

УПРАВЛЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ И ТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

УДК 303.732.4:681.518.5

Н.Д. Панкратова, Л.П. Кондратова

СИСТЕМНАЯ СТРАТЕГИЯ ГАРАНТИРОВАННОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СЛОЖНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В РЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Ключевые слова: восстановление функциональных зависимостей, многофакторные риски, прогнозирование, ресурс допустимого риска, интегральный показатель информированности ЛПР, информационная платформа технической диагностики.

Введение

Для сложных систем различной природы актуально надежное и своевременное распознавание и предотвращение критических, чрезвычайных и других нежелательных ситуаций и влияний, которые могут привести к нештатному режиму функционирования, авариям или катастрофам или значительно повлиять на работоспособность, живучесть, безопасность, эффективность и другие свойства исследуемых объектов [1, 2]. Возможность возникновения таких ситуаций и результатов их воздействий, условий и факторов определяется случайными и хаотическими процессами, которые по механизмам воздействия можно охарактеризовать как риски [3].

Рациональное сопровождение процесса функционирования сложной технической системы (СТС) обеспечит определенный запас допустимого риска с необходимыми допустимыми значениями степени и уровня риска. Реализация стратегии гарантированного функционирования СТС предполагает использование принципов системного гарантированного диагностирования ситуаций риска, своевременного и достоверного оценивания и прогнозирования ситуаций риска [4, 5]: системная согласованность показателей эффективности систем технической диагностики с соответствующими показателями системы управления безопасностью для предотвращения с необходимой надежностью отказов СТС в пределах ресурса допустимого риска различных режимов; своевременное выявление, распознавание и оценивание рисков нештатного режима на прогнозируемый период функционирования СТС для гарантирования своевременного устранения причин риска до появления отказа. Предлагаются модели Бокса–Дженкинса (авторегрессионная модель, модель скользящего среднего, авторегрессионная модель со скользящим средним, авторегрессионная модель с интегрированным скользящим средним), которые широко используются для прогнозирования стационарных и нестационарных процессов, представляемых временными рядами интенсивности трафика в телекоммуникационной сети [6], параметров геофизических систем [7], показателей работоспособности судовых электроэнергетических систем [8] и др.

1. Концептуальные основы реализации стратегии гарантированного функционирования СТС

Основная идея предлагаемой концепции основывается на реализации качественно нового принципа, суть которого заключается в своевременном выявлении
© Н.Д. ПАНКРАТОВА, Л.П. КОНДРАТОВА, 2019

и устранении причин возможного перехода работоспособного состояния в неработоспособное на основе системного анализа многофакторных рисков нештатных ситуаций, достоверном оценивании ресурса допустимого риска для разных режимов функционирования СТС и прогнозировании основных показателей живучести объекта в течение заданного периода эксплуатации [5]. Реализация приведенного принципа позволит обеспечить безопасность системы как способность своевременно предупреждать переход из штатного режима системы в аварию или катастрофу на основе своевременного выявления факторов существенных рисков и устранения возможности их преобразования в факторы катастрофического риска. Безопасность характеризуется следующими показателями: степенью риска как вероятностью наступления нежелательного события; уровнем риска как величиной ущерба в результате наступления данного события; ресурсом допустимого риска нештатного режима как продолжительности периода функционирования сложной системы в определенном режиме, в течение которого степень и уровень риска в результате возможного воздействия факторов риска не превышают априорно заданные допустимые значения; ресурсом допустимого риска аварии или катастрофы [9].

Стратегия гарантированного функционирования СТС реализуется в виде информационно-аналитической платформы технической диагностики (ИПАД), которая включает модули сбора и обработки исходной информации в процессе функционирования СТС; восстановления функциональных зависимостей (ФЗ) на основе заданных дискретных выборок; квантования дискретных численных величин; обнаружения возможных сбоев датчиков; своевременной диагностики нештатных ситуаций; прогнозирования стационарных и нестационарных процессов; генерации процесса технической диагностики [9].

В нештатных ситуациях возникают принципиально разные условия и факторы, характеризующиеся аксиомой ситуаций риска, согласно которой не исключена возможность одновременного осуществления нескольких событий из этого множества, и, следовательно, единице принципиально могут одновременно равняться вероятности нескольких событий. Поэтому неопределенность появления любого события из множества ситуаций риска не становится равной нулю при реализации одного или нескольких событий множества. Положения аксиомы следуют из анализа аварий, вызванных одновременным или последовательным возникновением нескольких неисправностей или сбоев. Принимая во внимание аксиому ситуаций риска и показатели качества информации, устанавливаются принципиально новые требования к количественному измерению информации в смысле обеспечения координации системы качества и количества информации в условиях предельных временных ограничений. Целесообразно оценивать качество информации по объему данных, полезных для формирования и обоснования решения, а также по качеству значимости данных относительно их достоверности и полноты представления ситуаций риска и своевременности доставки практически полезной информации для лица, принимающего решение (ЛПР).

Вводится обобщенное представление в форме эмпирического утверждения (гипотезы) о режиме функционирования реального сложного объекта, который позволит выявить как механизмы его функционирования и работоспособности в нормальном режиме, так и механизмы возникновения и развития нештатного режима. В соответствии с упомянутой гипотезой способ функционирования любой сложной системы в любой момент времени определяется действием множества его внутренних процессов и набором процессов его взаимодействия с окружающей средой; свойства режима зависят от порядка, случайности и хаотического состояния внутренних и внешних процессов. Режим содержит детерминированные, случайные и хаотические компоненты, которые связаны между собой через определенные процессы и явления. Совместные действия компонентов в любой мо-

мент времени определяют свойства и особенности режима функционирования сложной системы. Практическая важность данной гипотезы заключается в ее определении необходимости, возможности и целесообразности поиска различных экспериментальных и эмпирических подходов и методов их реализации.

2. Математическая постановка задачи

Предлагаемая стратегия реализуется на основе принципа своевременного выявления и устранения причин возможного перехода СТС в неработоспособное состояние с введением ресурса допустимого риска, учитывая интегральный показатель информированности о ситуациях риска как комбинации частных показателей полноты, достоверности и своевременности информированности ЛППР и неустранимое пороговое ограничение времени в условиях воздействия дестабилизирующих факторов риска. Ресурс допустимого риска оценивается для ситуаций некоторого множества S_j вложенной последовательности $S_1 \subset S_2 \subset \dots \subset S_j \subset \dots \subset S_{n_s}$, которое характеризует состояние СТС в некоторый момент времени. Ситуации множества S_j характеризуются интервалами времени, которые представляются в матрице $\mathbf{T}_R = \{[\mathbf{t}_f^i, \mathbf{t}_r^i] | \mathbf{t}_f^i < \mathbf{t}_r^i, \mathbf{t}_r^i < \mathbf{t}_{cr}, i = \overline{1, m}\}$, где $\mathbf{t}_f^i, \mathbf{t}_r^i$ — векторы-строки моментов времени формирования и реализации решения соответственно относительно ситуаций множества S_j ; \mathbf{t}_{cr} — вектор граничных значений времени принятия решения относительно ситуаций множества S_j . Учитывая различные виды неопределенности, оценивается в режиме реального времени на основе ФЗ $\tilde{y}_i = \Phi_i(\{x_j | j = \overline{1, n}\}, F_i(\rho_q | q = \overline{1, n_q})), i = \overline{1, m}$, восстановленных с учетом прогноза на некоторый период в условиях воздействия дестабилизирующих факторов риска $\rho_q | q = \overline{1, n_q}$, рациональный уровень интегрального показателя информированности как вектор $\mathbf{I}_0 = \langle I_{0p} = \min_{i \in \overline{1, m}} \{\bar{I}_0^{ip}(t_k) | t_k \in [\mathbf{t}_f^i, \mathbf{t}_r^i], \mathbf{t}_r^i < \mathbf{t}_{cr}, p = \overline{1, |S_j|}\} \rangle$, обеспечивающий распознавание ситуаций множества S_j . В выражении для \mathbf{I}_0 $\bar{I}_0^{ip}(t_k)$ — средние значения интегрального показателя информированности для \tilde{y}_i о p -й ситуации множества S_j в моменты времени $t_k \in [\mathbf{t}_f^i, \mathbf{t}_r^i], i = \overline{1, m}$.

При этом восстановление ФЗ $y_i | i = \overline{1, m}$ формируется в виде иерархической многоуровневой системы моделей, позволяющей получить с приемлемой степенью точности в заданном интервале времени на выборках Y_i реальных данных значения приближающих функций [9].

Для оценивания прогнозных значений показателей $y_i^p | i = \overline{1, m}$ функционирования СТС или их параметров $x_j^p | j = \overline{1, n}$ с последующим восстановлением ФЗ $y_i = \Phi_i(\{x_j^p | j = \overline{1, n}\}, F_i(\rho_q | q = \overline{1, n_q})), i = \overline{1, m}$, в некотором интервале времени $D^+ = \{t_p | t_0^+ < t_p \leq t^+\}$ реализуются модели Бокса–Дженкинса [6–8]. Учитывается уровень воздействия $F_i(\rho_q | q = \overline{1, n_q})$ дестабилизирующих факторов риска.

Этот прием основан на использовании дискретной выборки значений реальных показателей функционирования и восстановленных ФЗ $\tilde{y}_i = \Phi_i(\{x_j | j = \overline{1, n}\}, F_i(\rho_q | q = \overline{1, n_q})), i = \overline{1, m}$, в исходном интервале времени $D_0 = \{t | t_0^- \leq t \leq t_0^+\}$.

Вводится процедура выявления возможного сбоя датчиков на основе ступенчатых функций 1- и 2-го уровней [9] или индикатора Боллинджера [10]. Применение как ступенчатых функций, так и линий (полос) Боллинджера, которые характеризуют инструмент технического анализа и технический индикатор, отражающий текущие отклонения наблюдаемой величины, обеспечивает уменьшение уровня зависимости от погрешности измеряемых показателей.

Линии Боллинджера строятся в виде верхней (скользящая средняя плюс два стандартных отклонения) и нижней границ (скользящая средняя минус два стандартных отклонения) в окрестности скользящей средней, но ширина полосы пропорциональна среднеквадратическому отклонению от скользящей средней за анализируемый интервал времени.

Ступенчатые функции 1- и 2-го уровней строятся на основе соответствующих соотношений вида [9]:

$$Z_{1i} = \sum_{p=1}^{M_1} d_{ip} \cdot U(\hat{x}); \quad U(\hat{x}) = \begin{cases} 0, & \hat{x} < 0, \\ 1, & \hat{x} \geq 0; \end{cases} \quad \hat{x} = x_i - x_p; \quad x_p = 0,1 \cdot p; \quad M_1 = 10;$$

$$Z_{2i} = \sum_{p=1}^{M_2} d_{ip} \cdot U(\hat{x}); \quad x_p^0 = \begin{cases} 0,5 & \text{при } p = 1, \\ 0,1 & \text{при } p \in [2, 9], \\ 1,15 & \text{при } p = 10; \end{cases} \quad d_{ip} = \begin{cases} 0,1 & \text{при } p \in [1, 9], \\ 1 & \text{при } p = 10; \end{cases} \quad M_2 = 10;$$

$$i = \overline{1, m}.$$

В случае использования линий Боллинджера сбоем датчика считается выполнение условий $|\tilde{y}_i[t_k] - \bar{\tilde{y}}_i[t_k]| > 2 \cdot \sigma_i[t_k]$ ($\bar{\tilde{y}}_i[t_k]$ — среднее значение $\tilde{y}_i[t_k]$ в интервале $[t_k - \Delta, t_k + \Delta]$, Δ — период скользящей средней, $\sigma_i[t_k]$ — среднеквадратическое отклонение $\tilde{y}_i[t_k]$ от скользящей средней). Условия сбоев датчиков при использовании ступенчатых функций 1- и 2-го уровней выражаются соотношениями

$$\text{sign}(\tilde{y}_{i_1}[t_k] - Z_{1i_1}[t_k]) = \text{sign}(\tilde{y}_{i_2}[t_k] - Z_{1i_2}[t_k]),$$

$$\text{sign}(\tilde{y}_{i_1}[t_k] - Z_{2i_1}[t_k]) = \text{sign}(\tilde{y}_{i_2}[t_k] - Z_{2i_2}[t_k]), \quad i_1, i_2 \in [1, m].$$

Ресурс допустимого риска, представленный вектором $\mathbf{R}_i^{perm} = \langle R_{ip}^{perm}, p = \overline{1, |S_j|} \rangle \forall i \in [1, m]$, реализуется относительно ситуаций множества S_j в интервале времени $[\mathbf{t}_{a_1}^i, \mathbf{t}_{s_2}^i], \mathbf{t}_{s_1}^i \leq \mathbf{t}_{a_1}^i < \mathbf{t}_{s_2}^i \forall i \in [1, m]$ с границами $\mathbf{t}_{a_1}^i, \mathbf{t}_{s_2}^i$, которым соответствуют значения $\tilde{y}_i(t_{a_1}^{ip})$ со степенью риска $\eta_i(\tilde{y}_i(t_{a_1}^{ip})) < \eta_i(\tilde{y}_i(t_{s_2}^{ip}))$ и уровнем риска $W_i(\tilde{y}_i(t_{a_1}^{ip})) < W_i(\tilde{y}_i(t_{s_2}^{ip}))$ и $\tilde{y}_i(t_{s_2}^{ip})$ с $I_0^{ip}(t_{s_2}^i) \geq I_{0p}^-$ для p -й ситуации множества S_j . Согласование ресурсов допустимого риска реализуется относительно ситуаций множества S_j в соответствии с условиями $\mathbf{I}_0^i(t_k) \geq \mathbf{I}_0^-$, $t_k \in [\mathbf{t}_{s_1}^i, \mathbf{t}_{s_2}^i], i = \overline{1, m}$, для \tilde{y}_i в интервалах времени $[\mathbf{t}_{ca_1}, \mathbf{t}_{cs_2}] \subset \bigcup_{i \in [1, m]} [\mathbf{t}_{a_1}^i, \mathbf{t}_{s_2}^i]$, гарантируя предотвращение ситуаций нештатного режима, и определяется вектором $\mathbf{R}_c^{perm} = \langle R_{cp}^{perm}, p = \overline{1, |S_j|} \rangle$ [11].

Задача заключается в прогнозировании показателей функционирования, оценивании и рациональном согласовании ресурсов допустимого риска $\mathbf{R}_i^{perm} =$

$= \langle R_{ip}^{perm}, p = \overline{1, |S_j|} \rangle \forall \tilde{y}_i, [1, m]$ относительно ситуаций множества S_j , которые реализуются в интервалах времени $[t_{a_1}^{ip}, t_{s_2}^{ip}] \subset T_R^p, i = \overline{1, m}$. Здесь соответствующие значения степени и уровня риска не превышают значений $\eta_{ip}(\tilde{y}_i(t_{s_2}^{ip}))$ и $W_{ip}(\tilde{y}_i(t_{s_2}^{ip}))$ в конечный момент интервала $[t_{s_1}^{ip}, t_{s_2}^{ip}] \subset T_R^p \forall i = \overline{1, m}$ для поиска дополнительной информации, а значения интегрального показателя информированности $I_0^{ip}(t_{k_p})$, $t_{k_p} \in [t_{s_1}^{ip}, t_{s_2}^{ip}] \subset T_R^p$ не ниже $I_0^- = \langle I_{0p}^- = \min_{i \in \overline{1, m}} \{I_0^{ip}(t_{k_p}), t_{k_p} \in [t_f^{ip}, t_r^{ip}]\}, p = \overline{1, |S_j|} \rangle$.

3. Математические модели для прогнозирования показателей функционирования СТС, оценивания и рационального согласования значений ресурсов допустимого риска

3.1. Математические модели прогнозирования показателей функционирования СТС. Прогноз значений показателей функционирования строится с использованием моделей Бокса–Дженкинса, записываемых как [6–8]

$$\begin{aligned} y_i^p[t_k] &= \sum_{\tau=1}^r \mu_\tau \cdot y_i[t_k - \tau] + \varepsilon_i[t_k], \quad i = \overline{1, m}; \\ x_j^p[t_k] &= \sum_{\tau=1}^q \mu_\tau \cdot x_j[t_k - \tau] + \varepsilon_j[t_k], \quad j = \overline{1, n}; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} y_i^p[t_k] &= \varepsilon_i[t_k] - \sum_{\tau=1}^q \theta_\tau \cdot \varepsilon_i[t_k], \quad i = \overline{1, m}; \\ x_j^p[t_k] &= \varepsilon_j[t_k] - \sum_{\tau=1}^q \theta_\tau \cdot \varepsilon_j[t_k], \quad j = \overline{1, n}; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} y_i^p[t_k] &= \sum_{\tau=1}^r \mu_\tau \cdot y_i[t_k - \tau] + \varepsilon_i[t_k] - \sum_{\tau=1}^q \theta_\tau \cdot \varepsilon_i[t_k - \tau], \quad i = \overline{1, m}; \\ x_j^p[t_k] &= \sum_{\tau=1}^r \mu_\tau \cdot x_j[t_k - \tau] + \varepsilon_j[t_k] - \sum_{\tau=1}^q \theta_\tau \cdot \varepsilon_j[t_k - \tau], \quad j = \overline{1, n}; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} y_i^p[t_k] &= \sum_{\tau=1}^r \mu_\tau \cdot \Delta^d y_i[t_k - \tau] + \varepsilon_i[t_k] - \sum_{\tau=1}^q \theta_\tau \cdot \varepsilon_i[t_k - \tau] + \sum_{l=1}^{d-1} \Delta^l y_i[t_k - l] + y_i[t_k - 1], \quad i = \overline{1, m}; \\ x_j^p[t_k] &= \sum_{\tau=1}^r \mu_\tau \cdot \Delta^d x_j[t_k - \tau] + \varepsilon_j[t_k] - \sum_{\tau=1}^q \theta_\tau \cdot \varepsilon_j[t_k - \tau] + \sum_{l=1}^{d-1} \Delta^l x_j[t_k - l] + x_j[t_k - 1], \quad j = \overline{1, n}. \end{aligned} \quad (4)$$

В (1)–(4) $\mu_1, \dots, \mu_r, \theta_1, \dots, \theta_q$ характеризуют коэффициенты авторегрессии и скользящего среднего, соответственно, определяемые с использованием, например, метода наименьших квадратов; r, q, d — заданные порядки авторегрессии, скользящего среднего и разностей; $\varepsilon_i[t_k], \varepsilon_j[t_k]$ — случайные ошибки в моменты времени $t_k \in D_0 \cup D^+$.

3.2. Математическая модель оценивания и рационального согласования значений ресурса допустимого риска. Модель гарантированного функциониро-

вания СТС в реальных условиях воздействия дестабилизирующих факторов риска и различного типа неопределенностей описывает оценивание и рациональное согласование значений ресурсов допустимого риска для функциональных зависимостей \tilde{y}_i как [11]

$$\mathbf{R}_c^{perm} = \left\langle \left\{ R_{cp}^{perm} = \frac{|\min_{i=1,m}\{t_{a_1}^{ip}\}, \min_{i=1,m}\{t_{s_2}^{ip}\}|}{|\min_{i=1,m}\{t_{s_1}^{ip}\}, \min_{i=1,m}\{t_{s_2}^{ip}\}|}, p = \overline{1, |S_j|} \right\} \right\rangle, \quad (5)$$

$$t_{a_1}^{ip} = \min_{\{t_k^i \in [t_{s_1}^i, t_{s_2}^i]\}} \{t_k^i \mid t_k^i < t_{s_2}^{ip}\}, p = \overline{1, |S_j|}, i = \overline{1, m}, \quad (6)$$

$$\eta_i(\tilde{y}_i(t_{a_1}^{ip})) < \eta_i(\tilde{y}_i(t_{s_2}^{ip})), W_i(\tilde{y}_i(t_{a_1}^{ip})) < W_i(\tilde{y}_i(t_{s_2}^{ip})), p = \overline{1, |S_j|}, i = \overline{1, m}, \quad (7)$$

$$I_0^{ip}(t_{s_2}^{ip}) \geq I_{0p}, p = \overline{1, |S_j|}, i = \overline{1, m}. \quad (8)$$

В (5), (6) $t_{a_1}^{ip}$ характеризует для \tilde{y}_i нижнюю границу интервала времени реализации ресурса допустимого риска нештатного режима p -й ситуации множества S_j . Параметр $t_{a_1}^{ip}$ определяется в интервалах времени $[t_{s_1}^i, t_{s_2}^i] \subseteq [t_f^i, t_r^i]$ поиска дополнительной информации по принятию решения с учетом ограничений (7) относительно степени риска $\eta_i(\tilde{y}_i(t_{s_2}^{ip}))$, уровня риска $W_i(\tilde{y}_i(t_{s_2}^{ip}))$ и условий (8) относительно интегрального показателя информированности $I_0^{ip}(t_{s_2}^{ip})$ в конечных интервалах времени распознавания ситуаций множества S_j .

4. Применение моделей для диагностики функционирования замкнутой системы оборотного водоснабжения

Исследование процесса функционирования СТС на основе предложенной стратегии с использованием моделей прогнозирования показателей функционирования, оценивания и рационального согласования ресурсов допустимого риска с учетом восстановленных функциональных зависимостей, проведено на реальном примере замкнутой системы оборотного водоснабжения (ЗСОВ), функциональная схема которой приведена на рис. 1 (ПЧ — преобразователь частот для регулирования скорости вращения регулируемого насоса).

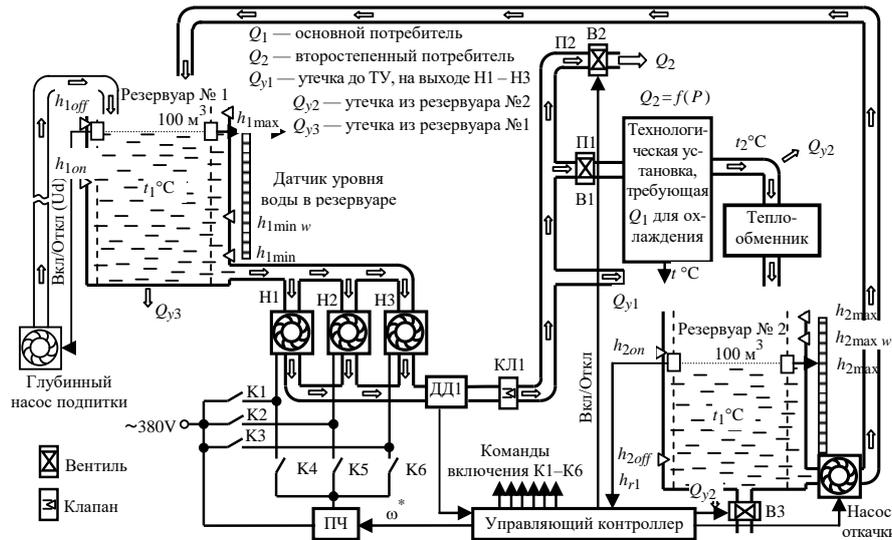


Рис. 1

Основное назначение системы — обеспечение заданного расхода воды $Q_1 \leq 0,045 \text{ м}^3/\text{с}$ для охлаждения технологической установки (ТУ) (приоритетный объект) и дополнительного расхода $Q_2 \leq 0,045 \text{ м}^3/\text{с}$, который потребляется вспомогательным оборудованием и не является критическим. Полный штатный расход $Q_n = Q_1 + Q_2$. Включение насоса подпитки происходит при 1) снижении уровня воды во входном резервуаре ниже значения $h_{1on} = 50 \text{ м}^3$, выключение при $h_{1off} = 80 \text{ м}^3$, если насос откачки отключен; 2) при снижении уровня воды в резервуаре ниже значения $h_{1on} = 40 \text{ м}^3$, выключение при $h_{1off} = 60 \text{ м}^3$, если насос откачки включен. Глубинный насос во включенном состоянии обеспечивает производительность $Q_{dn} = 0,05 \text{ м}^3/\text{с}$. Во входном резервуаре № 1 установлен датчик уровня воды, выдающий сигнал h_{r1} . Снижение уровня воды ниже 40 м^3 при работающем насосе откачки говорит о нештатной ситуации (утечке). В резервуаре № 2 установлен датчик уровня воды, выдающий сигнал h_{r2} . Включение насоса откачки происходит при уровне воды в резервуаре № 2 выше значения $h_{2on} = 80 \text{ м}^3$, выключение — ниже $h_{2off} = 20 \text{ м}^3$. Насос откачки во включенном состоянии обеспечивает производительность $Q_{dn2} = 0,05 \text{ м}^3/\text{с}$. В случае, когда уровень воды в резервуаре № 1 выше отметки 97 м^3 и насос откачки включен, последний принудительно отключается во избежание переполнения резервуара №1. Возобновление его работы происходит, когда уровень h_{r1} снижается до 95 м^3 . В резервуар № 2 попадает вода, только прошедшая через технологическую установку и охладитель. Вода после второго потребителя уходит в канализационную систему.

Для подачи воды из резервуара потребителям установлена насосная установка из трех нагнетающих насосов (P1–P3): два работают в штатном режиме, один — аварийный. Производительность каждого из насосов составляет $Q_m = 0,05 \text{ м}^3/\text{с}$. Насосная установка работает в режиме стабилизации давления, для чего на выходной трубе установлен датчик давления ДД1. Через клапан КЛ1 вода поступает в водопроводную сеть. К водопроводной сети подключены две группы потребителей, у которых максимально возможный штатный уровень расхода соответственно составляет $Q_1 \leq 0,045 \text{ м}^3/\text{с}$, $Q_2 \leq 0,045 \text{ м}^3/\text{с}$. Подача воды к потребителю П2 не является критическим фактором и может быть перекрыта путем запираания управляемого вентиля В2. Подача воды в ТУ (потребитель П1) является обязательной, ее нарушение приводит к аварии.

В штатном режиме требования ТУ в отношении необходимого расхода воды полностью удовлетворяются, т.е. обеспечивается надежный отбор тепла и температура ТУ находится в допустимых пределах. Допустимым пределом считается температура до 75°C . При температуре в диапазоне от 75 до 85°C ситуация является нештатной, после превышения порога 85°C — аварийной. Температура регулируется с помощью отдельного регулятора, выходом которого является гидравлическое сопротивление вентиля В1 на входе ТУ, что в свою очередь регулирует расход воды в ТУ.

В соответствии с требованиями разработанного инструментария ИПТД по глубине резервуаров и в ряде реперных точек ЗСОВ установлены датчики, показатели которых снимаются каждые 20 с, время моделирования — 10 000 с. Для рассмотренного эксперимента здесь приводятся показания датчиков уровня воды

h_{r1} и h_{r2} в резервуарах № 1 и 2 соответственно, напора H_1 на входе в технологическую установку, температуры T технологической установки и их аргументов в течение 10 000 с.

В процессе функционирования ЗСОВ для своевременного выявления причин потенциально возможных нештатных ситуаций и обеспечения живучести ее функционирования в режиме реального времени проводится мониторинг технического диагностирования. В соответствии с разработанной методологией гарантированного функционирования СТС по дискретно заданным выборкам значений показателей h_{r1} , H_1 , T , h_{r2} и их аргументов выполняется восстановление ФЗ $y_i = f_i(x_1, \dots, x_j, \dots) \Big|_{i=\overline{1,4}}$: $y_1 = h_{r1}(x_1)$, $y_2 = H_1(x_1, x_2, x_3)$, $y_3 = T(x_4, x_5, x_6, x_7, x_8)$, $y_4 = h_{r2}(x_5, x_8)$, где x_1 — суммарный расход воды; x_2 — число включенных насосов (от 1 до 3); x_3 — скорость регулируемого насоса; x_4 — температура охлаждающей воды; x_5 — напор H_1 ; x_6 — мощность тепловых потерь ΔP ; x_7 — заданная температура ТУ; x_8 — гидравлическое сопротивление вентиля на входе ТУ.

Нештатный режим происходит по причине выхода из строя теплообменника, т.е. нагретая в ТУ вода не охлаждается до требуемой температуры и возвращается в резервуар № 1. Это приводит к тому, что температура охлаждающей воды к моменту времени 3 000 с достигает 57°C , что существенно снижает ее охлаждающие свойства. В результате температура ТУ начинает расти. При этом наступают моменты времени, когда вентиль В1 является полностью открытым (минимальное значение гидравлического сопротивления), обеспечивая максимально возможный проход воды в ТУ. Поскольку вследствие указанных причин возможен перегрев ТУ, в момент времени 3 000 с принимается решение открыть вентиль слива воды В3 и отключить насос откачки. Глубинный насос подпитки закачивает холодную воду с температурой 20°C , что приводит к постепенному снижению температуры охлаждающей воды и выходу из нештатной ситуации по температуре. Вместе с тем уровень воды в резервуаре № 1 колеблется около 50 м^3 , что потенциально может привести к развитию аварийной ситуации, связанной с объемом воды в резервуаре № 1, в случае дополнительной утечки или отключения глубинного насоса. Потребитель П2 может быть перекрыт при необходимости. Полный выход из нештатной ситуации возможен только после возобновления работы теплообменника и включения насоса откачки. Принято, что на 5000-й с ремонт теплообменника закончен, вентиль В3 перекрывается, выдается разрешение на работу насоса откачки, когда уровень в резервуаре № 2 достигнет значения h_{2on} . Это событие наступает в момент времени 8 060 с, насос откачки начинает перекачивать теплую воду в резервуар № 1, что вызывает плавное штатное повышение температуры охлаждающей воды до уровня 28°C .

Стационарность поведения дискретных выборок для некоторых показателей функционирования ЗСОВ, обнаруженная в соответствии с критериями Фишера, Стьюдента, Кохрана–Кокса, позволяет построить прогноз в реальном времени на основе моделей Бокса–Дженкинса ($AR(r)$ порядка r , $MA(q)$ порядка q , $ARMA(r, q)$ порядков r, q , $ARIMA(r, d, q)$ порядков r, d, q). При этом учитываются ФЗ $\tilde{y}_i = \Phi_i(\{x_j \mid j = \overline{1,8}\})$, $i = \overline{1,4}$, восстановленные в интервале времени $D_0 \in [340 \text{ с}; 2020 \text{ с}]$ в условиях нештатного режима теплообменника. Прогноз построен на 20 значениях

для показателей функционирования $y_i^p | i = \overline{1, 4}$ и параметров $x_j^p | j = \overline{1, 8}$ ЗСОВ с последующим восстановлением ФЗ $y_i = \Phi_i(\{x_j^p | j = \overline{1, 8}\}, F_i(\rho_q | q = \overline{1, 8})), i = \overline{1, 4}$.

На точность прогноза влияет количественный и качественный составы параметров $x_j | j = \overline{1, 8}$ ФЗ $y_i | i = \overline{1, 4}$. В условиях нештатного режима теплообменника без применения процедуры выявления возможных сбоев датчиков ошибки прогнозирования показателей $y_i^p | i = \overline{1, 4}$ функционирования ЗСОВ на основе моделей Бокса–Дженкинса составили 23,926 %, 18,326 %, 22,826 %, 2,26 %, ошибки прогнозирования параметров $x_j^p | j = \overline{1, 8}$ с последующим восстановлением ФЗ $y_i = \Phi_i(\{x_j^p | j = \overline{1, 8}\}, F_i(\rho_q | q = \overline{1, 8})), i = \overline{1, 4}$, — 53,226 %, 16,326 %, 17,126 %, 25,1 % соответственно.

При применении процедуры выявления возможных сбоев датчиков ошибки прогнозирования показателей $y_i^p | i = \overline{1, 4}$ функционирования ЗСОВ составили 4,66, 15,0126 %, 14,126 %, 2,11 %, соответственно, ошибки прогнозирования параметров $x_j^p | j = \overline{1, 8}$ с последующим восстановлением ФЗ $y_i = \Phi_i(\{x_j^p | j = \overline{1, 8}\}, F_i(\rho_q | q = \overline{1, 8})), i = \overline{1, 4}$, — 34,026 %, 0,4626 %, 8,4526 %, 25, 0% соответственно.

Прогноз построен также для показателей функционирования $y_i^p | i = \overline{1, 4}$ и параметров $x_j^p | j = \overline{1, 8}$ с последующим восстановлением ФЗ $y_i = \Phi_i(\{x_j^p | j = \overline{1, 8}\}, F_i(\rho_q | q = \overline{1, 8})), i = \overline{1, 4}$, на основе ФЗ $\tilde{y}_i = \Phi_i(\{x_j | j = \overline{1, 8}\}), i = \overline{1, 4}$, восстановленных в интервале времени $D_0 \in [5760 \text{ с}; 8980 \text{ с}]$ в условиях штатного режима теплообменника. Здесь ошибки прогнозирования показателей $y_i^p | i = \overline{1, 4}$ функционирования ЗСОВ составили 5,326 %, 2,426 %, 5,726 %, 13,8 %; ошибки прогнозирования параметров $x_j^p | j = \overline{1, 8}$ с последующим восстановлением ФЗ $y_i = \Phi_i(\{x_j^p | j = \overline{1, 8}\}, F_i(\rho_q | q = \overline{1, 8})), i = \overline{1, 4}$, — 13,726 %, 1,5526 %, 2,626 %, 14,6 % без применения процедуры выявления возможных сбоев датчиков. С применением указанной процедуры ошибки прогнозирования показателей $y_i^p | i = \overline{1, 4}$ функционирования ЗСОВ составили 1,5326 %, 0,926 %, 10,326 %, 6,36 %, для параметров $x_j^p | j = \overline{1, 8}$ с последующим восстановлением ФЗ $y_i = \Phi_i(\{x_j^p | j = \overline{1, 8}\}, F_i(\rho_q | q = \overline{1, 8})), i = \overline{1, 4}$, — 9,926 %, 0,0326 %, 0,5226 %, 7,95 %.

Полученные результаты показали целесообразность прогнозирования параметров $x_j^p | j = \overline{1, 8}$ ЗСОВ с последующим восстановлением функциональных зависимостей с большим числом в их структуре существенно изменяющихся параметров. Результаты прогнозирования гарантируют выявление причин для возможного перехода СТС в нештатный режим функционирования, а также их своевременное устранение с учетом ресурса допустимого риска. Учитывая полученные на основе модели (5)–(8) согласованные значения ресурса допустимого риска ситуаций нештатного режима для функциональных зависимостей $\tilde{y}_1, \tilde{y}_2, \tilde{y}_3, \tilde{y}_4$, обеспечивается возможность гарантированного предотвращения перехода к нештатным ситуациям.

На рис. 2 представлены некоторые результаты распределения по времени восстановленных функциональных зависимостей \tilde{y}_1 , \tilde{y}_4 уровней воды h_{r1} (м³) и h_{r2} (м³) в резервуарах № 1 и 2 соответственно, \tilde{y}_2 — напора воды H_1 (м), \tilde{y}_3 — температуры ТУ (°С).

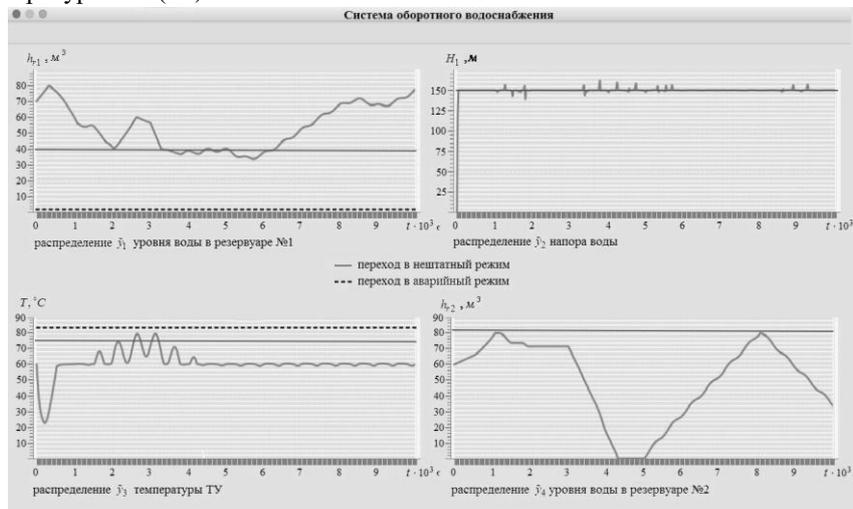


Рис. 2

Заключение

Стратегия оценивания гарантированного функционирования СТС позволяет предотвратить ее неработоспособность и переход в штатные ситуации. Сопровождение живучести функционирования сложной системы в реальном режиме времени с непрерывным оцениванием системных показателей объекта определяют ситуации, которые могут перевести объект из штатного режима функционирования в штатный. Совместный мониторинг и комплексная оценка параметров конечного числа функционально динамических параметров позволяют детально описать процессы функционирования объекта любого порядка сложности. Для ситуаций, которые могут вызвать отклонение параметров от штатного режима функционирования объекта, в целях гарантирования живучести может быть принято своевременное решение об изменении режима работы или искусственной корректировке некоторых параметров.

Принципы, положенные в основу реализации стратегии гарантированной безопасности и живучести СТС, обеспечивают гибкий подход к своевременному выявлению, распознаванию, прогнозированию и системной диагностике ситуаций и факторов риска, а также к разработке и реализации рационального решения в практическое осуществимое время в рамках неустраняемого порогового ограничения времени.

Н.Д. Панкратова, Л.П. Кондратова

СИСТЕМНА СТРАТЕГІЯ ГАРАНТОВАНОГО ФУНКЦІОНУВАННЯ СКЛАДНОЇ ТЕХНІЧНОЇ СИСТЕМИ В РЕАЛЬНИХ УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Запропоновано системну стратегію гарантованого функціонування складної технічної системи (СТС), що орієнтується на своєчасне виявлення та усунення причин можливого переходу з працездатного стану в непрацездатний на основі системного аналізу багатofакторних ризиків позаштатних ситуацій, достовірного оцінювання ресурсу допустимого ризику для різних режимів функціонування СТС та прогнозування основних показників живучості об'єкта протягом заданого періоду експлуатації. Наведено моделі прогнозування та оцінювання ресурсу допустимого ризику, що становлять основу реалізації запропонованої

стратегії у формі інформаційної платформи технічної діагностики. Як приклад показано функціонування замкнутої системи оборотного водопостачання.

Ключові слова: відновлення функціональних залежностей, багатofакторні ризики, прогнозування, ресурс допустимого ризику, інтегральний показник інформованості ОПР, інформаційна платформа технічної діагностики.

N.D. Pankratova, L.P. Kondratova

SYSTEM STRATEGY FOR GUARANTEED COMPLEX ENGINEERING SYSTEM FUNCTIONING IN REAL OPERATING CONDITIONS

There is proposed system strategy for the guaranteed operation of a complex engineering system (CES), which is oriented to the timely detection and elimination of the reasons for the possible transition of an operational state to an inoperative based on a system analysis of multifactorial risks of abnormal situations, reliable estimating the margin of permissible risk for different CES operation modes and forecasting the key indicators of the object's survivability for a specified operation period. There are given the models for forecasting and estimating of margin of permissible risk, which compose the basis for the implementation of the proposed strategy as the information platform for technical diagnostics. As an example, the functioning of the closed circulating water supply system is presented.

Keywords: recovery of functional dependencies, multifactorial risks, forecasting, margin of permissible risk, integral index of decision maker informedness, information platform for technical diagnostics.

1. Henning S. Diagnostic analysis for mechanical systems. *Proceedings of the 2000 ASME Design Theory and Methodology Conference*. 2000. P. 11–24.
2. Chao K., Chiang W., Huang S., Huang K. Fault analysis and diagnosis system for induction motors. *Computers & Electrical Engineering*. 2016. N 54. P. 195–209. DOI: 10.1016/j.compeleceng.2016.01.028.
3. Панкратова Н.Д., Курилин Б.И. Концептуальные основы системного анализа рисков в динамике управления безопасностью сложных систем. Часть 2. Общая задача системного анализа рисков и стратегия ее решения. *Проблемы управления и информатика*. 2001. № 2. С. 108–126.
4. Pankratova N.D. System coordination of survivability and safety complex engineering objects operation. *Computer Science Journal of Moldova*. 2014. Vol. 22, N 3. P. 303–317.
5. Pankratova N.D. The integrated system of safety and survivability complex technical objects operation in conditions of uncertainty and multifactor risks. *Proceedings of conference IEEE*, Kyiv, Ukraine, May 29–June 2. 2017. N 50. P. 1135–1140. DOI:10.1109/UKRCON.2017. 8100427.
6. Овчинников К.А., Бушманов В.С. Прогнозирование сетевого трафика при помощи авторегрессионных моделей. *Проблемы инфокоммуникаций. Наука и технологии. Материалы 1-й Международной научно-практической конференции*, Харьков, 9–11 октября. 2013. С.177–179.
7. Горшков В.Л. О методах прогнозирования в геодинамике. *Известия ГАО РАН*. 2004. № 217. С. 365–378.
8. Стеклов А.С., Серебряков А.В., Титов В.Г. Прогнозирование технического состояния судовых электроэнергетических систем. *Вестник ИГЭУ*. 2016. Вып. 5. С. 21–26. DOI: 10.17588/2072-2672.2016.5.021-026.
9. Pankratova N.D. System strategy for guaranteed safety of complex engineering systems. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2010. Vol. 46(2). P. 243–251. DOI: 10.1007/s10559-010-9201-6.
10. Colby R. The encyclopedia of technical market indicators. M. : Alpina Publisher, 2011. 840 p.
11. Pankratova N.D., Kondratova L.P. System evaluation of engineering objects' operating taking into account the margin of permissible risk. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. N 3. P.13–19. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.71126.

Получено 04.06.2018