УДК: 004.942

ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НА РАЗЛИЧНЫХ ЭТАПАХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА КОМПЛЕКСОВ ВООРУЖЕНИЯ, ВОЕННОЙ И СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

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

Введение

Одна из главных причин возникновения большого числа аварий и катастроф, происходящих повсеместно в мире, связана с усилением роли факторов сложности в существующих и проектируемых сложных технических системах (СТС), используемых в различных предметных областях. К таким системам относятся изделия, входящие в состав комплексов вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ), объектов топливно-энергетического и транспортно-логистических комплексов и других объектов, которые составляют основу критических инфраструктур любого государства [1]. При этом для комплексов ВВСТ важнейшей задачей была и остается задача синтеза их облика на ранних этапах жизненного цикла (ЖЦ). Проведенные исследования показывают, что субъективные и объективные ошибки, которые могут быть совершены на данном этапе, имеют стратегический характер и связаны с очень большими издержками, которые приходится компенсировать, как правило, на более поздних этапах ЖЦ комплексов ВВСТ (например, этапах создания опытных образцов, серийных образцов).

В этих условиях задача обоснования проектных решений, связанных с синтезом параметров и структур комплексов ВВСТ, обеспечивающих удовлетворение требований к множеству показателей эффективности их функционирования приобретает особую значимость и актуальность. Эта задача принадлежит к классу многокритериальных задач. Такие задачи чаще всего решаются путем перехода от многокритериальной задачи к однокритериальной с помощью свертки частных показателей эффективности к одному обобщенному показателю. Этот подход, например, лежит в основе методов анализа иерархий [5, 2], ELECTRA [3], различных интерактивных методов [4], а также методов, сущность которых описана в [1, 6].

Основным недостатком этих методов, как это отмечено в [1], является то, что преодоление критериальной неопределенности этих задач осуществляется путем введения весовых коэффициентов, характеризующих вклад частных показателей эффективности в обобщенный показатель, физический смысл которого в большинстве случаев не поддается объяснению. Назначение этих весовых коэффициентов носит субъективный характер, ибо осуществляется лицами, принимающими решение (ЛПР), и специалистами в заданных предметных областях, выступающими в роли экспертов, в то время как анализ различных психологических исследований показал, что их предложения часто отличаются от рациональных.

В связи с тем, что значения показателей эффективности функционирования комплексов ВВСТ носят случайный характер, обусловленный влиянием различных факторов неопределенности, то для преодоления названного выше недостатка в данной работе предлагается в качестве обобщенного показателя эффективности проектных решений при создании комплекса ВВСТ использовать вероятность попадания значений каждого из частных показателей эффективности функционирования (ПЭФ) $\pi_k, k=\overline{1,K}$ в соответствующую область заданных требований $\Pi_k, k=\overline{1,K}$:

$$P[\{\pi_1, \pi_2, ..., \pi_K\} \in \Pi^0], \quad (1)$$

где $\tilde{\Pi}$ – K-мерная область допустимых значений ПЭФ.

Аналитическое определение этой вероятности особенно для случая взаимозависимых случайных величин, входящих в систему ПЭФ затруднено [7]. Поэтому предлагается для определения этой вероятности использовать возможности многокритериального имитационного моделирования, позволяющего получить выборку значений ПЭФ, на основе которой восстановить плотность распределения системы этих значений и проинтегрировать ее.

Возможности современных ПЭВМ в настоящее время позволяют решать подобные задачи даже для случая многомерных случайных величин [8]. В настоящей работе разработано алгоритмическое обеспечения решения задачи обоснования проектных решений, позволяющих максимизировать объективную оценку вероятности достижения всех целей функционирования создаваемого комплекса ВВСТ. Данное алгоритмическое обеспечение лишено субъективизма, характерного для существующих методик решения многокритериальных задач, и может быть применено как для независимых, так и зависимых ПЭФ комплексов ВВСТ с различными законами их распределения.

Алгоритмическое обеспечение расчета вероятности достижения целей функционирования комплексов ВВСТ

Алгоритмическое обеспечение расчета вероятности достижения целей функционирования комплекса ВВСТ базируется на применении многокритериального имитационного моделирование процесса ее функционирования. Под многокритериальным имитационным моделированием будем понимать имитационное моделирование, выходными результатами которого являются два и более показателя. Исходными данными для моделирования функционирования комплекса ВВСТ являются:

- вектор $\mathbf{u} = [u_1, u_2, ..., u_N]^{\text{т}}$, элементы которого характеризуют параметры проектного решения;
- вектор $\mathbf{q} = [q_1, q_2, ..., q_M]^{\text{т}}$, элементы которого характеризуют параметры возмущающих воздействий.

Результатами моделирования являются ПЭФ комплекса ВВСТ, представленные в виде множества $\Pi = \{\pi_1, ..., \pi_k, ..., \pi_K\}, k = \overline{1, K}$.

На основе обработки этих можно найти плотность вероятности системы случайных величин $f(\pi_1, ..., \pi_k, ..., \pi_K), k = \overline{1, K}$, последующее K-кратное интегрирование которой позволит определить вероятность удовлетворения заданных требований [9]

$$P = P[\{\pi_1, \pi_2, ..., \pi_K\} \in \tilde{\Pi}] = \underbrace{\int ... \int}_{\tilde{\Pi}} f(\pi_1, ..., \pi_k, ..., \pi_K) d\pi_1 ... d\pi_K . \quad (2)$$

Для решения задачи восстановления плотности вероятности системы случайных величин предлагается использовать один из непараметрических методов, а именно ядерную оценку плотности Парзена-Розенблатта [16, 17, 18]. Этот метод предполагает на основе выборки результатов проведения I вычислительных экспериментов, представляющей собой систему K случайных величин

$$\left\{\pi_1^i, ..., \pi_k^i, ..., \pi_K^i\right\}, i = \overline{1, I}, k = \overline{1, K} , \quad (3)$$

вычисление значений плотности вероятности этой системы с помощью выражения [18]

$$f(\pi_1, ..., \pi_k, ..., \pi_K) = \frac{1}{Ih_k} \sum_{i=1}^{I} \sum_{k=1}^{K} Y(\frac{x_k - x_k^i}{h_k}) , \quad (4)$$

где π_k^i – реализация *k*-ой случайной величины в *i*-ом опыте;

h_k – ширина пропускания *k*-ой случайной величины;

$Y(\frac{\pi_k - \pi_k^i}{h_k})$ – ядерная функция.

В данной работе в качестве ядерной функции использовалась Гауссова ядерная функция

$$Y\,(\frac{\pi_k - \pi_k^i}{h_k}) = \frac{1}{2\pi} e^{-\frac{1}{2}(\frac{\pi_k - \pi_k^i}{h_k})^2}. \quad (5)$$

При этом для определения оптимального значения ширины пропускания использовалось правило Сильвермана [18]:

$$h_k = 0.9 A_k I^{-0.2}, \quad (6)$$

где A_k – вычисляется по алгоритму, приведенному в [18].

В этом случае график плотности вероятности двух случайных величин $\{\pi_1, \pi_2\}$ выглядит следующим образом (рис. 1).

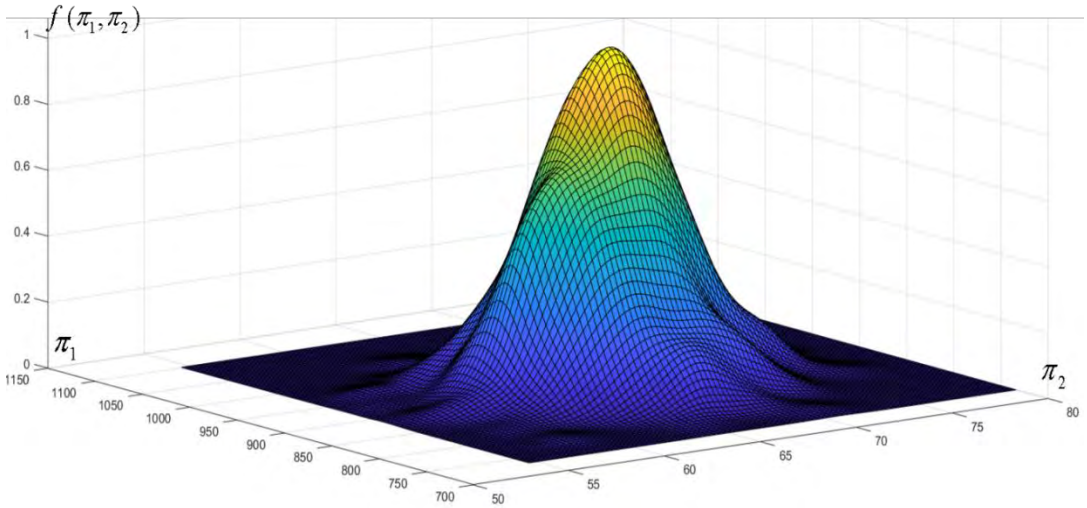

Рис. 1 – График восстановленной плотности вероятности системы двух случайных величин $\{\pi_1, \pi_2\}$ с использованием Гауссовой ядерной функции

Интегрирование восстановленной плотности вероятности системы случайных величин позволит рассчитать вероятность удовлетворения ПЭФ заданным требованиям.

Реализация разработанного алгоритмического обеспечения в среде Mathlab

Для реализации алгоритмического обеспечения расчета вероятности достижения целей функционирования комплексов ВВСТ был использован пакет прикладных программ для задач технических вычислений Mathlab.

Структура процесса его реализации представлена на рис. 2.

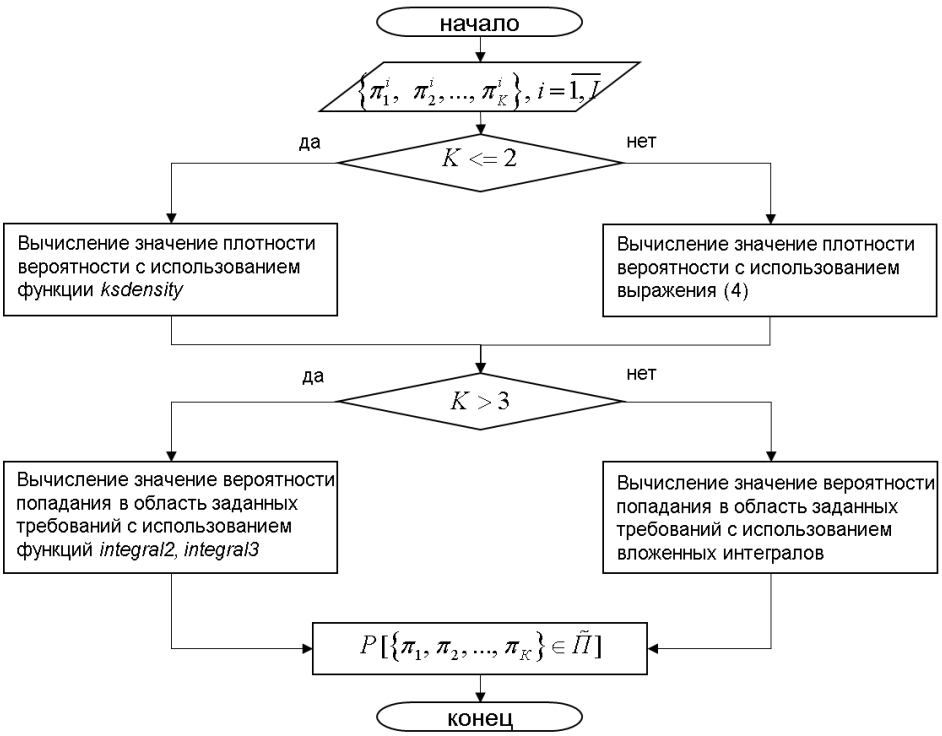

Рис. 2 – Структура процесса реализации алгоритмического обеспечения методики

Входными аргументами для функции *ksdensity* являются:

– выборка значений показателей ПЭФ, полученная по результатам многокритериального имитационного моделирования;

– оптимальное значение ширины пропускания;

– тип ядерной функции. Возможна реализация следующих базовых ядерных функций: треугольная, равномерная, Епанечникова, Гауссова.

Для реализации алгоритмического обеспечения расчета вероятности достижения целей функционирования комплексов ВВСТ необходимы следующие характеристики программного обеспечения: процессор с частотой не ниже 3 ГГц, объем оперативной памяти не менее 4 Гб, жесткий диск объемом не менее 1 Гб. При таких характеристиках среднее время получения результатов не превышает 80 секунд.

Пример обоснования параметров проектных решений по созданию комплексов ВВСТ на основе многокритериального имитационного моделирования

Рассмотрим производственную систему (ПС), целью функционирования которой является своевременный выпуск партии продукции для комплексов ВВСТ при ограничении на стоимость изготовления этой партии. Показателями эффективности функционирования такой системы являются продолжительность изготовления партии продукции T и ее стоимость C. Проектными параметрами решения по созданию такой ПС являются элементы вектора $\mathbf{u} = [u_1, u_2]^{\mathrm{T}}$, где u_1 – суммарное количество специально подготовленного персонала, участвующего в изготовлении продукции; u_2 – производительность одного человека, определяемая его уровнем подготовки и измеряемая количеством изготавливаемых им единиц продукции в час.

Продолжительность и стоимость изготовления партии продукции зависит от величины спроса на продукцию a, которая носит вероятностный характер. Продолжительность изготовления партии продукции определяется выражением

$$T = a / u_1 u_2, \tag{7}$$

а стоимость изготовления выражением

$$C = as / u_2 + r u_1 u_2, \tag{8}$$

s – случайная стоимость часа работы одного человека. Вероятностный характер этой величины обусловлен воздействием различных случайных факторов на рынке труда, а также возможности поощрения персонала за оперативное изготовлении партии продукции;

r – стоимость подготовки одного человека с квалификацией, позволяющей ему производить одну единицу продукции в час.

Примем в качестве закона распределения a и s нормальный закон с параметрами $\left\{\mu^a, \sigma^a\right\}$ и $\left\{\mu^s, \sigma^s\right\}$.

Тогда параметрами возмущающих воздействий будут являться элементы вектора $\mathbf{q}$

$$\mathbf{q} = \left[\ {}^{a}, \sigma^a,\ \ {}^{s}(T), \sigma^s\right]^{\mathrm{T}}, \tag{9}$$

где $\left\{\mu^a, \sigma^a\right\}$ – математическое ожидание и дисперсия величины спроса на продукцию;

$\left\{\mu^s, \sigma^s\right\}$ – математическое ожидание и дисперсия стоимости часа работы одного человека,

$$ {}^{s}(T) = \begin{cases} {}^{s}_{1}, T \le T_1 \\ {}^{s}_{2}, T_1 < T \le T_2 \\ {}^{s}_{3}, T > T_2 \end{cases}. \tag{10}$$

Для проведения многокритериального имитационного моделирования функционирования описанной выше ПС была разработана ее имитационная модель, схема которой представленная на рис. 3.

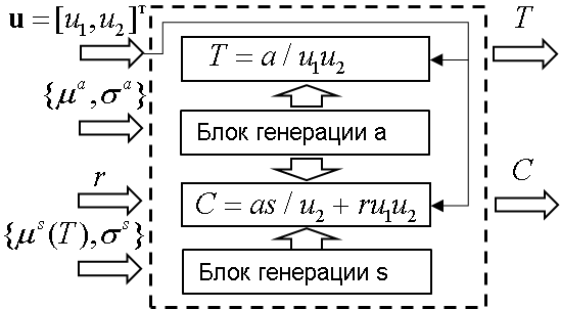

Рис. 3. – Схема имитационной модели функционирования ПС

С использованием имитационной модели функционирования ПС была решена задача определения таких параметров вектора $\mathbf{u}$, лежащих в области допустимых значений , при которых вероятность удовлетворения ПЭФ ПС заданным требованиям ($T^{\text{тр}}$ и $C^{\text{тр}}$) принимает максимальное значение, а именно:

$$\mathbf{u}^* = \arg\max_{\mathbf{u} \in \Delta} P[(0 < T(\mathbf{u}, \mathbf{q}) < T^{\text{тр}}), (0 < C(\mathbf{u}, \mathbf{q}) < C^{\text{тр}})]. \tag{11}$$

Исходные данные для моделирования представлены в таблице 1.

Таблица 1

^{a}, шт	σ^{a}, шт	$^{s}_{1}$, у.е.	$^{s}_{2}$, у.е.	$^{s}_{3}$, у.е.	T_1, ч.	T_2, ч.	σ^{s}, у.е.	r, у.е.		$T^{\text{тр}}$, ч.	$C^{\text{тр}}$, у.е.
2000	150	30	20	15	50	60	2	10	$u_1 = \overline{1,25}$ $u_2 = \overline{1,25}$	70	730

По результатам многокритериального имитационного моделирования была получена зависимость вероятности попадания значений ПЭФ ПС в область заданных требований от проектных параметров, представленная на рис. 4

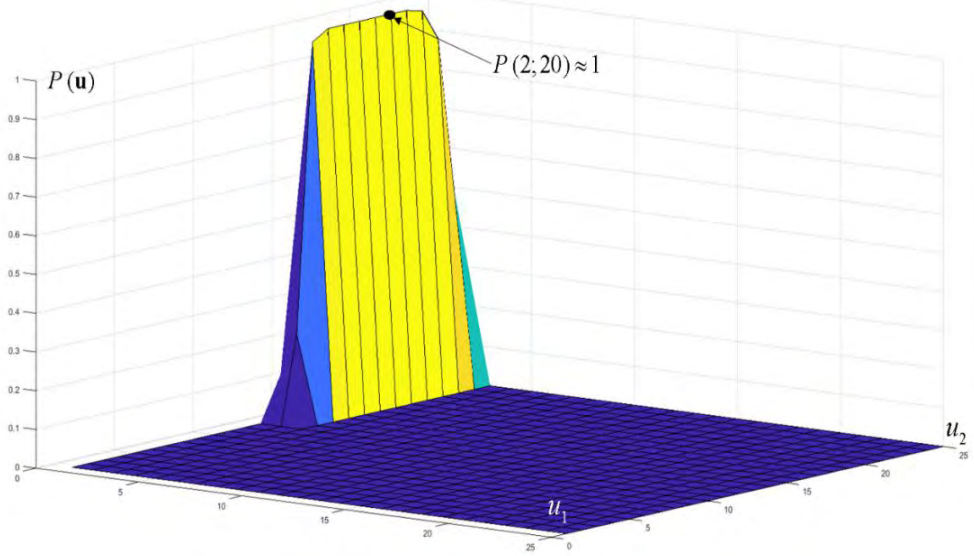

Рис. 4 – Зависимость вероятности попадания значений ПЭФ ПС в область заданных требований от проектных параметров

Из рисунка 4 видно, что удается получить множество решений:

$$W=\{(2;16), (2;17), (2;18), (2;19), (2;20), (2;21)\}, \quad (12)$$

для которых значение вероятности попадания значений ПЭФ ПС в область заданных требований равняется приблизительно 1. Возможной причиной этого являются слишком широкий диапазон возможных значений ПЭФ ПС.

Для проверки этого предположения были получены плотности вероятности T и C при указанных выше вариантах проектных параметров, рассматривая ПЭФ не как систему случайных величин, а как отдельные случайные величины. На рис. 5 и 6 представлены эти плотности.

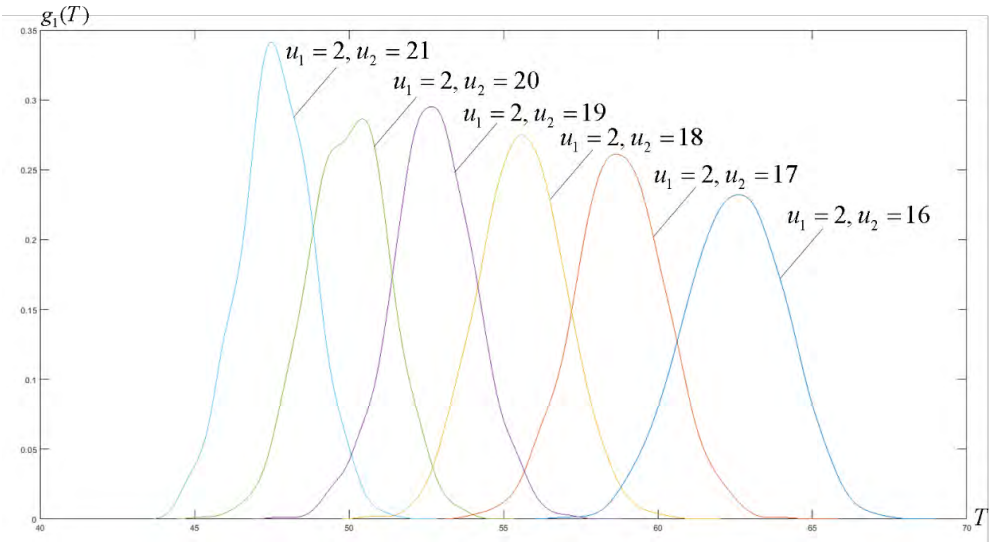

Рис. 5 – Графики плотностей вероятности продолжительности изготовления партии продукции $g_1(T)$ при различных проектных решениях, принадлежащих множеству (12)

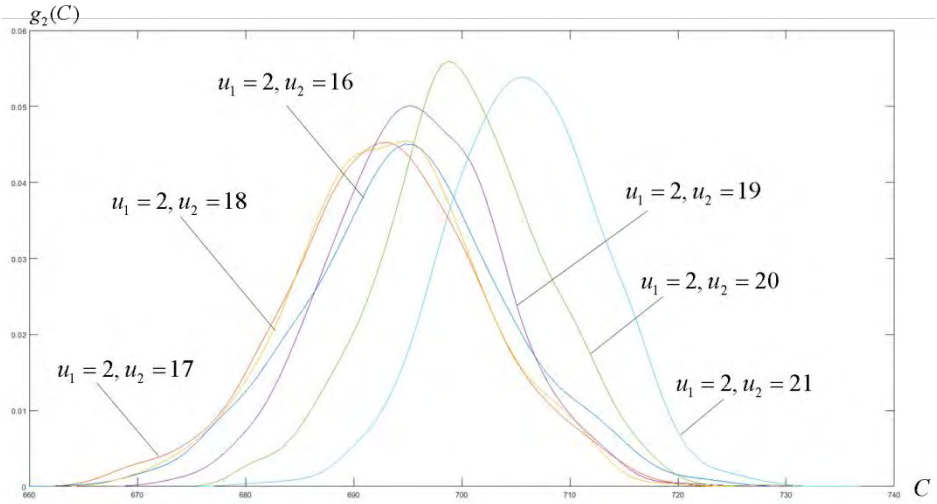

Рис. 6 – Графики плотностей вероятности стоимости изготовления партии продукции $g_2(C)$ при различных проектных решениях, принадлежащих множеству (12)

Представленные графики позволяют сделать вывод, что существует ряд решений, обладающих высокой вероятностью удовлетворения требований к ПЭФ ПС, но при этом характеризующихся большей продолжительностью изготовления партии продукции. Проведенные расчеты подтверждают предложенную гипотезу о некорректности заданных требований к ПЭФ ПС. Коррекция этих требований позволит получать только одно решение, характеризующееся такой же высокой вероятностью достижения требуемых ПЭФ и возможностями снижения продолжительности изготовления партии продукции и/или ее стоимости.

Рассмотренный пример позволяет проиллюстрировать возможность изменения требований к продолжительности изготовления партии продукции с 70 ч. на 53 ч. ($T_{\text{А}}^{\text{тр}} = 53$ ч.) при сохранении высокой вероятности удовлетворения требований к ПЭФ (случай А), что показано на рис. 7.

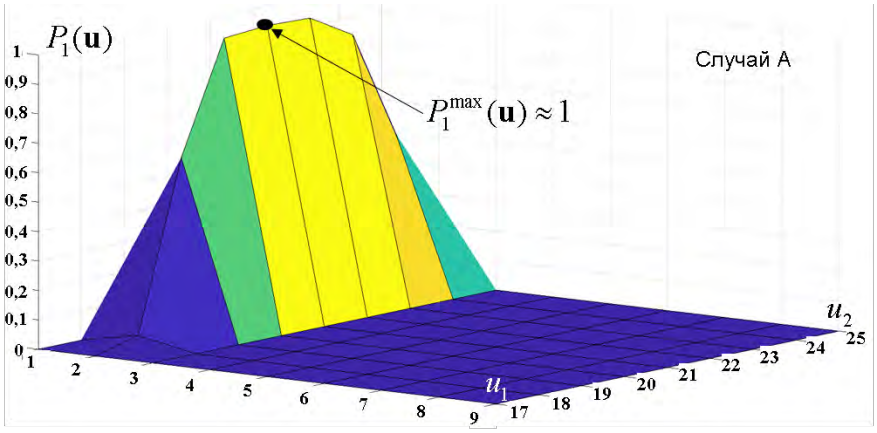

Рис. 7 – Иллюстрация возможности коррекции требований к ПЭФ ПС при сохранении высокой вероятности их удовлетворения

Таким образом, можно сделать вывод, что предложенная методика позволяет не только обосновать проектные параметры ПС с точки достижения всех ее целей функционирования, но и расширяет аналитические возможности для обоснования проектных решений.

Еще одним достоинством предложенной методики является возможность исследования устойчивости проектных решений к изменению возмущающих воздействий. На рис. 8 представлена зависимость вероятности попадания значений ПЭФ ПС в область заданных требований от проектных параметров при увеличении среднего числа деталей в партии и его СКО (случай Б) на 100 шт. и 50 шт. соответственно по сравнению со случаем А (см. табл. 1).

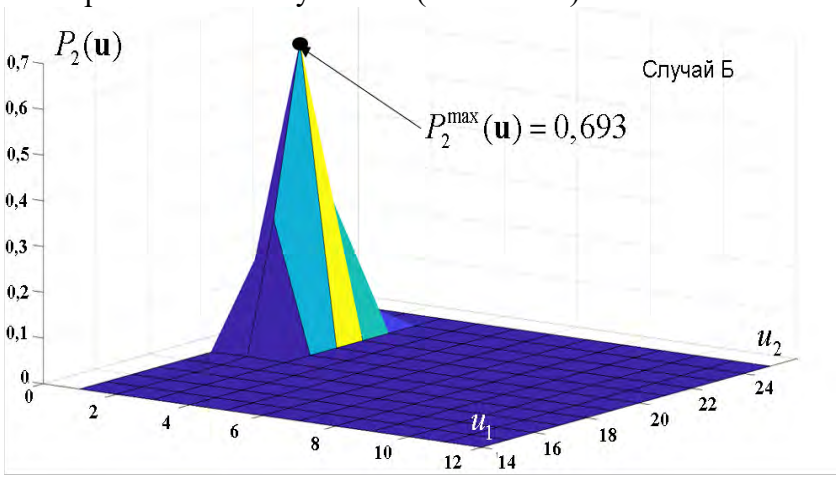

Рис. 8 – Зависимость вероятности попадания значений ПЭФ ПС в область заданных требований от проектных параметров для случая Б

Из рисунка видно, что максимальное значение вероятности попадания в область требуемых ПЭФ ПС значительно ниже ($P_2^{\max}(\mathbf{u}) = 0,693$), чем в случае А. Поэтому рассмотрим возможность расширения диапазона требований к ПЭФ ПС (случай В), позволяющего получить решение, характеризующееся такой же высокой вероятностью достижения всех целей ($P_3(\mathbf{u}) \approx 1$) как и в исходном случае. На рис. 9 проиллюстрирована такая возможность при условии, что требования к продолжительности изготовления партии продукции увеличивается с 53 ч. до 63 ч.

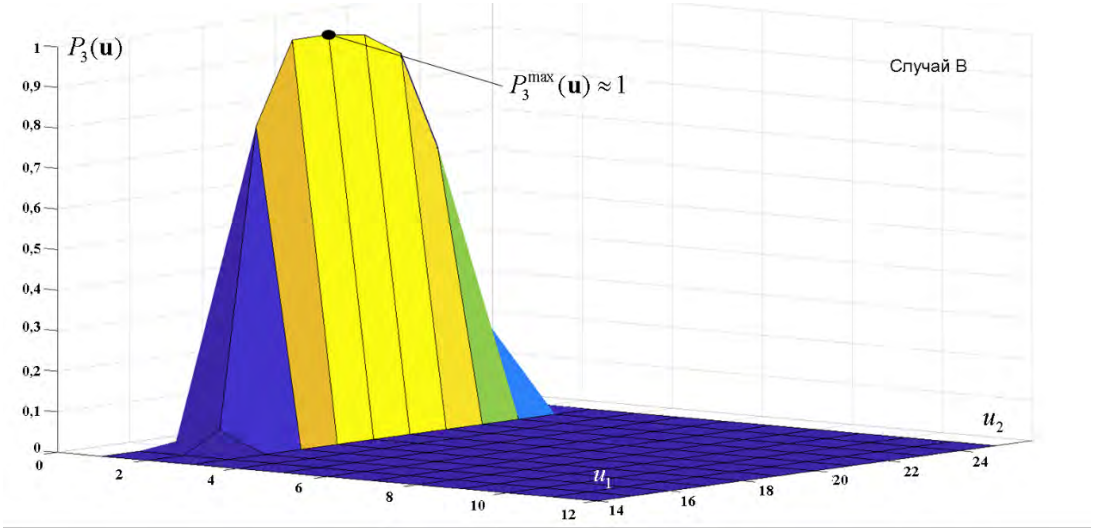

Рис. 9 – Иллюстрация возможности повышения устойчивости проектного решения к изменению возмущающих воздействий за счет расширения диапазона допустимых значений требований к ПЭФ

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что разработанное алгоритмическое обеспечение может быть применено для обоснования требований к ПЭФ ПС с учетом обеспечения возможности нахождения решений по созданию ПС, обеспечивающих эти требования и обладающих устойчивостью к изменению возмущающих воздействий, возникающих в процессе функционирования ПС.

Выводы

По результатам исследований можно сделать следующие выводы:

– использование в качестве скалярного обобщенного показателя эффективности функционирования стохастических СТС вероятности достижения его целей при обосновании решений по созданию таких систем позволяет полностью избавиться от существующего субъективизма в процессе преодоления критериальной неопределенности;

– для определения этой вероятности необходимо реализовать многократное интегрирование плотности распределения системы случайных величин, представленной показателями эффективности функционирования СТС;

– для преодоления сложности восстановления плотности вероятности системы зависимых случайных величин необходимо применение многокритериального имитационного моделирования функционирования СТС;

– для аппроксимации результатов многокритериального имитационного моделирования и восстановления плотности распределения целесообразно использовать ядерную оценку плотности.

Полученные результаты были апробированы при решении задач многокритериального оценивания эффективности функционирования ВВСТ на предприятиях оборонно-промышленного комплекса [10, 20, 21].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00767.

Литература

1. **Соколов Б.В.** Военная системотехника и системный анализ. СПб.: ВИКУ им. А. Ф. Можайского, 1999. 496 с.
2. **Титова А.А.** Исследование многокритериальной задачи принятия решения о выборе франшизы для инвестирования при помощи метода FUZZY VICOR // Инженерный вестник Дона, 2021. № 1 (73). С. 87-94.
3. **Нефедов А.С.** Сравнительный анализ метода ELECTRE III и метода анализа иерархий при решении многокритериальных задач // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки, 2018. Т. 2. С.9-15.
4. **Шварц Д.Т.** Интерактивные методы решения задачи многокритериальной оптимизации. Обзор // Наука и образование МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. № 4. С.245-264.
5. **Саати Т., Кернс К.** Аналитическое планирование. Организация систем. М.: Радио и связь, 1991. 224 с.
6. **Макаров О.Ю., Цветков В.В.** Методы многокритериальной оценки // Вестник Воронежского государственного технического университета, 2009. № 11. Т. 5. С. 133-135.
7. **Вентцель Е.С.** Теория вероятностей. М.: Физматгиз, 1969. 552 с.
8. Высокопроизводительные вычисления: проблемы и решения // HABR.COM URL: https://habr.com/ru/post/117021.html (дата обращения: 08.06.2022).
9. **Смирнов Н.В., Дунин-Барсковский И.В.** Краткий курс математической статистики для технических приложений. М.: Физматгиз, 1959. 436 с.
10. **Вивчарь Р.М., Решетников Д.В.** Оценивание влияния параметров системы эксплуатации технологического оборудования ракетно-космического комплекса на вероятность выполнения технологической операции за заданное время // Труды ВКА имени А.Ф. Можайского. 2019. Вып. №668. С. 197-207.
11. **Маслаков М.Л., Терновая А.К.** Построение плотности распределения вероятностей КАМ сигналов // Цифровая обработка сигналов. 2021. № 3. С. 36-40.
12. **Акимов С.С., Трипкош В.А.** Коэффициенты корректировки метода гистограмм для определения законов распределения вероятности // Научно-технический вестник Поволжья. 2021. № 10. С. 15-17.
13. **Сызранцев В.Н., Невелев Я.П., Голофаст С.Л.** Адаптивные методы восстановления функции плотности распределения вероятности // Известия ВУЗов. Машиностроение. 2006. № 12. С. 3-11.
14. **Шепель В.Н.** Алгоритм определения эмпирической функции плотности $\hat{f}^{(n)}(x)$ по выборке из генеральной совокупности // Современные информационные технологии в науке и практике. Материалы VIII всероссийской научно-технической конференции (с международным участием). Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, 2009. С. 224-226.
15. **Banon G.** Sur unestimateur non parametrique de la densite de probabilite // Rev. Statist. Appl. 1976. Volume 24. № 4. P. 61-73.
16. **Давыдов В.С.** Распознавание зарождающихся дефектов в узлах корабельных механизмов в результате вибродиагностирования на основе оптимальных решающих правил // Дефектоскопия. 2019. № 3. С. 19-24.
17. **Поршенев С.В., Копосов А.С.** Использование аппроксимации Розенблатта-Парзена для восстановления функции распределения непрерывной случайной величины с ограниченным одномодальным законом распределения // Политематический сетевой

электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2013. № 92. С. 1-27.
18. **Parzen E.** On estimation of a probability density function and mode // Ann. Math. Statist. 1962. 33(3). P. 1065-1076.
19. **Дьяков А.Н., Кокарев А.С., Пачин А.В., Поляков С.А.** Методика обоснования рациональных параметров подвижной системы обеспечения запасными частями мобильных сложных технических комплексов // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 10-1. С. 50-55.
20. **Охтилев М.Ю., Соколов Б.В. Юсупов Р.М., Стыскин М.М., Джао В.Ю-Д.** Концепция и технологии проактивного управления жизненным циклом изделий // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2020. Том: 63. Номер: 2, С. 158-163.
21. **Потрясаев С.А., Ронжин А.Л., Соколов Б.В., Джао В.Ю.-Д, Степанов П.В., Стыскин М.М.** Полимодельный комплекс мобильной сервисной системы, предназначенной для обслуживания воздушных судов // Информатизация и связь, 2020, Номер 6, С. 113-118.