УДК 65.012.122

© 2020 г. **О.В. Абрамов**, д-р техн. наук
(Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток)

СИНТЕЗ СТРАТЕГИИ ГАРАНТИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИЕЙ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ОТВЕТСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Рассматривается задача управления техническим состоянием (выбор оптимальной стратегии эксплуатации) сложных технических систем ответственного назначения. Основное внимание уделено синтезу стратегии эксплуатации на основе принципа гарантированного результата и с использованием идей функционально-параметрического направления теории надежности.

Ключевые слова: параметр, работоспособность, техническая система, эксплуатация, надежность, гарантирующий подход, прогнозирование, техническое обслуживание.

DOI: 10.22250/isu.2020.66.60-71

Введение

Доминирующий в теории надежности вероятностно-статистический подход, в основе которого лежит статистика отказов, оказывается малоприменимым в случае, когда речь идет об уникальных системах ответственного назначения, отказы которых связаны с большими материальными потерями или катастрофическими последствиями. Для таких систем вопрос ставится не о надежности систем данного типа вообще, а о надежности конкретного технического объекта, и не о фиксации отказов, а об их предотвращении. Более продуктивным в этих условиях может стать функционально-параметрический (ФП) подход [1, 2], в соответствии с которым процесс функционирования исследуемой системы и ее техническое состояние в любой момент времени определяются конечным набором некоторых переменных – параметров системы. В рамках ФП-подхода отказ системы есть след-

ствие эксплуатационных отклонений ее параметров от их исходных значений, а формой проявления отказа является выход параметров за пределы области допустимых значений (область работоспособности). Использование ФП-подхода связано с необходимостью решения задач прогнозирования технического состояния и надежности исследуемых систем, оптимального управления состоянием и создания инструментальных средств решения этих задач с привлечением современных информационных технологий. При этом основная проблема связана с необходимостью прогнозирования нестационарных случайных процессов эксплуатационной деградации и управления техническим состоянием высокоответственных уникальных систем (ВУС) в условиях неопределенности (дефицит необходимой информации).

Управление эксплуатацией в рамках ФП-подхода можно рассматривать как управление случайным процессом $y(t)$ изменения параметров технического состояния исследуемого объекта (системы). Для объектов ответственного назначения формирование стратегии управления эксплуатацией наиболее оправданно осуществлять на основе принципа гарантированного результата [3].

Гарантированное управление эксплуатацией

Под управлением эксплуатацией будем понимать некоторый набор мероприятий, направленных на изменение технического состояния объекта. 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

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

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 $u(\tau, y)$ являет-

ся случайной. Для устранения этой неопределенности можно принять $\tau = \tau(\mathbf{y}^*, t)$ и $\mathbf{u}(\tau, \mathbf{y}^*)$, где $\mathbf{y}^*$ – оценка случайного вектора $\mathbf{y}$. Упорядоченная тройка $\mathbf{u}(\tau, \mathbf{y}^*) \in U \times T \times Y^*$, где Y^* – множество значений оценок $\mathbf{y}^*$, определяет для каждого $t \in T$ управление $\mathbf{u} \in U$. При этом множество Q можно определить как множество пар отображений $(\mathbf{y}^*(t), \mathbf{u}(t))$ на множестве T , удовлетворяющих условиям $\mathbf{y}^* \in Y^*, \mathbf{u} \in U, G_j(\mathbf{y}, \mathbf{u}, t) \in C_j, j = \overline{1, l}$.

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

$$g^* = \text{extr } G(\mathbf{y}^*, \mathbf{u}, t), \{ \mathbf{u}(\tau, \mathbf{y}^*): \tau \in T, \mathbf{y}^* \in Y^*, \mathbf{u} \in U, \quad (2)$$

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

Множество управлений эксплуатацией включает в себя контроль и регулировку $\mathbf{y}(t)$. По результатам контроля (последовательности измерений $\{\mathbf{z}_t\}, t \in T_k \in T$) могут быть найдены вместо старых (априорных) новые (апостериорные) статистические характеристики случайного процесса $\mathbf{y}(t)$. Поэтому контроль можно условно рассматривать как управляющее воздействие, направленное на изменение статистических характеристик $\mathbf{y}(t)$. Целью регулировки является восстановление заданного качества функционирования объекта путем принудительного изменения параметров его технического состояния $\mathbf{y}(t)$. В результате регулировки состояние объекта изменяется на некоторое значение $\mathbf{r} \in R \subset U$, где R – множество регулировок $\mathbf{r}$. Математическая модель регулировки может быть представлена в виде [4, 5]:

$$\mathbf{y}_{\mathbf{r}}^* = \mathbf{y}^* + \mathbf{r}, \quad (3)$$

где $\mathbf{y}_{\mathbf{r}}^*$ – оценка состояния объекта после регулировки; $\mathbf{y}^*$ – оценка $\mathbf{y}(t)$ до регулировки.

Можно считать, что регулировка состоит в простом смещении случайного процесса $\mathbf{y}(t)$ на определенное значение $\mathbf{r}$. Это приводит к изменению статистических характеристик $\mathbf{y}(t)$, в частности к изменению его математического ожидания. Следовательно, существует общность результатов воздействия контроля и регулировки на техническое состояние объекта $\mathbf{y}(t)$. Она не затрагивает различий в физической природе рассматриваемых мероприятий по управлению эксплуатацией. Так, в процессе контроля поступает дополнительная информация о состоянии объекта. Учет этой информации приводит к изменению статистических характеристик $\mathbf{y}(t)$. При регулировке но-

вых, 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 эксплуатацией 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 [4].

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 $u(\tau, y^*)$ (как и $u(t)$) зависит от конструкции критерия оптимальности $G(y, u, t)$ [6].

Рассмотрим задачу определения стратегии управления эксплуатацией с использованием принципа гарантированного результата (в минимаксной постановке) [3, 6].

В соответствии с целью управления эксплуатацией (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 эксплуатацией.

Использование минимаксного (или максиминного) принципа обеспечивает нахождение равномерно наилучшего правила решения задачи, т.е. равномерно наилучшей стратегии управления эксплуатацией $u(t)$ (если такая имеется). 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 эксплуатацией $\mathbf{u}(t)$. 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 (или максиминного) подхода при определении стратегии управления эксплуатацией. С другой стороны, если удастся установить, что выбранная в условиях априорной неопределенности стратегия $\mathbf{u}(t)$ удовлетворяет принципу минимакса (максимина), то это, безусловно, является положительным фактором, поскольку гарантирует некоторый определенный уровень риска (прибыли), понизить (повысить) который в данных условиях невозможно.

Информационной основой для поиска минимаксной (максиминной) стратегии управления эксплуатацией служат данные о пределах (границах) изменения случайного процесса $\mathbf{y}(t) \in Y(t)$. Иначе говоря, относительно $\mathbf{y}(t)$ должно быть задано:

$$\mathbf{b}^-(t) \leq \mathbf{y}(t) \leq \mathbf{b}^+(t), \quad \forall t \in T,$$

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 $\mathbf{y}(t)$ [6], $Y(t) = \{\mathbf{y} \in R^n : \mathbf{b}^-(t) \leq \mathbf{y}(t) \leq \mathbf{b}^+(t)\}$.

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

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

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

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

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

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 использовать определенную процедуру. 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 эксплуатацией 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 эксплуатацией. В частности, применение критерия гарантированного времени безотказной работы обуславливает задачи поиска $\mathbf{u}^{opt}(\tau, \mathbf{y}^*)$, обеспечивающей:

максимум гарантированного времени безотказной работы объекта при заданных ограничениях на ресурсы и возможности управления;

заданное гарантированное время безотказной работы при минимальном расходовании 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 эксплуатацией и наличия информации о закономерностях дрейфа параметров объекта и имеющихся ресурсах (в том числе и вычислительных) среди разновидностей общей задачи формирования можно выделить задачи:

поиска глобально оптимальных стратегий гарантированного управления эксплуатацией;

построения или определения локально-оптимальных стратегий;

нахождения вырожденных стратегий гарантированного управления эксплуатацией.

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

Локально-оптимальные стратегии гарантированного управления эксплуатацией

Трудности, связанные с нахождением оптимальной минимаксной стратегии гарантированного управления эксплуатацией, 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 [6].

Вышеизложенное касается задачи построения стратегии гарантированного управления эксплуатацией

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

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 эксплуатацией, т.е. априори определить $\mathbf{u}^{opt}(\tau, \mathbf{y}^*)$. Построение области возможных значений параметров технического состоя-

ния и формирование искомой стратегии в задаче (8) требуется осуществлять на основе данных, получаемых в процессе управления эксплуатацией. 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 [7, 8].

Рассмотрим задачу поиска адаптивной локально-оптимальной стратегии гарантированного управления эксплуатацией с использованием минимаксного прогноза состояния технического объекта. Пусть управление эксплуатацией 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. Этот интервал $[\tau_0, \tau_k]$ можно назвать интервалом 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 эксплуатацией, 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 [9]:

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

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

Предложенный алгоритм однозначный, локально-оптимальный и адаптивный.

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

Пусть гарантированное управление эксплуатацией состоит в проведении в некоторые моменты времени контрольных измерений и регулировок $y(t)$ или только контрольных измерений $y(t)$. Ошибки контроля лежат в пределах $[c_1(t), c_2(t)]$. На интервале $[\tau_0, \tau_k]$ проводить регулировки $y(t)$ не требуется. Изменения технического состояния объекта $y(t)$ можно описать с помощью зависимости (5). Требуется определить стратегию управления эксплуатацией, гарантирующую безотказность функционирования объекта при условии, что время между двумя управлениям будет не меньше ΔT . При этом, если $y(t) \in D$, где D – заданная область работоспособности [10], то объект функционирует нормально.

Сформулированная задача может быть представлена в виде

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

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

Алгоритм решения задачи 10 состоит в следующем:

- 1) по данным контроля $y(t)$ на интервале $[\tau_0, \tau_k]$ определяются пара-

метры B^- и B^+ ;

2) вычисляются τ_{k+1}^* и величина $\mathbf{r} \in R$ для τ_k (если $\mathbf{r} \in R$, то в момент τ_k не проводится);

3) если $\tau_{i+1}^* - \tau_i^* \geq \Delta T$, то осуществляется контрольное измерение $y(t)$ 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 пункт 2 для τ_{k+2}^* (если $\mathbf{r} \in R$, то в момент τ_{k+1}^* не проводится).

Далее процедура повторяется, начиная с пункта 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 эксплуатацией с полученным при применении предложенного алгоритма.

Пример

Основной характеристикой, определяющей техническое состояние блока аварийной защиты электростанции, является время срабатывания τ . Измерения τ во времени можно описать как $\tau(t) = \tau_0 + \tau_1 e^{0,001t}$, где τ_0, τ_1 – случайные параметры. При $0 \leq \tau \leq 10$ блок аварийной защиты находится в работоспособном состоянии. Рассчитаем по критерию гарантированного времени безотказной работы оптимальную последовательность проведения управляющих воздействий для управления эксплуатацией данного блока, если допустимыми управлениями являются только контрольные измерения $\tau(t)$, выполняемые не чаще, чем через $\Delta T = 50$ час. Ошибка контроля при этом лежит в пределах $e = \pm 0,1$.

Результаты замеров $\tau(t)$ при $t_1 = 50$ час. и $t_2 = 100$ час. составили: $\tau(t_1) = 4,1 \pm 0,1$; $\tau(t_2) = 4,2 \pm 0,1$.

По результатам двух измерений $\tau(t)$, используя метод гарантированного прогноза, находим:

$$6,15 - 1,855e^{0,001t} \leq \tau(t) \leq -1,85 + 5,65 e^{0,001t}, t \geq 100 \text{ час.}$$

Далее, с учетом выражения (10), получаем, что момент очередного контроля $t_3 = 756$ час. Результат измерения $\tau(t)$ при $t_3 = 756$ час. составил $\tau(t_3) = 8,4 \pm 0,1$. Применяя минимаксный прогноз, по трем измерениям $\tau(t)$

находим, что:

$$-0,384 + 4,17e^{0,001}t \leq \alpha(t) \leq -0,0145 + 3,904e^{0,001}t, t \geq 756 \text{ час.}$$

При этом момент следующего измерения $t_4 = 2304$ час. и $\alpha(t_4) = 9,9 \pm 0,1$.
Результат минимаксного прогноза по четырем измерениям составил:

$$-0,384 + 4,17e^{0,001}t \leq \alpha(t) \leq -0,0145 + 3,904e^{0,001}t, t \geq 2304 \text{ час.}$$

По данным минимаксного прогноза $\alpha(t)$ при $t = 2304$ час. выходит за пределы заданной области D , поэтому дальнейшая эксплуатация рассматриваемого объекта не имеет смысла. Стратегия гарантированного управления эксплуатацией, полученная при расчете, может быть представлена в виде:

$$t_1 = 50 \text{ час.} - \text{измерение } \alpha(t); \quad t_2 = 100 \text{ час.} - \text{измерение } \alpha(t); \\ t_3 = 756 \text{ час.} - \text{измерение } \alpha(t); \quad t_4 = 2304 \text{ час.} - \text{измерение } \alpha(t).$$

Для сравнения можно заметить, что директивный (рекомендованный) срок службы блока аварийной защиты составляет $T = 1500$ час.

Заключение

Поддержание технических устройств и систем, предназначенных для длительной эксплуатации, в работоспособном состоянии осуществляется путем их технического обслуживания. Под техническим обслуживанием понимают все мероприятия, направленные на сохранение и восстановление работоспособности, определение и оценку технического состояния системы.

В статье основное внимание уделено синтезу стратегии эксплуатации технических систем на основе принципа гарантированного результата и с использованием идей функционально-параметрического направления теории надежности.

Особенность решаемых задач состоит в том, что они решаются в условиях неполной и не всегда достоверной информации, управления отыскиваются на основе прогноза, а результат управления должен быть гарантирован. Для решения задачи выбора оптимальной стратегии эксплуатации используется минимаксный принцип, гарантирующий получение положительного результата даже в самых неблагоприятных условиях. Естественно, что в более благоприятных условиях найденная таким образом стратегия эксплуатации будет слишком пессимистичной. Поэтому полученные результаты будут полезны прежде всего при синтезе стратегии эксплуатации сложных объектов ответственного назначения, отказы которых связаны с большими материальными потерями или катастрофическими последствиями.

Отметим также, что созданные с использованием гарантирующего подхода алгоритмы формирования стратегии эксплуатации достаточно просты в реализации и позволяют в условиях существенной ограниченности и

неопределенности исходных данных находить стратегию управления эксплуатацией, гарантирующую безотказность и высокое качество функционирования ВУС. При этом в ряде ситуаций, в частности при наличии большого числа ограничений на время проведения, характер и величину управляющих воздействий, локально-оптимальная стратегия гарантированного управления эксплуатацией может совпадать с глобально-оптимальной стратегией [11].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Abramov O.V., Dimitrov B.N.* Reliability design in gradual failures: a functional-parametric approach // Reliability: Theory&Applications. – 2017. – Т. 12, № 4. – Р. 39-48.
2. *Абрамов О.В.* Возможности и перспективы функционально-параметрического направления теории надежности // Информатика и системы управления. – 2014. – № 4(42). – С. 64-77.
3. *Гермейер Ю.Б.* Введение в теорию исследования операций. – М.: Наука, 1973.
4. *Abramov O.V.* Choosing optimal values of tuning parameters for technical devices and systems // Automation and Remote Control. – 2016. – Vol. 77, №4. – Р. 594-603.
5. *Абрамов О.В.* Проектирование технических систем с элементами настройки // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 2. – С. 51-55.
6. *Репин В.Г., Тартаковский Т.П.* Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем. – М.: Сов. радио, 1977.
7. *Абрамов О.В.* Основные особенности и свойства метода гарантированного прогноза // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 1. – С. 3-10.
8. *Абрамов О.В.* Контроль и прогнозирование технического состояния систем ответственного назначения // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – №4(24). – С.108-115.
9. *Абрамов О.В.* Прогнозирование состояния и планирование эксплуатации систем ответственного назначения // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество 2020». – Пенза: ПГУ, 2020. – Т.1. – С. 10-12.
10. *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.
11. *Abramov O.V., Nazarov D.A.* Condition-based maintenance by minimax criteria // Applied Mathematics in Engineering and Reliability / Proc. of the 1st Int. Conf. (ICAMED). – 2016. – Р. 91-94.

E-mail:

Абрамов Олег Васильевич – abramov@iacp.dvo.ru.