

СИСТЕМНАЯ СТРАТЕГИЯ ГАРАНТИРОВАННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Ключевые слова: *системная стратегия, многофакторные риски, нештатный режим, диагностирование, живучесть, работоспособность, безопасность.*

ВВЕДЕНИЕ

Анализ аварий и катастроф позволяет выявить наиболее важные причины и недостатки сложившихся принципов управления работоспособностью и безопасностью современной техники [1, 2]. Одна из таких причин состоит в специфике функционирования систем диагностирования, ориентированных на выявления отказов и неисправностей. Такой подход к обеспечению безопасности исключает априорное предотвращение нештатного режима, и, как следствие, появляется возможность его последующего перехода в нештатную ситуацию, аварию или катастрофу. Поэтому возникает практическая необходимость качественного изменения системы диагностирования в рамках принципов и структуры управления работоспособностью и безопасностью современных сложных технических систем (СТС) в реальных условиях воздействия многофакторных рисков.

Цель статьи — предложить системную стратегию гарантированной безопасности функционирования СТС как единого комплекса методологии работоспособности и безопасности и ее реализации в виде инструментария технической диагностики в процессе эксплуатации СТС.

1. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ И СТРАТЕГИЯ ЕЕ РЕАЛИЗАЦИИ

Системная стратегия гарантированной безопасности функционирования СТС базируется на предлагаемом принципе своевременного обнаружения причин появления нештатных ситуаций, оперативного предотвращения перехода штатных ситуаций в нештатные, аварийные или чрезвычайные, выявления факторов риска, прогнозирования основных показателей живучести объекта в течение заданного периода его эксплуатации как основы обеспечения гарантированной безопасности в динамике функционирования СТС, устранения причин возможного перехода работоспособного состояния объекта в неработоспособное состояние на основе системного анализа многофакторных рисков нештатных ситуаций [3].

Основная идея стратегии — обеспечить в реальных условиях функционирования сложной системы своевременное и достоверное обнаружение и оценивание факторов рисков, прогнозирование их развития в течение определенного периода эксплуатации и на этой основе осуществление своевременного устранения причин возникновения нештатных ситуаций до появления отказов и других нежелательных последствий.

Реализация стратегии формируется на основе следующих принципов:

- системная согласованность по целям, задачам, ресурсам и ожидаемым результатам по мероприятиям обеспечения безопасности функционирования сложной системы;
- своевременное обнаружение, гарантированное распознавание и системное диагностирование факторов и ситуаций рисков;
- оперативное прогнозирование, достоверное оценивание нештатных ситуаций;
- формирование и реализация рационального решения за практически приемлемое время в пределах неустраняемого временного ограничения.

Приведем математическую постановку задачи распознавания нештатной ситуации в динамике функционирования техногенно опасного объекта.

Известно, что для каждой ситуации $S_k^\tau \in S_\tau$ формируется множество $M_k^\tau \in M_\tau$ факторов риска в виде $M_k^\tau = \{\rho_{q_k}^\tau | q_k = \overline{1, n_k^\tau}\}$. Для каждого фактора риска $\rho_{q_k}^\tau \in M_k^\tau$ известны нечеткий информационный вектор $I_{q_k}^\tau = \{I_{q_k}^\tau | q_k = \overline{1, n_k^\tau}; k = \overline{1, K_\tau}\}$ и его компоненты:

$$I_{q_k}^\tau = \left\{ \tilde{x}_{q_k j_k p_k}^\tau | q_k = \overline{1, n_k^\tau}; j_k = \overline{1, n_{q_k}^\tau}; p_k = \overline{1, n_{q_k j_k}^\tau} \right\};$$

$$\tilde{x}_{q_k j_k p_k}^\tau = \left\langle x_{q_k j_k p_k}^\tau, \mu_{H_{q_k j_k p_k}}(x_{q_k j_k p_k}^\tau) \right\rangle; x_{q_k j_k p_k}^\tau \in H_{q_k j_k p_k}^\tau; \mu_{H_{q_k j_k p_k}} \in [0, 1];$$

$$H_{q_k j_k p_k}^\tau = \left\langle x_{q_k j_k p_k}^\tau | x_{q_k j_k p_k}^- \leq x_{q_k j_k p_k}^\tau \leq x_{q_k j_k p_k}^+ \right\rangle.$$

Необходимо для каждой ситуации $S_k^\tau \in S_\tau$ и каждого фактора риска $\rho_{q_k}^\tau \in M_k^\tau, M_k^\tau \in M_\tau$ обеспечить распознавание нештатной ситуации в динамике функционирования техногенно опасного объекта и живучесть сложной системы в процессе ее эксплуатации.

Будем рассматривать понятие безопасности системы как способность своевременно предотвращать последовательный переход из штатного режима системы в нештатный, аварию или катастрофу на основе своевременного выявления факторов существенного риска и устранения возможности их превращения в факторы катастрофического риска. Безопасность характеризуется следующими показателями: степенью риска η_i — вероятностью появления нежелательных последствий воздействия; уровнем риска W_i — величиной ущерба нежелательных последствий воздействия любых факторов риска в любой момент времени $T_i \in T^\pm$ в процессе функционирования сложной системы; ресурсом допустимого риска нештатного режима T_{pr} — продолжительностью периода функционирования сложной системы в определенном режиме, в течение которого степень и уровень риска в результате возможного воздействия факторов риска не превышают априорно заданных допустимых значений. Количественные значения показателей безопасности определяются на основе решения общей задачи анализа многофакторных рисков [4, 5].

Системная согласованность темпов диагностирования с темпами рабочих процессов в различных режимах функционирования СТС реализуется в рамках единого алгоритма управления безопасностью в нештатных ситуациях [6]. В данном алгоритме реализуются процедуры диагностирования и оценивания нештатных ситуаций в процессе перехода штатного режима функционирования СТС в последовательность нештатных ситуаций. Исходя из этого выполняется формирование базы данных и сценария возникновения последовательности нештатных ситуаций, определяется возможность перехода сложного объекта из нештатных ситуаций в штатный режим.

Основой реализации стратегии системного управления работоспособности и безопасности СТС является разработка блока диагностирования в виде информационной платформы технической диагностики функционирования СТС.

2. ИНФОРМАЦИОННАЯ ПЛАТФОРМА ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СТС

Разработка блока диагностирования, составляющего основу алгоритма управления безопасностью сложных объектов в нештатных ситуациях, осуществляется в виде информационной платформы, содержащей следующие модули:

- 1) получение и обработка исходной информации в процессе функционирования СТС;
- 2) восстановление функциональных зависимостей (ФЗ) и выявление закономерностей по эмпирическим дискретно заданным выборкам;
- 3) квантование исходных переменных;
- 4) прогнозирования нестационарных процессов;
- 5) построение процесса технического диагностирования.

Рассмотрим более детально приведенные модули информационной платформы технической диагностики (ИПТД).

Получение и обработка исходной информации в процессе функционирования СТС. Под СТС здесь понимается технический объект различной природы, который образован из нескольких разнотипных подсистем, системно согласованных по целям, задачам, ресурсам и ожидаемым результатам. Каждая подсистема имеет функционально взаимозависимые параметры, значения которых измеряются с помощью датчиков. Для этого к каждой подсистеме подсоединяются группы датчиков, причем каждый из них, в зависимости от физической природы, имеет разные рабочие показатели (дискретизация по времени, по раздельной способности и т.п.).

Для реализации технической диагностики в процессе функционирования СТС требуется наличие выборок объемом N_{01} и N_{02} , где N_{01} ($N_{01} \gg 200$) — общее количество выборки в процессе функционирования СТС в реальном режиме времени; N_{02} ($N_{02} \ll N_{01}$; $N_{02} = 40 \div 70$) — количество базовой выборки, требуемое для восстановления ФЗ. Исходная информация приводится к некоторому стандартному виду, который обеспечивает возможность формирования ФЗ по дискретно заданным выборкам. С учетом предлагаемой методологии в качестве базовых аппроксимирующих функций выбираются смещенные полиномы Чебышева, что обуславливает нормирование всей исходной информации к отрезку $[0, 1]$.

Восстановление функциональных зависимостей по дискретно заданным выборкам. В общем случае исходная информация задается в виде дискретного массива [7]

$$M_0 = \langle Y_0, X_1, X_2, X_3 \rangle,$$

$$Y_0 = (Y_i | i = \overline{1, m}), Y_i = (Y_i[q_0] | q_0 = \overline{1, k_0});$$

$$X_1 = (X_{1j_1} | j_1 = \overline{1, n_1}), X_{1j_1} = (X_{1j_1}[q_1] | q_1 = \overline{1, k_1});$$

$$X_2 = (X_{2j_2} | j_2 = \overline{1, n_2}), X_{2j_2} = (X_{2j_2}[q_2] | q_2 = \overline{1, k_2});$$

$$X_3 = (X_{3j_3} | j_3 = \overline{1, n_3}), X_{3j_3} = (X_{3j_3}[q_3] | q_3 = \overline{1, k_3}),$$

где множество Y_0 определяет численные значения $Y_i[q_0] \Rightarrow \langle X_{1j_1}[q_1], X_{2j_2}[q_2], X_{3j_3}[q_3] \rangle$ искомых непрерывных функций $y_i = f_i(x_1, x_2, x_3)$, $i = \overline{1, m}$; $x_1 = (x_{1j_1} | j_1 = \overline{1, n_1})$, $x_2 = (x_{2j_2} | j_2 = \overline{1, n_2})$, $x_3 = (x_{3j_3} | j_3 = \overline{1, n_3})$. Каждому значению $q_0 \in [1, k_0]$ соответствует определенный набор $q_0 \Leftrightarrow \langle q_1, q_2, q_3 \rangle$ значений $q_1 \in [1, k_1]$, $q_2 \in [1, k_2]$, $q_3 \in [1, k_3]$. Множество Y_0 состоит из k_0 различных значений $Y_i[q_0]$. В множествах X_1, X_2, X_3 определенная часть величин $X_{1j_1}[q_1]$, $X_{2j_2}[q_2]$, $X_{3j_3}[q_3]$ при некоторых значениях $q_1 = \hat{q}_1 \in \hat{Q}_1 \subset [1, k_1]$, $q_2 = \hat{q}_2 \in \hat{Q}_2 \subset [1, k_2]$, $q_3 = \hat{q}_3 \in \hat{Q}_3 \subset [1, k_3]$ раздельно повторяется, но для различных $q_0 \in [1, k_0]$ не существует полностью совпадающих наборов $\langle X_{1j_1}[q_1], X_{2j_2}[q_2], X_{3j_3}[q_3] \rangle$. Здесь $n_1 + n_2 + n_3 = n_0$, $n_0 \leq k_0$.

Известно, что $x_1 \in D_1, x_2 \in D_2, x_3 \in D_3, X_1 \in \hat{D}_1, X_2 \in \hat{D}_2, X_3 \in \hat{D}_3$, где

$$D_s = \langle x_{sj_s} | d_{sj_s}^- \leq x_{sj_s} \leq d_{sj_s}^+, j_s = \overline{1, n_s} \rangle, s = \overline{1, 3};$$

$$\hat{D}_s = \langle X_{sj_s} | \hat{d}_{sj_s}^- \leq X_{sj_s} \leq \hat{d}_{sj_s}^+, j_s = \overline{1, n_s} \rangle, s = \overline{1, 3};$$

$$d_{sj_s}^- \leq \hat{d}_{sj_s}^-, d_{sj_s}^+ \geq \hat{d}_{sj_s}^+.$$

Требуется найти такие приближающие функции $\Phi_i(x_1, x_2, x_3), i = \overline{1, m}$, которые с практически приемлемой погрешностью характеризуют истинные функциональные зависимости $y_i = f_i(x_1, x_2, x_3), i = \overline{1, m}$, на множестве D_s .

Учитывая разнородность исходной информации, а также разнородность свойств рассматриваемых групп факторов, которые определяются соответственно векторами x_1, x_2, x_3 , степень влияния каждой группы факторов на свойства приближающих функций необходимо оценивать независимо. Для этого приближающие функции формируются в виде иерархической многоуровневой системы моделей. На верхнем уровне реализуется модель, определяющая зависимость приближающих функций от переменных x_1, x_2, x_3 . Такая модель в классе аддитивных функций, когда векторы x_1, x_2, x_3 являются независимыми, представляется суперпозицией функций от переменных x_1, x_2, x_3 в виде

$$\Phi_i(x_1, x_2, x_3) = c_{i1} \Phi_{i1}(x_1) + c_{i2} \Phi_{i2}(x_2) + c_{i3} \Phi_{i3}(x_3), i = \overline{1, m}. \quad (1)$$

На втором иерархическом уровне формируются модели, которые определяют зависимость $\Phi_{is} (s = 1, 2, 3)$ от компонентов переменных x_1, x_2, x_3 соответственно и представляются в виде

$$\begin{aligned} \Phi_{i1}(x_1) &= \sum_{j_1=1}^{n_1} a_{ij_1}^{(1)} \Psi_{1j_1}(x_{1j_1}), \quad \Phi_{i2}(x_2) = \sum_{j_2=1}^{n_2} a_{ij_2}^{(2)} \Psi_{2j_2}(x_{2j_2}), \\ \Phi_{i3}(x_3) &= \sum_{j_3=1}^{n_3} a_{ij_3}^{(3)} \Psi_{3j_3}(x_{3j_3}). \end{aligned} \quad (2)$$

На третьем иерархическом уровне формируются модели, которые определяют функции $\Psi_{1j_1}, \Psi_{2j_2}, \Psi_{3j_3}$. Здесь важнейшей задачей является выбор структуры и компонентов функций $\Psi_{1j_1}, \Psi_{2j_2}, \Psi_{3j_3}$. Структуры этих функций выбираются аналогично (2) и представляются в виде следующих обобщенных полиномов:

$$\Psi_{sj_s}(x_{j_s}) = \sum_{p=0}^{P_{j_s}} \lambda_{j_s p} \varphi_{j_s p}(x_{sj_s}), s = 1, 2, 3. \quad (3)$$

В ряде случаев при формировании структуры моделей необходимо учитывать влияние на свойства искомым функций $\Phi_i(x_1, x_2, x_3), i = \overline{1, m}$, не только группы компонентов каждого вектора x_1, x_2, x_3 , но и взаимные воздействия их компонентов. В таком случае зависимость приближающих функций от переменных x_1, x_2, x_3 целесообразно формировать в классе мультипликативных функций, где приближающие функции по аналогии (1)–(3) формируются в виде иерархической многоуровневой системы моделей

$$\begin{aligned} [1 + \Phi_i(x)] &= \prod_{s=1}^{S_0} [1 + \Phi_{is}(x_s)]^{c_{is}}; \quad [1 + \Phi_{is}(x_s)] = \prod_{j_s=1}^{n_s} [1 + \Psi_{sj_s}(x_{sj_s})]^{a_{ij_s}^s}; \\ [1 + \Psi_{sj_s}(x_{sj_s})] &= \prod_{p=1}^{P_{j_s}} [1 + \varphi_{j_s p}(x_{sj_s})]^{l_{j_s p}}. \end{aligned} \quad (4)$$

В качестве функций $\varphi_{j_s p}$ выбираются смещенные полиномы Чебышева $T_{j_s p}(x_{j_s p}) \in [0, 1]$, а в качестве критерия — чебышевский критерий. Тогда нахождение приближающих функций выполняется на основе последовательности $\Psi_1, \Psi_2, \Psi_3 \rightarrow \Phi_{i1}, \Phi_{i2}, \Phi_{i3} \rightarrow \Phi_i$, что позволит получить конечный результат путем агрегирования соответствующих решений. Такой подход позволяет свести процедуру формирования приближающих функций к последовательности чебышевских задач приближения для несовместных систем линейных уравнений [8, 9].

Предлагаемый подход к формированию функциональных зависимостей в силу свойств полиномов Чебышева открывает возможность построенные для отрезков $[\hat{d}_{j_s}^-, \hat{d}_{j_s}^+]$ приближающие функции экстраполировать на более широкие отрезки $[d_{j_s}^-, d_{j_s}^+]$, что позволяет осуществлять прогноз исследуемых свойств изделия за пределами интервалов испытаний.

Квантование дискретных численных значений. Цель применения квантования — уменьшить влияние погрешности измерений различных параметров на достоверность формируемого решения. Реализация процедуры квантования дискретных численных значений выполняется следующим образом.

1. В качестве базовой эталонной статистики по каждой переменной $x_1, \dots, x_n, y_1, \dots, y_m$ принимаются статистики случайных выборок по этим переменным объемом $N_{01} \geq 200$.

2. В качестве базовой динамической статистики по тем же переменным принимаются статистики выборки динамики функционирования объекта за последние N_{02} измерений. Поэтому при очередном измерении $N_{02} + N_2$ должна производиться процедура отбрасывания самого первого измерения исходной выборки и перенумерация измерений. Схема выборки на момент $t = t_0, N_{02} = 40$ и $t = t_0 + \Delta t$ ($t = 1, 2, 3, \dots, t_k, \dots, T$), $N_{02} + N_2 = 41$ приведена на рис. 1.

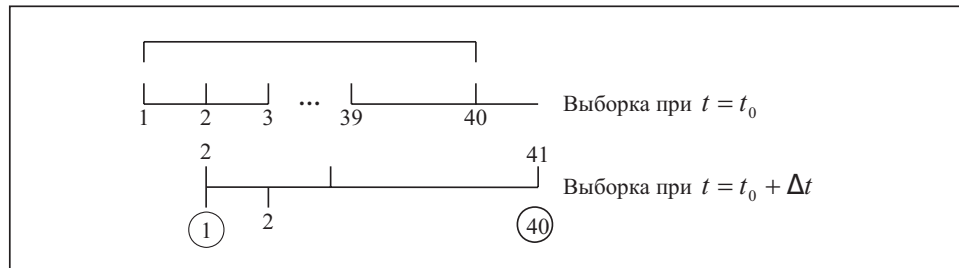


Рис. 1. Схема выборки на моменты $t = t_0$ и $t = t_0 + \Delta t$

3. В качестве текущих динамических параметров принимаются статистики выборок объема $N_{02} + N_2$, смещенные относительно статистик выборок объема N_{02} на величину N_2 .

4. Обработка каждой выборки по каждой переменной должна включать следующие процедуры:

— вычисление в виде (2) или (4) значений $\Phi_i^k(x_1^k, \dots, x_j^k, \dots, x_n^k), i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}$, для каждого k -го измерения при $t = t_k$;

— процедуру построения ступенчатой функции первого уровня

$$Z_{1j} = \sum_{p=1}^{M_1} d_{jp} U(\hat{x}); U(\hat{x}) = \begin{cases} 0, & \hat{x} < 0, \\ 1, & \hat{x} \geq 0, \end{cases} \hat{x} = x_j - x_p; \quad d_{jp} = \begin{cases} 0,15 & \text{при } p = 1, \\ 0,1 & \text{при } p = \overline{2, 9}, \\ 1 & \text{при } p = 10, \end{cases}$$

$x = 0,1 \cdot p; p = \overline{1, 10}; M_1 = 10;$

— процедуру построения ступенчатой функции второго уровня

$$Z_{2j} = \sum_{p=1}^{M_2} d_{jp} U(\hat{x}); M_2 = 10;$$

$$x_p^0 = \begin{cases} 0,5 & \text{при } p=1, \\ 0,1 & \text{при } p=\overline{2,9}, \\ 1,15 & \text{при } p=10, \end{cases} \quad d_{jp} = \begin{cases} 0,1 & \text{при } p=\overline{1,9}, \\ 1 & \text{при } p=10. \end{cases}$$

Прогнозирования нестационарных процессов. Модели прогнозирования нестационарных процессов строятся на основе исходной выборки временного ряда для исходного интервала D_0 и базовой модели динамики процессов (1)–(3). Для этого используется известное свойство полиномов Чебышева — обеспечивать равномерное приближение функций на интервале $[0,1]$. Суть подхода состоит в следующем. Нормирование исходных данных выполняется для интервала $D = \{t | t_0^- \leq t \leq t^+\}$, $D = D_0 \cup D_0^+$, который включает исходный интервал наблюдения $D_0 = \{t | t_0^- \leq t \leq t_0^+\}$ и интервал прогнозирования $D_0^+ = \{t | t_0^+ < t \leq t^+\}$. Далее для определения модели динамики процессов в виде восстановленных приближающих функций (1) или (4) по исходным данным формируется для интервала D_0 система уравнений следующим образом:

$$0,5a_0 + \sum_{n=n_1}^N a_n T_n^*(\tau_{k_1}) - \hat{y}_{k_1} = 0; \quad k_1 = \overline{1, K_0}; \quad (5)$$

$$\hat{y}_{k_1} = y(\tau_{k_1}), \quad \tau_{k_1} \in [0, \tau_{k_1}^+], \quad \tau_{k_1}^+ = \frac{t^+ - t_0^-}{t^+ - t_0^-} < 1, \quad t_k \in D_{K_0}, \quad D_{K_0} \subset D_0.$$

Модель динамики процесса в интервале наблюдения D_0 определяется как результат решения системы (5) и описывается соотношением

$$\Phi_1(\tau_1) = 0,5a_0 + \sum_{n=n_1}^N a_n^0 T_n^*(\tau_1); \quad \tau_1 \in D_0. \quad (6)$$

Модель прогноза динамики процесса определяется на основе экстраполирования функции (6) на интервал D_0^+ и выражается формулой

$$\Phi_2(\tau_2) = 0,5a_0 + \sum_{n=n_1}^N a_n^0 T_n^*(\tau_2); \quad \tau_2 \in D_0^+. \quad (7)$$

Модель динамики процесса в пределах заданного интервала $D = D_0 \cup D_0^+$ на основе (6) и (7) описывается выражением

$$\Phi_0(\tau) = \begin{cases} \Phi_1(\tau_1) & \text{при } \tau_1 \in D_0, \\ \Phi_2(\tau_2) & \text{при } \tau_2 \in D_0^+. \end{cases}$$

Модели для долгосрочного прогноза и краткосрочного прогноза отличаются как соотношением длительности интервалов наблюдений и прогноза, так и порядком полиномов Чебышева, используемых в модели.

Построение процесса технического диагностирования. Штатный режим функционирования исследуемого объекта будем описывать системой моделей функционирования СТС при следующих предположениях и утверждениях.

1. Каждый этап функционирования СТС характеризуется длительностью, начальным и конечным значениями каждого показателя y_i , определяемыми соответственно в момент начала и момент окончания этапа. Изменения y_i в пределах этапа определяется соответствующей моделью.

2. Все показатели y_i являются динамически синхронными и синфазными в том смысле, что под действием факторов риска они одновременно, без временной задержки увеличиваются или уменьшаются.

3. Управляющее воздействие $U = (U_j | j = \overline{1, m})$ является безынерционным, т.е. отсутствует временная задержка между воздействием управления и реакцией объекта на управление.

4. Факторы риска $\rho_{q_k}^\tau | q_k = \overline{1, n_k^\tau}$ изменяют величину воздействия на объект во времени, и с увеличением времени воздействия риск возрастает или уменьшается.

5. Управляющее воздействие может замедлить воздействия факторов риска или прекратить их отрицательное влияние на управляемый объект при условии, что темпы управляющего воздействия превышают темпы роста воздействия факторов риска. Прекращение отрицательного воздействия факторов риска обеспечивается при условии, что решение принято и реализовано до наступления T_{cr} — критического момента времени. При его появлении воздействия факторов риска приводят к отрицательным последствиям в виде аварии или катастрофы.

При исследовании нештатного режима введем дополнительно допущения относительно формирования модели и условий распознавания нештатной ситуации.

6. Факторы риска $\rho_{q_k}^\tau | q_k = \overline{1, n_k^\tau}$ являются независимыми и изменяются во времени по случайному закону, распределение которого априорно неизвестно.

7. Факторы риска могут воздействовать одновременно на несколько или на все показатели y_i . Ситуация воздействия факторов риска будет нештатной, если хотя бы два показателя y_i одновременно без управляющего воздействия синхронно и синфазно изменят свои значения в течение нескольких замеров (во времени).

8. Влияние факторов риска будем учитывать как относительное изменение уровня управления под их воздействием. Изменение значений каждого фактора риска проходит дискретно по закону случайных чисел.

На основе приемлемых предположений представим дополнительно модели и условия распознавания нештатной ситуации. Обозначим \tilde{y}_i величину показателя y_i при влиянии факторов риска; $F_i(\rho_{q_k})$ — функция, которая учитывает уровень влияния факторов риска на i -й показатель y_i ; ρ_{q_k} — значение q -го фактора риска в момент t_k .

Считаем в соответствии с п. 8, что в момент t_k величина $\tilde{y}_i[t_k]$ определяется соотношением

$$\tilde{y}_i[t_k] = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \tilde{b}_{ij} \sum_{r=0}^{R_j} a_{jr} T_r^*(U_j); \quad \tilde{b}_{ij} = b_{ij} \cdot F_i(\rho_{q_k}). \quad (8)$$

Здесь функция $F_i(\rho_{q_k})$ должна соответствовать условию, когда при отсутствии влияния факторов риска (т.е. при $\rho_{q_k} = 0$) $\tilde{y}_i = y_i$. Поэтому одним из простейших видов функции $F_i(\rho_{q_k})$ является

$$F_i(\rho_{q_k}) = 1 - \prod_{q_k=1}^{n_{q_k}} (1 - c_{iq_k} \rho_{q_k}). \quad (9)$$

Следует также учитывать, что факторы риска могут изменяться во времени непрерывно (например, с увеличением высоты при взлете самолета непрерывно изменяется давление) и скачкообразно (например, при полете на определенной высоте в крейсерском режиме давление может изменяться прыжком на границе раздела циклон — антициклон). Наиболее сложным является вариант, когда одни факторы риска изменяются непрерывно, а другие — скачкообразно.

Распознавание ситуации риска будем выполнять на основе последовательного сравнения величин $\tilde{y}_i[t_k]$ при $i = \overline{1, n}$ для нескольких последовательных значений t_k , $k = \overline{1, k_0}$, где $k_0 = 3 \div 7$. Условием штатной ситуации, как следует из п. 2 предпо-

ложений, являются синхронное и синфазное изменения \tilde{y}_i для нескольких (в общем случае для всех) показателей. Отсюда следует соотношение для разных моментов времени t_k при всех значениях i и для одинаковых моментов времени t_k при разных значениях i (разных показателях):

$$\text{sign } \Delta \tilde{y}_i [t_1, t_2] = \dots = \text{sign } \Delta \tilde{y}_i [t_k, t_{k+1}] = \dots = \text{sign } \Delta \tilde{y}_i [t_{k_0-1}, t_{k_0}], \quad (10)$$

$$\text{sign } \Delta \tilde{y}_1 [t_k, t_{k+1}] = \dots = \text{sign } \Delta \tilde{y}_i [t_k, t_{k+1}] = \dots = \text{sign } \Delta \tilde{y}_n [t_k, t_{k+1}], \quad i = \overline{1, n}. \quad (11)$$

Из (10) и (11) следует, что при наличии нештатной ситуации в интервале $[t_1, t_{k_0}]$ одновременно выполняется:

- неравенство знаков приращения $\Delta \tilde{y}_i$ для всех смежных интервалов $[t_k, t_{k+1}]$ при $k = \overline{1, k_0}$ каждого показателя \tilde{y}_i , $i = \overline{1, n}$;
- неравенство знаков приращения $\Delta \tilde{y}_i$, $i = \overline{1, n}$, всех показателей \tilde{y}_i для каждого интервала $[t_k, t_{k+1}]$, $k = \overline{1, k_0}$.

Условия (10), (11) являются жесткими, на практике достаточно обеспечить выполнение условий для представительского числа (3 ÷ 5), которые определяют показатели \tilde{y}_i , но не для всех показателей i . В (10) и (11) соответствующие величины определяются соотношениями

$$\Delta \tilde{y}_i [t_k, t_{k+1}] = \tilde{y}_i [t_{k+1}] - \tilde{y}_i [t_k], \quad (12)$$

где $\tilde{y}_i [t_k]$ определяются соотношениями (8), при этом полагаем, что $\rho_{q_k} [t_{k+1}] > \rho_{q_k} [t_k]$, т.е. зависимость каждого фактора риска является функцией времени, которая возрастает, или $\rho_{q_k} [t_{k+1}] < \rho_{q_k} [t_k]$, т.е. зависимость является убывающей функцией.

Практическая значимость распознавания нештатной ситуации на основе (10) и (11) заключается в том, что обеспечивается нахождение нештатной ситуации при незначительном изменении величин $\tilde{y}_i [t_k]$ под действием факторов риска, так как «индикатором» изменения является знак различия в (10) и (11), а не величина, которая определяется согласно (12). Другими словами, такой подход намного чувствительнее, чем типовые подходы, принятые в диагностировании. Более того, он позволяет «фильтровать» случайные изменения и случайные ошибки измерения \tilde{y}_i для отдельных i в соответствии с (10) или для отдельных $[t_k, t_{k+1}]$ в соответствии с (11).

3. ДИАГНОСТИКА ГЛУБИННОЙ СИСТЕМЫ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

В качестве примера реализации системной стратегии гарантированной безопасности функционирования СТС рассматривается реальная водопроводная глубинная система водоснабжения, функциональная схема которой приведена на рис. 2. Основное назначение системы — обеспечение заданного объема Q_n расхода воды для потребителей, приоритетным из которых является процесс охлаждения технологической экологически опасной установки.

К водопроводной сети подключены три группы потребителей, у которых максимально возможный штатный объем расхода воды соответственно составляет $Q_1 \leq 0,3Q_n$; $Q_2 \leq 0,4Q_n$; $Q_3 \leq 0,3Q_n$. Подача воды к потребителям П1 и П3 не является критическим фактором и может быть перекрыта путем регулирования управляемых вентилей В2 и В4 соответственно. Подача воды в технологический объект П2 является обязательной, и ее нарушение ведет к недопустимой аварии.

В штатном режиме в зависимости от уровня расхода воды работает один или два насоса. Стабилизацию давления на выходе установки осуществляет управляющий контроллер, который формирует задание на скорость регулируемого насоса, а также подключает (или отключает) к сети нерегулируемые насосы. Переходные процессы для нештатного режима могут быть связаны как с недостаточной (половиной или четвертью) номинальной продуктивностью работы глубинного насоса, так и с возможностью утечки воды у потребителей П1 и П3.

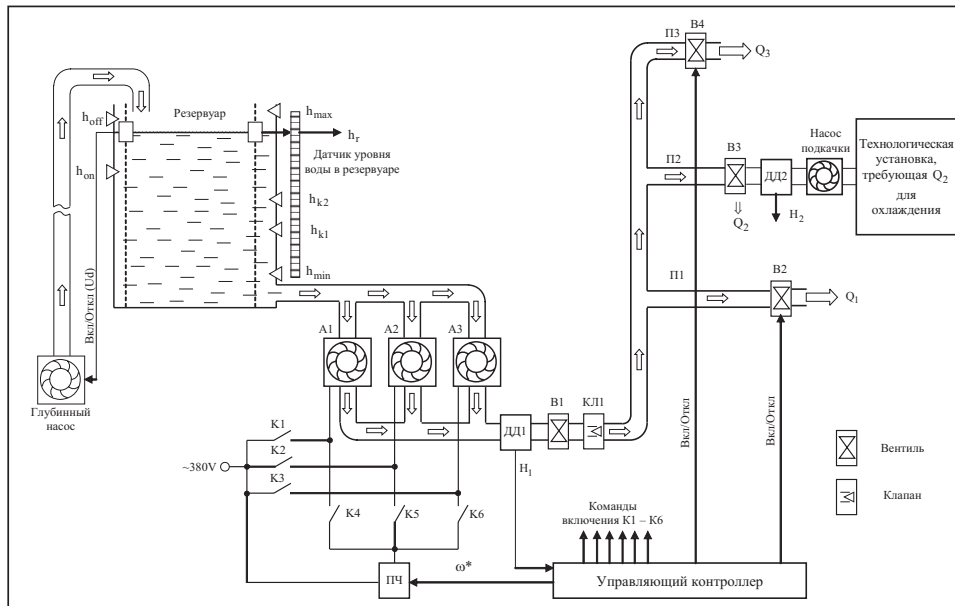


Рис. 2. Функциональная схема водопроводной глубинной системы водоснабжения

В соответствии с требованиями разработанного инструментария ИПТД по глубине резервуара и в ряде реперных точек системы водоснабжения были установлены датчики, показатели которых снимаются через каждые 10 сек. Для рассмотренного эксперимента здесь приводятся показания датчиков уровня воды h_r в резервуаре и напора воды H_2 при входе в технологическую установку и их аргументов в течение 5000 сек (500 выборок).

Глубинный насос осуществляет наполнение резервуара емкостью $V_r = 25 \text{ м}^3$. Включение насоса происходит при снижении уровня воды в резервуаре при $h_r \leq 40 \text{ м}$, выключение — при $h_r \geq 45 \text{ м}$. Глубинный насос во включенном состоянии обеспечивает производительность $Q_p = 1,5Q_n$. Подачу воды из резервуара потребителям в системе водоснабжения осуществляет насосная установка, состоящая из трех насосов (A1, A2, A3), два из которых работают в штатном режиме, один — в аварийном. Производительность каждого из насосов составляет $Q_{pi} = 0,5Q_n$ ($i = A1, A2, A3$). Насосная установка работает в режиме стабилизации давления, для чего на выходной трубе установлен датчик ДД1 измерения напора воды H_1 . Через нерегулируемый вентиль В1 и клапан КЛ1 вода поступает в водопроводную сеть. На входе технологического объекта (бойлера) установлены контрольный датчик напора воды ДД2, а также насос подкачки для регулирования количества расходуемой воды, а следовательно, и температуры бойлера.

В процессе функционирования системы водоснабжения с целью своевременного выявления причин потенциально возможных нештатных ситуаций и обеспечения живучести ее функционирования в реальном масштабе времени проводится мониторинг технического диагностирования. В соответствии с разработанной методологией гарантированной безопасности функционирования СТС на начальном этапе $t = t_0$ по $N_{02} = 50$ начально дискретно заданным выборкам значений h_r и H_2 и их аргументам выполняется восстановление функциональных зависимостей $y_i = f_i(x_1, \dots, x_j, \dots)$. Здесь $y_1 = h_r(x_{11}, x_{12})$; $y_2 = H_2(x_{21}, x_{22}, x_{23}, x_{24})$, где x_{11} — суммарный расход воды; x_{12} — продуктивность глубинного насоса; x_{21} — напор воды H_1 на выходе насосной установки; x_{22} — суммарный расход воды; x_{23} — число включенных насосов; x_{24} — скорость регулируемого насоса.

На основании восстановленных в аналитическом виде закономерностей h_r и H_2 в интервале $[0; 0,8]$ (с учетом свойства смещенных полиномов Чебышева, согласно которому необходимо обеспечивать равномерное приближение функций на

интервале $[0; 1]$) осуществляется гарантированный прогноз на десять значений выборок в интервале $(0,8; 1]$. Полученные значения используются для принятия определенного решения: система водоснабжения работает в штатном режиме; система водоснабжения работает в нештатном режиме, наблюдаются определенные отклонения; система водоснабжения переходит в аварийный режим функционирования; наблюдается сбой в работе датчиков.

Работа в штатном режиме обеспечивается синхронными и синфазными изменениями показателей закономерностей h_r и H_2 и их аргументов. Нештатная ситуация возникает, если хотя бы одна из функциональных зависимостей h_r или H_2 достигает значения ниже допустимого уровня: $h_r < 39$ м ; $H_2 < 100$. Здесь под аварией понимаются ситуации, когда H_2 опускается ниже значения $H_{2\min} = 50$ м и наблюдается снижение уровня воды h_r до значения $h_{k2} = 2$ м на период времени более 60 сек. Сбоем в работе датчиков фиксируется при использовании процедуры «построения ступенчатой функции», что позволяет выявить случайный выброс одного из датчиков.

Некоторые результаты мониторинга приведены в виде распределения по времени восстановленных функциональных зависимостей уровня воды h_r в резервуаре (рис. 3) и напора воды H_2 при входе в технологическую установку (рис. 4).

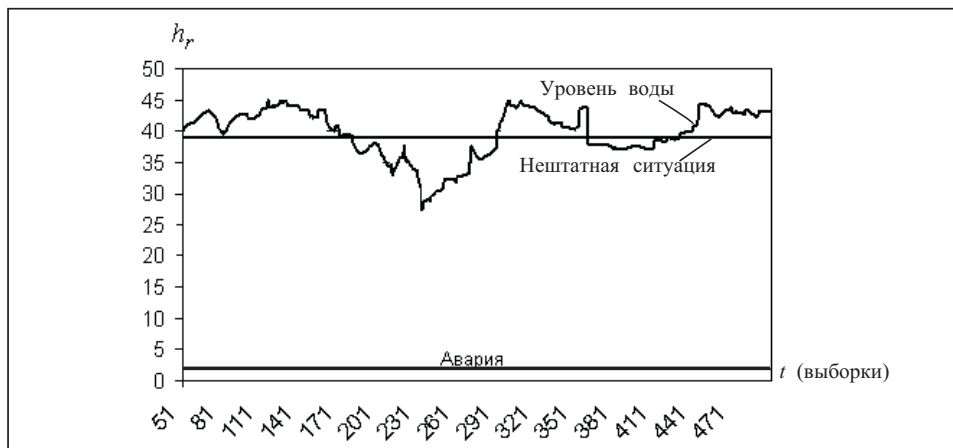


Рис. 3. График распределения по времени t уровня воды h_r в резервуаре

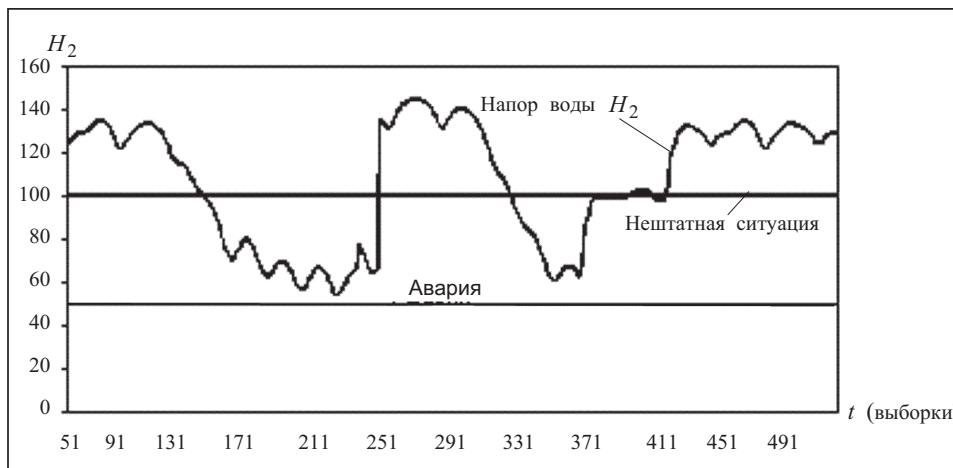


Рис. 4. График распределения по времени t напора воды H_2 при входе в технологическую установку

В процессе функционирования системы водоснабжения на информационное табло отображается количественно и качественно процесс диагностирования и опе-

ратор получает своевременную предварительную информацию о возможном переходе показателей уровня воды h_r и напора воды H_2 в нештатный режим. Это дает возможность своевременно выявить причину и принять решение об устранении возникновения нештатной ситуации, аварии или катастрофы.

Приведенные исследования показывают, что процесс сопровождения функционирования системы водоснабжения с привлечением разработанной методологии гарантированной безопасности функционирования СТС позволяет в реальном режиме времени принять решение, обеспечивающее живучесть работоспособности водопроводной глубинной системы водоснабжения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная стратегия гарантированной безопасности функционирования СТС, реализованная в виде инструментария ИПТД, обеспечивает предотвращение не работоспособности и нештатных ситуаций функционирования объекта. Путем комплексной, системной и непрерывной оценки параметров функционирования объекта в реальном режиме времени выявляются ситуации, которые потенциально могут привести к выходу объекта за пределы функционирования в штатном режиме. Одновременное сопровождение и интегрированная оценка показателей конечного количества функционально динамических параметров позволяет осуществлять детализацию процессов функционирования объекта любого порядка сложности. Для ситуаций, развитие которых приводит к возможным отклонениям параметров от штатного режима функционирования объекта, возможно своевременное принятие решения об изменении режима функционирования объекта или искусственного корректирования ряда параметров с целью живучести функционирования. Принципы, которые заложены в реализацию стратегии гарантированной безопасности функционирования СТС, обеспечивают гибкий подход к своевременному обнаружению, распознаванию, прогнозированию и системному диагностированию факторов и ситуаций рисков, формированию и реализации рационального решения за практически приемлемое время в пределах неустраняемого временного ограничения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Механика катастроф / Под общ. ред. К.В. Фролова. — М.: Международ. ин-т безопасности сложных техн. систем, 1995. — 389 с.
2. Сопrotивление материалов деформированию и разрушению. Справоч. пособие / Отв. ред. В.Т. Трошенко. — Киев: Наук. думка, 1993. — Ч. 1. — 288 с.; 1994. — Ч. 2. — 702 с.
3. Zgurovsky M.Z., Pankratova N.D. System analysis: Theory and applications. — Berlin: Springer, 2007. — 475 p.
4. Pankratova N., Kurilin B. Conceptual foundations of the system analysis of risks in dynamics of control of complex system safety. P. 1: Basic statements and substantiation of approach // J. of Automation and Information Sci. — 2001. — 33, N 2. — P. 15–31.
5. Pankratova N., Kurilin B. Conceptual foundations of the system analysis of risks in dynamics of control of complex system safety. P. 2: The general problem of the system analysis of risks and the strategy of its solving // Ibid. — 2001. — 33, N 4. — P. 1–14.
6. Панкратова Н.Д. Системный анализ в динамике диагностирования сложных технических систем // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2008. — № 1. — С. 33–49.
7. Панкратова Н.Д. Рациональный компромисс в системной задаче концептуальной неопределенности // Кибернетика и системный анализ. — 2002. — № 4. — С. 162–180.
8. Ланцош К. Практические методы прикладного анализа. — М.: Физматгиз, 1961. — 524 с.
9. Ремез Е.Я. Основы численных методов чебышевского приближения. — К.: Наук. думка, 1969. — 624 с.

Поступила 23.10.2009