным в 2 раза количеством ЗЧ d_{21} , которое позволило обеспечить требуемые показатели его качества $P_1(\mathbf{u}^*) = 0,019$ и $P_2(\mathbf{u}^*) = 0,037$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена методология оценивания качества управляющих решений, принимаемых при создании ОТС, которое проводится на основе анализа показателей совокупного риска, характеризующих степень недостижения целей этих решений. В качестве таких показателей используются вероятности недостижения целей, определенные в результате анализа плотностей вероятности параметров, характеризующих эти цели.

Таблица 1. Параметры управляющего решения \mathbf{u}

[Table 1. Control solution parameters \mathbf{u}]

km	$\lambda_{km}, 1/\text{ч}$	$\lambda_{km}^{xp}, 1/\text{ч}$	$z_{km}, \text{ч}$	L_{km}	$d_{km}, \text{шт}$	\mathbf{R}	\mathbf{Y}
11	0,0001	0,000025	4380	{12,25,1,4}	2	{1,5,1.5,3}	{5,9,2,4}
21	0,00015	0,000018	4380	{12,25,1,4}	1		
12	0,0002	0,000032	8760	{15,20,1.5,3}	1		
22	0,0005	0,00001	4380	{2,9,2,1}	3		

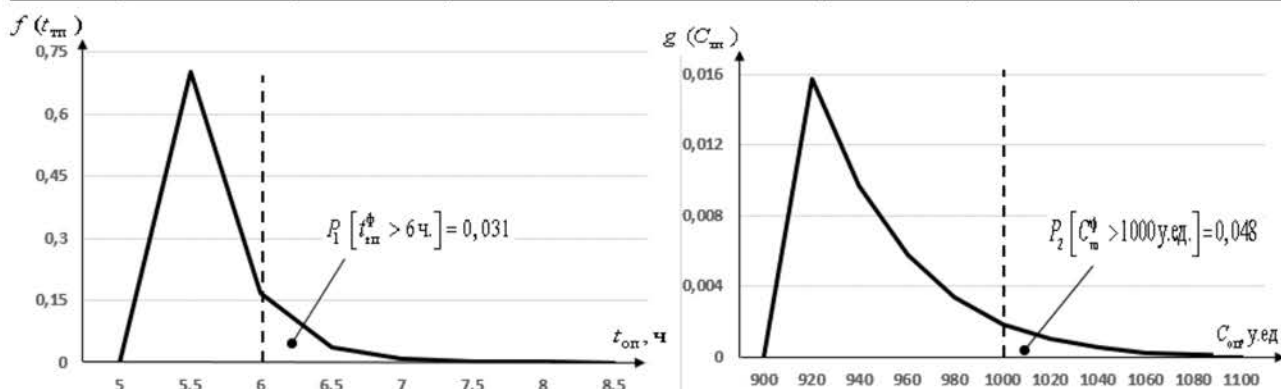


Рис. 5. Плотности вероятности продолжительности ТП $t_{\text{тп}}^{\Phi}$ и объема израсходованных на него финансовых ресурсов $C_{\text{тп}}^{\Phi}$
 [Fig. 5. Probability densities of the duration of the TP $t_{\text{тп}}^{\Phi}$ and the volume of financial resources spent on $C_{\text{тп}}^{\Phi}$]

Для комплексного учета воздействия на показатели качества решений всего множества нежелательных факторов было применено имитационное моделирование.

Это позволило решить, как задачу оценивания качества управляющих решений по созданию ОТС, так и задачу итеративного управления целевыми результатами за счет последовательной коррекции решений, не позволяющих достигнуть требуемых целей. При моделировании их исполнения фиксируются не только финальные результаты, но и ряд промежуточных, которые позволяют определить причины недостижения целей решения.

Выполненная работа иллюстрирует целесообразность применения имитационного моделирования в системе риск-ориентированного управления процессом создания ОТС и демонстрирует открывающиеся при этом возможности повышения качества управления этим процессом.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках бюджетной темы №0073–2019–0004.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Звягин, В. И. Риск как одно из свойств качества решений, принимаемых в условиях неопределенности / В. И. Звягин, А. И. Птушкин, А. В. Трудов // Надежность. – 2009. – Т. 18, № 4. – С. 45–50.
2. Постановление Правительства РФ от 17 августа 2016 г. N 806 «О применении риск-ориентированного подхода при организации отдельных видов государственного контроля (надзора) и внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации». – Москва : Моркнига, 2018. – 6 с.
3. Черненко, А. В. Применение риск-ориентированного подхода при построении системы менеджмента качества / А. В. Черненко // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – № 8(50). – 2016. – С. 92–96.
4. Теленков, Е. Е. Четыре шага к построению риск-ориентированной модели управления компанией / Е. Е. Теленков // Вопросы управления и инструменты рынка. – 2017. – № 3. – С. 139–153.
5. Указ Президента Российской Федерации от 07.05.2018 №204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года», (пп. «б» п. 11). – Официальный интернет-портал правовой информации: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201805070038> – (дата опубликования: 07.05.2018).
6. Воронов, С. П. Применение риск-ориентированного подхода в деятельности органов государственного пожарного надзора / С. П. Воронов, А. В. Матюшин, М. М. Шлепнев // Вестник Санкт-Петербургского университета государственной противопожарной службы МЧС России. – 2016. – С. 130–140.
7. NASA/SP-2011-3422 Version 1.0. Risk Management Handbook. – Washington, D.C. 20546: National Aeronautics and Space Administration NASA Headquarters, November 2011. – 256 p.
8. NPR 8000 004B. Agency Risk Management Procedural Requirements. ExpirationDate: December 06, 2022.
9. Кузьмина, Н. М. Решение задачи синтеза рисков в управлении инфраструктурными объектами / Н. М. Кузьмина, А. Н. Ридли // Надежность. – 2020. – № 4. С. 42–49. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2020-20-4-42-49>
10. Вяцкова, Н. А. Определение и оценка совокупного риска предприятия (на примере предприятий инвестиционно-строительного комплекса) / Н. А. Вяцкова. – Текст: непосредственный // Проблемы и перспективы экономики и управления: материалы VI Междунар. науч. конф. (г. Санкт-Петербург, декабрь 2017 г.): электронный ресурс. – Санкт-Петербург: Свое издательство, 2017. – С. 132–140.

11. IEC 60812:2006 «Analysis techniques for system reliability – Procedure for failure mode and effects analysis (FMEA).
12. ГОСТ Р ИСО 11231-2013. Менеджмент риска. Вероятностная оценка риска на примере космических систем, 2014.
13. NASA/SP-2011-3421 Probabilistic Risk Assessment Procedures Guide for NASA Managers and Practitioners NASA Headquarters Washington, D.C. 20546, December 2011.
14. *Алексенцева, О. Н.* Оценка рисков промышленных предприятий на основе имитационного моделирования / О. Н. Алексенцева, Е. П. Бочаров, Д. В. Ермошин // Прикладная информатика. – 2008. – Т. 13, № 1. – С. 15–24.
15. *Васильков, Ю. В.* Анализ рисков недо-стижения целей управления организацией / Ю. В. Васильков, Л. С. Гущина // Вестник ВГУ. Экономика и управление. – 2017. – № 1. – С. 5–12.
16. *Антонов, С. Г.* Методика оценки рисков нарушения устойчивости функционирования программно-аппаратных комплексов в условиях информационно-технических воздействий / С. Г. Антонов, С. М. Климов // Надежность. – 2017. – Т. 17, № 1. – С. 32–39. DOI: 10.21683/1729-2646-2017-17-1-32-39
17. ГОСТ Р ИСО-МЭК 31010-2011. Менеджмент риска. Методы оценки риска, 2012.
18. *Вивчарь, Р. М.* Оценка продолжительности подготовки ракеты космического назначения к пуску средствами имитационного моделирования / Р. М. Вивчарь, В. В. Тришункин, И. Г. Боровиков // Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники: сб. науч. статей по материалам IV Всероссийской научно-практической конференции. – СПб. : ВКА имени А. Ф. Можайского, 2018. – С. 106–112.
19. *Микони, С. В.* Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов: монография / С. В. Микони, Б. В. Соколов, Р. М. Юсупов. – М. : РАН, 2018. – 314 с. DOI: 10.31857/S9785907036321000001

Вивчарь Роман Михайлович — канд. техн. наук, преподаватель кафедры Федерального государственного бюджетного военного образовательного учреждения высшего образования «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» МО РФ.

E-mail: ramzec9322@rambler.ru

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-3865-9102>

Птушкин Анатолий Иванович — канд. техн. наук, проф., профессор кафедры Федерального государственного бюджетного военного образовательного учреждения высшего образования «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» МО РФ.

E-mail: anatoly.ptushkin2011@yandex.ru

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8498-6078>.

Соколов Борис Владимирович — д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр» Российской академии наук.

E-mail: sokolov_boris@inbox.ru

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-2295-7570>

RISK-BASED MANAGEMENT OF THE DESIGN OF ORGANISATIONAL AND TECHNICAL SYSTEMS BASED ON SIMULATION MODELS OF THEIR FUNCTIONING

© 2021 R. M. Vivchar¹, A. I. Ptushkin¹, B. V. Sokolov^{2✉}

¹*Mozhaisky Military Space Academy*

13, Zhdanovskaya Street, 197198 Saint-Petersburg, Russian Federation

²*St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences*

39, 14 line V.O., 199178 Saint-Petersburg, Russian Federation

Annotation. The article proposes a methodology for the design and application of simulation models in the development of a risk-based management system for the design of organisational and technical systems (OTS) that are created and function under conditions of uncertainty. Risk is understood as one of the properties of the quality of a decision made in a situation with uncertain outcomes. This property characterises the possibility and consequences of failure. A distinctive feature of the proposed methodology is that it can be used to assess the quality of decisions made during the design process, identify, if necessary, the causes of their unsatisfactory quality, and develop corrective actions to eliminate these causes. Assessment of the quality of management decisions made when creating an OTS is based on the analysis of the overall risk indicators characterising the degree of failure to achieve the goal. The indicators are the probabilities of failure to reach the set goals. They are determined by analysing the probability densities of the parameters characterising these goals. These parameters are obtained as a result of the simulation modelling of the functioning of the OTS, taking into account the impact of the entire set of undesirable random factors on the said indicators. The article presents the results of a computational experiment on the assessment and correction of the indicators of decision quality when designing an organisational and technical system. It shows that the simulation modelling of the functioning of a created object can be used to organise an iterative process for managing the final result at the design stage. The described methodology for the design and application of simulation models for assessing the quality indicators of management decisions can also be used to determine the way decisions can be altered in order to eliminate the causes of failure to achieve the required quality.

Keywords: risk, risk-based management, quality of decisions, simulation modelling, organisational and technical system, space and missile system operation, technological process.

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

REFERENCES

1. Zvjagin, V. I., Ptushkin, A. I., Trudov, A. V. (2009) Risk kak odno iz svojstv kachestva re-

shenij, prinimaemyh v uslovijah neopredelennosti [Risk as one of the properties of the quality of decisions made under conditions of uncertainty]. Dependability. No 18 (4). P. 45–50. (in Russian)

2. Russian Federation. Decree of the Government of the Russian Federation of August 17, 2016 N 806 “On the application of a risk-based approach when organizing certain types of state control (supervision) and amending some acts of the Government of the Russian Federation”. (2018) Moscow, Morkniga. (in Russian)

3. Chernen’kij, A. V. (2016) Primenenie risk-orientirovannogo podhoda pri postroenii

✉ Sokolov Boris V.
e-mail: sokolov_boris@inbox.ru

sistemy menedzhmenta kachestva [Application of a risk-based approach when building a quality management system]. *International Research Journal*. No 50 (8). P. 92–96. (in Russian)

4. *Telenkov, E. E.* (2017) Chetyre shaga k postroeniju risk-orientirovannoj modeli upravlenija kompaniej [Four steps to building a risk-oriented model of management of the company] *Management Issues*. No 3. P. 139–153. (in Russian)

5. Russian Federation. (2018) Decree of the President of the Russian Federation of 07.05.2018 No. 204 “On national goals and strategic objectives of the development of the Russian Federation for the period up to 2024” (subparagraphs “b”, item 11). Official Internet portal of legal information: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201805070038>. ([Accessed 7th May 2018] 07.05.2018). (in Russian)

6. *Voronov, S. P., Matjushin, A. V., Shlepnev M. M.* (2018) Primenenie risk-orientirovanogo podhoda v dejatel'nosti organov gosudarstvennogo pozharnogo nadzora [Application of a risk-based approach in the activities of state fire supervision bodies]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta GPS MCHS Rossii*. No 1. P. 130–140. (in Russian)

7. NASA/SP-2011-3422 Version 1.0. (2011) *Risk Management Handbook*. Washington, D.C. 20546, National Aeronautics and Space Administration NASA Headquarters, November.

8. NPR 8000 004B. (2022) *Agency Risk Management Procedural Requirements*. Expiration-Date: December 06.

9. *Kuz'mina, N. M., Ridli A. N.* (2020) Reshenie zadachi sinteza riskov v upravlenii infrastrukturnymi ob'ektami [Solving the problem of risk synthesis in the management of infrastructure facilities]. *Deendability*. (4). 42–49. (in Russian) <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2020-4-42-49>

10. *Vjackova, N. A.* (2017) Determination and assessment of the aggregate risk of an enterprise (on the example of enterprises of the investment and construction complex). In: *Problems and prospects of economics and management: materials of the VI International. scientific. conf.*, December 2017, Saint-Petersburg, Russia, Saint-Petersburg, Svoe izdatelstvo, P. 132–140. (in Russia)

11. IEC 60812:2006 “Analysis techniques for system reliability – Procedure for failure mode and effects analysis (FMEA)”.

12. GOST R ISO 11231-2013. (2014) *Risk management. Probabilistic risk assessment on the example of space systems*. (in Russian)

13. NASA/SP-2011-3421. (2011) *Probabilistic Risk Assessment Procedures Guide for NASA Managers and Practitioners* NASA Headquarters Washington, D.C. 20546, December.

14. *Aleksenceva, O. N., Bocharov, E. P., Ermoshin, D. V.* (2008) Ocenka riskov promyshlennyh predpriyatij na osnove imitacionnogo modelirovanija [Risk assessment of industrial enterprises based on simulation]. *Applied informatics*. No 13 (1). P. 15–24. (in Russian)

15. *Vasil'kov Ju. V., Gushhina L. S.* (2017) Analiz riskov nedostizhenija celej upravlenija organizaciej [Analysis of risks of failure to achieve the goals of management of the organization]. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Economics and management*. No 1. P. 5–12. (in Russian)

16. *Antonov, S. G., Klimov, S. M.* (2017) Metodika ocenki riskov narushenija ustojchivosti funkcionirovanija programmno-apparatnyh kompleksov v uslovijah informacionno-tehnicheskikh vozdeystvij [Methods for assessing the risks of violation of the stability of the functioning of software and hardware complexes in conditions of information and technical influences]. *Dependability*. No 17 (1). P. 32–39. (in Russian) DOI: 10.21683/1729-2646-2017-17-1-32-39

17. GOST R ISO-MEK 31010-2011. (2012) *Risk management. Risk assessment methods*. (in Russian)

18. *Vivchar, R. M., Trishunkin, V. V., Borovikov I. G.* (2018) Ocenka prodolzhitel'nosti podgotovki rakety kosmicheskogo naznachenija k pusku sredstvami imitacionnogo modelirovanija [Estimation of the duration of preparation of a space rocket for launch by means of simulation modeling]. In: *Modern problems of creation and operation of weapons, military and special equipment: collection of articles. scientific. Articles based on the materials of the IV All-Russian Scientific and Practical Conference*, Saint-Petersburg, VKA imeni A.F. Mozhaiskogo, P. 106–112. (in Russian)

19. *Mikoni, S. V., Sokolov B. V., Yusupov R. M.*
(2018) Kvalimetrija modelej i polimodel'nyh kompleksov [Qualimetry of models and poly-model complexes]. Moscow, RAN. (in Russian)
DOI: 10.31857/S9785907036321000001

Vivchar Roman M. — PhD in Technical Sciences, lecturer, A. F. Mozhaisky Military Space Academy.
E-mail: ramzec9322@rambler.ru
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-3865-9102>

Ptushkin Anatoly I. — PhD in Technical Sciences, Professor, A. F. Mozhaisky Military Space Academy.
E-mail: anatoly.ptushkin2011@yandex.ru
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8498-6078>.

Sokolov Boris V. — DSc in Technical Sciences, Professor, Chief Researcher, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences
E-mail: sokolov_boris@inbox.ru
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-2295-7570>