

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАК ИНСТРУМЕНТ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РИСК-ОРИЕНТИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ СОЗДАНИЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Б.В. Соколов, Р.М. Вивчарь, А.И. Птушкин (Санкт-Петербург)

Введение

Процессы создания любой сложной технической системы (СТС) всегда сопровождаются наличием большого числа неопределенностей различной природы, например, вероятностной, интервальной, нечеткой, что, в свою очередь, делает неопределенными результаты этой деятельности с точки зрения достижения ее целей. Это обстоятельство должно непрерывно учитываться при принятии проектных решений. Свойство качества решения, принимаемого в ситуации с неопределенными исходами, характеризующее возможность и последствия недостижения поставленных целей будем называть рискованностью или, кратко, – риском [1]. Принятие названных решений должно сопровождаться определением показателей этого свойства – риска. Осознание этой необходимости привело в настоящее время к активному использованию риск-ориентированного подхода (РОП) к управлению СТС, предусматривающего при разработке каждого принимаемого управляющего решения оценивание показателей, характеризующих невозможность достижения его целей и наступающих при этом последствий. Рекомендации к применению РОП определены Постановлением Правительства РФ от 17 августа 2016 г. N 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 остается он без внимания и за рубежом. Так, НАСА активно использует риск-ориентированный подход при реализации многих программ и проектов в области аэронавтики [7, 8]. Несмотря на это методология риск-ориентированного управления (РОУ) в настоящее время находится в стадии разработки. Не разработана система терминов в этой области, вопросы интеграции риск-менеджмента в процессы управления – главные вопросы этой методологии – недостаточно освещаются в научной литературе и отражаются в руководящих документах, отсутствуют общие рекомендации по построению риск-ориентированных систем управления в российских и международных стандартах.

В данной статье впервые в русскоязычной научной публикации рассмотрены основные аспекты методологии применения имитационного моделирования при построении системы РОУ созданием СТС.

Генеральная цель любого процесса создания СТС 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, 10, 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 сценарий 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 СТС в течение длительного интервала времени. Еще одним преимуществом имитационного моделирования является сравнительная простота в получении оценки влияния неопределенности, вызванной неточностями задания входных параметров, например, в виде интервалов. В связи с этим на целесообразность применения имитационного моделирования для оценивания показателей совокупного риска обращается внимание в ряде научных работ и документах по стандартизации [14, 15, 16, 17].

Целью данной статьи является развитие методологии построения и использования имитационных моделей при разработке системы РОУ созданием СТС, позволяющей оценивать качество, принимаемых при этом решений, исследовать их устойчивость, 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 при создании СТС, функционирующих в условиях неопределенностей вероятностного характера

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

Имитационная модель функционирования СЭ РКК, позволяющая организовать управление качеством решений, принимаемых при создании РКК, должна содержать: 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. 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.

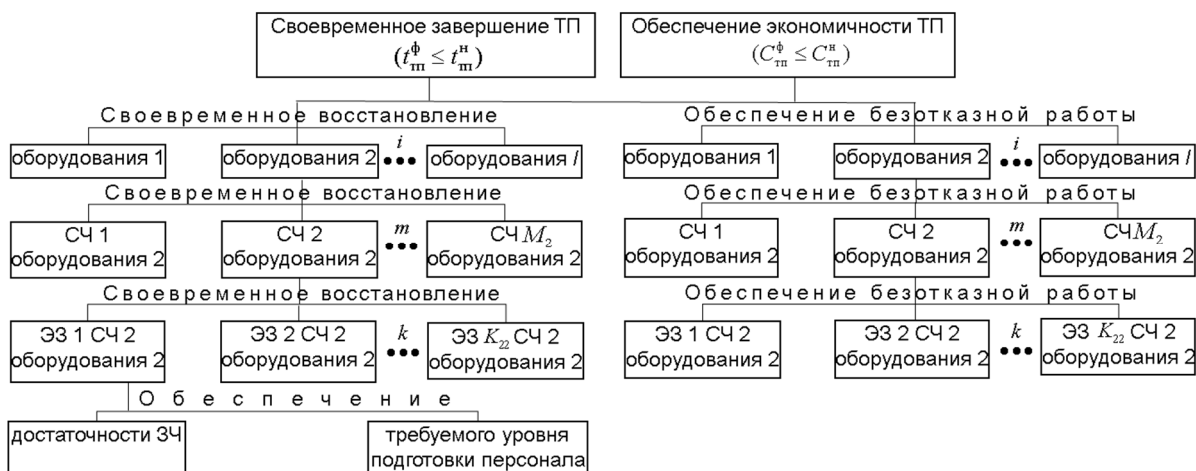


Рис. 1. Дерево целей, достижение которых необходимо для экономичного выполнения и своевременного завершения ТП

На рис. 1 использованы следующие обозначения:

i – вид оборудования, участвующий в ТП, $i = \overline{1, I}$;

mi – количество типов составных частей (СЧ) i -го вида оборудования, участвующего в ТП, $m = \overline{1, M_i}$;

kmi – количество типов элементов замены (ЭЗ) m -ой СЧ i -го вида оборудования, участвующего в ТП, $k = \overline{1, K_{mi}}$;

$t_{\text{тп}}^{\phi}, C_{\text{тп}}^{\phi}$ и $t_{\text{тп}}^{\text{н}}, C_{\text{тп}}^{\text{н}}$ – фактические и нормативные продолжительность ТП и объем, израсходованных на него финансовых ресурсов, соответственно.

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 совокупность 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.

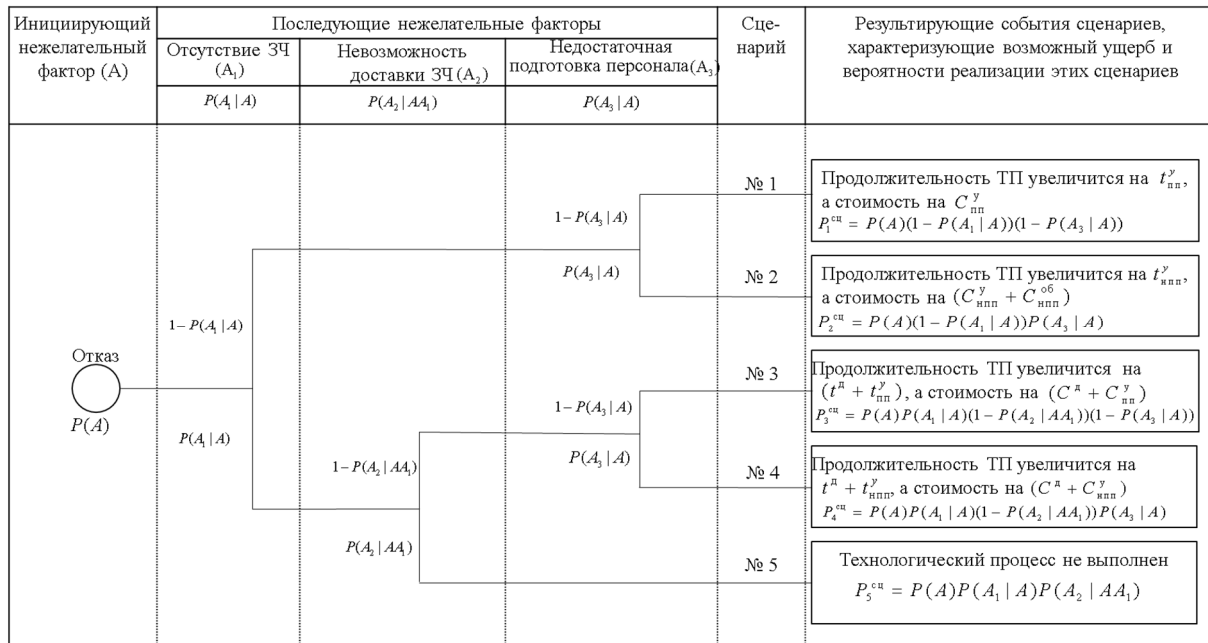


Рис. 2. Возможные сценарии недостижения целей

На рис. 2 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;

$t^{\text{н}}$ и $C^{\text{н}}$ — продолжительность и стоимость доставки ЗЧ соответственно;

$P(A_3|A)$ – вероятность того, что ТП будет выполняться недостаточно подготовленным персоналом;

$t_{\text{нп}}^y, C_{\text{нп}}^y$ и $t_{\text{нп}}^y, C_{\text{нп}}^y$ – продолжительности и стоимости устранения отказа оборудования подготовленным и недостаточно подготовленным персоналом соответственно;

$P_1^{\text{сч}}, P_2^{\text{сч}}, \dots, P_5^{\text{сч}}$ – вероятности реализации сценариев.

1.3. Разработка моделей подпроцессов функционирования СЭ РКК и их агрегирование

Далее необходимо разработать модели подпроцессов функционирования СЭ РКК, 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.

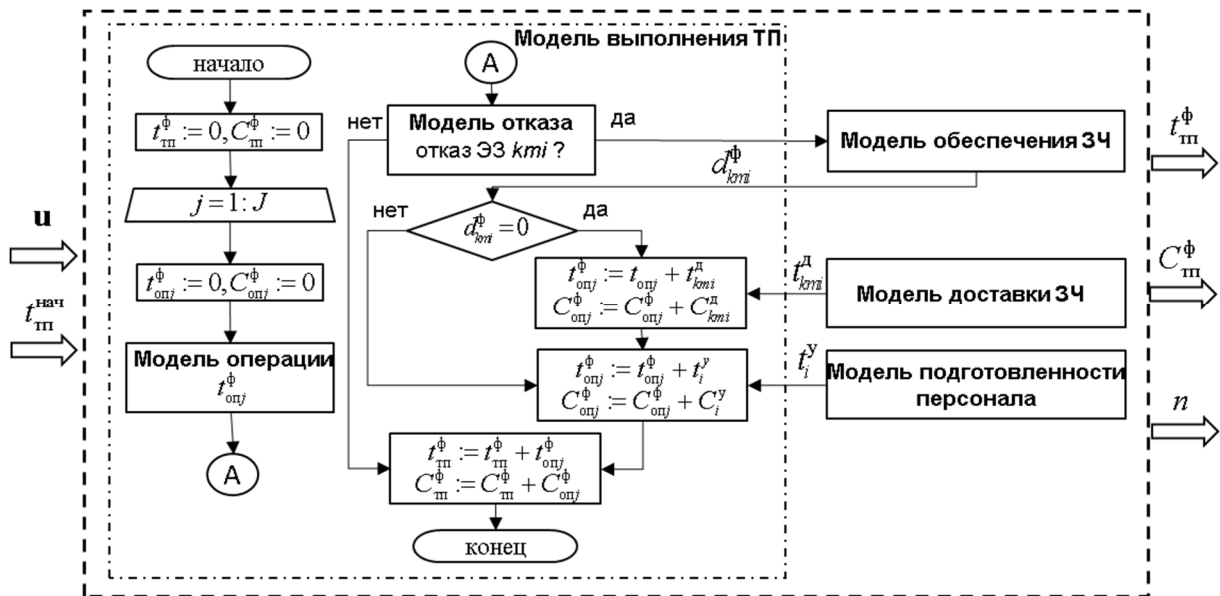


Рис. 3. Структура имитационной модели функционирования СЭ РКК: J – количество операций, входящих в ТП; $t_{опj}^φ, C_{опj}^φ$ – фактические продолжительность j -ой операции и объем затрачиваемых на нее финансовых ресурсов

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 1.2 нежелательных факторов и представленные в виде вектора, характеризующего параметры управляющего решения, принимаемого в процессе создания РКК ее СЭ.

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

где $\lambda_{kmi}, i = \overline{1, I}, m = \overline{1, M_i}, k = \overline{1, K_{mi}}$ – интенсивность отказов ЭЗ kmi -го типа; d_{kmi} и z_{kmi} – начальное количество ЗЧ и периодичность пополнения комплекта ЗИП ЭЗ kmi -го типа соответственно; L_{kmi} и $c_{kmi}^д$ – 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 – $t_{тп}^φ$ и объем израсходованных на него финансовых ресурсов – $C_{тп}^φ$, 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}^d), устранения отказов оборудования (t_i^y), выполнения операции ($t_{оп}$), 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}^d . Ее входным параметром является вариант доставки ЗЧ, характеризующийся объемом затрачиваемых финансовых средств c_{kmi}^d и множеством $L_{kmi} = \{t_{kmi}^{d\min}, t_{kmi}^{d\max}, \alpha_{kmi}^d, \beta_{kmi}^d\}$, где $t_{kmi}^{d\min}$ и $t_{kmi}^{d\max}$ – минимальная и максимальная продолжительность доставки ЗЧ ЭЗ kmi -го типа соответственно.

Продолжительность процесса доставки ЗЧ t^d 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 $R_i = \{t_i^{y\min}, t_i^{y\max}, \alpha_i^y, \beta_i^y\}$, $i = \overline{1, I}$, где $t_i^{y\min}$ и $t_i^{y\max}$ – 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 $t_{ТП}^{\text{нач}}$. Модель включает в себя модель оборудования, участвующего в ТП, и модель операции, выполняемой с помощью этого

оборудования. Модель операции позволяет оценить продолжительность j -ой операции $t_{опj}$ без учета отказов оборудования. Эта продолжительность моделируется путем генерации случайного числа, распределенного по закону (2) с параметрами $Y_j = \{t_{опj}^{мин}, t_{опj}^{макс}, \alpha_{опj}, \beta_{опj}\}, j = \overline{1, J}$, где $t_{опj}^{мин}$ и $t_{опj}^{макс}$ – минимальная и максимальная продолжительность выполнения j -ой операции. В модели оборудования генерируется возможность наступления отказа ЭЗ k -го типа в любой момент выполнения ТП.

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 $Ver[r(Ob, M) \leq \varepsilon] \geq 1 - \delta$ [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 $Ver[r_1(t_{тп}^{нвм}, t_{тп}^p) \leq 0,5] = 0,985$ и $Ver[r_2(C_{тп}^{нвм}, C_{тп}^p) \leq 45] = 0,91$ говорят о приемлемой адекватности разработанной имитационной модели функционирования СЭ РКК.

2. Методология применения имитационной модели функционирования СЭ РКК для управления качеством решений по ее созданию с использованием вероятностных моделей факторов риска

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 $t_{тп}^{\phi}$ и объема израсходованных на это финансовых ресурсов $C_{тп}^{\phi}$, условные вероятности проявления всех нежелательных факторов, а также вероятности проявления каждого сценария недостижения цели. На основе знания законов распределения $t_{тп}^{\phi}$ и $C_{тп}^{\phi}$ можно определить такие показатели качества решений по управлению процессом создания СЭ РКК, как: вероятность несвоевременного завершения ТП $P_1[t_{тп}^{\phi} > t_{тп}^н]$ и вероятность превышения объема израсходованных на его проведение финансовых ресурсов $P_2[C_{тп}^{\phi} > C_{тп}^н]$, являющимися 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 СТС.

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).

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 -ой 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 -ой цели; Υ – объем выборки значений последствий недостижения ζ -ой цели при реализации n -го сценария.

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

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 решений 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 СТС.

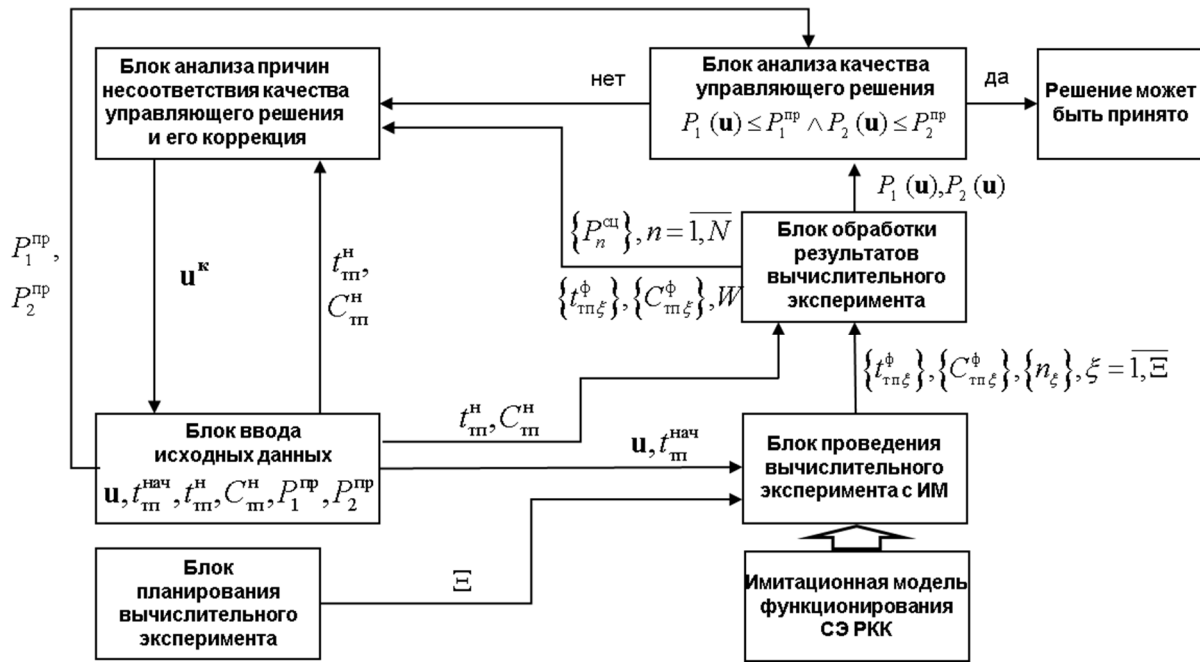


Рис. 4. Структура вычислительного комплекса обоснования управляющего решения по созданию СЭ РКК: W – множество условных вероятностей проявления нежелательных факторов; Ξ – количество прогонов имитационной модели

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.

2.3. Вычислительный эксперимент

Целью вычислительного эксперимента является получение ответа на вопрос: «Позволяет ли предложенное в процессе создания СТС 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 $t_{тп}^H = 6$ ч., объема финансовых ресурсов на его проведение $C_{тп}^H = 1000$ у.е., а также приемлемые значения показателей качества управляющего решения $P_1^{пр} = 0,02$ и $P_2^{пр} = 0,04$.

Таблица 1. Параметры управляющего решения u

km	$\lambda_{km}, 1/\text{ч}$	$\lambda_{km}^{xp}, 1/\text{ч}$	$z_{km}, \text{ч}$	L_{km}	$d_{km}, \text{шт}$	R	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		

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 СТС были получены плотности вероятности продолжительности ТП $t_{тп}^\phi$ и объема

израсходованных на это финансовых ресурсов $C_{тп}^{\phi}$, представленные на рис. 5, условные вероятности проявления всех нежелательных факторов $P(A) = 0,05; P(A / A_1) = 0,3; \dots; P(A_6 / A_2 A_3 A_4) = 0,15$, а также вероятности реализации каждого сценария недостижения цели

$$P_1^{сн} = 0,07; P_2^{сн} = 0,04; \dots; P_7^{сн} = 0,1; \dots; P_{20}^{сн} = 0,018$$

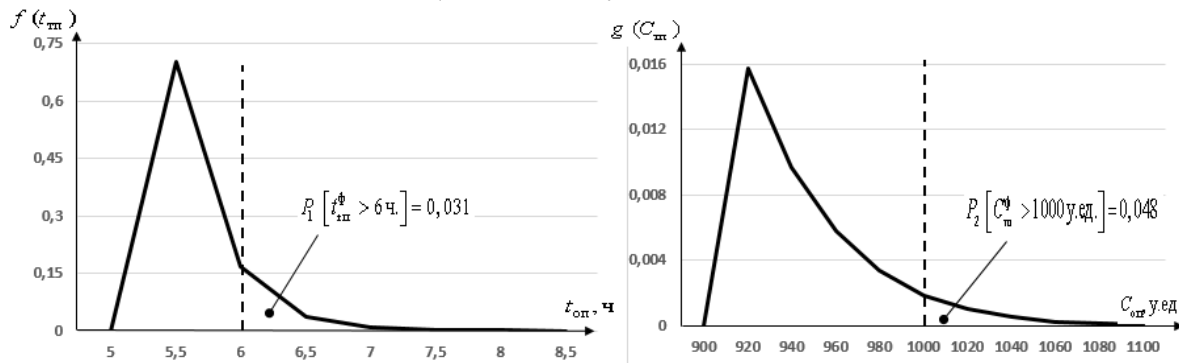


Рис. 5. Плотности вероятности продолжительности ТП $t_{тп}^{\phi}$ и объема израсходованных на него финансовых ресурсов $C_{тп}^{\phi}$

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

3. Алгоритмы исследования устойчивости риск-ориентированного управления

В предыдущем разделе определение требуемых параметров управляющего решения осуществлялось с использованием детерминированных оценок параметров вероятностных моделей учитываемых факторов неопределенностей. В процессе функционирования СТС значения этих параметров под воздействием индифферентных и/или целенаправленных факторов могут изменяться, и определить закономерность их изменений, практически невозможно. Поэтому, обычно, ограничиваются интервальными оценками возможного диапазона изменения этих параметров.

Рассмотрим наиболее сложный случай, когда границы указанных интервалов изменяются во времени в соответствии с некоторыми фиксированным сценариями и

будем предполагать, что при интервальном задании исходных данных (ИД) область допустимых возмущающих воздействий $Z(\mathbf{x}(t), t)$, будет описываться следующими соотношениями:

$$\zeta_j^{(1)}(t) \leq \zeta_j(t) \leq \zeta_j^{(2)}(t), \quad j = 1, \dots, m, \quad (6)$$

где $\mathbf{x}(t)$ – вектор состояния СТС, $\zeta_j^{(1)}, \zeta_j^{(2)}$ – соответственно заданные векторные функции, определяющие минимальные и максимальные значения возмущающих воздействий. Возмущения $\zeta_j(t)$ могут появиться в моменты времени $t \in (T_0, T_f]$ в рамках того или иного сценария воздействия внешней среды на процесс функционирования СТС при реализации каждого фиксированного управляющего решения $\mathbf{u}_i(t)$. Пусть задано некоторое начальное состояние СТС $\mathbf{x}(T_0)$ и рассматривается некоторая фиксированная программа управления $\mathbf{u}_i(t)$ СТС. Тогда указанным векторам и области возмущающих воздействий (6) для фиксированного сценария $\zeta_j(t)$ соответствует область (множество) возможных значений фазовых переменных модели СТС.

Назовём эту область (множество) областью (множеством) достижимости динамической СТС под воздействием возмущений и обозначим её

$$D_x^{(\zeta)}(T_f, T_0, X_0, Z, \mathbf{u}_i) \quad (7)$$

Множеству $D_x^{(\zeta)}(T_f, T_0, X_0, Z, \mathbf{u}_i)$ в пространстве состояний соответствует множество точек (область) в пространстве значений показателей, оценивающих эффективность и устойчивость функционирования СТС, которое мы обозначим как

$$D_J^{(\zeta)}(T_f, T_0, X_0, Z, \mathbf{u}_i), \quad (8)$$

где $\mathbf{J} = \|J_1, J_2, J_3, J_4, J_5, J_6, J_7, J_8\|^T$ – вектор показателей, оценивающих эффективность и устойчивость функционирования СТС.

Для удобства и наглядности дальнейшего изложения рассмотрим только две компоненты эффективности: показатели результативности J_1 и ресурсоёмкости J_2 процесса функционирования СТС. В этом случае можно при геометрическом описании области достижимости (8) воспользоваться декартовой системой координат (см. рис.6).

На рис. 6 показана область достижимости (8) для сокращённого вектора показателей эффективности и устойчивости функционирования СТС вида

$$\mathbf{J}' = \|J_1, J_2\|^T \quad (9)$$

Пусть заданы допустимые границы изменений значений частных показателей результативности и ресурсоёмкости процесса функционирования СТС в виде следующих соотношений

$$a_1 \leq J_1 \leq J_{b1}, \quad (10)$$

$$J_{a2} \leq J_2 \leq J_{b2}, \quad (11)$$

определяющих в пространстве показателей некоторую область P_J (см. рис. 6).

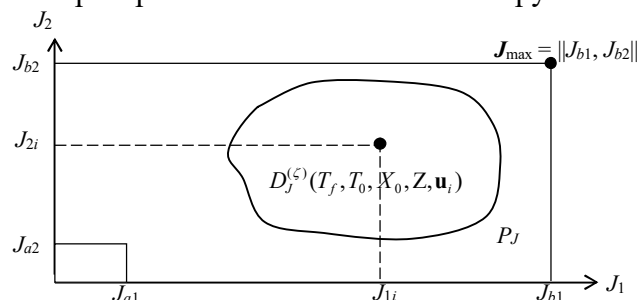


Рис.6. ОД динамической СТС в пространстве изменения частных показателей эффективности ее функционирования

В работах [20, 21] показано, что если для некоторого фиксированной программы управления $\mathbf{u}_i(t)$, ($i = 1, \dots, n$), подверженного влиянию возмущающих воздействий $\zeta_j(t)$ выполняются условия

$$D_J^{(\zeta)}(T_f, T_0, X_0, Z, \mathbf{u}_i) \subset P_J, \quad (12)$$

то программа управления $\mathbf{u}_i(t)$ устойчива к воздействию возмущений $\zeta_j(t)$. Другими словами, возможные отклонения значений показателей качества функционирования СТС вида J_1, J_2 , вызванные возмущениями $\square_j(t)$, являются допустимыми.

Таким образом, для того, чтобы оценить устойчивость $\mathbf{u}_i(t)$ к воздействию тех или иных возмущений $\zeta_j(t)$, в случае их интервального задания, необходимо научиться строить соответствующие этим возмущениям ОД. Исследования показывают, что точное построение ОД является чрезвычайно трудной задачей и в практических приложениях обычно ограничиваются аппроксимацией ОД с требуемой точностью [21]. В качестве примеров можно привести подходы к построению аппроксимации ОД, базирующиеся на решении соответствующих задач оптимального управления, на построении различных классов эллипсоидов [21] и т.п. Остановимся более подробно на первом подходе к решению задач аппроксимации ОД.

В этом случае для построения ОД необходимо решение некоторой совокупности задач оптимального программного управления СТС следующего вида:

$$J_g = \mathbf{c}^T \mathbf{J} \rightarrow \min_{\zeta_i \in Z}, \quad (13)$$

где $\mathbf{c} = \|c_1, c_2\|^T$ – заданный вектор, удовлетворяющий условиям нормировки

$$|\mathbf{c}| = \sqrt{c_1^2 + c_2^2} = 1,$$

а $\mathbf{J} = \|J_1, J_2\|$ – вектор частных показателей качества функционирования СТС.

Особенностью задачи (13) является то, что при её решении осуществляется как бы «оптимизация» программы возмущающих воздействий $\zeta_j(t)$ при заданной программе управлений $\mathbf{u}_i(t)$. Но в данном случае интерпретация конкретных значений вектора $\zeta_j(t)$ нас не интересует. В рамках решения задачи оценивания устойчивости программы управления СТС, цель решения задачи (13) состоит в отыскании некоторой точки $\mathbf{J}^* = \|J_1^*, J_2^*\|^T$, лежащей на границе множества (8) и некоторой прямой вида

$$c_1 J_1^* + c_2 J_2^* = 0 \quad (14)$$

касательной к данному множеству и проходящей через точку \mathbf{J}^* . Определив множество точек J_γ^* и соответствующие касательные прямые для некоторых вариантов варьирования компонент вектора \mathbf{c}_γ , $\gamma = 1, \dots, \Gamma$ (Γ – число вариантов варьирования коэффициентов \mathbf{c}_γ), можно получить внешнюю аппроксимацию множества (8), которую мы обозначим следующим образом:

$$\bar{\bar{D}}_J^{(\zeta)}(T_f, T_0, X_0, Z, \mathbf{u}_i) \quad (15)$$

Данная аппроксимация ОД представляет собой геометрическую фигуру, заключённую между прямыми, задаваемыми выражениями вида $\mathbf{c}_\gamma^T \mathbf{J}^*$, $\gamma = 1, \dots, \Gamma$.

Рассмотрим случай, когда $\Gamma = 4$, а векторы \mathbf{c}_γ имеют вид

$$\mathbf{c}_1 = \|0, 1\|^T; \mathbf{c}_2 = \|0, -1\|^T; \mathbf{c}_3 = \|1, 0\|^T; \mathbf{c}_4 = \|-1, 0\|^T \quad (16)$$

и удовлетворяют условиям нормировки. В этом случае для аппроксимации ОД необходимо решить следующие четыре задачи оптимального программного управления вида (13):

$$J'_1 = J_2 \rightarrow \min_{\zeta_j \in Z}; J'_2 = -J_2 \rightarrow \min_{\zeta_j \in Z}; J'_3 = J_1 \rightarrow \min_{\zeta_j \in Z}; J'_4 = -J_1 \rightarrow \min_{\zeta_j \in Z} \quad (17)$$

Решение данных задач можно осуществить широко известными комбинированными методами поиска оптимальных программных управлений динамической системы вида. В результате решения задач (17) получаются координаты

точек J_1^* , J_2^* , J_3^* , J_4^* , позволяющие с учётом (16) построить внешнюю аппроксимацию множества достижимости (15), которая будет представлять собой область, образованную в результате пересечения четырёх прямых, касательных к множеству (8). На рис. 7 показаны точки J_γ $\gamma = 1, \dots, 4$ и соответствующие прямые. В этом случае можно гарантировать, что в рамках принятых допущений, возмущения $\zeta_j(t)$ не «выведут» показатели качества функционирования СТС за пределы области вида (15).

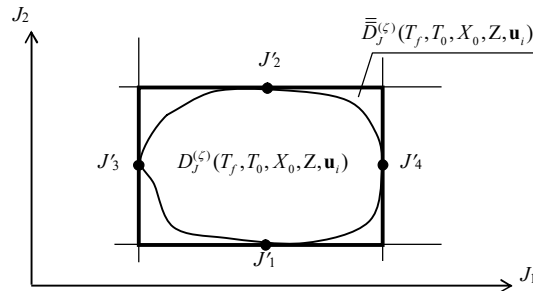


Рис.7. Внешняя аппроксимация ОД динамической СТС

Решение задач (17) и аппроксимация соответствующих ОД должны осуществляться для каждой из программ управления СТС u_i ($i = 1, \dots, 4$) для каждого фиксированного сценария возмущающих воздействий $\zeta_j(t)$ ($j = 1, \dots, m$).

На рис. 8 показаны наиболее характерные случаи взаимного расположения областей P_J и $\overline{\overline{D}}_J^{(\zeta)}$ для различных программ управления СТС.

При этом можно утверждать следующее:

- в случае 5a возможные отклонения значений показателей качества функционирования СТС, вызванные возмущениями, являются допустимыми, а соответствующая программ управления СТС устойчива к воздействию возмущений;
- в случае 5b отклонение значений показателей качества функционирования СТС, вызванные возмущениями, недопустимы, а соответствующая программа управления – неустойчива к воздействию этих возмущений;
- в случае 5c программа управления СТС неустойчива к воздействию возмущений, причём эти возмущения в большей степени влияют на показатель результативности функционирования СТС J_1 ;
- в случае 5d программа управления СТС неустойчива к воздействию возмущений, причём эти возмущения в большей степени влияют на показатель результативности функционирования СТС J_2 .

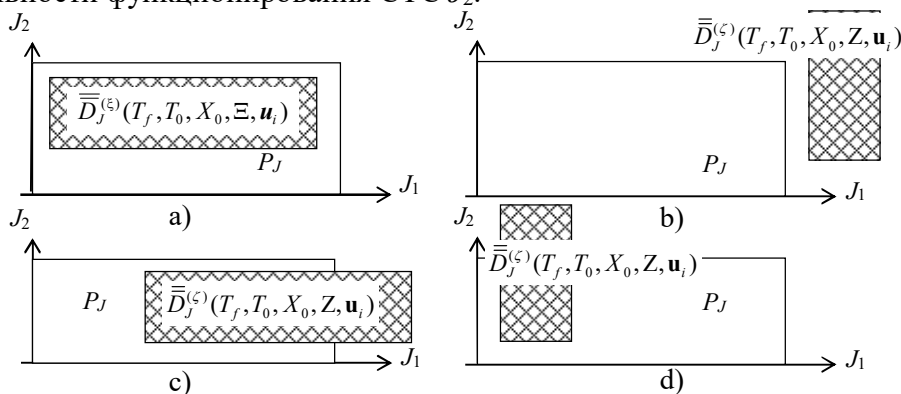


Рис.8. Случаи взаимного расположения областей P_J и $\overline{\overline{D}}_J^{(\zeta)}$ для различных программ управления СТС

Окончательный выбор наиболее устойчивых программ управления СТС в этом случае целесообразно проводить, исходя из следующего условия

$$S_j(\mathbf{u}_i^*(t)) = \min_{1 \leq i \leq n} \max_{1 \leq j \leq m} S_j(\mathbf{u}_i(t)) \quad (18)$$

где $S_j(\mathbf{u}_i(t))$ – площадь пересечения областей $\bar{D}_j^{(\zeta)}(T_f, T_0, X_0, Z, \mathbf{u}_i)$ и P_j ; n – общее количество анализируемых планов применения СТС; m – общее количество сценариев возмущающих воздействий на этапе реализации планов управления СТС.

Можно показать, что поиск наиболее устойчивой программы управления СТС в соответствии с выражением (18) является, по сути, реализацией одного из основополагающих принципов многокритериального выбора в условиях неопределённости, а именно принципа гарантированного результата. В этом случае

величина площади $S_j(\mathbf{u}_i^*(t))$ с геометрических позиций позволяет количественно оценить риск невыполнения заданной программы управления СТС $\mathbf{u}_i(t)$ (оценить риск недостижения поставленной цели) для интервально заданного сценария возмущающих воздействий, границы которого определяются временными функциями вида (6).

Исследования, выполненные по данной тематике, проводились при частичной финансовой поддержке Программы НТС Союзного государства «Интеграция-СГ» (проект «Интеграция-СГ-3.2.4.1»), и в рамках бюджетной темы № 0073–2019–0004.

Выводы

Предложена методология оценивания качества управляющих решений, принимаемых при создании СТС, 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.

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 СТС, 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.

Предложенный подход к аппроксимации ОД целей функционирования СТС, базирующийся на решении соответствующих задач оптимального управления, позволит приближенно оценить устойчивость программы управления ее функционированием. Для его реализации могут быть использованы широко известные методы поиска программного управления динамическими системами.

Разработана методика определения наиболее устойчивой программы управления СТС, которая позволяет реализовать один из основополагающих принципов многокритериального выбора в условиях неопределённости, а именно принцип гарантированного результата для динамически изменяющихся условий функционирования рассматриваемых сложных систем.

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

Литература

1. **Звягин В.И., Птушкин А.И., Трудов А.В.** Риск как одно из свойств качества решений, принимаемых в условиях неопределенности // Надежность, том 18, №4, 2018. 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».
3. **Черненький А.В.** Применение риск-ориентированного подхода при построении системы менеджмента качества//Международный научно-исследовательский журнал. № 8 (50). 2016. С. 92-96.
4. **Теленков Е.Е.** Четыре шага к построению риск-ориентированной модели управления компанией // Вопросы управления и инструменты рынка. 2017. 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).
6. **Воронов С.П., Матюшин А.В., Шлепнев М.М.** Применение риск-ориентированного подхода в деятельности органов государственного пожарного надзора // Вестник Санкт-Петербургского университета государственной противопожарной службы МЧС России. 2016. № 1. С.130-140.
7. NASA/SP-2011-3422 Version 1.0. Risk Management Handbook. National Aeronautics and Space Administration NASA Headquarters Washington, D.C. 20546, November 2011.
8. NPR 8000 004B. Agency Risk Management Procedural Requirements. ExpirationDate: December 06, 2022.
9. **Кузьмина Н.М., Ридли А.Н.** Решение задачи синтеза рисков в управлении инфраструктурными объектами // Надежность. 2020. №4. С. 42-49. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2020-20-4-42-49> (эксперт).
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 VIМеждунар. науч. конф. (г. Санкт-Петербург, декабрь 2017 г.). Санкт-Петербург : Свое издательство, 2017. – С. 132-140. – URL: <https://moluch.ru/conf/econ/archive/263/13257> (дата обращения: 12.02.2021) (эксперты).
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., Бочаров Е.П., Ермошин Д.В.** Оценка рисков промышленных предприятий на основе имитационного моделирования // Прикладная информатика. 2008. №1 (13). С. 15-24.
15. **Васильков Ю.В., Гущина Л.С.** Анализ рисков недостижения целей управления организацией // Вестник ВГУ. Экономика и управление. 2017. № 1. С. 5-12.
16. **Антонов С.Г., Климов С.М.** Методика оценки рисков нарушения устойчивости функционирования программно-аппаратных комплексов в условиях

- информационно-технических воздействий // 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 / Сборник научных 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.
 20. **Жуковский В.И., Жуковская Л.В.** Риск в многокритериальных и конфликтных системах при неопределённости / Под ред. В.С. Молостова. – М.: Едиториал УРСС, 2004.
 21. **Sokolov B.V.** Optimal Structure Reconfiguration in a Complex Technical Systems (CTS): principles, models, methods and algorithms for the CTS Structure Dynamics Control // VI ISTC Scientific Advisory Committee Seminar “Science and Computing”, Moscow, Russia, September 15-17 2003, Abstracts. / ISTC. Moscow, 2003. P. 30-31