

О. В. Абрамов

КОНТРОЛЬ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМ ОТВЕТСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ¹

O. V. Abramov

MONITORING AND PREDICTING THE STATE OF HIGHLY RESPONSIBLE SYSTEMS

Аннотация. Рассмотрена одна из возможных постановок задачи планирования эксплуатации контролируемых технических систем, возникающих в рамках функционально-параметрического направления теории рисков. Показано, что на основе предложенных рекуррентных алгоритмов минимаксного оценивания (прогноза) технического состояния с использованием идеи эллипсоидального оценивания можно реализовать гарантирующую стратегию управления техногенными рисками. Предложенный подход позволяет осуществлять прогноз даже при небольшом числе измерений параметров, не требует сведений о стохастических свойствах ошибок измерений и других помех, обладает адаптивными свойствами. Наиболее целесообразно использовать его при планировании эксплуатации сложных систем ответственного назначения, отказы которых связаны с большими материальными потерями или катастрофическими последствиями.

Ключевые слова: техногенный риск, параметр, работоспособность, техническая система, измерения, оценка состояния, прогнозирование, эксплуатация.

Abstract. One of the possible statements of the problem of planning of operation of the controlled engineering systems arising in the framework of the functional-parametric direction of the risk theory is considered. It is shown that on the basis of the proposed recurrent algorithms of minimax estimation (prediction) of the technical condition with the use of the idea of ellipsoidal estimation it is possible to implement a strategy of technogenic risk management. The proposed approach makes it possible to make prediction even with a small number of parameters measurements, does not require information about the stochastic properties of measurement errors and other noise, has adaptive properties. It is most advisable to use it when planning the operation of complex systems of responsible purpose, failures which are associated with large material losses or catastrophic consequences.

Key words: technogenic risk, parameter, working capacity, engineering system, measurements, state estimation, prediction, operation.

Введение

Проблема предупреждения отказов и 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.

Решение задачи предотвращения отказов систем ответственного назначения (СОН) в значительной степени зависит от возможности мониторинга и прогнозирования их технического состояния или остаточного ресурса [1–3].

Под мониторингом понимается процесс получения и первичной обработки информации о техническом состоянии элементов СОН, воздействующих факторах окружающей среды и реализуемых СОН эксплуатационных процессах. Данные мониторинга являются важным элементом решения задачи оценки остаточного ресурса (запаса работоспособности), прогнозирования изменения технического состояния в процессе эксплуатации и снижения риска возникновения аварийных ситуаций.

¹ Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта ДВО РАН программы «Дальний Восток», проект № 18-5-044.

Проблема предупреждения рискованных событий (отказов) СОН связана с решением следующих задач:

- оценка технического состояния системы в интересующий нас момент времени (заданный или рассчитываемый);
- оценка запаса работоспособности или остаточного ресурса в определенный момент времени;
- прогнозирование расходования ресурса (изменения технического состояния);
- выбор стратегии эксплуатации, гарантирующей сохранение работоспособности в течение заданного или рассчитываемого времени эксплуатации.

Исходной информацией о принятии решения о техническом состоянии системы являются измеренные значения ее параметров (оценки параметров). При этом контролируемые могут быть внутренние параметры (параметры элементов системы) или выходные параметры (параметры состояния, показатели качества). В обоих случаях принятие решения осуществляется путем непосредственного сравнения оценок параметров с границами области работоспособности [4]. Степень удаленности параметров от границ допустимых изменений можно использовать для оценки запаса работоспособности или остаточного ресурса в момент контроля.

Важную роль при решении проблемы предотвращения отказов СОН играет прогнозирование расходования ресурса (изменения технического состояния) в процессе эксплуатации. Умение предсказать возможный момент наступления рискованного события (отказа) и принять необходимые меры по предотвращению отказа особенно важно, если потеря работоспособности системы связана с большими материальными потерями или катастрофическими последствиями. Вместе с тем специфика эксплуатации многих из СОН не позволяет решить эту задачу даже при непрерывном контроле технического состояния, поскольку в течение определенных промежутков времени эксплуатации техническое обслуживание становится невозможным (летательных аппаратов – во время полета, надводных и подводных судов – во время рейса, радиоэлектронной аппаратуры в течение сеанса связи или слежения за целью и т.д.).

Для многих технических объектов непрерывный контроль осуществить невозможно, а при дискретном контроле каждая оценка их фактического состояния часто связана с существенными материальными затратами. В этих случаях прогнозирование позволяет решать задачу назначения оптимальных моментов контроля, в промежутках между которыми не произойдет отказа.

Основные трудности при решении задачи прогнозирования для синтеза превентивной стратегии эксплуатации по состоянию связаны с тем, что прогноз приходится осуществлять для каждого объекта индивидуально, при малых объемах исходной информации (по небольшому набору результатов контроля), и в присутствии помех (ошибок контроля), 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 приводит к существенным ошибкам и невысокой достоверности прогноза.

Индивидуальное прогнозирование и управление рисками

Для технических систем ответственного назначения 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 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 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 помех.

Планирование моментов времени проведения контроля на заданном интервале эксплуатации можно рассматривать в качестве важного элемента задачи управления техногенными рисками (управления эксплуатацией). Задача сводится к поиску наиболее рационального плана наблюдений (содержащего только минимально необходимые элементы), выполнение которого направлено на возможно более полное использование потенциального эксплуатационного ресурса СОН.

Для преодоления возникающих при этом трудностей можно использовать минимаксный подход, т.е. расчет на «наихудший» случай. Указанный подход к решению задач прогнозирования состояния связан не с минимизацией среднего риска по Байесу (как в фильтрах калмановского типа), а с минимизацией максимального риска. При этом объем обрабатываемой выборки может быть малым, а ее вероятностные свойства неизвестными.

Пусть процесс изменения технического состояния исследуемой системы в процессе ее эксплуатации $y(t)$ достаточно хорошо описывается следующей моделью:

$$y(t) = A \cdot F(t) + c(t), t \in T, \tag{1}$$

где T – интервал эксплуатации; $F(t) = \{f_j(t)\}_{j=0}^m$ – непрерывные детерминированные функции времени; $A = \|a_{ij}\|_{i=1, j=0}^{n,m}$ – матрица неопределенных (или случайных) коэффициентов; $c(t) = \{c_i(t)\}_{i=1}^n$ – неизвестные ошибки модели, область возможных вариаций которых может быть представлена как канонический эллипсоид $C(t)$:

$$C(t) = \{c(t): c(t)^T \cdot B(t)^{-1} \cdot c(t) \leq 1\}, t \in T, \tag{2}$$

где $B(t)$ – известная симметрическая, положительно определенная матрица.

Представление вида (1) можно интерпретировать как разложение процесса эксплуатационных изменений параметров технической системы по известному детерминированному базису.

На интервале наблюдений $T_L \subseteq T$ техническое состояние системы $y(t)$ можно контролировать с ошибками $e(t)$. При этом результаты контроля образуют последовательность

$$z(t_k) = y(t_k) + e(t_k), k = \overline{1, L}. \tag{3}$$

Будем считать, что стохастические свойства помехи $e(t)$ не определены, а известна лишь область ее возможных значений. Указанная область может быть представлена, как и для ошибок используемой модели $c(t)$, в виде канонического эллипсоида $E^*(t)$:

$$E^*(t) = \{e(t): e(t)^T \cdot R(t)^{-1} \cdot e(t) \leq 1\}, t \in T_L \subseteq T, \tag{4}$$

где $R(t)$ – известная симметрическая положительно определенная матрица.

В большинстве практических ситуаций ограничения вида (4) несложно найти исходя, например, из класса точности используемой измерительной аппаратуры [5].

Применительно к модели (1) задача оценки (или прогноза) технического состояния системы сводится к определению по некоторой совокупности исходных данных оценок неизвестных коэффициентов $\|a_{ij}\|_{i=1, j=0}^{n,m}$.

Такие оценки могут быть найдены с помощью минимаксных алгоритмов прогноза состояния. Применение минимаксного принципа (расчет на «наихудший» случай) может позволить преодолеть влияние неопределенных мешающих факторов на качество оценок прогноза состояния технических объектов.

При этом алгоритмы минимаксного (гарантированного) прогноза состояния направлены на построение гарантированных границ изменения параметров технического состояния системы $y(t)$ при $t \in T \setminus T_L$, т.е. на получение интервальной оценки $y(t)$, или на нахождение точечных оценок $y(t)$ с гарантированной максимально возможной ошибкой оценивания.

Построение алгоритмов минимаксной оценки коэффициентов $\|a_{ij}\|_{i=1, j=0}^{n,m}$ целесообразно выполнять, применяя рекуррентную форму обработки информации. При этом отпадает необходимость в

запоминании больших массивов исходных данных и оказывается возможным использовать для решения, собственно, задачи синтеза стратегии наблюдений имеющиеся наработки в области теории управления [6, 7].

Рассмотрим задачу построения рекуррентных алгоритмов минимаксного оценивания (прогноза) технического состояния СОН.

Фактически при описании (аппроксимации) области возможных значений ошибок наблюдений эллипсоидом $E^*(t)$ алгоритм решения задачи поиска минимаксных оценок $\|a_{ij}\|_{i=1, j=0}^{n,m}$ состоит в нахождении на каждом шаге контроля эллипсоида минимального объема $\gamma^*(t_k) = \gamma(\mathbf{h}_k^*, X_k^*)$, где \mathbf{h}_k^* – координаты центра эллипсоида, X_k^* – симметрическая положительно определенная матрица:

$$\gamma(t_k) \cap E^*(t_k), \text{ где } \gamma(t_k) \Leftrightarrow \gamma(\mathbf{h}_k, X_k);$$

$$E^*(t_k) = \left\{ (\mathbf{z}(t_k) - A \cdot \mathbf{F}(t_k))^T \cdot R^{-1}(t_k) \cdot (\mathbf{z}(t_k) - A \cdot \mathbf{F}(t_k)) \leq 1 \right\}, t_k \in T_L \setminus T_m.$$

При отсутствии расхождений между реальным процессом $\mathbf{y}(t)$ и его модельным представлением по $\gamma^*(t_k)$ могут быть найдены минимаксные или гарантированные оценки $\mathbf{y}(t)$, $t \geq t_k$. Если же $\mathbf{y}(t)$ только приблизительно удовлетворяет зависимости (1), то влияние ошибок модели приведет к снижению достоверности результатов прогноза, получаемых по области $\gamma^*(t_k)$. Для устранения этого влияния можно ввести в модель (1) дополнительную составляющую – матрицу Ξ размерности $n \times (m + 1)$, значения которой лежат в известном каноническом эллипсоиде $\Phi(0, W)$, где W – положительно определенная симметрическая матрица. Область $\Phi(0, W)$ обеспечивает необходимую коррекцию. Однако $\{\Phi(0, W) + \gamma^*(t_k)\}$ в общем случае не является эллипсоидом. При построении гарантированных оценок $\mathbf{y}(t_{k+1})$ ее целесообразно аппроксимировать эллипсоидом наименьшего объема $\gamma(t_{k+1})^{**} \Leftrightarrow \gamma(\mathbf{h}_{k+1}^{**}, X_{k+1}^{**})$, где координаты центра эллипсоида – \mathbf{h}_{k+1}^{**} , X_{k+1}^{**} – положительно определенная симметрическая матрица.

Основой для формирования $\gamma(t_{k+1})^{**}$ по существу служит область $\gamma(\mathbf{h}_k^*, X_k^*)$. В частности, при $\Phi(0, W) \in \gamma(\mathbf{h}_k^*, X_k^*)$ эллипсоид $\gamma^*(t_k) \equiv \gamma^{**}(t_k)$ и $\mathbf{h}_k^* \equiv \mathbf{h}_{k+1}^{**}$, $X_k^* \equiv X_{k+1}^{**}$. При этом условие $\Phi(0, W) + \gamma^*(t_k)$ эквивалентно $\chi \leq -(n \cdot (m + 1))^{-1}$, где $n \times (m + 1)$ – размер матрицы A в модели (1):

$$\chi = (1 - \mu) \left[\mu^2 \cdot (X_k \cdot \mathbf{v}, \mathbf{v})^{1/2} \right]^{-1};$$

$$\mathbf{v} = V^T(t_k) \cdot R^{-1}(t_k) \cdot (\mathbf{z}(t_k) - A \cdot \mathbf{F}(t_k));$$

где $V(t_k)$ – матрица размера $n \times ((n + 1)(m + 1))$, составляется последовательным сдвигом по строкам на $i \cdot (m + 1)$ позиций транспонированного вектора $\{f_j(t_k)\}_{j=0}^m$ (i – номер строки в матрице $V(t_k)$);

$$\mu = (R^{-1}(t_k) \cdot (\mathbf{z}(t_k) - A \cdot \mathbf{F}(t_k)), (\mathbf{z}(t_k) - A \cdot \mathbf{F}(t_k)))^{-1/2}.$$

Если $\chi \in \left[-(n(m + 1))^{-1}, 1 \right]$, то

$$\mathbf{h}_k^* = \mathbf{h}_k + \frac{\chi \cdot n(m + 1) + 1}{n(m + 1) + 1} \cdot \frac{X_k \cdot \mathbf{v}}{(X_k \cdot \mathbf{v}, \mathbf{v})^{1/2}}; \quad (5)$$

$$X_{k+1}^* = \left(\frac{(n(m + 1))^2 - 1}{(n(m + 1))^2 (1 - \chi^2)} \cdot X_k^{-1} + \frac{2(\chi + 1)(n(m + 1) + 1)}{(n(m + 1))^2 (1 - \chi^2)(1 - \chi)} \cdot \frac{\mathbf{v} * \mathbf{v}}{(X_k \cdot \mathbf{v}, \mathbf{v})} \right)^{-1};$$

$$\mathbf{h}_{k+1}^{**} = \mathbf{h}_k^*, \quad X_{k+1}^{**} = (\beta^{-1} + 1) \cdot B(t_k) + (\beta + 1) \cdot X_{k+1}^*,$$

где β – единственный положительный корень уравнения

$$\sum_{s=0}^{n(m+1)} \frac{1}{\lambda_s + \beta} = \frac{n(m+1)}{\beta(\beta+1)};$$

$\lambda_s, s = 0, n(m+1)$ – корни уравнения $\det(B(t_k) - \lambda \cdot X_{k+1}^*) = 0$.

Для построения гарантированных оценок $\mathbf{y}(t)$ по области $\gamma(t_{k+1})^{**}$ можно использовать соотношение

$$\begin{aligned} Z(\mathbf{y}(t)) &= V(t) \cdot X_k^{*-1} \cdot V^T(t), \\ \mathbf{q}(\mathbf{y}(t)) &= V(t) \cdot \mathbf{h}_{k+1}, \end{aligned} \tag{6}$$

где $Z(\mathbf{y}(t))$ – положительно определенная симметрическая матрица, определяющая параметры эллипсоида для $\mathbf{y}(t)$; $\mathbf{q}(\mathbf{y}(t))$ – координаты центра эллипсоида для $\mathbf{y}(t)$.

В результате рекуррентный алгоритм получения эллипсоидальных оценок коэффициентов матрицы A и прогноза искомых параметров $\mathbf{y}(t)$ может быть представлен следующим образом:

- 1) ввод исходных ограничений на коэффициенты матрицы A и $\mathbf{y}(t_0)$, а также на ошибки модели и наблюдений в виде эллипсоидов;
- 2) уточнение области вариации коэффициентов модели с использованием результатов очередного наблюдения по формулам (5);
- 3) проверка соответствия оцениваемых параметров наблюдаемым по формулам (6);
- 4) вычисление V_1 – объема области вариации коэффициентов модели на момент очередного наблюдения;
- 5) вычисление V_2 – объема области вариации прогнозируемых параметров на момент t^* после очередного наблюдения;
- 6) переход к п. 2 до тех пор, пока имеются наблюдения. Иначе к п. 7;
- 7) вывод результатов.

Рассмотрим пример.

Пусть результаты контроля параметров технического состояния системы $\mathbf{y}(t) = \{a_1 + a_2 \cdot e^{0,001t}; a_3 + a_4 \cdot t\}$ в моменты времени эксплуатации (в точках) $t_{m+1} = 500, t_{m+2} = 800, t_{m+3} = 1200$ составляют векторы $\mathbf{z}(500) = \{6; 10,6\}, \mathbf{z}(800) = \{6,1; 10,9\}, \mathbf{z}(1200) = \{6,3; 11,4\}$.

С учетом трансформации модели относительно $\mathbf{y}(t)$ в модель относительно коэффициентов $\{a_1, a_2, a_3, a_4\} = \mathbf{a}$, эллипсоид коррекции модели $\mathbf{a}(t)$ задан как $\Phi_a(0, W_a)$, где W_a – диагональная матрица. Ошибки наблюдения $\mathbf{e}(t) \in E^*(0, R)$, где R – диагональная матрица. При этом

$$W_a = \begin{pmatrix} 0,0022 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2,7 \cdot 10^{-6} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,007 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 7 \cdot 10^{-11} \end{pmatrix}; \quad R = \begin{pmatrix} 0,0025 & 0 \\ 0 & 0,0028 \end{pmatrix};$$

$$V(t) = \begin{pmatrix} 1 & e^{0,001t} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & t \end{pmatrix}.$$

Найдем гарантированную оценку $\mathbf{y}(t)$ на момент $t_{m+4} = 5000$, если $\mathbf{z}(t_{m+4}) = \{35,3; 15,1\}$.

Выполняя вычисления по алгоритму эллипсоидального оценивания, получаем

$$\mathbf{q}_{m+4} = \{35,32; 15,1918\}; \quad Z(t_{m+4}) = \begin{pmatrix} 0,9955 & -0,0025 \\ -0,0025 & 0,0829 \end{pmatrix}.$$

Подстановка в выражение

$$(\mathbf{z}(t_{m+4}) - \mathbf{y}(t_{m+4}))^T \cdot Z^{-1}(t_{m+4}) (\mathbf{z}(t_{m+4}) - \mathbf{y}(t_{m+4})) \leq 1$$

дает результат $0,1021 < 1$.

Следовательно, полученная оценка соответствует реальным значениям $\mathbf{y}(t_{m+4})$.

По приведенному примеру можно судить о сходимости используемого рекуррентного алгоритма эллипсоидального оценивания. При этом интегральным критерием сходимости может служить объем эллипсоида ошибок коэффициентов модели, определяемого в темпе поступления результатов наблюдений. Анализируя динамику изменения указанной величины в соответствии с исходными данными, нетрудно заметить, что сходимость в данном случае практически линейная.

При эксплуатации СОН немаловажным является вопрос о том, когда (в какие моменты времени эксплуатации) наиболее целесообразно проводить измерения параметров, характеризующих их работоспособность. Соответственно, минимаксный алгоритм планирования наблюдений параметров состояния СОН должен определять моменты времени проведения наблюдений и состав измеряемых параметров (план наблюдений Θ). Построение данного алгоритма можно осуществить на основе использования методов вариационного исчисления, т.е. классических методов условно-глобальной оптимизации.

Определение программы наблюдений на основе рекуррентного алгоритма прогноза состояния СОН требует приведения модели вида (1) к разностной форме. Такое преобразование можно осуществить следующим образом.

В выражении (1) неизвестными величинами являются коэффициенты матрицы A . В дальнейшем коэффициенты матрицы A можно рассматривать как компоненты искомого вектора оцениваемых параметров $\left\{ \left\{ a_{ji} \right\}_{i=1}^n \right\}_{j=1}^m \Rightarrow \mathbf{k}(t)$.

При этом задача оценивания состояния системы сводится к определению $\mathbf{k}(t)$ по модели

$$\begin{aligned} \mathbf{k}(t+1) &= \Phi_1 \cdot \mathbf{k}(t) + \Phi_2 \cdot \delta(t), \quad t \in T, \\ z(t_k) &= \theta_k \cdot \Gamma_k \cdot \mathbf{k}(t_k) + \mathbf{e}(t_k), \quad t_k \in T_L \subset T, \end{aligned} \quad (7)$$

где $\Phi_1 = \Phi_2 = E_{mn}$ – единичные матрицы размером $(mn \times mn)$, $\Gamma_k (n \times mn) = F^T(t_k) \otimes E_n$ (\otimes – Кронекерово произведение матриц). Выражение (7) определяет все потенциально возможные измерения, соответствующие плану измерений $\Theta = \{ \theta_k, \Gamma_k \}_{k=1}^L$, где $\{ \theta_k \}$, $\theta_k \in \theta_k^* = \{0; 1\}$ – программа измерений; $\{ \Gamma_k \}$, $\Gamma_k \in \Delta_k$ – последовательность матриц, указывающая на состав измеряемых параметров из потенциального множества Δ_k . Ограничения на $\{ \delta(t_k) \}$ и $\{ \mathbf{e}(t_k) \}$ из (7) могут быть заданы в виде несвязанных эллипсоидов типа

$$\begin{aligned} O(t_k) &= \{ \delta = \delta(t_k) : \delta^T \cdot I^{-1}(t_k) \cdot \delta \leq 1 \}, \quad t_k \in T_L, \\ E(t_k) &= \{ \mathbf{e} = \mathbf{e}(t_k) : \mathbf{e}^T \cdot R^{-1}(t_k) \cdot \mathbf{e} \leq 1 \}, \quad t_k \in T_L. \end{aligned} \quad (8)$$

Затраты на процесс наблюдения определяются суммарным количеством измерений:

$$L_{\Sigma} = \sum_{k=1}^L \theta_k.$$

Область возможных вариаций ошибок модели измерений $\Omega = O \times E$, где $O = O(t_1) \times O(t_2) \times \dots \times O(t_p)$, $E = E(t_1) \times E(t_2) \times \dots \times E(t_p)$. Расширенный вектор погрешности эксперимента $\omega \in \Omega$.

Задача формирования Θ^{opt} может быть представлена как

$$g^* = \max_{\omega \in \Omega} G(\omega) \rightarrow \min_{\Theta = \{ \theta_k, \Gamma_k \}}, \quad \theta_k \in \theta_k^*, \Gamma_k \in \Delta_k, k = \overline{1, L},$$

где $G(\omega)$ – заданный критерий оптимальности программы наблюдений в процессе управления эксплуатацией.

Представленная задача является задачей условно глобальной оптимизации, в которой заданные ограничивающие условия (8) включены в критерий $G(\omega)$ с помощью множителей Лагранжа $\xi_i = \{0; 1\}$, $i = 1, (2L+1)$. При этом формирование Θ^{opt} можно осуществить на основе метода последовательного планирования [8]. Смысл данного метода состоит в последовательном приближении к Θ^{opt} при рассмотрении результатов минимаксной обработки каждого очередного измерения как априорной информации для построения нового Θ .

Заключение

В статье рассмотрена одна из возможных постановок задачи планирования эксплуатации контролируемых технических систем ответственного назначения, возникающих в рамках функционально-параметрического направления теории рисков. Показано, что на основе предложенных рекуррентных алгоритмов минимаксного оценивания (прогноза) технического состояния с использованием идеи эллипсоидального оценивания можно реализовать гарантирующую стратегию управления техногенными рисками.

Библиографический список

1. *Абрамов, О. В.* Об оценке вероятности наступления рисков события: функционально-параметрический подход / О. В. Абрамов // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 1. – С. 24–31.
2. *Абрамов, О. В.* О функционально-параметрическом направлении теории рисков / О. В. Абрамов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. 1. – С. 5–6.
3. *Абрамов, О. В.* Анализ и прогнозирование техногенных рисков / О. В. Абрамов // Информатика и системы управления. – 2012. – № 3. – С. 97–105.
4. *Абрамов, О. В.* Программно-алгоритмический комплекс построения, анализа и использования областей работоспособности / О. В. Абрамов, Д. А. Назаров // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2015. – № 2. – С. 3–13.
5. *Rozenbaum, F. N.* Passive control of the operation of measuring instruments / F. N. Rozenbaum, O. V. Abramov // Measurement Techniques. – 2004. – Vol. 47, № 3. – P. 233–239.
6. *Репин, В. Г.* Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем / В. Г. Репин, Т. П. Тартаковский. – М.: Сов. радио, 1977. – 432 с.
7. *Куржанский, А. Б.* Задача идентификации – теория гарантированных оценок / А. Б. Куржанский // Автоматика и телемеханика. – 1991. – № 4. – С. 3–26.
8. *Черноусько, Ф. Л.* Оценивание фазового состояния динамических систем / Ф. Л. Черноусько. – М.: Наука, 1988. – 320 с.

References

1. Abramov O. V. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability and quality of complex systems]. 2016, no. 1, pp. 24–31.
2. Abramov O. V. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of The international Symposium Reliability and quality]. 2015, vol. 1, pp. 5–6.
3. Abramov O. V. *Informatika i sistemy upravleniya* [Informatics and control systems]. 2012, no. 3, pp. 97–105.
4. Abramov O. V., Nazarov D. A. *Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy* [Information technology and computing systems]. 2015, no. 2, pp. 3–13.
5. Rozenbaum F. N., Abramov O. V. *Measurement Techniques*. 2004, vol. 47, no. 3, pp. 233–239.
6. Repin V. G., Tartakovskiy T. P. *Statisticheskii sintez pri apriornoy neopredelennosti i adaptatsiya informatsionnykh sistem* [Statistical synthesis under a priori uncertainty and adaptation of information systems]. Moscow: Sov. radio, 1977, 432 p.
7. Kurzhanskiy A. B. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and remote control]. 1991, no. 4, pp. 3–26.
8. Chernous'ko F. L. *Otsenivanie fazovogo sostoyaniya dinamicheskikh sistem* [Estimation of the phase state of dynamic systems]. Moscow: Nauka, 1988, 320 p.

Абрамов Олег Васильевич

доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ,
заведующий лабораторией управления
надежностью сложных систем,
Институт автоматизации и процессов управления
Дальневосточного отделения
Российской Академии наук
(690041, Россия, г. Владивосток, ул. Радио, 5)
E-mail: abramov@iacp.dvo.ru

Abramov Oleg Vasil'evich

doctor of technical sciences, professor,
honored worker of science of Russia,
head of laboratory of complex systems
reliability management,
Institute for Automation and Control processes,
Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences
(690041, 5 Radio Street, Vladivostok, Russia)

УДК 519.87

Абрамов, О. В.

Контроль и прогнозирование технического состояния систем ответственного назначения /
О. В. Абрамов // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 4 (24). – С. 108–115. –
DOI 10.21685/2307-4205-2018-4-12.