

УДК 004.94

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДИКИ ОЦЕНИВАНИЯ АДЕКВАТНОСТИ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫХ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ВЕРОЯТНОСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТОЧНОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ ВСЕХ ЗАДАЧ МОДЕЛИРОВАНИЯ

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

Введение

Моделирование функционирования сложных технических систем (СТС) является одним из основных методов получения информации об этих системах. Широкое распространение для описания процесса функционирования СТС получило имитационное моделирование (ИМ). Это обусловлено сложностью структуры СТС, разнообразием связей между элементами таких систем и нелинейным характером изменения их характеристик.

Результатом ИМ обычно является несколько показателей, отражающих свойства системы. Эффективность получения знаний об исследуемых СТС зависит от качества ИМ, которое определяется совокупностью свойств, позволяющих ей выполнять поставленные задачи. Адекватность является одним из важнейших свойств модели, определяющим возможность получения точных и достоверных знаний о процессе функционирования СТС. Данное обстоятельство обуславливает высокую актуальность вопросов количественного оценивания адекватности ИМ. При этом особую сложность составляет получение количественных оценок адекватности ИМ, выходными параметрами которых являются два и более показателей эффективности функционирования исследуемой СТС. В этой связи в качестве примера можно привести проблему многокритериального оценивания жизнеспособности СТС. Под жизнеспособностью СТС понимается ее комплексное свойство, характеризующее способность СТС на протяжении всего своего жизненного цикла сохранять, оперативно восстанавливать и эффективно реализовать свои основные функции с требуемым качеством в условиях воздействия внешних и/или внутренних возмущающих факторов, приводящих к аварийным, чрезвычайным и катастрофическим ситуациям в природно-экологической, техногенной и социально-экономической сферах. Свойство жизнеспособности является интегративным (много качественным) свойством, включающим в себя – как компоненты – такие частные свойства как надежность, живучесть, устойчивость, катастрофоустойчивость [1-4]. В этом случае разработчики сталкиваются с необходимостью решения многокритериальной задачи выбора варианта построения ИМ СТС на основе оценивания адекватности этой модели и получения для ее оценки некоторого обобщенного показателя.

В настоящее время в качестве наиболее часто встречающегося обобщенного показателя для решения многокритериальных задач используются аддитивные или мультипликативные свертки критериев с весовыми коэффициентами, полученными на основе различных экспертных методов. Однако такой подход имеет высокую долю субъективизма в процессе оценки адекватности ИМ, что негативным образом сказывается на эффективности этого процесса [5].

Была предложена методика оценивания адекватности многокритериальных имитационных моделей, подробно изложенная в [6]. В ее основе лежит новый подход к оцениванию адекватности названных моделей свободный от субъективизма за счет использования в качестве критерия адекватности вероятности обеспечения точности выполнения всех задач, стоящих перед моделируемыми процессами.

Данная методика апробирована для оценивания адекватности ИМ процессов функционирования реальных СТС в ряде организаций РАН, ОПК и МО РФ. Целью настоящей статьи является обсуждение результатов этой апробации.

Сущность и структура применения методики

Сущность методики заключается в использовании нового определения понятия адекватности.

Под адекватностью ИМ будем понимать комплексное свойство модели, характеризующее степень соответствия значений выходных параметров модели и объекта с заданной точностью при требуемой достоверности [7, 8].

В предложенной методике одна из основных идей заключается в представлении выходных параметров ИМ, которые представляют собой показатели эффективности функционирования СТС как системы случайных величин (СВ). В этом контексте мерой адекватности ИМ в соответствии с данным выше определением может выступать вероятность, определяемая следующим образом

$$P\left[r_1(w_1^{Ob}, w_1^M) \leq \varepsilon_1, \dots, r_k(w_k^{Ob}, w_k^M) \leq \varepsilon_k, \dots, r_K(w_K^{Ob}, w_K^M) \leq \varepsilon_K\right] = \int_0^{\varepsilon_1} \dots \int_0^{\varepsilon_K} f(r_1, r_2, \dots, r_K) dr_K \dots dr_1, \quad (1)$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_K$ – положительные величины, отражающие точность модели по каждому рассматриваемому показателю эффективности функционирования СТС;

$r_k(Ob, M) = |w_k^{Ob} - w_k^M|$, $k = \overline{1, K}$ – мера близости между результатами, полученными в процессе моделирования (M) и путем статистического анализа данных об изучаемом объекте (Ob). Для определения $r_k(Ob, M)$ могут быть использованы различные метрики, такие как Евклидово расстояние, косинусное расстояние, метрика Чебышева, Хэмминга, Ли и другие [4];

w_k^{Ob} – значение показателя k -го показателя эффективности функционирования СТС, полученное путем статистического анализа;

w_k^M – значение показателя k -го показателя эффективности функционирования СТС, полученное в результате ИМ;

K – количество показателей эффективности, характеризующих процесс функционирования СТС;

$f(r_1, r_2, \dots, r_K)$ – плотность вероятности расстояний между значениями показателей эффективности функционирования СТС, полученными путем статистического анализа и в результате моделирования.

ИМ процесса функционирования СТС будет адекватной в случае выполнения следующего условия:

$$P\left[r_1(w_1^{Ob}, w_1^M) \leq \varepsilon_1, \dots, r_k(w_k^{Ob}, w_k^M) \leq \varepsilon_k, \dots, r_K(w_K^{Ob}, w_K^M) \leq \varepsilon_K\right] \geq \beta, \quad (2)$$

где $\beta = (1 - \delta)$ – доверительная вероятность, представляющая собой меру достоверности модели;

δ – малая положительная величина.

Вероятность (1) отражает возможность достижения ИМ заданной точности по каждому из рассматриваемых показателей эффективности СТС и, фактически, представляет собой объективную и однозначно интерпретируемую обобщенную оценку адекватности ИМ, лишенную субъективизма в процессе ее получения, а также сохранить физический смысл переменных ε, β .

Обобщенная структурная схема применения методики оценивания адекватности многокритериальных ИМ, включающей в себя семь основных этапов, представлена на рис. 1.

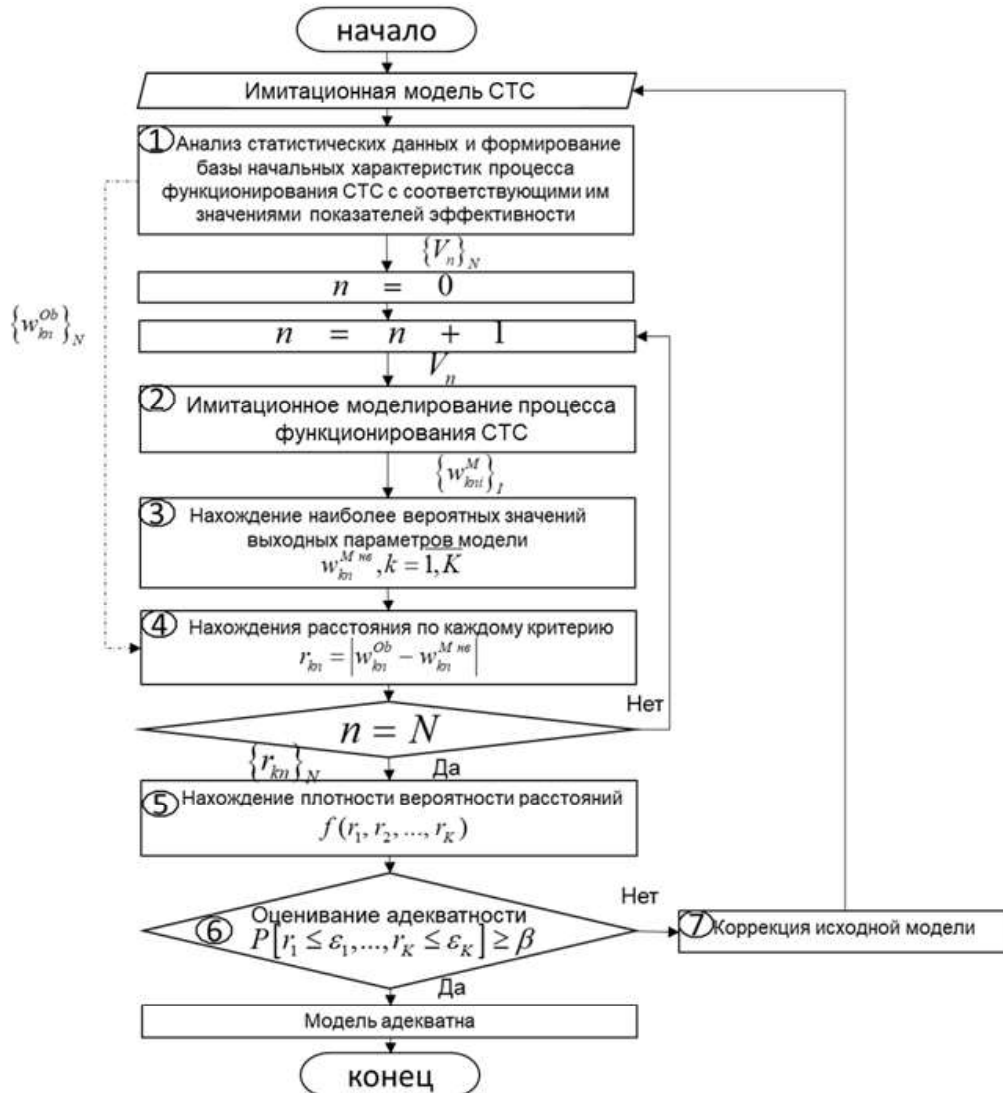


Рис. 1. Структурная схема применения методики оценивания адекватности многокритериальных ИМ

Остановимся на более сложных и трудоемких этапах методики, а именно на этапах нахождения плотности вероятности расстояний $f(r_1, r_2, \dots, r_K)$ и вероятности (1).

Для определения плотности вероятности расстояний $f(r_1, r_2, \dots, r_K)$ был использован метод Парзена-Розенблатта, который является одной из разновидностей ядерной оценки плотности вероятности случайных величин. Сущность данного метода заключается в аппроксимации выборочных данных о системе случайных величин $X = (r_1, r_2, \dots, r_K)$ следующим выражением:

$$f(r_1, \dots, r_k, \dots, r_K) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \prod_{k=1}^K \frac{1}{h_k} Y\left(\frac{r_k - r_{kn}}{h_k}\right), \quad (3)$$

где r_{kn} – реализация k -го расстояния в n -ом опыте;

h_k – ширина пропускания k -го расстояния;

$$Y\left(\frac{r_k - r_{kn}}{h_k}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{r_k - r_{kn}}{h_k}\right)^2} - \text{Гауссова ядерная функция.}$$

Преимуществом данного метода является возможность получения плотности вероятности при любом количестве расстояний K и отсутствие необходимости проводить предварительную проверку независимости этих расстояний.

Определение вероятности (1) заключается в K -кратном интегрировании полученной плотности (3). Для этого используется метод Монте-Карло, заключающийся в вычислении значений подынтегральной функции $f(r_1, r_2, \dots, r_K)$ в случайно выбранных точках I -мерного пространства и определении ее среднего значения, которое затем используется для оценки интеграла путем перемножения этого значения на объем тела, определенного числом этих точек [6].

Новизна данной методики заключается в использовании в качестве обобщенного показателя адекватности многокритериальных моделей – вероятности достижения выполнения всех требований по точности определения каждого рассматриваемого показателя эффективности СТС.

Результаты применения методики

Представленная методика была применена для оценивания адекватности имитационных моделей процесса функционирования сложных организационно-технических систем, эффективность которого представлена двумя показателями. Дадим краткую характеристику этих моделей.

Имитационная модель функционирования системы эксплуатации (СЭ) сложного технологического оборудования [9].

Модель позволяет оценить показатели эффективности функционирования СЭ сложного технологического оборудования: оперативность выполнения всех задач, стоящих перед оборудованием в течение заданного периода эксплуатации, а также стоимость функционирования системы эксплуатации. Для моделирования используется агентный подход. Модель включает в себя описание следующих подпроцессов функционирования СЭ сложного технологического оборудования: выполнение процессов применения оборудования по назначению, техническое обслуживание технологического оборудования, обеспечение материальными средствами, отказы элементов технологического оборудования и восстановление их работоспособного состояния.

Имитационная модель функционирования измерительного комплекса [10].

Целевым предназначением измерительного комплекса является получение телеметрической информации о состоянии различного рода летательных аппаратов. Модель позволяет оценить такие показатели процесса функционирования измерительного комплекса как продолжительной операций восстановления работоспособного состояния оборудования комплекса и время приема телеметрической информации. Имитационная модель функционирования измерительного комплекса имеет трёхуровневую структуру. Третий уровень иерархии представлен моделями станции измерительного комплекса, состоящих из элементов (блоков), управление техническим состоянием которых осуществляться на основе управляющих воздействий. Второй уровень иерархии формируется на основе совокупности имитационных моделей станций измерительного комплекса. Высший уровень иерархии представлен совокупностью моделей видов систем измерительного комплекса, совместно функционирующих в составе комплекса.

Комплексная имитационная модель функционирования подвижной системы обеспечения запасными частями сложных технических систем [11].

Модель позволяет оценить показатели эффективности функционирования подвижной системы обеспечения запасными частями сложных технических систем: готовность каждого элемента этой системы, а также эксплуатационные затраты на процесс ее функционирования. В качестве входных данных модели используются изменяющихся в течение периода эксплуатации параметры подвижной системы обеспечения запасными частями и надежностные характеристик сложной технической системы. Основой имитационной модели является аппарат разностных уравнений, позволяющий учесть динамическую природу параметров подвижной системы обеспечения запасными частями.

Рассмотрим более подробно процесс оценивания адекватности первой имитационной модели с использованием предложенной методики.

Выходными параметрами модели – как уже было отмечено выше – являются: оперативность выполнения всех задач, стоящих перед оборудованием в течение заданного периода эксплуатации – t_n ; стоимость функционирования СЭ оборудования – C .

В качестве входных параметров выступают параметры СЭ, заданные множеством V .

Определены требования к точности и достоверности результатов моделирования:
 $\varepsilon_1 = 1$ ч. – требования к точности определения значений оперативности выполнения всех задач, стоящих перед оборудованием в течение заданного периода эксплуатации;

$\varepsilon_2 = 140000$ у.е. – требования к точности определения значения стоимости функционирования СЭ оборудования;

$\beta = 0,95$ – требования к достоверности выходных результатов моделирования.

На первом этапе методики предполагается, что в результате анализа процесса функционирования реальной СЭ сложного технологического оборудования в течение 20 лет была получена база данных о параметрах СЭ за каждый год и соответствующих им показателях эффективности функционирования этой системы (табл. 1).

Таблица 1. Результаты анализа процесса функционирования СЭ сложного технологического оборудования

№ наблюдения	Множество параметров СЭ	Показатели эффективности процесса функционирования СЭ	
		t_n , ч.	C , у.е.
1	V_1	51,3	8760274
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
20	V_{20}	49	8730288

На этапах два и три для каждого набора входных данных $V_n, n = \overline{1, 20}$ была выполнена тысяча симуляций с использованием разработанной имитационной модели. Анализ этих результатов позволил определить для каждого n наиболее вероятные модельные значения оперативности выполнения всех задач, стоящих перед оборудованием в течение заданного периода эксплуатации и стоимости функционирования СЭ.

На четвертом этапе были получены выборки расстояний $\{r_{kn}\}_{20}$, графическая интерпретация которых представлена на рис. 4.

На четвертом этапе были сформированы массивы данных, отражающие множество расстояний $\{r_{kn}\}_{20}$, визуальное отображение которого представлено на рис. 2.

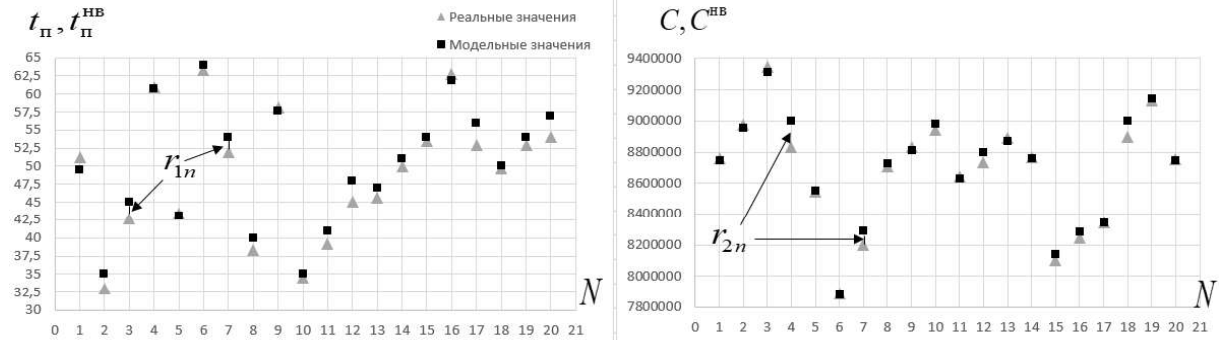


Рис. 2. Графическое отображение множества $\{r_{kn}\}_{20}$

Полученное множество расстояний $\{r_{kn}\}_{20}$ позволило на пятом этапе методики с помощью метода Парзена-Розенблатта получить плотность вероятности $f(r_1, r_2)$, представленную на рис. 3.

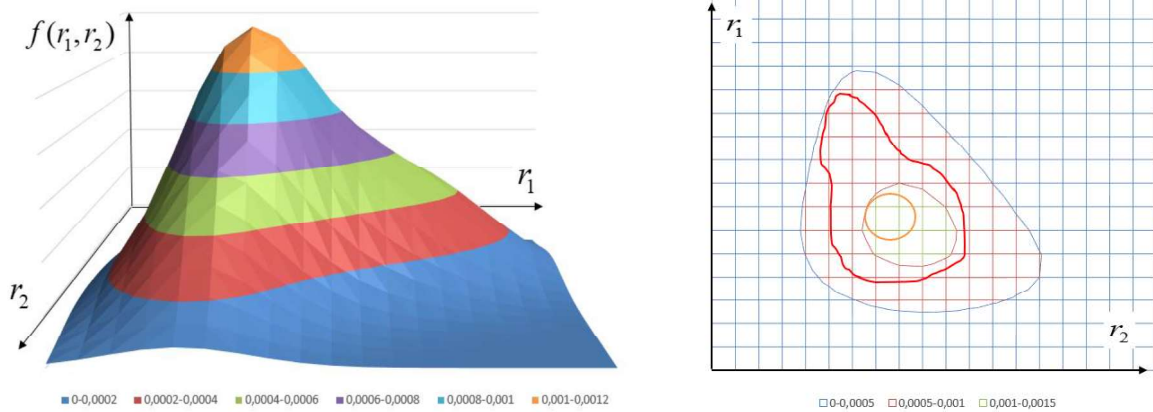


Рис. 3. Плотность вероятности $f(r_1, r_2)$

Далее в результате двухкратного интегрирования по методу Монте-Карло было получено значение вероятности

$$P[r_1 \leq \varepsilon_1, r_2 \leq \varepsilon_2] = 0,974. \quad (4)$$

Так как условие (2) выполняется, то необходимо считать, что разработанная имитационная модель функционирования СЭ сложного технологического оборудования адекватна реальному процессу.

Оценим чувствительность вероятности (1) к изменению требований по точности определения показателей эффективности функционирования СЭ сложного технологического оборудования. Для этого будем повышать требования к точности определения каждого показателя эффективности от 0 до 60 % от первоначально заданных.

На рис. 4 представлены результаты оценивания чувствительности вероятности (1) к изменению требований по точности определения показателей эффективности функционирования СЭ.

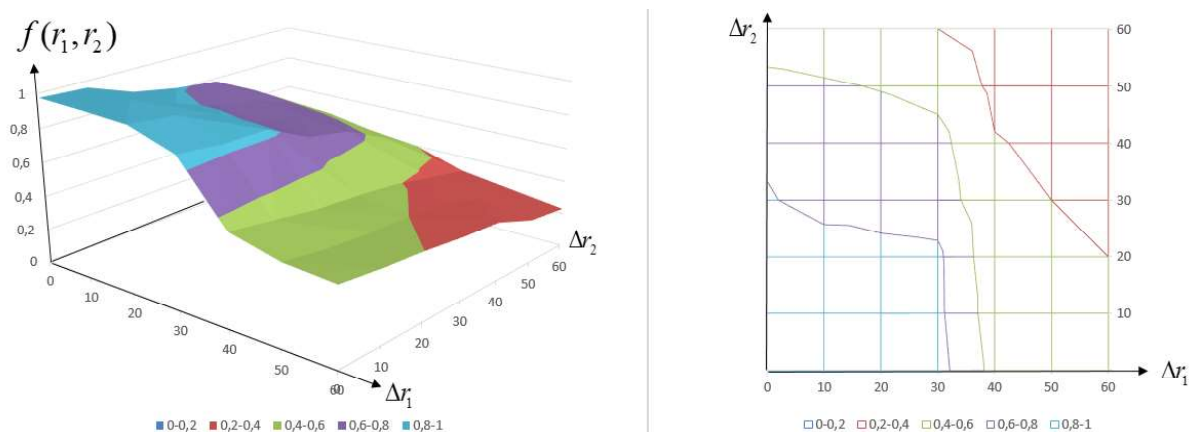


Рис.4. Результаты оценивания чувствительности вероятности (1) к изменению требований по точности определения показателей эффективности функционирования СЭ сложного технологического оборудования

Анализ результатов чувствительности показал, что адекватность исследуемой ИМ более чувствительна к изменению точности определения значений оперативности выполнения всех задач, стоящих перед оборудованием в течение заданного периода эксплуатации. Кроме того, по результатам оценивания чувствительности был сделан вывод, что повышение точности определения обоих показателей эффективности функционирования СЭ на 10 процентов от первоначально заданных требований (соответственно с $\varepsilon_1 = 1$ час до $\varepsilon_1 = 0,83$ часа и с $\varepsilon_2 = 140000$ у.е. до $\varepsilon_2 = 126000$ у.е.) не приводит к снижению адекватности ИМ ($P[r_1 \leq 0,83, r_2 \leq 126000] = 0,951$).

Следовательно, предложенная методика оценивания адекватности многокритериальных имитационных моделей может быть использована также для коррекции первоначально заданных требований к точности и достоверности результатов моделирования.

Соответствующие результаты также были получены при оценивании адекватности оставшихся двух имитационных моделей функционирования сложных организационно-технических систем, что позволило сделать вывод, что предложенная методика может быть использована для оценивания адекватности ИМ функционирования сложных организационно-технических систем с различными показателями эффективности функционирования. Используемый в методике математический аппарат накладывает определенное ограничение на характер этих показателей, выражающееся в необходимости их непрерывности. Для снятия этого ограничения предлагается в дальнейшем усовершенствовать представленную методику путем использования для нахождения вероятности (1) теории смешанных случайных величин и вероятностных смесей. Это позволит оценивать адекватность многокритериальных ИМ функционирования сложных организационно-технических систем независимо от характера показателей эффективности этого процесса (все непрерывные, все дискретные, смесь дискретных и непрерывных).

Представленные выше имитационные модели были доведены до уровня конечных программных продуктов [12-14] и реализованы в эксплуатирующих организациях Министерства обороны РФ и на различных предприятиях оборонно-промышленного комплекса таких как АО «ГКНПЦ имени М.В. Хруничева», АО «ЦЭНКИ». Были получены соответствующие акты реализации, анализ которых подтвердил полученную ранее с помощью методики высокую оценку адекватности представленных ИМ.

Заключение

Анализ результатов применения методики оценивания адекватности многокритериальных имитационных моделей на основе анализа вероятности обеспечения точности выполнения всех задач моделирования позволил сделать следующие выводы:

– методика может быть использована для оценивания адекватности многокритериальных ИМ функционирования сложных организационно-технических систем с различными показателями эффективности функционирования, главным требованием к которым является их непрерывный характер;

– методика оценивания адекватности многокритериальных ИМ может быть использована для коррекции первоначально заданных требований к точности и достоверности результатов моделирования;

– анализ результатов реализации в эксплуатирующих организациях Министерства обороны РФ и на предприятиях оборонно-промышленного комплекса различных имитационных моделей, адекватность которых была оценена с помощью предложенной методики, подтвердил полученные ранее оценки адекватности.

Исследования, представленные в данном докладе, выполнялись при частичной финансовой поддержке госбюджетной темы FFZF-2025-0020.

Литература

1. **Зимин И.Н.** К вопросу о долговечности проектов и формировании жизнеспособных систем // Труды ИСА РАН. 2013. Т. 63. С. 16-29.
2. **Гончаренко В.А., Соколов Б.В.** Комбинированный подход к построению жизнеспособных киберфизических систем в условиях неопределенности // Информатизация и связь №2, 2025. С.40-48.
3. **Кимяев И.Т., Соколов Б.В.** Проблемы и методические подходы к повышению жизнеспособности производственных объектов на основе концепции эволюционного управления // Информационные технологии. Том 29. № 1. 2023. С.23-32.
4. **Кимяев И.Т., Соколов Б.В.** Методология обеспечения жизнеспособности сложного объекта на основе управления его структурной динамикой. // Мехатроника, Автоматизация, управление, 2024. Т.25. №4. С. 167-176.
5. **Вивчарь Р.М.** Методика многокритериального оценивания эффективности функционирования стохастических сложных технических систем / Р.М. Вивчарь, Б.В. Соколов, А.И. Птушкин // Авиакосмические приборостроение, 2022. № 7.
6. **Вивчарь Р.М.** Методика оценивания адекватности статистических имитационных моделей / Р.М. Вивчарь, Б.В. Соколов, А.И. Птушкин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: математика. Механика. Физика, 2023. Т.15. №.3. С. 5-14.
7. **Микони С.В.** Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов: монография / С. В. Микони, Б. В. Соколов, Р. М. Юсупов. М.: РАН, 2018. 314 с.
8. **Ростовцев Ю.Г.** Проблема обеспечения адекватности субъектно-объектного моделирования / Ю.Г. Ростовцев, Р.М. Юсупов // Известия вузов. Приборостроение. 1991. № 7. С. 7-14.
9. **Есипов Е.Н.** Имитационное моделирование функционирования системы эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры как инструмент обоснования параметров технического обслуживания / Е.Н. Есипов, Р.М. Вивчарь, А.С. Кокарев, Д.В. Решетников // Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского, 2023. №688. С. 87–98.
10. **Локтионов В.М.** Модель конфликтных ситуаций, возникающих в процессе функционирования сложных организационно-технических систем / В.М. Локтионов,

- Е.В. Басотин, И.С. Щербина // Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского, 2023. №688. С. 80-86.
11. **Пачин А.В.** Комплексная модель функционирования подвижной системы обеспечения запасными частями сложных технических комплексов / А.В. Пачин, А.С. Кокарев, А.Н. Дьяков // Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского, 2019. №668. С. 266-275.
12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024661134 Российская Федерация. Программный комплекс поддержки принятия решений по управлению сложными техническими системами на основе прецедентов: №2024619357: опубл. (зарег.) 26.04.2024 / В.М. Локтионов, Р.М. Вивчарь, Э.К. Коргачева, И.С. Щербина, А.В. Кривоносов.
13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023662058 Российская Федерация. Имитационная модель функционирования системы эксплуатации сложной технической системы: № 2023660383: опубл. (зарег.) 06.06.2023 / Е.Н. Есипов, Р.М. Вивчарь, А.С. Кокарев, В.М. Локтионов, Т.О. Котляр.
14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019665339 Российская Федерация. Программа моделирования процесса функционирования системы обеспечения запасными частями мобильных сложных технических комплексов: № 2019662586: опубл. (зарег.) 22.11.2019 / А. В. Пачин, А. Н. Дьяков, А. С. Кокарев.