

УДК 303.732.4:681.518.5

Н.Д. Панкратова, А.М. Радюк

РОЗПІЗНАВАННЯ ПОЗАШТАТНОЇ СИТУАЦІЇ В ДИНАМІЦІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТЕХНОГЕННО НЕБЕЗПЕЧНОГО ОБ'ЄКТА

Вступ

Запропонований підхід базується на загальних принципах і основних прийомах стратегії системного забезпечення гарантованої безпеки складних технічних систем, багатокритеріального оцінювання і прогнозування ситуацій ризику та математичній постановці загальної задачі системного аналізу ризиків у динаміці керування безпекою складних систем [1–3]. На підставі принципу декомпозиції загальна задача аналізу багатofакторних ризиків реалізується у вигляді послідовності таких системно узгоджених, інформаційно взаємопов'язаних задач: системної багатofакторної класифікації виявлених і прогнозованих ситуацій ризиків; системного багатofакторного розпізнавання виявлених і прогнозованих ситуацій ризиків; системного багатокритеріального ранжування ситуацій; багатоцільової мінімізації ризиків прогнозованої множини позаштатних ситуацій; раціональної багатоцільової оптимізації рівня інформованості під час розпізнавання позаштатних ситуацій у процесі функціонування складної системи; раціонального узгодження ресурсів допустимого ризику прогнозованої множини позаштатних ситуацій; визначення раціонального рівня інформованості для порогового обмеження часу в процесі функціонування складної системи; системного оцінювання ресурсів допустимого ризику в динаміці позаштатного режиму. Такий прийом зумовлений складністю загальної задачі системного аналізу і орієнтацією на комп'ютерну реалізацію основних процедур системного аналізу ризиків, що, у свою чергу, визначає потребу, можливість і доцільність використання модульного принципу організації процесу паралельного розв'язання задачі.

Практичну реалізацію стратегії системного забезпечення гарантованої безпеки складних систем зорієнтовано на своєчасне виявлення і ліквідацію причин можливих несправностей і відмов [4]. Головною метою запропонованої стратегії є гарантування раціонально обгрунто-

ваного ресурсу живучості складної системи в реальних умовах принципово неусунених інформаційних і часових обмежень. У даному випадку живучість розуміємо як властивість складної системи в її спроможності зберегти штатний режим функціонування і усунути можливість аварії або катастрофи в прогнозованих і непрогнозованих умовах впливу дестабілізуючих, неруйнівних факторів ризику.

Конкретизація кожної процедури стратегії і її взаємозв'язків має здійснюватися для кожної предметної області у формі відповідного інформаційного, математичного і програмного забезпечення. Необхідність такого підходу до реалізації стратегії визначається принциповими відмінностями динаміки ситуацій ризику в різних сферах практичної діяльності. Наприклад, критична ситуація на промисловому підприємстві при недостатній кількості палива і її наслідки відрізняються від критичної ситуації і викликаних нею наслідків при виявленій недостатці палива в динаміці польоту літака. Звідси впливає істотна різниця пріоритетів в оцінюванні причин і умов дії ситуацій ризику і, як наслідок, відмінність формалізації і алгоритмізації однотипних процедур для різних практичних додатків.

Постановка задачі

Мета даної статті – постановка і реалізація задачі розпізнавання позаштатної ситуації в динаміці функціонування техногенно небезпечних складних технічних систем (СТС).

Розглянемо особливості основних властивостей ситуацій ризиків. Серед ситуацій ризику, які виникають у процесі функціонування техногенно небезпечного об'єкта, будемо розрізняти позаштатні, критичні, надзвичайні, аварійні та катастрофічні ситуації [5, 6], які виникають у результаті переходу із штатного до позаштатного режиму функціонування складного технічного об'єкта, коли деякі його параметри знаходяться поза апріорно заданими інтервалами. Позаштатна ситуація – це такий позаштатний режим функціонування, в якому окремі показники якості системи чи зовнішнього середовища знаходяться поза інтервалами штатного режиму в таких межах, коли не існує загрози аварії чи катастрофи. Критична ситуація – це такий позаштатний режим функціонування, в якому показники якості системи чи зовнішнього середовища знаходяться поза інтервалами штатного режиму в таких межах,

коли з'являється реальна погроза аварії чи катастрофи. Надзвичайна ситуація – це такий позаштатний режим функціонування, в якому показники якості системи чи зовнішнього середовища знаходяться поза інтервалами штатного режиму в межах, коли майже неминуче відбувається аварія чи катастрофа. Аварійна ситуація – це такий позаштатний режим функціонування, в якому технічна система переходить із працездатного стану в непрацездатний, наприклад аварійний, коли для переходу до працездатного стану необхідно здійснити ремонт. Катастрофічна ситуація – це такий позаштатний режим функціонування, впродовж якого технічна система переходить із працездатного стану в катастрофічний непрацездатний стан, коли перехід до працездатного принципово неможливий.

Наведені різноманітні ситуації позаштатного режиму свідчать про практичну необхідність раціональних дій в умовах невизначеностей різної природи і багатофакторних ризиків. Основна ідея стратегії дії полягає в забезпеченні в реальних умовах функціонування складної системи своєчасного та вірогідного виявлення і розпізнавання, оцінювання факторів ризиків, прогнозування їх розвитку впродовж визначеного режиму експлуатації і на цій основі забезпечення своєчасного усунення причин ризиків до появи відмов та інших небажаних наслідків.

Наведемо *математичну постановку* задачі розпізнавання позаштатної ситуації в динаміці функціонування техногенно небезпечного об'єкта [3].

Задано: для кожної ситуації $S_k^\tau \in S_\tau$ формується множина $M_k^\tau \in M_\tau$ факторів ризику у вигляді $M_k^\tau = \{\rho_{q_k}^\tau \mid q_k = \overline{1, n_k}^\tau\}$. Для кожного фактора ризиків множини M_k^τ відомий нечіткий інформаційний вектор $I_q^\tau = \{I_{q_k}^\tau \mid q_k = \overline{1, n_k}^\tau; k = \overline{1, K_\tau}\}$ та його компоненти у вигляді

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

$$\tilde{x}_{q_k j_k p_k}^\tau = \langle x_{q_k j_k p_k}^\tau, \mu_{H_{q_k j_k p_k}}(x_{q_k j_k p_k}^\tau) \rangle;$$

$$x_{q_k j_k p_k}^\tau \in H_{q_k j_k p_k}^\tau; \mu_{H_{q_k j_k p_k}} \in [0, 1],$$

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

Потрібно: для кожної ситуації $S_k^\tau \in S_\tau$ і кожного фактора ризику $M_k^\tau \in M_\tau$ забезпечити розпізнавання позаштатної ситуації в динаміці функціонування техногенно небезпечного об'єкта та живучість складної технічної системи під час її експлуатації.

Підхід до розв'язання задачі

Для більшої наглядності і практичної направленості роботи доцільно штатний і позаштатний режими описувати таким чином, щоб це відповідало фізичній сутності реальних процесів визначеного класу складних технічних систем. Найбільш наглядно динаміка реального процесу буде описуватися в тому випадку, коли ці процеси мають змінюватися під дією системи керування в досить широких межах за досить короткий режим часу. Такі умови задовольняє функціонування СТС, таких, як авіаційні двигуни, режими яких у стадіях зльоту, крейсерського польоту, посадки суттєво відрізняються між собою, а також реактори атомних електростанцій, хімічні виробництва тощо. При цьому ряд параметрів функціональних залежностей y_i , $i = \overline{1, n}$, в послідовності різних етапів $p = 1, 2, \dots, P$ функціонування СТС змінюються синхронно в динаміці переходу від одного режиму до другого і в динаміці відповідних режимів.

При побудові підходу до розв'язання задачі всі вхідні та вихідні дані нормуються до інтервалу $[0; 1]$. Тому при побудові моделей тривалість кожного етапу $p = 1, 2, \dots, P$ функціонування СТС нормується до загальної тривалості роботи досліджуваного об'єкта. Можливі два варіанти нормування. У першому з них (позначимо його A_1) виконується загальне нормування для всіх етапів функціонування на основі співвідношення

$$\tau = 1 - \frac{t_0^+ - t}{t_0^+ - t_0^-}, \quad t \in [t_0^-, t_0^+]. \quad (1)$$

Для залежностей, що мають місце для різних етапів функціонування, отримати єдину модель, яка б забезпечила прийнятну точність апроксимації для всіх режимів, досить складно. У цьому випадку доцільно будувати систему

погоджених моделей. Погодження відбувається на межах етапів функціонування і полягає в тому, що початкове значення наступного етапу повинно дорівнювати кінцевому значенню попереднього етапу, яке визначається наближеною функцією. Тоді, відповідно до цього для етапу 1 маємо такі значення на межі:

$$\begin{aligned}\tau_1 &= 1 - \frac{t_0^+ - t}{t_0^+ - t_0^-}, \quad t \in [t_0^-, t_1], \quad \tau_1^- = 0, \\ \tau_1^+ &= 1 - \frac{t_0^+ - t_1}{t_0^+ - t_0^-},\end{aligned}\quad (2)$$

а для етапу 2 маємо

$$\begin{aligned}\tau_2 &= 1 - \frac{t_0^+ - t}{t_0^+ - t_0^-}, \quad t \in [t_1, t_2], \\ \tau_2^- &= 1 - \frac{t_0^+ - t_1}{t_0^+ - t_0^-}, \quad \tau_2^+ = 1 - \frac{t_0^+ - t_2}{t_0^+ - t_0^-}.\end{aligned}\quad (3)$$

Це означає, що якщо в точці t_1 побудована модель дає значення, яке не збігається із заданим дискретним значенням, що визначається вибірками (2) або (3), то для етапу 2 за вихідне значення береться така величина, яка визначена кінцевим значенням моделі для етапу 1. Аналогічно знаходимо значення на межах для всіх інших етапів функціонування СТС. У цьому випадку формула (1) є загальною, а формули (2), (3) і подібні співвідношення для інших етапів необхідні для перевірки збігу умов на межах зміни режимів у випадку, коли дані дискретних значень y_i задаються для кожного етапу окремо. Необхідно в такому випадку обов'язково мати дані для всіх y_i на межах всіх етапів функціонування СТС.

Для залежностей, що мають місце для різних етапів $p = 1, 2, \dots, P$ функціонування, доцільно виконувати нормування окремо до тривалості кожного етапу на основі таких співвідношень (варіант нормування позначимо A_2):

$$\tau_1 = \frac{t - t_0^-}{t_1 - t_0^-}, \dots, \tau_p = \frac{t - t_{p-1}}{t_p - t_{p-1}}, \dots, \tau_P = \frac{t - t_{P-1}}{t_P - t_{P-1}}.$$

Аналогічно нормування виконується для всіх інших етапів функціонування СТС. Для кожного етапу τ змінюється в інтервалі $[0, 1]$.

Такий підхід дає змогу підвищити точність за рахунок збільшення кількості точок для кожного інтервалу при складанні відповідної системи рівнянь.

У випадку варіанта нормування A_1 при тій же кількості рівнянь для кожного етапу загальна кількість рівнянь збільшується у вісім разів, оскільки у варіанті A_1 складається єдина система рівнянь для всіх етапів функціонування СТС, а у варіанті A_2 – система складається для кожного етапу окремо і знаходиться своя наближена функція вигляду (4).

Нормування змінних y_i для кожного показника p етапів функціонування СТС необхідно виконувати для варіантів A_1 і A_2 на основі співвідношень

$$Z_i = Z_i(\tau_k) = \frac{y_i(t_k^p) - y_i(t_k^{p-1})}{y_i^+ - y_i^-},$$

$$y_i^+ = \max_{t_k \in [t_0^-, t_0^+]} y_i(t_k), \quad y_i^- = \min_{t_k \in [t_0^-, t_0^+]} y_i(t_k), \quad i = \overline{1, n}.$$

Нормування керованих дій U_j виконується на основі співвідношень

$$U_j = U_j(t_k) = \frac{U_j(t_k^p) - U_j(t_k^{p-1})}{U_j^+ - U_j^-},$$

$$U_j^+ = \max_{t_k \in [t_0^-, t_0^+]} U_j(t_k), \quad U_j^- = \min_{t_k \in [t_0^-, t_0^+]} U_j(t_k), \quad j = \overline{1, m}.$$

Штатний режим функціонування для досліджуваного об'єкта будемо описувати системою моделей функціонування СТС при таких припущеннях і твердженнях.

1. Кожний етап функціонування СТС характеризується тривалістю, початковим та кінцевим значеннями кожного показника y_i , який визначається за моментами початку і закінчення етапу. Зміни y_i в межах етапу визначаються відповідною функціональною моделлю.

2. Всі показники y_i є динамічно синхронними і синфазними в тому розумінні, що під дією керування вони одночасно, без часу затримки, збільшуються або зменшуються.

3. Керована дія $U = (U_j, j = \overline{1, m})$ є безінерційною, тобто відсутня тимчасова затримка між дією керування та реакцією об'єкта на керування.

4. Фактори ризику $\rho_{q_k}^\tau | q_k = \overline{1, n_k}^\tau$ змінюють величину дії на об'єкт в часі, і із зростанням тривалості дії ризик збільшується або зменшується.

5. Керована дія може сповільнювати вплив факторів ризику або припинити їх негативний вплив на керований об'єкт при умові, що темпи керованого впливу перевищують зростання впливу факторів ризику. Припинення негативного впливу факторів ризику забезпечується при умові, що рішення прийнято і реалізовано до початку T_{cr} , де T_{cr} – критичний момент часу, при настанні якого вплив факторів ризику веде до негативних наслідків у вигляді аварії або катастрофи.

На основі прийнятних припущень будемо будувати систему моделей, кожна з яких описує визначений режим функціонування СТС. Моделі для етапів $p = 1, 2, \dots, P$ знаходитимемо в штатному режимі на основі співвідношення

$$y_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m b_{ij} \sum_{r=0}^{R_j} a_{jr} T_r^*(U_j). \quad (4)$$

Зокрема, для етапу 1 модель визначається співвідношенням

$$y_{i_1} = \frac{1}{m} \sum_{j_1=1}^m b_{i_1 j_1} \sum_{r_1=0}^{R_{j_1}} a_{j_1 r_1} T_{r_1}^*(U_{j_1}). \quad (5)$$

Тут коефіцієнти $b_{i_1 j_1}$ визначають ступінь впливу керування U_{j_1} на y_{i_1} відповідно для $j_1 = \overline{1, m}$ на основі виборки B_0 при $t_k \in [t_0, t_1]$, $k = \overline{0, k_0}$.

Якщо U_{j_1} для всіх $j_1 = \overline{1, m}$ є лінійними функціями t (згідно з припущенням 1), то вираз (5) можна спростити і записати у вигляді

$$y_{i_1} = \frac{1}{m} \sum_{j_1=1}^m [a_{i_1 j_0} T_0^* + a_{i_1 j_1} T_1^*(U_{j_1})]. \quad (6)$$

У співвідношенні (4) у загальному випадку залежність керованого впливу U_j є нелінійною функцією часу

$$U_j(t) = d_{j_0} + d_{j_1} t + d_{j_2} t^2 + \dots + d_{j_l} t^l + \dots + d_{j_{l_0}} t^{l_0},$$

або

$$U_j(t) = \sum_{l=0}^{l_0} d_{j_l} t^l. \quad (7)$$

Враховуючи, що початковий момент t^0 відповідає непрацюючому стану об'єкта, то d_{j_0} слід розглядати як величину керованого впливу в усталеному режимі, d_{j_1} – як швидкість зміни керування, а d_{j_2} – як прискорення зміни керування і т.д.

Із врахуванням формули (7) загальну залежність показників y_i від часу можна отримати, підставивши (7) у вираз (4). Але в цьому випадку ускладнюється задача визначення шуканих коефіцієнтів a_{ir}, b_{ij}, d_{jl} . Для усунення цих труднощів доцільно побудувати ієрархічну систему моделей [7].

Для штатного режиму (без врахування дії зовнішніх факторів ризику) масив дискретних значень вибірок результатів випробувань надається у вигляді таблиці.

На основі даних таблиці визначення пошукових коефіцієнтів доцільно виконувати в такій послідовності:

- знайти коефіцієнти d_{j_l} для кожного керованого U_j на основі системи рівнянь

$$U_j[t_0] = d_{j_0} + d_{j_1} t_0 + \dots + d_{j_l} t_0^l + \dots + d_{j_{l_0}} t_0^{l_0}, \quad (8)$$

$$U_j[t_{k_0}] = d_{j_0} + d_{j_1} t_{k_0} + \dots + d_{j_l} t_{k_0}^l + \dots + d_{j_{l_0}} t_{k_0}^{l_0},$$

де невідомими є коефіцієнти d_{j_l} , $l = \overline{0, l_0}$;

Таблиця. Масив дискретних значень вибірок результатів випробувань

№ п/п	t_k	$y_1[t_k]$	...	$y_i[t_k]$	...	$y_n[t_k]$	$U_1[t_k]$	...	$U_j[t_k]$	...	$U_m[t_k]$
1	t_0	$y_1[t_0]$	...	$y_i[t_0]$	...	$y_n[t_0]$	$U_1[t_0]$	...	$U_j[t_0]$	...	$U_m[t_0]$
⋮	⋮	⋮		⋮		⋮	⋮		⋮		⋮
k_0	t_{k_0}	$y_1[t_{k_0}]$		$y_i[t_{k_0}]$		$y_n[t_{k_0}]$	$U_1[t_{k_0}]$		$U_j[t_{k_0}]$		$U_m[t_{k_0}]$

• знайти коефіцієнти a_{ir} для кожного показника y_i . Покладаємо, для прикладу, що значення $y_i[t_k]$ визначається тільки одним керованим впливом $U_1[t_k]$. Тоді маємо систему рівнянь

$$\begin{aligned} y_i[t_0] &= \sum_{r_1=0}^{R_1} a_{ir_1} T_{r_1}^*(U_1[t_0]); \\ &\vdots \\ y_i[t_{k_0}] &= \sum_{r_1=0}^{R_1} a_{ir_1} T_{r_1}^*(U_1[t_{k_0}]). \end{aligned} \quad (9)$$

Тут невідомими є коефіцієнти $a_{ir_1}, r_1 = \overline{1, R_1}$. Системи типу (9) складаються для всіх $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, m}$; загальна кількість систем дорівнює $n \times m$;

• знайти коефіцієнти b_{ij} для кожного показника y_i . Покладаємо, що значення $y_i[t_k]$, $i = \overline{1, n}$, визначаються всіма керованими впливами $U_j, j = \overline{1, m}$. Для розв'язання цієї задачі складемо систему рівнянь

$$\begin{aligned} y_i[t_0] &= \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m b_{ij} \psi_j(U_j[t_0]), \\ &\vdots \\ y_i[t_{k_0}] &= \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m b_{ij} \psi_j(U_j[t_{k_0}]), \end{aligned} \quad (10)$$

де $\psi_j(U_1[t_{k_0}]) = \sum_{r=0}^{R_1} a_{jr} T_r^*(U_j[t_{k_0}])$. Тут невідомими є коефіцієнти b_{ij} для $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, m}$; $T_r^*(\cdot)$ – зміщений поліном Чебишева.

Системи (8), (9), (10) визначають моделі для випадку, коли моделі для всіх y_i будуються для всього інтервалу $t \in [t_0^-, t_0^+]$. Коли ж моделі будуються окремо для кожного етапу $p = 1, 2, \dots, P$ функціонування, то в цих системах з'являється допоміжний індекс, яким позначається номер етапу, для якого будується система моделей. Наприклад, для етапу 2 система (9) матиме вигляд

$$\begin{aligned} y_{i_2}[t_2^-] &= \sum_{r_2=0}^{R_{i_2}} a_{1r_2} T_{r_2}^*(U_{12}[t_2^-]), \\ &\vdots \\ y_{i_2}[t_2^+] &= \sum_{r_2=0}^{R_{i_2}} a_{1r_2} T_{r_2}^*(U_{12}[t_2^+]), \end{aligned}$$

де t_2^- і t_2^+ – значення на межі етапу 2. Аналогічно змінюються інші системи рівнянь для других етапів.

При дослідженні позаштатного режиму введемо додаткові (до раніше введених припущень 1–5 для штатного режиму) припущення щодо формування додаткової моделі та умови розпізнавання позаштатної ситуації.

6. Фактори ризику $\rho_{q_k}^{\tau} | q_k = \overline{1, n_k}^{\tau}$ є незалежними і змінюються в часі за законом випадкових чисел, розподіл якого апріорно невідомий.

7. Фактори ризику можуть впливати одночасно на кілька або на всі показники y_i . Ситуація впливу факторів ризику буде позаштатною, якщо хоча б два показники y_i одночасно без керованого впливу змінюють у часі несинхронно або несинфазно свої значення протягом кількох замірювань.

Дані припущення є практично важливими в тому розумінні, що дозволяють відрізнити на кожному етапі функціонування випадкові помилки вимірювань від впливу факторів ризику. Дійсно, через незалежність вимірювань значень y_i для різних i може виявитися, що для двох або більше показників y_i в якийсь момент часу одночасно значення показників несинхронно або несинфазно змінюються. Зразу ж треба дати відповідь – це випадковий збіг помилок вимірювань чи початок дії факторів ризику. Звідси випливає практична необхідність визначити синхронність та синфазність змін абсолютних значень y_i протягом кількох вимірювань (в межах припущень 3–7), тобто визначити $\Delta y_i = y_i(t_k) - y_i(t_{k-1})$. Якщо згідно з припущенням 2 виявиться, що хоча б для двох y_i для кількох значень t_k, t_{k-1}, \dots $\Delta y_i > 0$, то це слід розглядати як появу ознак позаштатної ситуації. У таких випадках особа, що приймає рішення, має отримати необхідну інформацію про ситуацію.

8. Вплив факторів ризику будемо враховувати як відносну зміну рівня керування під впливом факторів ризику. Зміна значень кожного фактора ризику проходить дискретно за законом випадкових чисел.

На основі прийнятих припущень наведемо додатково моделі та умови розпізнавання позаштатної ситуації. Позначимо: \tilde{y}_i – значення показника y_i при впливі факторів ризику; $F_i(\rho_{q_k})$ – функція, що враховує рівень впливу факторів ризику на i -й показник y_i ; ρ_{q_k} – значення q -го фактора ризику в момент t_k .

Вважаємо відповідно до припущення 8, що в момент t_k величина $\tilde{y}_i[t_k]$ визначається співвідношенням, яке впливає з (4):

$$\tilde{y}_i[t_k] = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \tilde{b}_{ij} \sum_{r=0}^{R_j} a_{jr} T_r^*(U_j), \quad \tilde{b}_{ij} = b_{ij} F_i(\rho_{q_k}). \quad (11)$$

Тут функція $F_i(\rho_{q_k})$ повинна відповідати умові, що при відсутності впливу факторів ризику (тобто при $\rho_{q_k} = 0$) має виконуватися нерівність $\tilde{y}_i \neq y_i$. Тому одне з найпростіших видів $F_i(\rho_{q_k})$ має вигляд

$$F_i(\rho_{q_k}) = 1 - \prod_{q_k=1}^{n_{q_k}} (1 - c_{iq_k} \rho_{q_k}). \quad (12)$$

Слід також враховувати, що фактори ризику можуть змінюватися в часі безперервно (наприклад, зі збільшенням висоти при зльоті літака безперервно змінюється тиск) і стрибкоподібно (наприклад, при польоті на визначеній висоті в крейсерському режимі тиск може змінюватися стрибком на межі розділу “циклон-антициклон”). Найбільш складним є варіант, коли одні фактори ризику змінюються безперервно, а інші – стрибкоподібно.

У співвідношенні (12) значення величин ρ_{q_k} можуть бути як додатними, так і від'ємними, а для всіх q_k та i маємо $c_{iq_k} > 0$ і виконується умова $0 \leq |c_{iq_k} \rho_{q_k}| \leq 1$. Остання умова не є обов'язковою щодо обмеження зверху і вводиться нормуванням для спрощення розв'язання задачі розпізнавання ситуації ризику та оцінки ступеня ризику.

Розпізнавання ситуації ризику виконуватимемо на основі послідовного порівняння значень величин $\tilde{y}_i[t_k]$ при $i = \overline{1, n}$ для кількох послідовних значень t_k , $k = \overline{1, k_0}$, де $k_0 = 3-7$. Умовою появи позаштатної ситуації, як впливає з припущення 2, є синхронна і синфазна зміна \tilde{y}_i для кількох, а в загальному випадку – для всіх показників. Звідси впливає співвідношення для різних моментів часу t_k для всіх значень i та для однакових моментів часу t_k для різних значень i (різних показників):

$$\begin{aligned} \text{sign } \Delta \tilde{y}_i[t_1, t_2] &= \dots = \text{sign } \Delta \tilde{y}_i[t_k, t_{k+1}] = \dots = \\ &= \text{sign } \Delta \tilde{y}_i[t_{k_0-1}, t_{k_0}], \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \text{sign } \Delta \tilde{y}_1[t_k, t_{k+1}] &= \dots = \text{sign } \Delta \tilde{y}_i[t_k, t_{k+1}] = \dots = \\ &= \text{sign } \Delta \tilde{y}_n[t_k, t_{k+1}], \quad i = \overline{1, n}. \end{aligned} \quad (14)$$

Із (13) і (14) впливає, що при наявності позаштатної ситуації в інтервалі $[t_1, t_{k_0}]$ одночасно має місце:

- рівність знаків приросту $\Delta \tilde{y}_i$ для всіх суміжних інтервалів $[t_k, t_{k+1}]$ при $k = \overline{1, k_0}$ кожного показника \tilde{y}_i , $i = \overline{1, n}$;
- рівність знаків приросту $\Delta \tilde{y}_i$, $i = \overline{1, n}$, всіх показників \tilde{y}_i для кожного інтервалу $[t_k, t_{k+1}]$, $k = \overline{1, k_0}$.

Умови (13), (14) є найбільш жорсткими, на практиці достатньо забезпечити виконання умов для представницького числа (3–5), що визначають показники \tilde{y}_i , але не для всіх показників \tilde{y}_i . В (13) і (14) відповідні величини записуємо у вигляді

$$\Delta \tilde{y}_i[t_k, t_{k+1}] = \tilde{y}_i[t_{k+1}] - \tilde{y}_i[t_k], \quad (15)$$

де $\tilde{y}_i[t_k]$ визначаються співвідношенням (11), і при цьому покладаємо, що $\rho_{q_k}[t_{k+1}] > \rho_{q_k}[t_k]$, тобто залежність кожного фактора ризику є функцією часу, що зростає, або $\rho_{q_k}[t_{k+1}] < \rho_{q_k}[t_k]$, тобто залежність є спадною функцією.

Практична значимість розпізнавання позаштатної ситуації на основі (13) і (14) полягає в тому, що при такому підході забезпечується

знаходження позаштатної ситуації при незначній зміні величин $\tilde{y}_i[t_k]$ під дією факторів ризику, тобто “індикатором” зміни є знак різниці (13) і (14), а не величина такої різниці, що визначається (15). Іншими словами, такий підхід суттєво чутливіший до змін різниці (15), ніж типові підходи, прийняті в діагностуванні. Більше того, підхід, що пропонується, дає змогу “відфільтрувати” випадкові зміни і випадкові помилки вимірювання \tilde{y}_i для окремих i або окремих $[t_k, t_{k+1}]$, оскільки в цьому випадку не будуть виконуватися умови (14) і (15) внаслідок незалежності випадкових помилок вимірювань різних показників y_i .

Із викладеного випливає, що для розпізнавання ситуації ризику або позаштатної ситуації необхідно доповнити запропонований алгоритм такими процедурами.

1. Обчислення функцій $F_i(\rho_{q_k})$ на основі (12) для всіх i із врахуванням послідовностей зростаючих випадкових чисел.

2. Обчислення функцій $\tilde{y}_i[t_k]$ на основі (11) для всіх i при відомих залежностях $y_i[t]$, що визначаються на основі даних таблиці.

3. Послідовна перевірка умов (13) для трьох періодів часу $[t_1, t_2]$, $[t_2, t_3]$, $[t_3, t_4]$ для двох функцій $y_1[t_k]$, $y_2[t_k]$, $t_k \in [t_1, t_2]$. Якщо одночасно виконується умова (13) для обох функцій для всіх трьох періодів, то кількість функцій y_i , що перевіряються, повинно збільшуватися і одночасно має перевірятися умова (14) для функцій, які перевіряються. Якщо для всіх функцій, що перевіряються, для всіх трьох періодів часу виконуються умови (13) і (14), то має бути поданий сигнал: “Увага! Позаштатна ситуація”.

Процедура 3 повинна дати сигнал після перегляду певного числа t_k , наприклад після 5–8-го моменту t_k в динаміці розрахунку \tilde{y}_i для контрольного прикладу. Така реалізація має допускати можливість зміни ρ_{q_k} таким чином, щоб при новому варіанті ρ_{q_k} позаштатна ситуація виявлялася раніше або пізніше.

4. Оцінка ступеня ризику позаштатної ситуації. Дана процедура є заключною в розпізнаванні ситуації ризику.

Оцінка ступеня ризику виконується на основі таких умов. Вважаємо, що ступінь ризику

як вірогідність появи небажаних наслідків позаштатної ситуації зростає в міру збільшення впливу факторів ризику. Збільшення впливу може відбуватися за двома показниками: збільшення кількості факторів, що впливають; збільшення чисельного значення впливу факторів ризику.

Як найпростішу модель оцінки ступеня ризику можна взяти співвідношення

$$\eta_{q_k} = 1 - \prod_{q_k=1}^{n_{q_k}^*} [1 - (c_{iq_k}^+ \rho_{q_k}^+)^2]. \quad (16)$$

Тут η_{q_k} – ступінь ризику на момент $t = t_k$;

$(c_{iq_k}^+ \rho_{q_k}^+) = \max_i (c_{iq_k} \rho_{q_k})$; $\rho_{q_k} = \rho_{q_k}[t_k]$; $n_{q_k}^*$ – кількість факторів ризику, для яких на момент $t = t_k$ виконуються умови (13) та (14).

5. Мінімізація ризику позаштатної ситуації. Мета даної процедури полягає у зменшенні ступеня ризику на основі зміни керування, тобто зміни U_j . Слід зазначити важливу особ-

ливість цієї процедури, яка відрізняє її від типової процедури мінімізації. На відміну від типової процедури, в якій, як правило, апріорі відомі обмеження та цільові функції, в даній процедурі, як видно з (16), умови суттєво складніші. По-перше, показник η_{q_k} не визначений

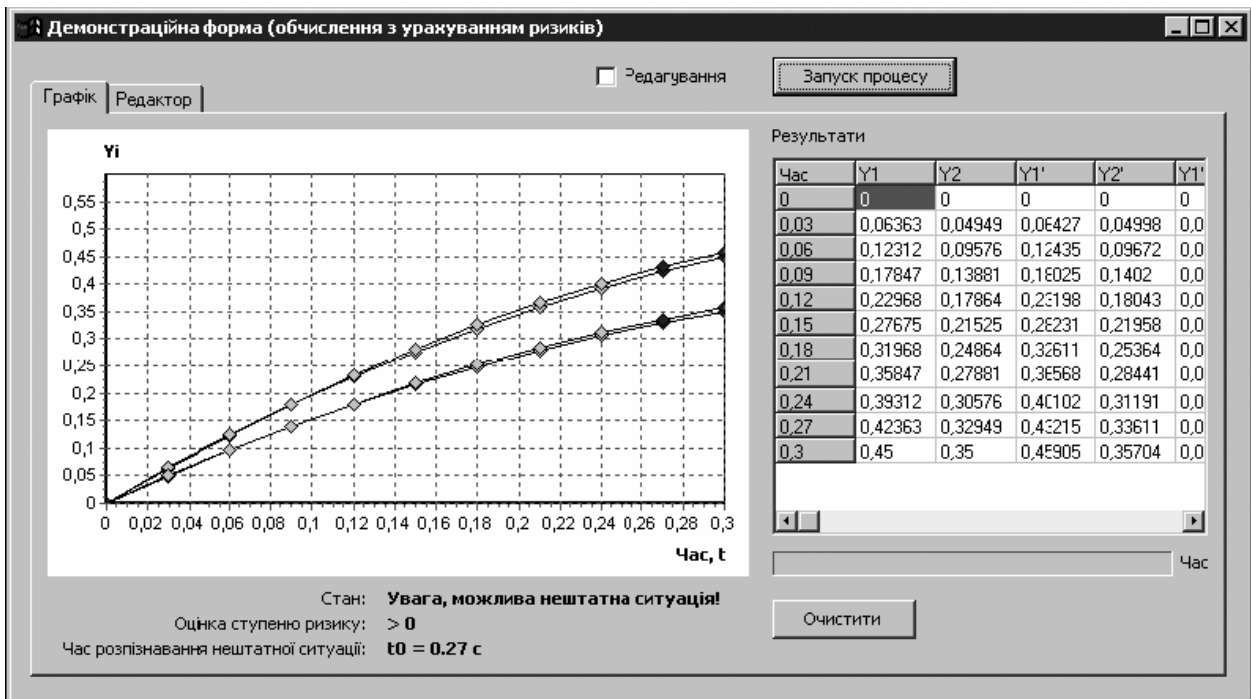
однозначно, ρ_{q_k} є функцією і тому в (16) вели-

чина $(c_{iq_k}^+ \rho_{q_k}^+) = \max_i (c_{iq_k} \rho_{q_k})$ може змінюватися

при переході від t_k до t_{k+1} , від t_{k+1} до t_{k+2} і т.д. не тільки кількісно, а й якісно. По-друге, процедура мінімізації ризику обмежена в часі в тому розумінні, що існує часовий поріг, який визначається моментом настання небажаних наслідків, у гіршому разі – у вигляді аварії чи катастрофи. Отже, рішення повинно бути ухвалене і реалізоване до настання небажаних наслідків. По-третє, на відміну від типової процедури в даній процедурі не визначені однозначні змінні, зміни яких приводять до бажаного результату.

Модельний приклад розпізнавання позаштатної ситуації

Для налашки програмного модуля, який забезпечує розв’язання систем (8), (9), (10), наведемо на основі (6) такий модельний приклад розпізнавання позаштатної ситуації.



Результати розпізнавання позаштатної ситуації

Покладаємо: $n = 2$, тобто маємо $y_1(t)$ і $y_2(t)$, $b_{11} = 0,2$, $b_{12} = 0,3$, $b_{13} = 0,5$, $m = 3$ і маємо $U_1(t)$, $U_2(t)$, $U_3(t)$; коефіцієнти d_{ji} визначаються на основі (8) з умов

$$U_1(t) = d_{10} + d_{11}t + d_{12}t^2, \quad 0 \leq U_1(t) \leq 1, \quad (17)$$

$$U_2(t) = d_{20} + d_{21}t, \quad 0 \leq U_2(t) \leq 0,7,$$

$$U_3(t) = d_{30} + d_{31}t + d_{32}t^2, \quad 0 \leq U_3(t) \leq 0,5. \quad (18)$$

Розглянемо інтервал зміни $t \in [0; 0,3]$. Дискретний аналог інтервалу $[0; 0,3]$ будується з умови: при $k = 0$ $t = t_0 = 0$; при $k = k_0 = 11$ $t = t_{k_0} = 0,3$. У формулах (17) і (18) коефіцієнти знаходяться з умов

$$U_1(t_0) = 0, U_1(0,3) = 1, U_1(0,15) = 0,7,$$

$$U_3(t_0) = 0, U_3(0,3) = 0,5, U_3(0,2) = 0,4.$$

Коефіцієнти для U_2 визначаються з умов

$$U_2(t_0) = d_{20} + d_{21}t_0, \quad 0 = d_{20} + d_{21}0,$$

.....

$$U_2(t_k) = d_{20} + d_{21}t_k, \quad 0,7 = d_{20} + d_{21}0,3.$$

Аналогічно визначаються коефіцієнти для U_1 і U_3 . Коефіцієнти в (6) знаходяться з умов:

$$y_1[t_0] = 0, y_1[t_k] = 0,45, y_2[t_0] = 0, y_2[t_k] = 0,35.$$

На основі введених і отриманих даних формуються вихідні дані для модельного прикладу у формі таблиці, із застосуванням яких розв'язуються відповідні системи рівнянь і визначаються коефіцієнти d_{ji}, b_{ij} та коефіцієнти

при поліномах T_0^* і T_1^* . Демонстраційна версія розпізнавання позаштатної ситуації наведена на рисунку.

Розглянуті багаточисельні приклади розв'язування задач свідчать, що є можливість із достатньою для практики достовірністю виявляти момент можливого переходу штатного режиму складної технічної системи в позаштатний і вчасно забезпечувати безпеку її функціонування.

Висновки

На основі запропонованого підходу забезпечується формування і реалізація раціонального компромісного рішення за наявності множини об'єктивних і суб'єктивних протиріч на основі раціонального використання існуючих ресурсів і можливостей в умовах апріорно

невідомого ліміту часу. Важливіша особливість даного підходу полягає у врахуванні якісно нових обмежень, а саме принципово неусунених інформаційних і часових обмежень. Особливо важливим є наявність неусуненого порогового обмеження часу при формуванні і реалізації рішення. При порушенні цього обмеження можуть настати незворотні, катастрофічні наслідки у вигляді вибуху, загибелі об'єкта або інших аналогічних лих. Необхідно відзначити і другу практично важливу відмінність – вибір принципу раціональності рішення замість типового принципу оптимальності. Такий вибір зумовлений як вказаними обмеженнями, так і наявністю ряду протиріч, зокрема протиріччя між вимогою вірогідності і обґрунтованості рішення і вимогою своєчасності формування і реалізації рішення. Тут раціональність розуміємо як визначений, обґрунтований компроміс у досягненні суперечливих цілей на множині суперечливих обмежень, де порогове обмеження часу є абсолютно пріоритетним.

Перевірка функціонування об'єкта в штатній ситуації здійснюється безпосередньо в робочому режимі з реальними вхідними впливами в реальному режимі часу. Запропонована модель забезпечує запобігання непрацездатності і небезпечності функціонування об'єкта.

Шляхом комплексної, системної і безперервної оцінки параметрів функціонування об'єкта в реальному режимі часу виявляються ситуації, які потенційно можуть привести до виходу об'єкта за межі функціонування в штатному режимі. Запропонований підхід враховує можливість одночасного відстеження і оцінки довірливої кількості функціонально-динамічних параметрів, тому можлива деталізація процесів функціонування об'єкта будь-якого порядку складності. Для тих ситуацій, розвиток яких приводить до можливих відхилень параметрів від штатного режиму функціонування об'єкта, можливе своєчасне прийняття рішення про зміну режиму функціонування об'єкта або штучного корегування ряду параметрів з метою впливу на змінений режим і повернення його значення в режим штатного функціонування. Принципи формування первинних даних, які пропонуються в даній статті, забезпечують гнучкий підхід до відбору параметрів і орієнтовані на широкий спектр проблем процесів експериментального відпрацювання, випробувань і технічної діагностики складних екологічно небезпечних об'єктів у реальних умовах неповноти, невизначеності і протиріччя первинної інформації про штатні і позаштатні режими їх функціонування і експлуатації.

Н.Д. Панкратова, А.М. Радюк

РАСПОЗНАВАНИЕ НЕШТАТНОЙ СИТУАЦИИ В ДИНАМИКЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕХНОГЕННО ОПАСНОГО ОБЪЕКТА

Предложен подход к распознаванию нештатной ситуации в динамике функционирования техногенно опасного объекта. Подход базируется на общих принципах и основных приемах стратегии системного обеспечения гарантированной безопасности сложных технических систем, многокритериального оценивания и прогнозирования ситуаций риска в реальных условиях неполноты, неопределенности, неточности и противоречивости исходной информации и при наличии порогового ограничения времени на цикл формирования и реализацию решений по предотвращению аварийных и катастрофических ситуаций.

N.D. Pankratova, A.M. Radjuk

THE APPROACH TO ABNORMAL SITUATION RECOGNITION IN DYNAMICS OF MAN-CAUSED DANGEROUS OBJECT FUNCTIONING

The research described in this paper addresses the approach to abnormal situation recognition in dynamics of man-caused dangerous object functioning. This approach is based on the general principles and basic techniques of system strategy of guaranteed safety for complex engineering systems, multicriterion estimation and situations of risk forecasting in the real conditions of incompleteness, uncertainty, inconsistency and fuzziness of the initial information. Moreover, we consider the proposed approach under the time threshold restrictions for a cycle of decision making process on prevention of emergency and catastrophic situations.

1. *Pankratova N.D.* A system analysis of multifactor risks in conditions of uncertainty // Proc. of the XV IFIP World Computer Congress. Vienna/Austria and Budapest/Hun-

gary, 31 August–4 September, 1998. CD-ROM, file: /doc/000/000/665.htm

2. *Pankratova N., Kurilin B.* Conceptual foundations of the system analysis of risks in dynamics of control of complex system safety. Part 1. Basic statements and substantiation of approach // J. of automation and information sciences. – 2001. – 33, N 2. – P. 15–31.
3. *Pankratova N., Kurilin B.* Conceptual foundations of the system analysis of risks in dynamics of control of complex system safety. Part 2. The general problem of the system analysis of risks and the strategy of its solving // Ibid. – N 4. – P. 1–14.
4. *Панкратова Н.Д.* Системный анализ в динамике диагностирования сложных технических систем // Системный анализ и информатика. – 2008. – № 1. – С. 33–49.
5. *Zgurovsky M.Z., Pankratova N.D.* System analysis: Theory and Applications. – Springer, 2007. – 475 p.
6. *Згуровський М.З., Панкратова Н.Д.* Основи системного аналізу. – Київ: BHV, 2007. – 543 с.
7. *Панкратова Н.Д.* Рациональный компромисс в системной задаче концептуальной неопределенности // Кибернетика и системный анализ. – 2002. – № 4. – С. 162–180.

Рекомендована Радою
Навчально-наукового комплексу
“Інститут прикладного системного
аналізу” НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції
5 травня 2008 року