

НЕКОТОРЫЕ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОГЕННЫМИ РИСКАМИ

О. В. Абрамов

Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения
Российской академии наук, Владивосток, Россия
abramov@iacp.dvo.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассмотрена задача управления техногенными рисками сложных систем ответственного назначения. *Материалы и методы.* Основное внимание уделено синтезу стратегии управления техногенными рисками на основе принципа гарантированного результата и с использованием идей функционально-параметрического направления теории надежности. *Результаты и выводы.* Созданные с использованием гарантирующего подхода алгоритмы формирования стратегии управления техногенными рисками достаточно просты в реализации и позволяют в условиях существенной ограниченности и неопределенности исходных данных находить стратегию управления техногенными рисками, гарантирующую безотказность систем и высокое качество функционирования.

Ключевые слова: надежность, риск, параметр, прогноз, случайный процесс, мониторинг, техническое состояние, управление рисками, гарантирующий подход

Для цитирования: Абрамов О. В. Некоторые решения проблемы управления техногенными рисками // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 1. С. 13–22. doi:10.21685/2307-4205-2023-1-2

SOME SOLUTIONS TO THE PROBLEM OF TECHNOGENIC RISK MANAGEMENT

O.V. Abramov

Institute for Automation and Control processes, Far Eastern Branch
of Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia
abramov@iacp.dvo.ru

Abstract. *Background.* The problem of managing technogenic risks of complex engineering systems of responsible purpose is considered. *Materials and methods.* The main attention is paid to the synthesis of a strategy for managing technogenic risks based on the principle of guaranteed results and using the ideas of the functional-parametric direction of reliability theory. *Results and conclusions.* The algorithms created using the guaranteeing approach for the formation of a technogenic risk management strategy are quite simple to implement and allow, in conditions of significant limitations and uncertainty of the initial data, to find a strategy for managing technogenic risks that guarantees the reliability of systems and high quality of functioning.

Keywords: reliability, risk, parameter, forecast, random process, monitoring, technical condition, risk management, guaranteeing approach

For citation: Abramov O.V. Some solutions to the problem of technogenic risk management. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(1):13–22. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2023-1-2

Введение

Наблюдаемый в последние годы высокий уровень чрезвычайных ситуаций техногенного характера делает актуальным решение целого ряда новых задач теории рисков [1–3]. Проблема снижения техногенных рисков приобретает особую актуальность применительно к техническим объектам ответственного назначения, отказы которых связаны с большими материальными потерями или катастрофическими последствиями. В большинстве своем это сложные системы, изготавливаемые в небольшом числе экземпляров, эксплуатирующиеся в отличающихся условиях и реализующие экстремальные технологии. Такие технические системы иногда называют уникальными (УТС). Риск обычно связывают с наступлением некоторого, вообще говоря, случайного события, которое называют рисковым событием из возможного семейства событий, описывающих рассматриваемую рис-

ковую ситуацию. При исследовании техногенных рисков в качестве рискового события чаще всего рассматривается потеря работоспособности (отказ) технической системы, характеристиками которой является наработка (время безотказной работы) или момент отказа. Их вероятностные характеристики определяются обычно методами математической статистики и теории надежности. К сожалению, при исследовании УТС ответственного назначения для их получения найти представительную статистику отказов не представляется возможным. Это связано с тем, что их отказы являются редкими событиями. Больше того, задача состоит не в накоплении статистики отказов, а в их предотвращении. В этих условиях перспективным при решении задачи управления техногенными рисками может стать использование идей функционально-параметрического направления (ФП-подхода) теории надежности и теории техногенных рисков [4–6].

В соответствии с методологией функционально-параметрического направления теории техногенных рисков процесс функционирования системы и ее техническое состояние в любой момент времени определяются конечным набором некоторых переменных – параметров системы, а все отказы (рисковые события) есть следствие отклонений параметров от их исходных (номинальных, расчетных) значений [6]. Формой проявления отказа является выход параметров состояния технической системы за пределы области допустимых значений (области работоспособности), при этом возникают задачи оценки (прогнозирования) момента наступления рискового события и принятия управленческих решений (прекращения эксплуатации или проведения профилактических коррекций параметров). В данной работе предлагаются некоторые решения проблемы управления и прогнозирования техногенных рисков, возникающих в процессе эксплуатации сложных технических систем ответственного назначения.

Основные положения функционально-параметрического направления теории техногенных рисков

В основе методологии функционально-параметрического подхода теории рисков лежат следующие основные принципы:

- процесс функционирования системы и ее техническое состояние в любой момент времени определяются конечным набором некоторых переменных – параметров системы;
- накопление различных воздействий на систему приводит к изменениям ее параметров и вследствие этого к возможности перехода в иное качественное состояние;
- наступление рискового события (отказа) есть следствие отклонений параметров от их исходных (номинальных, расчетных) значений, а формой проявления отказа является выход параметров за пределы области допустимых значений (области работоспособности).

При решении задачи управления техногенными рисками на основе ФП-подхода необходимо уметь оценивать текущее техническое состояние системы, прогнозировать изменения технического состояния (момент перехода в предельное состояние), а также определять соответствующие суммарные и единовременные эксплуатационные расходы, связанные с мониторингом состояния, проведением профилактических мероприятий и с ущербом, вызванным наступлением рискового события.

Пусть $y(t)$ – случайный процесс изменения параметров состояния технической системы, статистические характеристики которого полагаются известными. Задана область допустимых изменений этого параметра (область работоспособности). Рисковое событие (отказ) в этом случае наступает в момент выхода случайного процесса $y(t)$ за пределы области работоспособности [7], а нахождение вероятности наступления рискового события можно свести к решению задачи о выбросах случайных процессов [8, 9]. Заметим, что результаты анализа рисков основаны при таком подходе на априори заданных закономерностях изменений параметров всего ансамбля объектов рассматриваемого типа и не учитывают индивидуальных особенностей отдельного конкретного объекта, а поэтому носят «групповой» характер. Рассчитанная с использованием таких результатов стратегия управления риском может быть рекомендована для всех объектов данного типа независимо от того, насколько каждый из них отличается от среднестатистического. Поэтому она оправдана лишь в тех случаях, когда эксплуатируемые объекты статистически однородны (имеют небольшой разброс индивидуальных характеристик качества), а рисковые события не связаны с большими материальными потерями или катастрофическими последствиями.

Для УТС стратегия управления техногенными рисками должна учитывать индивидуальные особенности каждой конкретной системы и условий ее эксплуатации. Такую стратегию и соответствующие ей риски будем называть индивидуальными. Эффект от использования индивидуальной стратегии управления рисками определяется главным образом следующими факторами:

- возможностью в наибольшей степени использовать ресурс каждой конкретной системы, что достигается уменьшением числа преждевременных вмешательств в ее работу;
- возможностью предотвращения наступления рискованных событий (отказов), вызываемых выходом определяющих параметров системы за пределы области работоспособности, что достигается своевременным прекращением эксплуатации или проведением профилактических мероприятий.

Индивидуальное управление рисками возможно при условии получения текущей информации о действительном техническом состоянии каждой системы, т.е. реализация индивидуального подхода требует непрерывного или дискретного контроля и анализа ее технического состояния.

В основе индивидуального подхода лежит прогнозирование изменений параметров технического состояния системы, осуществляемое по результатам контроля. Прогнозирование состояния по одной реализации, т.е. по наблюдениям за одной конкретной системой, может проводиться только при наличии известных априорных характеристик процессов, протекающих в аналогичных системах (модели случайного процесса дрейфа параметров), и данных о характеристиках ошибок контроля и других помех.

Основные трудности при решении задачи прогнозирования состояния для синтеза стратегии управления техногенными рисками связаны с тем, что прогноз приходится осуществлять для каждого объекта индивидуально, при ограниченном объеме исходной информации (по небольшому набору результатов контроля) и в присутствии помех (ошибок контроля и выбранной модели изменения параметров), статистические свойства которых достоверно не известны. В этих условиях классические методы математической статистики и теории случайных процессов теряют свои привлекательные свойства, а их использование для прогнозирования момента наступления рискованного события приводит к существенным ошибкам и невысокой достоверности прогноза.

Основы методологии управления техногенными рисками

Под управлением рисками будем понимать некоторый набор мероприятий, направленных на изменение технического состояния объекта управления т.е. характеристик случайного процесса $y(t)$. Цель управления находится в соответствии с требованиями обеспечения безотказности и заданного или оптимального качества функционирования объекта и может в общем случае рассматриваться как достижение экстремума некоторого критерия оптимальности. Указанный критерий представляет собой функционал, определяемый на допустимом множестве Q с элементами y, u, t , где y – вектор параметров состояния объекта; u – вектор управляющих воздействий, $t \in T$ время эксплуатации. С учетом конкретных возможностей на управление u накладываются определенные ограничения $u \in U$. Цель управления может быть представлена в виде

$$G_0(y, u, t) = \text{extr}, G_j(y, u, t) \in C_j, j = \overline{1, l}, \quad (1)$$

где $G_j(y, u, t)$ – критерий оптимальности управления, элементы которого определены на множестве Q .

Введем понятие стратегии управления, под которой можно понимать функцию $u(\tau, y)$ со значениями из U , где $\tau = \tau(y, t)$ определяет моменты приложения управляющих воздействий (сроки проведения технического обслуживания). Вследствие случайности аргументов функция $u(\tau, y)$ является случайной. Для устранения этой неопределенности можно принять $\tau = \tau(y^*, t)$ и $u(\tau, y^*)$, где y^* – оценка случайного вектора y . Упорядоченная тройка $u(\tau, y^*) \in U \times T \times Y^*$, где Y^* – множество значений оценок y^* ; определяет для каждого $t \in T$ управление $u \in U$. При этом множество Q можно определить как множество пар отображений $(y^*(t), u(t))$ на множестве T , удовлетворяющих условиям $y^* \in Y^*, u \in U, G_j(y, u, t) \in C_j, j = \overline{1, l}$.

Таким образом, стратегия управления есть функция $u(\tau, y^*)$, где $\tau = \tau(y^*, t)$, а задача управления рисками может быть представлена в виде

$$g^* = \text{extr} G(y^*, u, t), \quad (2)$$

$$\{ u(\tau, y^*): \tau \in T, y^* \in Y^*, u \in U \},$$

где g^* – значение критерия, соответствующее оптимальной стратегии управления.

Множество управлений включает в себя контроль и регулировку $y(t)$. По результатам контроля (последовательности измерений $\{z_t\}$, $t \in T_k \in T$) могут быть найдены вместо старых (априорных) новые (апостериорные) статистические характеристики случайного процесса $y(t)$. Поэтому контроль можно условно рассматривать как управляющее воздействие, направленное на изменение статистических характеристик $y(t)$. Целью регулировки является восстановление заданного качества функционирования объекта путем принудительного изменения параметров его технического состояния $y(t)$. В результате регулировки состояние объекта изменяется на некоторое значение $r \in R \subset U$, где R – множество регулировок r . Математическая модель регулировки может быть представлена в виде [10, 11]

$$y_r^* = y^* + r, \quad (3)$$

где y_r^* – оценка состояния объекта после регулировки; y^* – оценка $y(t)$ до регулировки.

Можно считать, что регулировка состоит в смещении случайного процесса $y(t)$ на определенное значение r . Это приводит к изменению статистических характеристик $y(t)$, в частности, к изменению его математического ожидания. Следовательно, существует общность результатов воздействия контроля и регулировки на техническое состояние объекта $y(t)$. Она не затрагивает различий в физической природе рассматриваемых мероприятий по управлению рисками. Так, в процессе контроля поступает дополнительная информация о состоянии объекта. Учет этой информации приводит к изменению статистических характеристик $y(t)$. При регулировке новых, ранее неизвестных сведений о состоянии объекта не представляется. Изменение статистических характеристик $y(t)$ происходит путем непосредственного воздействия на процесс $y(t)$. Указанные различия существенно влияют на вид зависимости $u(\tau, y^*)$.

Для неконтролируемых объектов поиск оптимальной стратегии управления рисками сводится к установлению соответствия между величинами регулировок случайного процесса $y(t)$ и моментами времени их проведения. Поскольку решение такой задачи осуществляется только по априорной информации, то перед началом эксплуатации объекта можно найти функцию $r(t)$, $r \in R$, которая и определяет закон управления случайным процессом $y(t)$ в функции времени, т.е. $u(t)$. Следовательно, при $U \equiv R$ решение задачи (2) поиска $u^{opt}(\tau, y^*)$ можно представить как $r^{opt}(t) \equiv u^{opt}(t)$. При этом задачу поиска $r^{opt}(t)$ можно рассматривать как расширение задачи оптимальной настройки [11].

Если в класс допустимых управлений U входят контроль и регулировка $y(t)$, т.е. $R \subset U$, то обойти трудности, связанные с нахождением стратегии управления в виде $u(\tau, y^*)$ не удастся. Решение задачи (2) в этом случае необходимо получить в общем виде. Выбор метода поиска $u(\tau, y^*)$ зависит от конструкции критерия оптимальности $G(y, u, t)$ [12].

Рассмотрим задачу определения стратегии управления техногенными рисками с использованием принципа гарантированного результата (в минимаксной постановке) [13]. В соответствии с целью управления (1) данная задача может быть представлена в виде

$$g^* = \min_{u(t) \in U(t)} \max_{y(t) \in Y(t)} G(y, u, t). \quad (4)$$

Функция, доставляющая минимум максимуму (или максимум минимуму) критерия $G(y, u, t)$, является искомой минимаксной (или максиминной) стратегией управления рисками.

Использование минимаксного (или максиминного) принципа обеспечивает нахождение равномерно наилучшего правила решения задачи, т.е. равномерно наилучшей стратегии управления рисками $u(t)$. Условием существования указанной стратегии является наличие седловой точки функционала $G(y, u, t)$ по параметрам оптимизации. Вместе с тем характерной чертой минимаксного подхода является отсутствие готового рецепта для определения структуры решения задачи, т.е. не существует достаточно общей и эффективной процедуры поиска минимаксной (максиминной) стратегии управления рисками $u(t)$. Выбор метода решения задач (4) в каждом отдельном случае должен производиться на основании опыта и интуиции исследователя, исходя из конкретных особенностей задачи (конструкция критерия, формы представления исходных данных и т.п.). Такое положение в значительной мере обесценивает достоинства минимаксного подхода при определении стратегии управления рисками. С другой стороны, если удастся установить, что выбранная в условиях априорной неопределенности стратегия $u(t)$ удовлетворяет принципу минимакса (максимина), то это,

безусловно, является положительным фактором, поскольку гарантирует некоторый определенный уровень риска (прибыли), понизить (повысить) который в данных условиях невозможно.

Как отмечалось выше, важным элементом методологии управления техногенными рисками является прогнозирование изменений параметров технического состояния системы, осуществляемое по результатам контроля. Одним из достаточно эффективных методов прогноза в условиях неопределенности может стать метод индивидуального гарантированного прогноза [14, 15]. Метод гарантированного прогноза позволяет определить некоторую область, в пределах которой гарантированно будут находиться параметры технического состояния исследуемого объекта в заданный упрежденный момент времени. В отличие от традиционных вероятностно-статистических методов прогноза он позволяет получать решение при отсутствии сведений о вероятностных характеристиках ошибок наблюдений и других помех. Метод основан на использовании экстремальных свойств полиномов Карлина [16] и идеях минимаксного оценивания. Он позволяет при поиске минимаксной стратегии управления рисками получить данные о пределах (границах) изменения случайного процесса $\mathbf{y}(t) \in Y(t)$. Иначе говоря, относительно $\mathbf{y}(t)$ задать $\mathbf{b}^-(t) \leq \mathbf{y}(t) \leq \mathbf{b}^+(t), \forall t \in T$, где $\mathbf{b}^-(t)$ и $\mathbf{b}^+(t)$ – некоторые детерминированные функции. Можно считать, что по структуре $\mathbf{b}^-(t)$ и $\mathbf{b}^+(t)$ идентичны реализациям $\mathbf{y}(t)$, т.е. $\mathbf{b}^-(t)$ и $\mathbf{b}^+(t)$ – граничные (экстремальные) реализации случайного процесса $\mathbf{y}(t)$ [14], $Y(t) = \{\mathbf{y} \in R^n : \mathbf{b}^-(t) \leq \mathbf{y}(t) \leq \mathbf{b}^+(t)\}$.

При аппроксимации $\mathbf{y}(t)$ зависимостью

$$\mathbf{y}(t) = A\mathbf{F}, \quad (5)$$

где $\mathbf{F} = \{f_i(t)\}_{i=0}^n$ – набор детерминированных функций времени, A – матрица случайных (неопределенных) коэффициентов функции, $\mathbf{b}^-(t)$ и $\mathbf{b}^+(t)$, $t \in T$, можно определить как

$$\mathbf{b}^-(t) = B^-\mathbf{F}, \quad (6)$$

$$\mathbf{b}^+(t) = B^+\mathbf{F}, \quad (7)$$

где $B^+ = \|b_{ij}^+\|_{i=1, j=0}^{n,m}$, $B^- = \|b_{ij}^-\|_{i=1, j=0}^{n,m}$ – матрицы неслучайных коэффициентов.

Если функции $\mathbf{b}^-(t)$ и $\mathbf{b}^+(t)$ известны, то информация для решения задачи (4) определена. При этом оказываются излишними и не могут быть использованы любые другие данные о техническом состоянии объекта на множестве T , в том числе и результаты наблюдений случайного процесса $\mathbf{y}(t)$, $t \in T$. Соответственно, искомая стратегия при априори заданных $\mathbf{b}^-(t)$ и $\mathbf{b}^+(t)$ может быть представлена как $\mathbf{u}(t) \equiv \mathbf{r}(t)$, $U \equiv R$.

Если функции $\mathbf{b}^-(t)$ и $\mathbf{b}^+(t)$ заданы не полностью, например, с точностью до параметров B^+ и B^- (из выражений (6), (7)), то поступающая в процессе контроля $\mathbf{y}(t)$ информация может быть использована для устранения имеющейся неопределенности. Очевидно, что в этом случае контрольные измерения $\mathbf{y}(t)$ должны входить в состав допустимых управлений, а искомая стратегия будет $\mathbf{u}(t)$, $\mathbf{u} \in U \supset R$ (результат решения задачи (4)). При этом для нахождения неизвестных параметров функций необходимо использование определенной процедуры. Такая процедура должна обладать свойствами, обеспечивающими возможность ее применения в условиях ограниченности исходных данных (дискретный контроль $\mathbf{y}(t)$ в присутствии ошибок с неизвестными стохастическими свойствами).

Содержание основного этапа гарантированного управления рисками составляет задача поиска оптимальной (в минимаксном смысле) стратегии управления. Постановка этой задачи связана с определением последовательности, характера и величины управляющих воздействий, элементами множества которых являются наблюдения за состоянием технического объекта и регулировки его параметров (или замены отдельных блоков, узлов, элементов, угрожающих безотказности функционирования объекта на заданном интервале времени T). При этом в зависимости от информационного обеспечения, избранного критерия оптимальности, возможности управления, условий эксплуатации и т.п. в рамках общей постановки рассматриваемой задачи можно выделить ряд частных ее разновидностей. Так, при использовании разных критериев оптимальности возникают задачи формирования тех или иных стратегий гарантированного управления рисками. В частности, применение кри-

терия гарантированного времени безотказной работы обуславливает решение задачи поиска $\mathbf{u}^{opt}(\tau, \mathbf{y}^*)$, обеспечивающей:

- максимум гарантированного времени безотказной работы объекта (времени до момента наступления рисковог о события) при заданных ограничениях на ресурсы и возможности управления;
- заданное гарантированное время безотказной работы при минимальном расходе ресурса.

Для критерия гарантированного уровня материальных потерь при эксплуатации технического объекта на множестве T искомая стратегия управления (и соответственно решение задач определения такой стратегии) может быть представлена как стратегия, обеспечивающая:

- гарантированный минимум общих эксплуатационных потерь (или гарантированная максимальная эффективность эксплуатации);
- минимум гарантированных эксплуатационных потерь на отдельных отрезках интервала T .

В зависимости от возможностей управления рисками, наличия информации о закономерностях дрейфа параметров объекта и имеющихся ресурсах, среди разновидностей общей задачи можно выделить:

- задачи поиска глобально оптимальных стратегий гарантированного управления рисками;
- задачи определения локально-оптимальных стратегий;
- задачи нахождения вырожденных стратегий гарантированного управления рисками.

Приведенные выше задачи не исчерпывают всего многообразия разновидностей задач определения стратегий гарантированного управления рисками, но отражают основные особенности других таких задач и являются наиболее типичными для практики.

Локально-оптимальные стратегии гарантированного управления рисками

Трудности, связанные с нахождением оптимальной минимаксной стратегии гарантированного управления рисками, часто вынуждают прибегать к определенным упрощениям и вводить аппроксимацию. Такой подход является традиционным в теории оптимального управления и часто применяется на практике из-за большей простоты достижения конкретных результатов. Особенно велико значение этого перехода в условиях априорной неопределенности, когда уместно пойти на некоторые упрощения, без которых найти решение задачи чрезвычайно сложно либо вообще невозможно [12].

Вышеизложенное касается задачи построения стратегии гарантированного управления рисками

$$g^* = \min_{\mathbf{u}(t) \in U(t)} \max_{\mathbf{b}^-(t) \leq \mathbf{y}(t) \leq \mathbf{b}^+(t)} G(\mathbf{y}, \mathbf{u}, t), \quad (8)$$

в которой поиск необходимо осуществлять в условиях, когда границы возможных изменений параметров технического состояния $\mathbf{y}(t)$ априори не определены, т.е. область $[\mathbf{b}^-(t), \mathbf{b}^+(t)]$ не задана. Из-за недостатка априорных сведений при решении задачи (8) невозможно заранее установить функциональное соответствие между $\mathbf{y}(t)$ и ожидаемыми результатами гарантированного управления рисками, т.е. априори определить $\mathbf{u}^{opt}(\tau, \mathbf{y}^*)$. Построение области возможных значений параметров технического состояния и формирование искомой стратегии в задаче (8) требуется осуществлять на основе данных, получаемых в процессе управления рисками. Найти в такой ситуации глобально оптимальную стратегию управления чрезвычайно трудно. Для преодоления возникающих здесь трудностей можно аппроксимировать глобально-оптимальную стратегию управления совокупностью локально-оптимальных стратегий. При этом каждая из локально-оптимальных стратегий для уменьшения ошибки аппроксимации должна быть адаптивной, т.е. обладать способностью к улучшению по мере накопления данных об изменениях $\mathbf{y}(t) \in Y(t)$. Для нахождения области $[\mathbf{b}^-(t), \mathbf{b}^+(t)]$ можно использовать метод гарантированного прогноза [14].

Рассмотрим задачу поиска адаптивной локально-оптимальной стратегии гарантированного управления рисками с использованием минимаксного прогноза состояния технического объекта. Пусть управление рисками состоит в проведении в фиксированные моменты времени $\{\tau_i\}_{i=0}^p$, $\tau_i \in T$ контрольных измерений или совмещенных с контролем регулировок $\mathbf{y}(t)$. При этом на интервале $[\tau_0, \tau_k] \in T$, $k < p$ можно без ущерба нормального функционирования объекта лишь контролировать $\mathbf{y}(t)$. Другими словами, существует некоторый интервал, где заведомо известно, что регулировки $\mathbf{y}(t)$ не потребуются (рисковое событие не произойдет). Этот интервал $[\tau_0, \tau_k]$ можно назвать интерва-

лом накопления информации. Далее пусть относительно ошибки контроля $\mathbf{e}(t)$ известно только, что она лежит в пределах $[c_1(t), c_2(t)]$. Функция потерь $H(\mathbf{y})$ задана. Затраты на проведение одной регулировки составляют χ . Изменение технического состояния объекта $\mathbf{y}(t)$ на интервале эксплуатации можно описать в виде зависимости (5). Требуется найти такую стратегию управления рисками, реализация которой обеспечивает гарантированный минимум эксплуатации потерь на множестве T .

Поставленная задача является разновидностью задачи (4) формирования минимаксной стратегии $\mathbf{u}^{opt}(\tau, \mathbf{y}^*)$ по критерию затрат, связанных с эксплуатацией – S_T . Она может быть представлена как [6]

$$g^* = \inf_{\mathbf{r} \in R} \sup_{B^- \leq A \leq B^+} \left\{ \int_{\tau_i}^{\tau_{i+1}} H(A, \mathbf{r}, t) dt + w_i \chi \right\}, \quad (9)$$

где B^-, B^+ – параметры функций $\mathbf{b}^-(t)$ и $\mathbf{b}^+(t)$ экстремальных реализаций, образующих «конус прогноза» [5], $\mathbf{b}^-(t) \leq \mathbf{y}(t) \leq \mathbf{b}^+(t)$, $t > \tau_i$, $i \geq k$, $w_i = \begin{cases} 0, & \mathbf{r} \notin R, \\ 1, & \mathbf{r} \in R, \end{cases} \quad i = \overline{k, p}$.

Алгоритм решения задачи (9) состоит в следующем:

- 1) на интервале $[\tau_0, \tau_k] \in T$ по результатам измерений случайного процесса $\mathbf{y}(t)$ с помощью алгоритма гарантированного прогноза строятся экстремальные реализации $\mathbf{b}^-(t)$, $\mathbf{b}^+(t)$ и определяются параметры B^-, B^+ ;
- 2) вычисляются g^* и соответствующие ему настройки \mathbf{r} (если $\mathbf{r} \notin R$, то регулировка $\mathbf{y}(t)$ в момент τ_k не производится);
- 3) осуществляется контрольное измерение $\mathbf{y}(t)$ в момент τ_{k+1} , с помощью алгоритма минимаксного гарантированного прогноза уточняются B^- и B^+ ;
- 4) повторяется п. 2 для момента τ_{k+1} (определяется необходимость регулировки $\mathbf{y}(t)$ в момент τ_{k+1});
- 5) процедура повторяется, начиная с п. 3, до тех пор, пока $\tau_{k+1} \in T$.

Предложенный алгоритм является однозначным, локально-оптимальным и адаптивным.

Другой разновидностью задачи (4) является задача построения $\mathbf{u}^{opt}(\tau, \mathbf{y}^*)$ по критерию гарантированного времени безотказного функционирования.

Пусть гарантированное управление техногенными рисками состоит в проведении в некоторые моменты времени контрольных измерений и регулировок $\mathbf{y}(t)$ или только контрольных измерений $\mathbf{y}(t)$. Ошибки контроля лежат в пределах $[c_1(t), c_2(t)]$. На интервале $[\tau_0, \tau_k]$ проводить регулировки $\mathbf{y}(t)$ не требуется. Изменения технического состояния объекта $\mathbf{y}(t)$ можно описать с помощью зависимости (5). Требуется определить стратегию управления рисками, гарантирующую безотказность функционирования объекта при условии, что время между двумя управлениями будет не меньше ΔT . При этом, если $\mathbf{y}(t) \in D$, где D – заданная область работоспособности [9], то объект функционирует нормально.

Сформулированная задача может быть представлена в виде

$$\tau_{i+1}^* = \max_{\mathbf{r} \in R} \min_{A=B^-, B^+} \{ \tau : \mathbf{y}(A, \mathbf{r}, \tau) \notin D \}, \quad (10)$$

при $\tau_{i+1}^* - \tau_i^* \geq \Delta T$, где B^-, B^+ – параметры функций $\mathbf{b}^-(t)$ и $\mathbf{b}^+(t)$, $\mathbf{b}^-(t) \leq \mathbf{y}(t) \leq \mathbf{b}^+(t)$, $t > \tau_i$, $i \geq k$.

Алгоритм решения задачи (10) состоит в следующем:

- 1) по данным контроля $\mathbf{y}(t)$ на интервале $[\tau_0, \tau_k]$ определяются параметры B^- и B^+ ;
- 2) вычисляются τ_{k+1}^* и величина $\mathbf{r} \in R$ для τ_k (если $\mathbf{r} \notin R$, то регулировка в момент τ_k не проводится);
- 3) если $\tau_{i+1}^* - \tau_i^* \geq \Delta T$, то осуществляется контрольное измерение $\mathbf{y}(t)$ в момент τ_{k+1}^* , с помощью минимаксного прогноза уточняются B^- и B^+ (при $\tau_{i+1}^* - \tau_i^* \leq \Delta T$ формирование $\mathbf{u}^{opt}(\tau, \mathbf{y}^*)$ завершается);
- 4) повторяется п. 2 для τ_{k+2}^* (если $\mathbf{r} \notin R$, то регулировка в момент τ_{k+1}^* не проводится).

Далее процедура повторяется, начиная с п. 3, до тех пор, пока $\tau_{i+1}^* - \tau_i^* \geq \Delta T$.

Нетрудно заметить, что представленный алгоритм является однозначным, локально-оптимальным и адаптивным. Эффективность такого алгоритма, как и описанного выше, можно оценить, сравнивая гарантированное время безотказного функционирования объекта без управления с полученным при применении предложенного алгоритма.

Наиболее общим и естественным критерием оптимальности гарантированного управления рисками является критерий, имеющий экономическую природу. В конечном счете, мы всегда стремимся так управлять объектом, чтобы суммарный эффект от его использования во время эксплуатации был бы максимальным. Одним из таких показателей является, в частности, показатель гарантированного уровня общих материальных затрат S_T . Для формирования искомой стратегии $\mathbf{u}_g^{opt}(\tau, \mathbf{y}^*)$, учитывая аддитивность критерия S_T , можно применить принцип оптимальности Беллмана [17]. За счет аддитивности S_T на основе принципа оптимальности Беллмана может быть достигнута глобально-оптимальная стратегия гарантированного управления рисками $\mathbf{u}_g^{opt}(\tau, \mathbf{y}^*)$ пошаговой минимизацией критерия S_T . Соответствующие алгоритмы являются адаптивными, так как совместно с принятием основных решений оценивают сложившуюся обстановку, чем улучшают процесс принятия решений. Они, как правило, могут быть реализованы в рекуррентном виде [15, 18].

Заключение

Исследованы некоторые пути решения проблемы управления техногенными рисками, источником которых являются постепенные отказы. Особую важность решение этой проблемы приобретает применительно к уникальным системам ответственного назначения, отказы которых приводят к существенным материальным потерям или катастрофическим последствиям.

В статье основное внимание уделено синтезу стратегии управления техногенными рисками на основе принципа гарантированного результата и с использованием идей функционально-параметрического направления теории надежности. Особенность возникающих задач состоит в том, что они решаются в условиях неполной и не всегда достоверной информации, управления ищутся на основе прогноза, а результат управления должен быть гарантирован. Для решения задачи выбора оптимальной стратегии управления техногенными рисками используется минимаксный принцип, гарантирующий получение положительного результата даже в самых неблагоприятных условиях. Отметим также, что созданные с использованием гарантирующего подхода алгоритмы формирования стратегии управления техногенными рисками достаточно просты в реализации и позволяют в условиях существенной ограниченности и неопределенности исходных данных находить стратегию управления техногенными рисками, гарантирующую безотказность и высокое качество функционирования исследуемых объектов.

Список литературы

1. Острейковский В. А. Теория техногенного риска: математические методы и модели. Сургут : ИЦ СурГУ, 2013.
2. Aven T. Risk assessment and risk management: Review of recent advances on their foundation // *European Journal of Operational Research*. 2016. № 25. P. 1–13.
3. Kaplan S., Garrick B. J. On the quantitative definition of risk // *Risk Analysis*. 1981. № 1. P. 11–27.
4. Abramov O., Dimitrov B. Reliability design in gradual failures: a functional-parametric approach // *Reliability: Theory & Applications*. 2017. Vol. 12, № 4. P. 39–48.
5. Abramov O. V., Nazarov D. A. Functional-Parametric Direction of Risk Theory // *The 13th Asian Control Conference (ASCC 2022)*. May 4–7, 2022 (Wed-Sat), International Convention Center. Jeju Island, Korea, IEEE, 2022. P. 1911–1913. doi:10.23919/ASCC56756.2022.9828266
6. Абрамов О. В. Об одном направлении теории техногенного риска // XIII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2019 (г. Москва, 17–20 июня 2019 г.) : сб. тр. / под общ. ред. Д. А. Новикова. М. : ИПУ РАН, 2019. С. 2827–2831.
7. Абрамов О. В., Назаров Д. А. Программно-алгоритмический комплекс построения, анализа и использования областей работоспособности // *Информационные технологии и вычислительные системы*. 2015. № 2. С. 3–13.
8. Тихонов В. И., Хищенко В. И. Выбросы траекторий случайных процессов. М. : Наука, 1987.
9. Фомин Я. Н. Теория выбросов случайных процессов. М. : Связь, 1980.

10. Абрамов О. В. Выбор параметров настройки технических устройств и систем // Проблемы управления. 2011. № 4. С. 13–19.
11. Abramov O. V. Choosing optimal values of tuning parameters for technical devices and systems // Automation and Remote Control. 2016. Vol. 77, № 4. P. 594–603.
12. Репин В. Г., Тартаковский Т. П. Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем. М. : Сов. радио, 1977.
13. Гермейер Ю. Б. Введение в теорию исследования операций. М. : Наука, 1973.
14. Абрамов О. В. Основные особенности и свойства метода гарантированного прогноза // Надежность и качество сложных систем. 2017. № 1. С. 3–10.
15. Abramov O., Nazarov D. Condition-based maintenance by minimax criteria // Applied Mathematics in Engineering and Reliability : Proceedings of the 1st International Conference on Applied Mathematics in Engineering and Reliability. Ho Chi Minh City, Vietnam, 2016. P. 91–94.
16. Карлин С., Стадден В. Чебышевские системы и их применение в анализе и статистике. М. : Наука, 1976. 586 с.
17. Беллман Р., Дрейфус С. Прикладные задачи динамического программирования. М. : Наука, 1965. 458 с.
18. Абрамов О. В. Контроль и прогнозирование технического состояния систем ответственного назначения // Надежность и качество сложных систем. 2018. № 4. С. 108–115.

References

1. Ostreykovskiy V.A. *Teoriya tekhnogennogo riska: matematicheskie metody i modeli = Technogenic risk theory: mathematical methods and models*. Surgut: ITs SurGU, 2013. (In Russ.)
2. Aven T. Risk assessment and risk management: Review of recent advances on their foundation. *European Journal of Operational Research*. 2016;(25):1–13.
3. Kaplan S., Garrick B.J. On the quantitative definition of risk. *Risk Analysis*. 1981;(1):11–27.
4. Abramov O., Dimitrov B. Reliability design in gradual failures: a functional-parametric approach. *Reliability: Theory & Applications*. 2017;12(4):39–48.
5. Abramov O.V., Nazarov D.A. Functional-Parametric Direction of Risk Theory. *The 13th Asian Control Conference (ASCC 2022). May 4–7, 2022 (Wed-Sat), International Convention Center. Jeju Island, Korea, IEEE, 2022:1911–1913. doi:10.23919/ASCC56756.2022.9828266*
6. Abramov O.V. About one direction of the theory of technogenic risk. *XIII Vserossiyskoe soveshchanie po problemam upravleniya VSPU-2019 (g. Moskva, 17–20 iyunya 2019 g.): sb. tr. = XIII All-Russian meeting on management problems of VSPU-2019 (Moscow, June 17-20, 2019) : proceedings*. Moscow: IPU RAN, 2019:2827–2831. (In Russ.)
7. Abramov O.V., Nazarov D.A. Programmno-algorithmic complex of construction, analysis and use of areas of operability. *Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy = Information technologies and computing systems*. 2015;(2):3–13. (In Russ.)
8. Tikhonov V.I., Khimenko V.I. *Vybrosy traektoriy sluchaynykh protsessov = Emissions of trajectories of random processes*. Moscow: Nauka, 1987. (In Russ.)
9. Fomin Ya.N. *Teoriya vybrosov sluchaynykh protsessov = Theory of emissions of random processes*. Moscow: Svyaz', 1980. (In Russ.)
10. Abramov O.V. Choice of settings for technical devices and systems. *Problemy upravleniya = Control problems*. 2011;(4):13–19. (In Russ.)
11. Abramov O.V. Choosing optimal values of tuning parameters for technical devices and systems. *Automation and Remote Control*. 2016;77(4):594–603.
12. Repin V.G., Tartakovskiy T.P. *Statisticheskii sintez pri apriornoj neopredelennosti i adaptatsiya informatsionnykh system = Statistical synthesis with a priori uncertainty and adaptation of information systems*. Moscow: Sov. radio, 1977. (In Russ.)
13. Germeyer Yu.B. *Vvedenie v teoriyu issledovaniya operatsiy = Introduction to the theory of operations research*. Moscow: Nauka, 1973. (In Russ.)
14. Abramov O.V. Main features and properties of the guaranteed forecast method. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2017;(1):3–10. (In Russ.)
15. Abramov O., Nazarov D. Condition-based maintenance by minimax criteria. *Applied Mathematics in Engineering and Reliability: Proceedings of the 1st International Conference on Applied Mathematics in Engineering and Reliability*. Ho Chi Minh City, Vietnam, 2016:91–94.
16. Karlin S., Stadden V. *Chebyshevskie sistemy i ikh primenenie v analize i statistike = Chebyshev systems and their application in analysis and statistics*. Moscow: Nauka, 1976:586. (In Russ.)
17. Bellman R., Dreyfus S. *Prikladnye zadachi dinamicheskogo programmirovaniya = Applied problems of dynamic programming*. Moscow: Nauka, 1965:458. (In Russ.)
18. Abramov O.V. Control and forecasting of the technical condition of systems of responsible purpose. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2018;(4):108–115. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Олег Васильевич Абрамов

доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ,
главный научный сотрудник лаборатории
управления надежностью сложных систем,
Институт автоматизации и процессов управления
Дальневосточного отделения
Российской Академии наук
(Россия, г. Владивосток, ул. Радио, 5)
E-mail: abramov@iacp.dvo.ru

Oleg V. Abramov

Doctor of technical sciences, professor,
honored Scientist of the Russian Federation,
chief researcher of the laboratory
of complex systems reliability management,
Institute for Automation and Control processes,
Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences
(5 Radio street, Vladivostok, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 20.11.2022

Поступила после рецензирования/Revised 22.12.2022

Принята к публикации/Accepted 20.01.2023