

П.В. Калашников

К ПРОБЛЕМЕ ПОСТРОЕНИЯ АДЕКВАТНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ
МОДЕЛЕЙ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ
СЛОЖНЫХ УНИКАЛЬНЫХ СИСТЕМ ОТВЕТСТВЕННОГО
НАЗНАЧЕНИЯ

Аннотация. Описывается математическая модель управления рисками, возникающими в процессе функционирования сложных технических систем ответственного назначения в условиях неполноты и неопределенности информации о параметрах и фазовом состоянии. Цель исследования – разработка индивидуальной оптимальной стратегии управления рисковыми событиями, возникающими в ходе работы сложных технических систем, предполагающая минимизацию величины ущерба, связанного с рисками, а также наименьший размер затрат, возникающих в связи с профилактическими и контрольно-измерительными работами в течение всего периода эксплуатации. Задачи исследования – построение математической модели управления рисками в процессе функционирования сложных динамических технических систем ответственного назначения в условиях интервальной неопределенности о параметрах и фазовом состоянии, разработка методов индивидуального прогнозирования изменения состояния рассматриваемого класса систем. Дается сравнительная характеристика эффективности применения математического аппарата теории выбросов случайных процессов и метода индивидуального прогноза при решении задачи управления рисками, возникающими при эксплуатации сложных технических систем ответственного назначения в условиях неопределенности. На основе методов статистики интервальных данных создана математическая модель управления рисками, учитывающая возможные погрешности при измерении значений параметров рассматриваемого класса сложных систем на всех этапах контроля в течение периода эксплуатации. Научная новизна предлагаемого подхода заключается в применении статистики интервальных данных, позволяющих наиболее точно учитывать возможные погрешности, связанные с замерами значений параметров изучаемых технических систем на всех этапах контроля. Построенная в ходе проведенного исследования математическая модель управления рисками при работе сложных технических систем ответственного назначения дает возможность сделать выбор оптимальной стратегии управления рисками при эксплуатации объектов данного класса. Разработан алгоритм прогноза изменения состояния технической системы в течение всего периода работы на основе аппарата статистики интервальных данных, позволяющий учитывать погрешности при измерении основных параметров рассматриваемой системы на всех этапах процесса управления.

Ключевые слова: управление рисками, статистика интервальных данных, сложная техническая система ответственного назначения, теория выбросов случайных процессов, метод гарантированного прогноза.

P.V. Kalashnikov

ON THE PROBLEM OF BUILDING ADEQUATE MATHEMATICAL
MODELS OF RISK MANAGEMENT IN THE OPERATION OF COMPLEX
UNIQUE RESPONSIBLE SYSTEMS

Abstract. The paper describes a mathematical model for control risks arising in the course of the operation of complex technical systems of responsible purpose in the context of incompleteness and uncertainty of information about parameters and phase state. The aim of the study is to develop an individual optimal strategy for control risk events arising during the operation of complex technical systems, involving mini-

Калашников Павел Викторович

младший научный сотрудник Института автоматизации и процессов управления. Дальневосточное отделение Российской академии наук, город Владивосток. Сфера научных интересов: управление надежностью сложных систем, математическая теория оптимального управления. Автор более 30 опубликованных научных работ.

Электронный адрес: pkalash_89@mail.ru

mization of the magnitude of damage associated with risks, as well as the smallest amount of costs arising from preventive and control and measurement work during the entire period of operation. The objectives of the study are to build a mathematical model of risk management in the operation of complex dynamic technical systems of critical purpose in the conditions of interval uncertainty about parameters and phase state, as well as the development of methods for individual forecast of the state change of the considered class of systems. The article gives a comparative characteristic of the effectiveness of using the mathematical apparatus of the theory of emissions of random processes and the method of individual forecasting when solving the problem of control risks arising from the operation of complex technical systems for critical purposes in conditions of uncertainty. Based on the methods of statistics of interval data, a mathematical model of risk control is created, which takes into account possible errors in measuring the values of the parameters of the considered class of complex systems on all control windows during the period of operation. The scientific novelty of the proposed approach consists in the application of statistics of interval data, which make it possible to most accurately take into account possible errors associated with measuring the values of parameters of the technical systems under study at all stages of control. The mathematical model of risk management built in the course of the research carried out during the operation of complex technical systems for critical purposes makes it possible to select the optimal risk management strategy for the operation of objects of the class under consideration. Along with this, an algorithm for predicting changes in the state of a technical system during the entire period of operation was built on the basis of the apparatus of statistics of interval data, which allows taking into account errors in measuring the main parameters of the system under consideration at all stages of control.

Keywords: risk management, statistics of interval data, complex technical system for critical purposes, theory of outliers of random processes, guaranteed forecast method.

Введение

Данная статья представляет собой обобщение и развитие ранее полученных результатов, относящихся к аспектам математического моделирования управления рисками, возникающими в ходе функционирования сложных уникальных технических систем ответственного назначения, описанных в работах [9; 10]. Основным элементом научной новизны является дополнение ранее полученных результатов сравнением эффективности методов теории выбросов и метода гарантированного прогноза при решении задачи управления рисками. Работа сложных систем ответственного назначения в различных областях техники и экономики связана с нештатными ситуациями, авариями, отказами, а также нарушением нормальной работы отдельных организационных структур, отраслей производства, что, в свою очередь, наносит вред народному хозяйству и населению. Основные подходы к теории управления рисками в технических системах описаны в работах [9; 10; 12; 14; 16].

Величина риска, возникающего в ходе работы технических систем, задается соотношением

$$R = P_r B, \quad (1)$$

где R – величина риска, возникающего в ходе функционирования технической системы; P_r – вероятность реализации рискованного события; B – величина потерь при реализации рискованного события.

Общая величина риска R , возникающего при работе сложных технических систем ответственного назначения, которую можно описать существованием разнообразных комбинаций величины ущерба и вероятности их наступления, находится по формуле

$$R_i = \sum_{i=0}^n P_i B_i. \quad (2)$$

Суммирование ведется по всем существующим элементам дерева событий.

Рассматриваемые величины размера ущерба и вероятности наступления рискованного события являются функциями времени t . Под риском, как правило, понимается случайная величина вида (T_R, B) , где T_R – момент времени, в который происходит рискованное событие

Подход, основанный на применении стандартного аппарата теории вероятности и математической статистики при управлении рисками, возникающими в ходе функционирования сложных уникальных систем ответственного назначения, является неэффективным, так как не учитывает индивидуальные особенности каждой конкретной системы, а также не дает надежных результатов и статистических оценок в условиях неполноты и нечеткости информации о параметрах и фазовом состоянии рассматриваемых объектов.

Функционально-параметрический подход ориентирован на решение обозначенных проблем. Основные положения данного подхода описаны в работах [1; 2; 4; 11; 15].

Основная идея функционально-параметрического подхода основана на предположении о постепенном характере возникновения отказов при функционировании технических систем. Поводом для возникновения отказов в работе сложных объектов является выход значений параметров за пределы области работоспособности. Прогнозирование состояния и управление параметрами сложных технических систем позволяет решить задачу обеспечения стабильной работы рассматриваемых структур на протяжении всего периода эксплуатации.

Функционально-параметрический подход ориентирован на решение задачи прогнозирования изменения значений параметров рассматриваемой системы, а также определение оптимальной стратегии профилактических мероприятий, которая позволяет с минимальными затратами реализовать комплекс мер по оценке состояния и корректировке работы узлов и агрегатов, обеспечивающих безотказное функционирование объекта в течение всего периода эксплуатации.

Например, в процессе длительного функционирования наблюдается постепенный износ зданий и сооружений, приводящий при реализации рискованного события к их разрушению; потеря сопротивления изоляции на проводах электрических сетей приводит к возникновению коротких замыканий и пожаров, и др.

Задача управления рисками при эксплуатации технических систем ответственного назначения заключается в определении набора профилактических мероприятий и поиске оптимальных управляющих воздействий на параметры системы, которые минимизируют

К проблеме построения адекватных математических моделей управления рисками ...

величину ущерба от реализации рискового события. Под рисковым событием понимается выход значений параметров состояния системы за пределы области работоспособности.

Математическая модель управления рисками в условиях интервальной неопределенности

Состояние рассматриваемой технической системы S задается набором параметров $s = (s_1, \dots, s_m)$ в течение периода функционирования $[0, T]$. Сформулируем задачу управления рисками для случая дискретного контроля, выполняемого в моменты времени $t_k, k = 0, \dots, n; T = t_n - t_0$. Область работоспособности для параметра j данного технического объекта в момент времени t_k задается соотношением

$$\underline{s}_{jk} \leq s_{jk} \leq \overline{s}_{jk} . \tag{3}$$

Данные значения параметров определяют возможное отклонение от расчетных номинальных значений, при которых сохраняется работоспособность системы.

Вектор состояния системы в момент времени $t_k, k = 0, \dots, n$, имеет вид

$$s(t_k) = (s_1(t_k) \dots s_m(t_k)) . \tag{4}$$

Если значение параметра системы j в момент времени t_k выходит за пределы области, заданной соотношением (4), то имеет место реализация рискового события, связанного с наличием отказа.

Для предотвращения аварий и отказов проводится регулярное измерение и контроль параметров технической системы, а также выполняется комплекс ремонтных и профилактических мероприятий, обеспечивающий стабильное функционирование рассматриваемой системы. Проведение обозначенного вида работ сопряжено, как правило, с существенными материальными затратами и вынужденными простоями оборудования.

Затраты c_k на проведение технического обслуживания системы в момент времени $t_k \in T$ задаются соотношением

$$\underline{c}_{jk} \leq c_{jk} \leq \overline{c}_{jk} . \tag{5}$$

Общая величина затрат C , связанных с проведением контрольно-измерительных и профилактических мероприятий, рассчитывается на основе соотношения

$$C = \sum_{i=0}^n c_k = [\underline{c}, \overline{c}], \tag{6}$$

$$\underline{c}, \leq C \leq \overline{c}$$

Стратегия управления рисками предполагает реализацию такого комплекса управляющих воздействий и профилактических мероприятий, при которых величина ущерба, вызванного рисковым событием, является минимальной.

Вектор управляющих воздействий на параметры системы в течение периода эксплуатации $[0, T]$ имеет вид

$$u = (u_1, \dots, u_r) . \tag{7}$$

Множество значений j управляющего корректирующего воздействия на параметры системы в момент времени $t_k, k = 0, \dots, n$ задается соотношением

$$\underline{u}_{jk} \leq u_{jk} \leq \overline{u}_{jk} . \tag{8}$$

Данные значения определяют возможные варианты выбора стратегии управления рисками при соответствующем отклонении параметров технической системы от расчетных номинальных значений для обеспечения минимизации величины ущерба и затрат на эксплуатацию при прохождении всех окон контроля.

Вектор управляющих воздействий в момент времени $t_k, k = 0, \dots, n$ имеет вид

$$u(t_k) = (u_1(t_k) \dots u_r(t_k)). \quad (9)$$

Обозначим через $B_k = B_k(s(t_k), s(t_{k+1}), u(t_k), t_k)$ величину потерь, связанную с выбранной стратегией управления рисками в момент времени t_k . Тогда оптимальное управление $u^*(t_k)$, приводящее к минимальным потерям в ходе эксплуатации технической системы, определяется для момента времени t_k на основе соотношения

$$B_k(s(t_k), s(t_{k+1}), u^*(t_k), t_k) \leq B_k(s(t_k), s(t_{k+1}), u(t_k), t_k). \quad (10)$$

За период эксплуатации $T = t_n - t_0$ имеем набор оптимальных управляющих воздействий вида

$$U^*(t_0, t_n) = \{u^*(t_0), \dots, u^*(t_n)\}. \quad (11)$$

Оптимальная стратегия управления рисками состоит в определении такого комплекса управляющих воздействий на параметры системы, при котором величина ущерба в ходе реализации рискованного события будет минимальной:

$$J = \sum_{k=0}^{n-1} B_k(s(t_k), s(t_{k+1}), u(t_k), t_k) \rightarrow \min; \quad (12)$$

$$\sum_{k=0}^n c_k = C \rightarrow \min. \quad (13)$$

Применение теории выбросов случайных процессов к задаче управления рисками, возникающими при функционировании систем ответственного назначения

Важную роль при решении задачи управления рисками при функционировании систем ответственного назначения играет задача определения первого момента времени, в который происходит выход случайного процесса, описывающего механизм функционирования рассматриваемой системы за пределы области работоспособности. Для решения обозначенной задачи применяются элементы теории выбросов случайных процессов, описанные в [5].

Предположим, что изменение (дрейф) параметров системы S описывается случайным процессом $S(t)$, и первый выход рассматриваемого процесса за пределы области работоспособности W приводит к отказу (аварийной ситуации, при которой нарушается работоспособность системы). Обозначим через $P(t)$ вероятность безотказной работы системы, где $P(t) = P(S(\tau) \in W), \tau \in [0, t]$.

Для стационарного дифференцируемого процесса $P(t)$ имеет вид

$$P(t) = P_0 - n \int_0^t (1 - L(\tau)) d\tau, \quad (14)$$

где P_0 – вероятность пребывания процесса в области работоспособности в начальный момент времени; n – среднее в единицу времени число выбросов рассматриваемого процесса за пределы области W ; $L(\tau)$ – функция распределения длительности времени пребывания процесса в заданной области W с момента попадания до момента первого выхода из нее.

К проблеме построения адекватных математических моделей управления рисками ...

Рассмотрим случай, при котором область работоспособности W задается с помощью интервала вида $W = [\underline{a}, \bar{a}]$. В данном случае выражения для расчета величины $P(t) = P(\underline{a} < S(\tau) < \bar{a})$, $\tau \in [0, t]$ принимает вид

$$P(t) = F(\bar{a}) - F(\underline{a}) - n_{\underline{a}\bar{a}} \int_0^t (1 - L_{\underline{a}\bar{a}}(\tau)) d\tau, \tag{15}$$

где $F(\dots)$ – функция распределения ординаты рассматриваемого случайного процесса, описывающего функционирование системы; $n_{\underline{a}\bar{a}}$ – среднее в единицу времени число выходов случайного процесса за пределы области работоспособности W ; $L_{\underline{a}\bar{a}}$ – функция распределения длительности времени процесса в заданной области W с момента попадания до момента первого выхода из нее.

Введем в рассмотрение следующие случайные величины:

τ – время с момента t_0 начала наблюдения за рассматриваемым случайным процессом до момента его первого выхода за пределы области W ;

μ – продолжительность времени проходящего с момента первого попадания процесса в область W до момента 1-го выхода из нее;

ρ – продолжительность времени, проходящего с момента попадания случайного процесса в область W до момента начала наблюдения за ним.

Величина $\mu = \tau + \rho$. Обозначим через $K(\tau) = 1 - L(\tau)$, $\varphi(\tau)$ плотность распределения случайной величины τ во введенных обозначениях:

$$\varphi(\tau) = -\frac{dP}{d\tau}, \varphi(\tau) = n_{\underline{a}\bar{a}} K(\tau). \tag{16}$$

Рассмотрим выражения $K(t) = P(\mu > t)$ и $P(t) = P(\tau > t)$. Между реализациями случайных величин μ и τ справедливо соотношение $\mu > \tau$. Следовательно, $K(t) \geq P(t)$.

$$\frac{dP}{dt} = -n_{\underline{a}\bar{a}} K(t). \tag{17}$$

Разделив левую и правую части соотношения (17) на $P(t)$ получим выражение

$$\frac{dP}{Pdt} = -n_{\underline{a}\bar{a}} \frac{K(t)}{P(t)}. \tag{18}$$

Введем обозначения

$$\delta(t) = -\frac{dP}{Pdt}, b(t) = \frac{K(t)}{P(t)}. \tag{19}$$

Во введенных обозначениях имеем

$$\delta(t) = n_{\underline{a}\bar{a}} b(t). \tag{20}$$

В силу неравенства $K(t) \geq P(t)$ величина $b(t) \geq 1$, следовательно, $\delta(t) \geq n_{\underline{a}\bar{a}}$.

Построим оценки для величины $P(t)$. Положим $K(\tau) = 1 - L(\tau) = 1$. В этом случае имеем оценку

$$P(t) \geq F(\bar{a}) - F(\underline{a}) - n_{\underline{a}\bar{a}} t, \quad t \leq \frac{F(\bar{a}) - F(\underline{a})}{n_{\underline{a}\bar{a}}}. \tag{21}$$

Для случая односторонних границ имеем следующие оценки:

$$P(t) \geq F(\bar{a}) - n_{\bar{a}} t, \quad t \leq \frac{F(\bar{a})}{n_{\bar{a}}}; \tag{22}$$

$$P(t) \geq 1 - F(\underline{a}) - n_{\underline{a}} t, t \leq \frac{1 - F(\underline{a})}{n_{\underline{a}}}. \quad (23)$$

При решении практических задач достаточно часто рассматриваются случайные процессы, представляющие собой сумму детерминированной функции и случайного шума, которые описываются соотношением

$$S(t) = Y(t) + \beta(t), \quad (24)$$

где $Y(t)$ – случайный шум; $\beta(t)$ – детерминированная функция.

Формулы для оценивания вероятности безотказной работы $P(t)$ для случайных процессов вида (24) представлены в работе [3].

Для оценивания вероятности пребывания случайного процесса в заданной области необходимо знать одномерный закон распределения ординаты данного процесса, а также среднее в единицу времени число выбросов данного процесса за пределы полосы W .

Применение вышеописанного математического аппарата позволяет получать приближенные оценки величины $P(t)$ вероятности безотказной работы рассматриваемой системы, а также ориентировочно определять момент наступления рискованного события (первого выброса случайного процесса за пределы области W), при котором происходит отказ в работе исследуемого технического объекта. Использование подобного сорта методов является пригодным для групп технических объектов, характеризующихся статистической однородностью, и не учитывает индивидуальных особенностей и уникальных черт, характерных для систем ответственного назначения.

Для решения обозначенной проблемы применяется метод индивидуального прогноза [11].

В момент времени t_p доступна информация о ходе изменения процесса функционирования системы в форме последовательности наблюдений $\{d_k\}$, $k = 0 \dots p$. Измерение параметров системы на различных этапах контроля, как правило, связано с наличием погрешностей (неточностей) в работе измерительной аппаратуры, ошибок округления и др.

Результаты исследования

Принятие решений о выборе управляющих воздействий, которые минимизируют величину риска в уникальных системах ответственного назначения, связано с наличием неполноты и неопределенности информации. Наиболее подходящим инструментом математического моделирования в такой ситуации выступает аппарат статистики интервальных данных [13; 17–19].

При применении подобного сорта математического аппарата появляется возможность принимать оптимальные решения в условиях неполноты и дефицита информации о параметрах системы, так как объемы выборок, которыми оперирует аппарат статистики интервальных данных, намного меньше, чем в случае применения традиционных подходов математической статистики.

Рассмотрим задачу построения индивидуального прогноза изменения состояния технической системы ответственного назначения.

Пусть $S(t)$ – случайный процесс, описывающий изменение значений (дрейф) параметров технической системы ответственного назначения S . Задача прогноза состоит в оценке наблюдаемой информации о системе в присутствии ошибок за промежуток времени $[0, t_p]$ и определении дальнейшей траектории изменения параметров системы за проме-

К проблеме построения адекватных математических моделей управления рисками ...

жуток времени $T - t_p$.

Предположим, что модель случайного процесса $S(t)$ имеет вид

$$S(t) = F(t) + h(t), \tag{25}$$

где $F(t)$ – форма рассматриваемого процесса (скалярный, линейный, монотонный); $h(t)$ – ошибка модели, которая может отсутствовать, быть случайно или интервально заданной.

Рассмотрим конкретную форму случайного процесса, задаваемую соотношением

$$S(t) = a' b(t) + h(t), t \in [0, T], \tag{26}$$

где $a = \{a_j\}, j = 0, \dots, n$ – вектор случайных коэффициентов; $b(t)$ – непрерывно заданные детерминированные функции времени $t \in [0, T]$; $h(t)$ – ошибка модели, заданная интервально; $\underline{h(t)} \leq h(t) \leq \overline{h(t)}$ – функция времени $t \in [0, T]$.

На интервале времени T_p рассмотрим реализацию $s(t)$ процесса $S(t)$, наблюдаемую с ошибкой измерения $e(t_k)$ для момента контроля t_k , заданную интервально соотношением

$$\underline{e(t_k)} \leq e(t_k) \leq \overline{e(t_k)}. \tag{27}$$

В соответствии с моделью (15) реализация процесса $S(t)$ на интервале времени $[0, T_p]$ имеет вид

$$s(t) = a' b(t) + [\underline{h(t)}, \overline{h(t)}]. \tag{28}$$

Для момента контроля t_k множество допустимых реализаций процесса $s(t_k)$ описывается выражением

$$\underline{e(t_k)} + \underline{h(t_k)} + d(t_k \leq s(t_k) \leq \overline{e(t_k)} + \overline{h(t_k)} + d(t_k, \cdot)), t_k \in T_p. \tag{29}$$

Условие (18) описывает трубку прогноза, в которой гарантированно содержатся значения реализации $s(t_k)$ в момент времени $t_k \in T_p$.

Выделим среди допустимых реализаций $s(t_k)$ экстремальные $s(t_k)^+$, $s(t_k)^-$ на основе решения минимаксной оптимизационной задачи вида

$$a' b(t^*) + h(t^*) \rightarrow \max; \tag{30}$$

$$a' b(t^*) + h(t^*) \rightarrow \min t^* \in [T_p, T] \tag{31}$$

при ограничениях

$$\underline{e(t_k)} + \underline{h(t_k)} + d(t_k \leq a' b(t_k) + h(t_k) \leq \overline{e(t_k)} + \overline{h(t_k)} + d(t_k, \cdot)), k = 0, \dots, p \tag{32}$$

Подходы к решению рассматриваемой задачи описаны в работе [18].

Предположим, что на основе решения задачи (19)–(21) определены экстремальные реализации $s(t_k)^+$, $s(t_k)^-$, $t_k > t_p$.

Пусть границы области работоспособности заданы в виде

$$A(t_k) = (s_{1k}, \dots, s_{mk}), k = 0, \dots, n, \tag{33}$$

$$B(t_k) = (\underline{s}_{1k}, \dots, \underline{s}_{mk}), k = 0, \dots, n. \tag{34}$$

Для решения задачи управления рисками необходимо определить ближайший момент

времени, в который возможна реализация рискового события (отказа), а также уменьшить по возможности число профилактических мероприятий, связанных с измерением и контролем состояния системы.

В этой связи в качестве следующего момента времени, в котором необходимо осуществить контроль состояния системы, целесообразно выбрать $t_{p+1} = \min\{\tau_{A_k}, \tau_{B_k}\}$, где моменты времени τ_{A_k}, τ_{B_k} определяются на основе решения уравнений вида

$$A(t_k) = s(t_k)^-, B(t_k) = s(t_k)^+. \quad (35)$$

Соотношения (24) задают условие пересечения экстремальных траекторий и границ области работоспособности системы в момент $t_k > t_p$.

В течение промежутка времени $t_c = t_{p+1} - t_p$ можно гарантировать нахождение параметров системы в пределах области работоспособности и отсутствие отказов.

Рассматриваемый процесс прогнозирования состояния системы носит итерационный характер. На следующем шаге необходимо определить момент времени t_{p+d} проведения контроля состояния системы на основе расчета экстремальных траекторий исходя из доступной наблюдаемой информации (d_{p+1}, t_{p+1}) .

Если период эксплуатации до момента наступления следующего рискового события меньше минимального гарантированного целесообразного интервала времени сохранения работоспособности t_c^{min} , $t_{p+d} - t_{p+1} < t_c^{min}$, то необходимо прекратить работу системы в момент t_{p+1} и провести необходимые профилактические мероприятия по коррекции значений параметров рассматриваемого технического объекта.

Заключение

В ходе проведенной работы изучены основные подходы к управлению рисками, возникающими в процессе функционирования сложных технических систем ответственного назначения, а также разработана математическая модель, позволяющая осуществлять выбор оптимальной стратегии контроля и корректировки значений параметров такого вида систем в условиях интервальной неопределенности. Разработан алгоритм прогноза изменения состояния технической системы в течение всего периода ее работы на основе аппарата статистики интервальных данных, позволяющий учитывать погрешности при измерении основных параметров рассматриваемой системы на всех этапах процесса управления. Применение математического аппарата теории выбросов случайных процессов дает возможность найти приближенные оценки вероятности безотказной работы технической системы ответственного назначения в условиях неопределенности, а также рассчитать момент первого выброса процесса за пределы области работоспособности.

Литература

1. Абрамов О.В. Анализ и прогнозирование техногенных рисков // Информатика и системы управления. 2012. № 3. С. 97–105.
2. Абрамов О.В. К проблеме предотвращения аварий технических объектов ответственного назначения // Надежность и качество сложных систем. 2013. № 1. С. 11–16.
3. Абрамов О.В. Мониторинг и прогнозирование технического состояния систем ответственного

К проблеме построения адекватных математических моделей управления рисками ...

- назначения // Информатика и системы управления. 2011. № 2. С. 4–15.
4. Абрамов О.В. Об оценке вероятности наступления рисков события: функционально-параметрический подход // Надежность и качество сложных систем. 2016. № 1. С. 24–31.
5. Абрамов О.В. Функционально-параметрическое направление теории рисков: возможности и перспективы // Вестник ДВО РАН. 2016. № 4. С. 96–101.
6. Абрамов О.В., Розенбаум А.Н. Управление эксплуатацией систем ответственного назначения. Владивосток: Дальнаука, 2000. 200 с.
7. Воишин А.П. Метод оптимизации объектов по интервальным моделям целевой функции. М.: МЭИ, 1987. 109 с.
8. Воишин А.П., Скибицкий Н.В. Интервальный подход к выражению неопределенности измерений и калибровке цифровых измерительных систем // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2007. Т. 73, № 11. С. 66–71.
9. Калашников П.В. К проблеме управления рисками при эксплуатации сложных технических систем ответственного назначения // Наука. Промышленность. Оборона: сборник научных трудов XXI Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 75-летию Победы в Великой Отечественной войне (Новосибирск, 7–9 октября 2020 г.). С. 212–217.
10. Калашников П.В. Математическая модель управления рисками при эксплуатации сложных технических систем ответственного назначения // Развитие концепции современного образования в рамках научно-технического прогресса: сборник научных трудов. Казань, 2020. С. 134–140.
11. Королев В.Ю., Бенинг В.Е., Шоргин С.Я. Математические основы теории риска: учебное пособие. М.: Физматлит, 2007. 544 с.
12. Муравьев И.И., Острейковский В. А., Шевченко Е. Н. Модели оценки фактора времени в теории техногенного риска динамических систем // Надежность и качество: труды международного симпозиума. 2015. Т. 1. С. 24–27.
13. Орлов А.И. Пути развития статистических методов: непараметрика, робастность, бутстреп и реалистическая статистика // Надежность и контроль качества. 1991. № 8. С. 3–8.
14. Острейковский В.А. Количественная оценка риска в теории техногенной безопасности сложных динамических систем // Итоги науки: Избранные труды международного симпозиума по фундаментальным и прикладным проблемам науки. М.: РАН, 2013. Т. 1. С. 12–31.
15. Острейковский В.А. О некоторых классах моделей риска в теории техногенной безопасности // Надежность и качество: труды международного симпозиума: в 2 т. / под ред. Н.К. Юркова. Пенза: Изд-во ПГУ, 2013. Т. 1. С. 46–49.
16. Острейковский В.А. Теория техногенного риска: математические методы и модели : монография. Сургут: КЦ СурГУ, 2013.
17. Переверзев Е.С. Модели накопления повреждений в задачах долговечности. Киев: Наукова Думка, 1995.
18. Пузикова Д.А. Об интервальных методах статистической классификации // Наука и технология в России. 1995. № 2 (8). С. 12–13.
19. Тихонов В.И., Хименко В.И. Выбросы траекторий случайных процессов. М.: Наука, 1987. 304 с.

References

1. Abramov O.V. (2012) *Analiz i prognozirovanie tekhnogennykh riskov* [Analysis and forecasting of technogenic risks]. *Informatika i sistemy upravleniya*, No. 3, pp. 97–105 (in Russian).
2. Abramov O.V. (2013) *K probleme predotvrashcheniya avarii tekhnicheskikh ob'ektov otvetstvennogo naznacheniya* [On the problem of preventing accidents in critical technical facilities]. *Nadezhnost' i*

- kachestvo slozhnykh system*, No. 1, pp. 11–16 (in Russian).
3. Abramov O.V. (2011) *Monitoring i prognozirovanie tekhnicheskogo sostoyaniya sistem otvetstvennogo naznacheniya* [Monitoring and forecasting of the technical condition of critical systems]. *Informatika i sistemy upravleniya*, No. 2, pp. 4–15 (in Russian).
 4. Abramov O.V. (2016) *Ob otsenke veroyatnosti nastupleniya riskovogo sobyitiya: funktsional'no-parametricheskii podkhod* [On assessing the probability of a risk event: a functional-parametric approach] *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system*, No. 1, pp. 24–31 (in Russian).
 5. Abramov O.V. (2016) *Funktsional'no-parametricheskoe napravlenie teorii riskov: vozmozhnosti i perspektivy* [Functional-parametric direction of risk theory: opportunities and prospects]. *Vestnik DVO RAN*, No. 4, pp. 96–101 (in Russian).
 6. Abramov O.V., Rozenbaum A.N. (2000) *Upravlenie ekspluatatsiei sistem otvetstvennogo naznacheniya* [Managing the operation of mission-critical systems]. Vladivostok, Dal'nauka Publishing, 200 p. (in Russian)
 7. Voshchinin A.P. (1987) *Metod optimizatsii ob'ektov po interval'nym modelyam tselevoi funktsii* [Method for optimizing objects by interval models of the objective function]. Moscow, MEI Publishing, 109 p. (in Russian)
 8. Voshchinin A.P., Skibitsky N.V. (2007) *Interval'nyi podkhod k vyrazheniyu neopredelennosti izmerenii i kalibrovke tsifrovyykh izmeritel'nykh sistem* [Interval approach to the expression of measurement uncertainty and calibration of digital measuring systems]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, vol. 73, No. 11, pp. 66–71 (in Russian).
 9. Kalashnikov P.V. (2020) *K probleme upravleniya riskami pri ekspluatatsii slozhnykh tekhnicheskikh sistem otvetstvennogo naznacheniya* [On the problem of risk management in the operation of complex technical systems for responsible purposes]. *Nauka. Promyshlennost'. Oborona: sbornik nauchnykh trudov XXI Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, posvyashchennoi 75-letiyu Pobedy v Velikoi Otechestvennoi voine (Novosibirsk, 7–9 oktyabrya 2020 g.)* [Nauka. Industry. Defense: Proc. of the XXI All-Russian Scientific and Technical Conference dedicated to the 75th anniversary of the Victory in the Great Patriotic War (Novosibirsk, October 7–9, 2020)], pp. 212–217 (in Russian).
 10. Kalashnikov P.V. (2020) *Matematicheskaya model' upravleniya riskami pri ekspluatatsii slozhnykh tekhnicheskikh sistem otvetstvennogo naznacheniya* [Mathematical model of risk management in the operation of complex technical systems for critical purposes]. *Razvitie kontseptsii sovremennogo obrazovaniya v ramkakh nauchno-tekhnicheskogo progressa: sbornik nauchnykh trudov* [Development of the concept of modern education within the framework of scientific and technological progress: a collection of scientific papers]. Kazan', pp. 134–140 (in Russian).
 11. Korolev V.Yu., Bening V.E., Shorgin S.Ya. (2007) *Matematicheskie osnovy teorii riska* [Mathematical foundations of the theory of risk: a tutorial]. Moscow, Fizmatlit Publishing, 544 p. (in Russian).
 12. Muravyov I.I., Ostreikovskiy V.A., Shevchenko E.N. (2015) *Modeli otsenki faktora vremeni v teorii tekhnogennoogo riska dinamicheskikh sistem* [Models for estimating the time factor in the theory of technogenic risk of dynamic systems]. *Nadezhnost' i kachestvo: trudy mezhdunarodnogo simpoziuma* [Reliability and quality: Proc. of the international symposium], vol. 1, pp. 24–27 (in Russian).
 13. Orlov A.I. (1991) *Puti razvitiya statisticheskikh metodov: neparametrika, robustnost', butstrep i realisticheskaya statistika* [Ways of development of statistical methods: non-parametrics, robustness, bootstrap and realistic statistics]. *Nadezhnost' i kontrol' kachestva*, No. 8, pp. 3–8 (in Russian).
 14. Ostreikovskiy V.A. (2013) *Kolichestvennaya otsenka riska v teorii tekhnogennoi bezopasnosti slozhnykh dinamicheskikh sistem* [Quantitative Risk Assessment in the Theory of Technogenic Safety of Complex

Dynamic Systems]. *Itogi nauki: Izbrannyye trudy mezhdunarodnogo simpoziuma po fundamental'nyim i prikladnym problemam nauki* [Results of Science: Selected Proceedings of the International Symposium on Fundamental and Applied Problems of Science]. Moscow, RAN, vol. 1, pp. 12–31 (in Russian).

15. Ostreikovskiy V.A. (2013) *O nekotorykh klassakh modelei riska v teorii tekhnogennoi bezopasnosti* [On some classes of risk models in the theory of technological safety]. *Nadezhnost' i kachestvo: trudy mezhdunarodnogo simpoziuma* [Reliability and quality: Proc. of the international symposium]. Penza, PGU, vol. 1, pp. 46–49 (in Russian).

16. Ostreikovskiy V.A. (2013) *Teoriya tekhnogennogo riska: matematicheskie metody i modeli* [Theory of Technogenic Risk: Mathematical Methods and Models]. Surgut, KTs SurGu.

17. Pereverzev E.S. (1995) *Modeli nakopleniya povrezhdenii v zadachakh dolgovechnosti* [Damage accumulation models in durability problems]. Kiev, Naukova Dumka Publishing.

18. Puzikova D.A. (1995) *Ob interval'nykh metodakh statisticheskoi klassifikatsii* [On interval methods of statistical classification]. *Nauka i tekhnologiya v Rossii*, No. 2 (8), pp. 12–13 (in Russian).

19. Tikhonov V.I., Khimenko V.I. (1987) *Vybrosty traektorii sluchainykh protsessov* [Emissions of trajectories of random processes]. Moscow, Nauka Publishing, 304 p. (in Russian).