

**Формализация процесса разработки
бортовой радиолокационной станции
фазовой траекторией в допустимой области
значений с учетом неопределенности данных
о технической готовности ее компонентов
и порядке финансирования**

Решается актуальная задача эффективного управления процессом разработки авиационной бортовой радиолокационной станции мониторинга. Проведен анализ особенностей данного процесса в условиях неопределенности данных о технической готовности ее компонент с учетом стохастического характера порядка финансирования работ и продолжительности жизненного цикла разработки. Выявлены преимущества и недостатки существующих методов оценки процесса разработки бортовой радиолокационной станции как сложной системы с использованием различных вариантов рисков. Выдвинута и формализована гипотеза о возможности целесообразности применения управления финансовыми воздействиями на процесс разработки для своевременного принятия организационных и конструкторских решений по корректировке разработки для безусловного выполнения требований заказчика и директивных сроков. Исследована эффективность модифицированного по результатам моделирования, разработанного научной школой академика Ю.В. Шокина показателя риск-анализа, учитывающего не только директивные сроки разработки и текущую техническую готовность компонент радиолокационной станции, но и объем и время проведения необходимого финансирования, обеспечивающего нахождение процесса разработки в области с допустимым риском.

И.В. ТРУНДАЕВ,
аспирант

(Финансовый университет,
Москва),

В.А. ПАНКРАТОВ,
канд. техн. наук

(НПОДАР, Москва),

С.П. СОЛЯНИКОВА,
канд. экон. наук,

С.С. МИХАЙЛОВА,
д-р экон. наук

(Финансовый университет,
Москва)

ivan_t98@mail.ru

Экспертные системы, нечеткое управление, радар

Авиационные бортовые радиолокационные станции мониторинга – важнейшие информационные средства для обнаружения воздушных, морских и наземных объектов методом радиолокации, определения их дальности, размерности и вычисления параметров движения [1, 2]. Характер решаемых задач и требования к функциональным возможностям обуславливают облик бортовых радиолокационных станций как сложных наукоемких изделий радиоэлектронной промышленности, интегрирующих новейшие достижения в области информационных технологий радиоэлектронных систем. Создание бортовых радиолокационных станций нового поколения, а также модернизация существующих образцов требуют высокого уровня организации их проектирования и производства. Это обусловлено высокой сложностью как самого изделия бортовой радиолокационной станции, так и производственного процесса его создания. Возникает необходимость применения новых инновационных технологических решений конструирования аппаратно-программных комплексов бортовых радиолокационных станций, а также совершенствования организационных методов управления на всех этапах жизненного цикла. При этом управление процессом создания бортовых радиолокационных станций нового поколения должно основываться, с одной стороны, на актуальных и точных оценках эффективности разработки отдельных компонентов и бортовых радиолокационных станций в целом, с другой стороны, на математически обоснованных методиках оптимального выбора состава и структуры бортовой радиолокационной станции при ограничениях на общую стоимость и время ее создания.

Существующие модели и методы управления процессом создания бортовой радиолокационной станции, как правило, используют вероятностные подходы, например, представляя длительность каждого этапа или расходы как случайные величины с заданными распределениями вероятностей (марковские процессы, мартингалы). В работах [3–5] в качестве универсального показателя эффективности создания бортовой радиолокационной станции рассматривается показатель риска, под которым понимается веро-

ятностная мера отклонения характеристик создаваемой бортовой радиолокационной станции от заданных в техническом задании значений, учитывающий текущие характеристики производственного процесса создания бортовой радиолокационной станции, прежде всего, ее технологическую готовность, а также финансовые и временные ограничения при создании бортовой радиолокационной станции.

Однако определение оптимального варианта состава бортовой радиолокационной станции, а также выбор применяемых конструктивно-технических решений рассматривается только с точки зрения готовности составных частей к их применению в процессе разработки бортовой радиолокационной станции. При этом не учитывается достигаемый уровень тактико-технических характеристик, что не позволяет достоверно судить о выполнении требований технического задания в целом, особенно на этапах проектирования. Указанный недостаток может привести к принятию неоптимальных решений: некорректный выбор технологических и технических параметров компонентов бортовой радиолокационной станции повышает риск необходимости перепроектирования отдельных конструктивных узлов, что, в свою очередь, может существенно увеличить сроки разработки радиолокационной станции.

В работах [6, 7] предложен комплексный показатель технико-экономической эффективности создания радиолокационной станции контроля космического пространства, определяемый в трехмерном пространстве «технические характеристики – стоимость – время». Данный показатель учитывает особенности создания радиолокационных станций контроля космического пространства, а также выполнение ими целевых задач в процессе применения по назначению. Он обеспечивает обоснованный выбор технических и технологических решений при создании радиолокационных станций контроля космического пространства, а также может быть использован для определения модернизационного потенциала существующих радиолокационных станций контроля космического пространства. Вместе с тем указанный показатель не предусматривает возможность проведения оперативной оценки технической реализуемости компонент с учетом неопределенности данных.

В работах [8, 9] предложен подход к формированию оптимального облика перспективной радиолокационной станции контроля космического пространства на основе минимизации стоимости изготовления аппаратуры с использованием поискового потенциала. Показано, что данный показатель представляет собой характеристику, позволяющую комплексно оценивать степень выполнения критически значимых тактико-технических характеристик. Таким образом, поисковый потенциал может выступать в качестве обобщенного критерия для обоснования конструктивно-технических решений радиолокационных станций на этапе концептуального проектирования. Однако эффективное применение метода Гермейера в значительной степени ограничено качеством исходных данных, которые на ранних стадиях разработки, как правило, основаны на недостоверных экспертных оценках.

Указанные ограничения стали предметом исследования научной школы академика Ю.И. Шокина. В работе [10] отмечена принципиальная сложность своевременного создания современных технических систем с требуемыми характеристиками в связи с «фундаментальной неопределенностью будущего». Кроме того, ввиду стремительного развития цифровых технологий значительно увеличиваются объемы информации, что снижает эффективность классических методов принятия решений на основе прогнозирования рисков.

В трудах Ю.И. Шокина предложена модель риска, основанная на применении цифровых двойников, которая, по мнению автора, обеспечивает возможность предиктивного прогностического риск-анализа и, кроме того, имеет преимущества. Используется различная информация о ходе разработки для каждого из этапов, таким образом, риск не является статической величиной, информация о системе меняется. При оценке риска рассматриваются события с малыми вероятностями, которые вместе с тем могут привести к катастрофическим последствиям. Применение цифровых двойников позволяет производить оперативную оценку состояния системы.

Однако сложность и стоимость внедрения цифровых двойников в условиях недостаточных данных, например, на этапе эскизно-технического проектирования для проведения количественного анализа приводит к низкой точности в оценке показателей эффективности процесса разработки и, соответственно, к

значительным финансовым потерям, а в ряде случаев и срывам контрактов в целом. Кроме того, вследствие замены хотя бы одного компонента в иерархической структуре бортовой радиолокационной станции часто возникает необходимость сбора и обработки значительных объемов данных для проведения необходимого комплекса работ по валидации цифровых двойников вновь введенного компонента и цифрового двойника в целом.

Таким образом, в настоящее время существуют объективные предпосылки для дальнейшего совершенствования методов риск-анализа, направленных на разработку научно-методического инженерно-экономического аппарата, обеспечивающего адаптивное управление процессом создания бортовой радиолокационной станции в условиях стохастических рисков. Ключевым элементом такого подхода является возможность своевременной и точной корректировки порядка финансирования с целью компенсации прогнозируемых угроз.

Ситуация с неопределенностью процесса разработки осложняется также неопределенностью в экономико-финансовой области (проблемы с логистикой, изменение цен, ставок), а также по причине возникновения непредвиденных расходов или изменения кредитной политики и ситуации спроса-предложения на рынке оборудования и необходимых компонент. С течением времени неопределенность, присущая процессу разработки, уменьшает свою энтропию. Однако на начальных этапах разработки бортовой радиолокационной станции уровень неопределенности в отношении технического состояния и объема достигает максимума. В условиях отсутствия обоснованной и оперативной реакции со стороны заказчика и разработчика на новые непредвиденные возмущения существует высокая вероятность выхода процесса разработки бортовой радиолокационной станции за пределы утвержденного директивного плана-графика.

Для формализации задачи адаптивного управления процессом разработки бортовой радиолокационной станции, включающей оптимизацию контроля, предиктивную оценку угроз и разработку механизмов целевого финансирования для предотвращения или смягчения отклонений показателей бортовой радиолокационной станции, примем следующие исходные предпосылки.

Заданы некоторые основные (технические или финансовые) показатели, которые описываются комплексными или отдельными величинами $H = \{h_1, h_2, \dots, h_m\}$, в которых могут присутствовать некоторые ошибки или потери $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_m$, где m – количество заданных характеристик. Пространство всевозможных значений параметров назовем Ω .

Известна структурно-логическая схема бортовой радиолокационной станции и взаимодействие ее компонент. Существуют дополнительные управляемые расходы $u(t)$ на поддержание некоторого из h_1, h_2, \dots, h_m выбранного параметра в требуемом для момента t состоянии, а также ограничения на минимальные сроки (время) нормальной работы системы без остановок T , ограничения по максимуму на привлеченные для этого расходы C и ограничения, описываемые функциями, по допустимым значениям $H_0 = \{f_1(H), f_2(H), \dots, f_n(H)\}$ в рамках технического задания, где n – количество заданных ограничений.

В каждый момент времени состояние разработки бортовой радиолокационной станции можно описать движением точки по некоторой траектории в пространстве Ω , представляющей собой эволюцию этих состояний во времени. Дополнительной характеристикой траектории выступают совокупные объемы спланированного и дополнительного финансирования $\sum_0^{T_{\text{ком}}} u(t) dt$ и время существования $T_{\text{ком}}$.

Необходимо построить оценку соответствия ограничениям H_0 всех значений H на траектории комплекса, а также (меняя управление $u(t)$) сохранить траекторию в области допустимых ограничений H_0 так, чтобы для времени существования комплекса $T_{\text{ком}}$ выполнялось $T_{\text{ком}} \geq T$, а для суммарных

дополнительных финансовых воздействий $\sum_0^{T_{\text{ком}}} u(t) dt \leq C$.

Положим, что процесс разработки радиолокационной станции можно представить следующей системой из показателей H (примем их для удобства x, y, z):

$$\begin{cases} \dot{x} = (\alpha - \beta y)xz - \varepsilon; \\ \dot{y} = (-\gamma + \delta x)yz + u; \\ \dot{z} = \zeta xy - \eta z, \end{cases} \quad (1)$$

где $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \zeta, \eta$ – положительные постоянные; x – некоторый выбранный ключевой технический показатель радиолокационной станции; y – некоторый финансовый показатель; z – функциональные характеристики радиолокационной станции; ε – неучтенный коэффициент потери из-за возникающей неопределенности в работе радиолокационной станции; u – дополнительные финансовые воздействия.

Положим, что ε меняет свое значение через промежуток времени Δt_ε . Будем считать, что данные по ε получены из нормального распределения $N(\mu, \sigma^2)$. Пусть u меняет свои значения через Δt_u .

Представим процесс модернизации как движение точки в фазовом пространстве по кривой (образованной состояниями системы (1)), которая демонстрирует эволюцию характеристик радиолокационной станции. В каждой точке пространства состояний существует вектор фазовой скорости, характеризующий темп прохождения радиолокационной станцией текущей стадии жизненного цикла. Этот вектор зависит исключительно от текущего положения точки (состояния системы). Набор таких векторов определяет дифференциальное уравнение, моделирующее динамику разработки. В дальнейшем при определении показателя риска указанная траектория будет играть ключевую роль.

Как было отмечено в постановке задачи, областью всевозможных состояний показателей бортовой радиолокационной станции будем считать область $\Omega = \{(x, y, z) \mid x, y, z \in \mathbb{R} > 0\}$.

При отсутствии параметров u и ε (т. е. при их нулевых значениях) траектория системы (1) приобретает замкнутый (и устойчивый по одному направлению) характер, будут образовываться циклы. В таком случае данную кривую целесообразно интерпретировать как «планируемую траекторию», когда на этапе разработки учтены не все факторы. В случае когда ε не является нулевой величиной, что естественно для следующих этапов разработки, планируемая траектория может отклониться и прийти в некоторую недопустимую область, т. е. в системе при выполнении определенных условий может возникнуть неустойчивое положение «седло-фокус» (имеет одномерное устойчивое и двумерное неустойчивое многообразие (рис. 1, а)). Таким образом, фазовая траектория процесса разработки бортовой радиолокационной станции может выйти в недопустимую область за конечное время (рис. 1, б), что приведет к срыву сроков сдачи объекта или остановке во время функционирования (рис. 1, в).

Положим, что в конкретный момент времени оценить риски, т. е. возможность выхода за рамки технического задания, можно по некоторому числовому значению ρ оценки нахождения в допустимой области H_0 .

Положим, что весь исследуемый процесс в момент времени T можно в целом описать на основе множества

$$S = \left\{ T, \sum_0^T u(t)dt, \int_0^T \rho(t)dt \right\}, \quad (2)$$

где T – временной интервал, в течение которого осуществляется наблюдение за динамикой системы; $\sum_0^T u(t)dt$ – агрегированные сопутствующие расходы; $\int_0^T \rho(t)dt$ – суммарная оценка риска, т. е. степень положения системы в допустимой области H_0 .

Известно несколько оценок параметрических рисков-отказов с «геометрической» точки зрения, в частности, с использованием полей допуска [11].

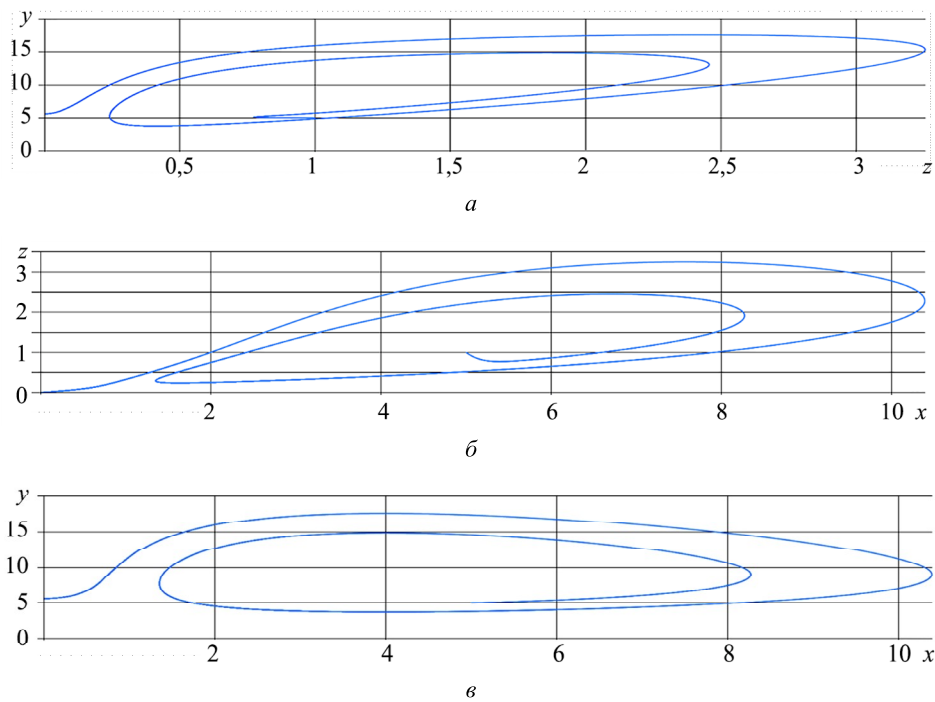


Рис. 1

Цифровой двойник в риск-анализе, формализуемый как пятимерная конструкция (физический объект, виртуальная модель объекта, сервисы, данные, связи) [12], представляет собой интегрированное физическое и вероятностное моделирование объекта, отражающее его жизненный цикл на основе данных и моделей. Эта комплексность позволяет оперативно оценивать риски, например, через вероятность возникновения опасных событий, вызванных критическими отклонениями параметров виртуальной модели в заданные моменты времени.

Геометрически это можно было бы выразить в фазовом пространстве параметров виртуальной модели в виде допустимой области H_0 (условно в пространстве с малым риском), ограниченной требованиями технического задания. Выход за границы данной области трактуется как максимальный риск. Несмотря на неоспоримый потенциал цифрового двойника в задачах риск-анализа и оптимизации компоновки, его практическое применение для количественной оценки эффективности на ранних стадиях проекта (например, эскизного проектирования) сопряжено с фундаментальными проблемами – высокой стоимостью и сложностью создания адекватных моделей в условиях дефицита данных.

В качестве иллюстрации построим для виртуальной траектории область допустимых значений, используя известные методы, не предполагающие полной и детальной информации для проведения более простого и низкочастотного риск-анализ. Пусть есть некоторый выбранный параметр θ_i , который не должен выходить за определенные границы, т. е. будем считать, что оборудование будет адекватно работать, только если $\theta_i \in (\theta_{i_{\min}}, \theta_{i_{\max}})$. В рамках $(\theta_{i_{\min}}, \theta_{i_{\max}})$, а также большего интервала может быть определена некоторая функция, показывающая меру соответствия параметра определенному значению (например, вероятность или функция принадлежности). При нескольких параметрах может образовываться многомерная область неопределенности (эллипс или эллипсоид (рис. 2)).

Построим такую область неопределенности для трех ключевых величин x, y, z в уравнениях (1) (x – некоторый выбранный ключевой технический показатель бортовой радиолокационной станции; y – некоторый финансовый показатель; z – функциональные характеристики бортовой радиолокационной станции). При этом проектную кривую будем считать условно планируемой траекторией разработки, для нее и зададим указанную область. В случае когда ε не является нулевой величиной, траектория может отклониться и войти в недопустимую область.



Рис. 2

Построим эллипсоид неопределенности между выбранными техническими параметрами и некоторым финансовым показателем, что в дальнейшем позволит оперативно определять опасное положение траектории до момента отказа компонент, остановки функционирования и срыва графика, что приведет к большим финансовым потерям. Избежать этого в конкретный просматриваемый промежуток возможно благодаря решению о краткосрочных финансовых воздействиях для корректировки траектории, описывающей связь между определенными показателями.

Представление эллипсоида неопределенности показано на рис. 3. Сплошная кривая представляет собой фазовую проекционную кривую (набор точек из наиболее планируемых значений трех показателей во времени), пунктирная – фазовую траекторию комплекса (набор точек из реальных значений трех показателей во времени) при наличии неучтенных факторов.

Рис. 3, а иллюстрирует выход за допустимую границу пунктирной кривой (фазовой траектории комплекса), что считается недопустимым по техническому заданию, в дальнейшем она уходит на одну из осей (рис. 3, б), что приводит к остановке вообще развития всей системы (что может означать сбой и полную остановку всего комплекса в реальности). На основе данного подхода (только на известных границах параметров) не всегда получается построить приемлемое управление.

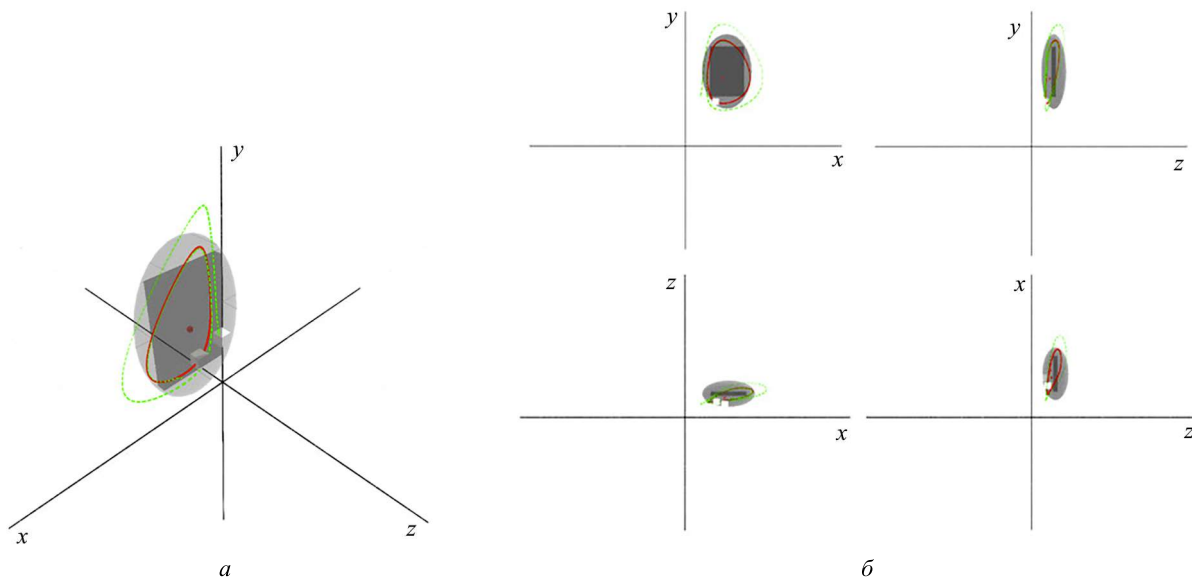


Рис. 3

Существующий подход, основанный исключительно на заданных граничных значениях параметров, часто не обеспечивает приемлемый контроль. Это связано с необходимостью одновременного мониторинга – соблюдения сроков и базовых требований, соответствия состояния компонентов радиолокационной станции нормативам, оптимизации финансовых вложений u на разработку, – при отсутствии научно обоснованных методов расчета финансовых воздействий u .

В комплексах, жизненный цикл которых описывается системой уравнений (1), представление допустимой области колебаний значений в виде жесткого параллелепипеда или эллипсоида значений часто некорректно для риск-анализа. Центральные («идеальные») значения параметров могут быть недостижимы из-за естественных динамических колебаний между факторами. Более адекватным с точки зрения управления рисками является описание области допустимых по техническому заданию значений как торического многообразия H_0 допустимых отклонений, внутри которого параметры совершают циклические витки. Эта геометрия отражает типичную траекторию параметров при штатной работе с допустимыми вариациями, снижая вероятность ложных сигналов увеличения или снижения риска. Поверхность тора определим как область приемлемого риска, формируемую отклонением на заданную величину от номинальной («идеальной») траектории развития системы (рис. 4, *a*). Тор показывает допустимую область значений.

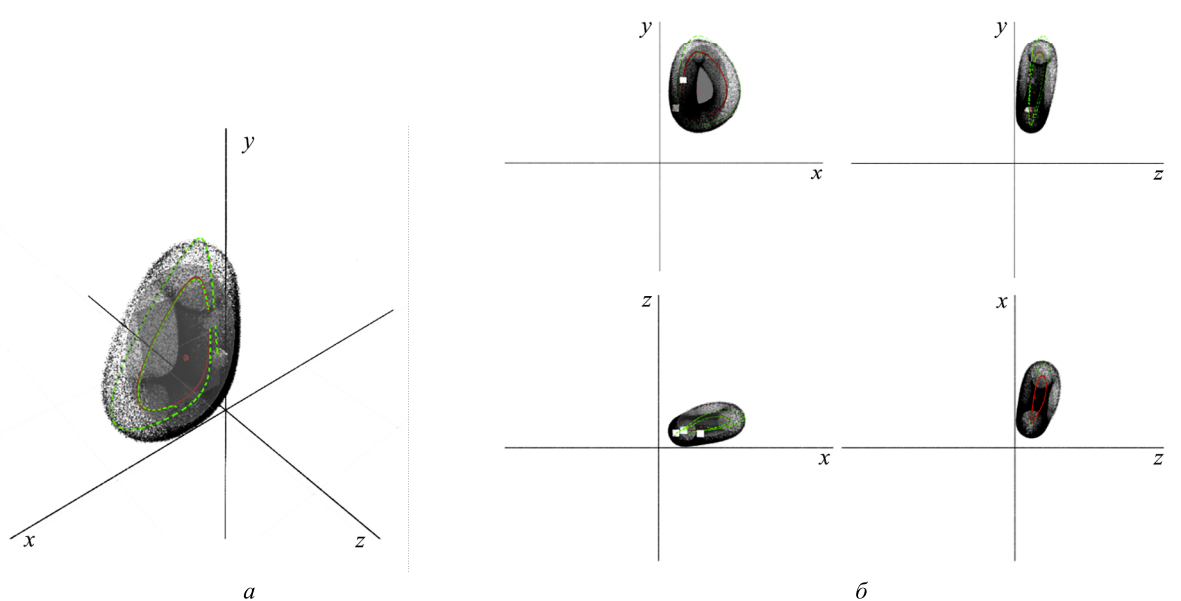


Рис. 4

Такое представление (рис. 4, *б*) может более правдоподобно описывать риск, так как нахождение траектории системы (1) в центре эллипсоида может свидетельствовать о начале интенсивных колебаний между параметрами, которые в перспективе необратимо выведут траекторию за пределы допустимой области, заданной техническим заданием, несмотря на ее текущее положение в идеальной середине. Представление области в виде тора позволяет исключить необходимость учета истории предыдущих значений траектории при оценке риска. В случае эллипсоидальной области пришлось бы анализировать динамику траектории – свертывание или разворачивание спирали. Тороидальная конфигурация накладывает жесткие геометрические ограничения: любое колебание приведет к выходу параметров из данной области. Кроме того, данный подход характеризуется меньшей вычислительной сложностью и меньшим объемом данных для описания такого объекта в пространстве. При определенных соотношениях параметров объем и площадь тора могут быть меньше, чем у соответствующего эллипсоида, а результативность выше.

Такие геометрические тела достаточно эффективно можно строить несколькими способами [13, 14], но сложность и трудоемкость первого подхода обусловлены необходимостью построения локальных описаний для множества ориентированных точек поверхности, многоэтапным процессом установления и группировки точечных соответствий с последующим итеративным уточнением преобразований, что требует значительных вычислительных ресурсов. Подход чувствителен к качеству исходных данных в перегруженных сценах, что важно при использовании сложных связей и огромного количества точек. При реализации сложных по структуре и процессу разработки проектов, таких, как разработка бортовой радиолокационной станции, возникают математические или технические трудности, связанные с описа-

нием процесса [15]. Это делает практическое внедрение подобных подходов затруднительным, хотя и теоретически осуществимым.

Области допустимых значений (с определенной точностью) можно описывать с помощью множества граничных точек, которые задают адекватное или приемлемое состояние системы в фазовом пространстве. Находить такие точки можно различными методами – аналитическим, статистическим или экспертным – в зависимости от количества данных. Указанные точки формируют допустимую область (см. рис. 4, 5). Данный подход имеет дополнительное преимущество: даже при отсутствии точного знания конкретной фазовой траектории развития комплекса возможно оценить ее приблизительное положение, а также предположить характер ее геометрической конфигурации.

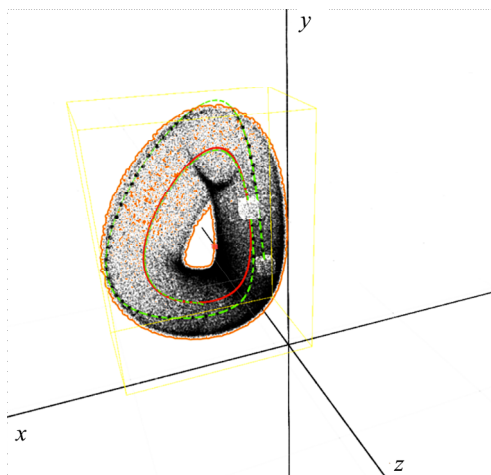


Рис. 5

Представленная на рис. 5 область допустимых значений риска формировалась по результатам аналитической зависимости, что позволяет представить процесс разработки в форме плоской фигуры, ограниченной двумя окружностями, движущейся от начальной точки по фазовой кривой проектирования.

Внутри фигуры случайным образом создавались требуемые точки. Ориентация плоской фигуры в трехмерном пространстве при моделировании представлялась через кватернионы, описывающие повороты тела по кратчайшей дуге, что критически важно при непрерывном процессе. Требуемое направление описывалось вектором фазовой скорости в конкретной точке фазовой кривой, что позволяло через умножение соответствующих кватернионов найти нужное положение плоской фигуры (генерирующей точки) [16].

В классической вероятностной модели риск решений оценивается функцией потерь $\rho = f(\bar{x}, \bar{y})$ ($\bar{x} \in \mathbb{R}^n$ – решение; $\bar{y} \in \mathbb{R}^m$ – неопределенные будущие состояния). Случайность y приводит к тому, что величина ρ случайна, и ее распределение зависит от вектора \bar{x} .

В случае когда торическая поверхность задана конкретным трехмерным телом, а не набором точек, меру риска можно определить как степень вхождения в область (или отклонение от области при другой постановке задачи). Например, в случае гладкого торообразного объекта, сечение которого представляет окружность, возможны следующие подходы к определению меры ρ .

1. Подход на основе нечетких множеств.

Риск интерпретируется как мера принадлежности текущего состояния объекта (положение на расходящейся фазовой кривой) к множеству «безопасная область», которое опишем с помощью нечеткого числа. Под нечетким числом понимается нечеткое множество множества действительных чисел, которое характеризуется определенными свойствами (выпуклость; нормальность; ядро, состоящее только из одной точки), где в качестве функции принадлежности можно принять треугольные, гауссовы или полиномиальные функции.

Рекомендуется использовать гауссову функцию с ограниченным носителем (λ_1, λ_2) :

$$\mu(x) = \begin{cases} \frac{4(\lambda_2 - x)(x - \lambda_1)(\lambda_2 - \lambda_1)^2}{4(\lambda_2 - x)(x - \lambda_1)}; \\ e \text{ для } \lambda_1 \leq x \leq \lambda_2; \\ 0 \text{ в других случаях,} \end{cases}$$

где (λ_1, λ_2) – значения, ограничивающие диаметр окружности (срез торического объекта); x – передаваемое текущее положение показателей бортовой радиолокационной станции на диаметре.

2. Альтернативный нечеткий подход.

Пусть передаваемое значение x будет положением на радиусе окружности. Тогда множество «безопасная область» может быть описано с помощью некоторой сигмовидной функции, отражающей принцип: «чем ближе к краю, тем выше риск». В качестве сигмоиды могут использоваться логистические функции, тригонометрические, полиномы и т. д., в том числе с ограниченным носителем. Данный способ концептуально аналогичен первому.

3. Вероятностный подход.

Риск определяется как вероятность выхода траектории системы за пределы безопасной области. Для нелинейных моделей вида (1) аналитическое вычисление такой вероятности, как правило, затруднено. Вместо этого целесообразно использовать метод Монте-Карло на предложенных дифференциальных уравнениях (1). Моделируется множество реализаций траектории системы в некоторый момент времени с учетом случайных возмущений, после чего для каждой траектории проверяется, произошел ли ее выход за пределы H_0 к некоторому моменту времени. Оценка риска вычисляется как отношение этих двух величин, т. е. рассчитывается доля вышедших траекторий. Однако данный метод характеризуется высокой вычислительной сложностью, что приводит к значительным временным затратам на моделирование. Исправление возможной ошибки замедляет процесс получения новых результатов.

Оценку риска можно осуществлять и с использованием других подходов. Предложенные подходы имеют ряд преимуществ и ограничений. В частности, первые два варианта оценки меры риска могут в отдельных случаях давать недостаточно объективную картину: приближение траектории к краю тора не всегда свидетельствует о выходе за область H_0 . Тем не менее данный подход сохраняет практическую ценность благодаря вычислительной простоте и легкости интерпретации, что особенно важно, если система уравнений (1) изменяется в процессе разработки. Проблему избыточной чувствительности к приближению к границе можно скорректировать в рамках парадигмы мягких вычислений изменением крутизны функций.

Третий подход позволяет получить более полную и объективную статистическую оценку, однако является чрезвычайно ресурсоемким, поскольку требует моделирования всей динамики системы, а не отдельного ее временного отрезка. Кроме того, даже малое изменение системы (1) приводит к нерелевантности накопленных методом Монте-Карло данных, что требует проведения повторного моделирования с нуля.

В случае описания области H_0 , как было отмечено ранее, с помощью точек данные оценки возможно модернизировать без изменения самой области (без построения удобной непрерывной поверхности). В частности, в рамках таких дискретных представлений можно применять методы поиска ближайших к траектории точек или множества точек.

Проведенные исследования показали, что наиболее эффективным способом разбиения данных пространства является использование трехмерной диаграммы Вороного. Эта структура разбивает пространство на области, наиболее близкие к каждой точке, т. е. разделяет пространство на зоны влияния, формируя сеть выпуклых трехмерных многогранников. Границы этих многогранников состоят из плоских многогранников, равноудаленных от ближайших ключевых точек. Такой подход позволяет суще-

ственно ускорить вычисление оценки риска. По полученным областям возможно определить ближайшую точку (в зависимости от некоторой траектории в той или иной области разбиения) и на основе этой точки сформировать некоторую суммарную метрику до нее и до точек из соприкасающихся многогранников в качестве оценки рискованного состояния. Альтернативой такой геометрической интерпретации является перебор всех таких точек, организованных в массив, с последующим поиском ближайшей точки на каждом шаге. Поиск в таком массиве данных можно алгоритмически оптимизировать. Могут быть применены и иные подходы, в частности машинное обучение.

Использование предложенного множества оценки S может быть эффективно использовано в задачах многокритериальной оптимизации процесса управления системой. В частности, для предложенной системы уравнений найдено так называемое «мягкое» управление на основе обратной связи, обеспечивающее удержание фазовой траектории в безопасной области. Предлагается использовать и нечеткие методы оценки нахождения фазовой траектории в допустимой области [17].

Последовательную процедуру оценки риска разработки бортовой радиолокационной станции на основе зависимостей, полученных в предлагаемой модели, можно представить в виде следующего алгоритма (рис. 6).

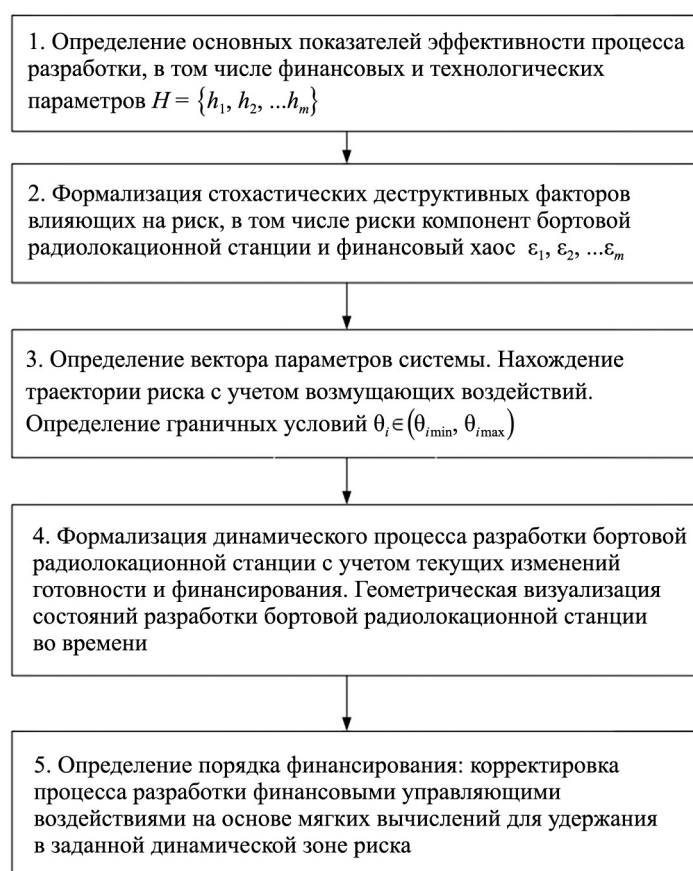


Рис. 6

Преимуществом предложенной модели является ее способность качественно описывать и формализовать неопределенность среды при ограниченном объеме информации, так как параметры настраиваются на основе экспертных знаний. Нестационарные риски интегрированы в модель. Сложность и высокая стоимость цепочки цифровых двойников существенно снижаются, так как модель описывается небольшим набором основных переменных. Это обеспечивает упрощенный поиск ошибок, легкость внесения обновлений, что дополнительно поддерживается аппаратом теории бифуркаций. Также отсутствует необходимость в постоянной поддержке системы. При этом система сохраняет гибкость: в случае выявления недостатков, существенно снижающих прогностическую возможность, ее можно скорректировать в ходе жизненного цикла и трансформировать в систему цифровых двойников. Наконец, упроще-

ние формализации (связей, структуры и свойств) способствует более четкому выявлению основных тенденций в процессе управления разработкой бортовой радиолокационной станции.

Совмещение предложенного метода оценки процесса разработки с положениями, разработанными Ю.И. Шокиным, обеспечивает более гибкое и непрерывное описание жизненного цикла бортовой радиолокационной станции. Такой синтез позволяет осуществлять пропорциональное финансовое вмешательство в процесс разработки при умеренной частоте корректировки управления. Оценка по множеству критериев S может применяться и при решении задач многокритериальной оптимизации.

Ключевым преимуществом системы дифференциальных уравнений является ее адаптивность: несмотря на простоту формализации, обусловленную использованием небольшого набора ключевых переменных, предложенные дифференциальные уравнения и другие похожие системы, описывающие циклы и дополненные механизмами управления на основе небольшого числа основных факторов, могут быть полезны при разработке систем поддержки принятия решений. Это особенно актуально в условиях, когда разработка более сложных и объемных цифровых систем оказывается экономически неоправданной по сравнению с приростом информации.

В качестве перспективных направлений дальнейших исследований рассматривается применение метода мягких вычислений для выбора оптимальных вариантов разработки бортовой радиолокационной станции на основе комплексного показателя риска.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шевцов В.А. и др. Алгоритм определения критически важных элементов бортовых радиолокационных комплексов по результатам оперативного анализа временных рядов диагностической информации // Изв. вузов. Авиационная техника. 2022. № 2. С. 162–168.
2. Sazonov V.V. et al. Proactive Monitoring of Functional Characteristics of Radio Information Systems Using Risk Analysis Concept // Russian Aeronautics. 2025. Vol. 68. P. S1–S98.
3. Мощные надгоризонтные РЛС дальнего обнаружения: разработка, испытания, функционирование / Под ред. С.Ф. Боева. М.: Радиотехника, 2013. 168 с.
4. Боев С.Ф. Управление рисками проектирования и создания радиолокационных станций дальнего обнаружения. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. 430 с.
5. Управление созданием и эксплуатацией радиолокационных систем дальнего обнаружения / Под ред. С.Ф. Боева. М.: Научная книга, 2019. 420 с.
6. Боев С.Ф. и др. О возможности снижения сроков и стоимости создания РЛС ДО с использованием стенда главного конструктора // Журнал радиоэлектроники [Электронный журнал]. 2017. № 9. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_30496410_45604989.pdf (дата обращения: 1.08.2025).
7. Логовский А.С. и др. Техничко-экономический показатель эффективности создания радиолокационных систем дальнего обнаружения // Вооружение и экономика. 2020. № 2 (52). С. 9–23.
8. Казанцев А.М., Перлов А.Ю., Соколов К.С. Обоснование рациональных конструктивно-технических решений на этапе концептуального проектирования радиолокационных станций дальнего обнаружения // Научный вестник оборонно-промышленного комплекса России. 2023. № 4. С. 45–53.
9. Бондаренко А.П. и др. Обобщенный показатель для обоснования конструктивно-технических решений радиолокационных станций на этапе концептуального проектирования // Изв. РАН. 2023. № 3 (128). С. 70–75.
10. Лепихин А.М. и др. Концепция риск-анализа технических систем с использованием цифровых двойников // Вычислительные технологии. 2020. №. 4. С. 99–113.
11. Будко Н.П., Крюков О.В., Южакова А.А. Модель превентивной идентификации отказов устройств и систем телекоммуникаций // Системы управления, связи и безопасности. 2025. № 2. С. 138–242.
12. Qi Q. et al. Enabling Technologies and Tools for Digital Twin // Journal of Manufacturing Systems. 2021. Vol. 58. P. 3–21.
13. Johnson A.E., Hebert M. Surface Matching for Object Recognition in Complex Three-Dimensional Scenes // Image and Vision Computing. 1998. Vol. 16. Iss. 9-10. P. 635–651.
14. Воронинов А.А., Соколов С.С., Шмелева А.К. Построение трехмерной сетки на основе диаграммы Вороного в невыпуклых областях // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2018. № 2. С. 40–54.
15. Sukumar S.R. et al. Towards Understanding What Makes 3D Objects Appear Simple or Complex // Proc. of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, June 23–28, 2008, Anchorage, USA. С. 1–8.

16. Трундаев И.В. Моделирование траекторного движения к цели в условиях неопределенности // Нелинейный мир. 2024. №. 4. С. 70–79.
17. Трундаев И.В. Мягкое управление нелинейной экономической системой // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2025. № 1. С. 84–100.

Поступила в редакцию 1.09.25

После доработки 5.09.25

Принята к публикации 9.09.25

Formalization of the Process of Developing an Onboard Radar with a Phase Trajectory in an Acceptable Range of Values, Taking into Account the Uncertainty of Data on the Technical Readiness of Its Components and the Financing Procedure

I.V. TRUNDAEV¹, V.A. PANKRATOV²,
S.P. SOLYANNIKOVA¹, AND S.S. MIKHAILOVA¹

¹ Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow

² Academician A.L. Mints Scientific and Production Association of Long-Range Radar, Moscow

The paper is devoted to solving the urgent problem of effective control over the process of developing an airborne radar monitoring system. The features of the development process are investigated in conditions of uncertainty of data on the technical readiness of its components and taking into account both the stochastic nature of the financing procedure and the duration of the development lifecycle. The advantages and disadvantages of existing methods for assessing the radar development process as a complex system using various risk options are studied. A hypothesis is put forward and formalized on the possibility and expediency of applying financial impact management to the development process for timely adoption of organizational and design decisions to adjust the development to unconditionally meet Customer requirements and policy deadlines. The effectiveness of the risk analysis indicator modified based on the results of modeling developed by the scientific school of Academician Yu.V. Shokin, which takes into account not only the target development dates and the current technical readiness of the radar components, but also the amount and time of necessary financing to ensure that the development process is located in an area with acceptable risk, is investigated.

Expert systems, fuzzy control, radar