4. *Горлин С.М.* Экспериментальная аэромеханика. – М.: Высш. шк., 1970. – 423 с.

5. *Зинченко В.П., Радченко С.Г.* Метод моделирования многокомпонентных тензометрических измерительных систем. – К., 1993. – 24 с. – Препринт / АН Украины. Ин-т кибернетики им. В.М. Глушкова; 93–20.

6. *Зинченко В.П.* Программный комплекс моделирования многокомпонентных измерительных систем // Технические и программные средства систем экологического мониторинга: Сб. науч. тр. АН Украины. – К.: Ин-т кибернетики им. В.М. Глушкова. 1994. – С. 62–64.

7. *Зинченко В.П.* Метод моделирования многокомпонентных измерительных систем // Тез. докл. Междунар. конф. "Методы и средства экспериментальных исследований в аэронавтике". – Жуковский (Россия): ЦАГИ, 1993. – С. 2–21.

8. *Зинченко В.П., Зинченко Н.П., Радченко С.Г.* Методика расчета шестикомпонентных тензометрических аэродинамических весов // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України.– К.: ІЕД НАН України, 2001. – № 3. – С. 108–115.

9. *Зинченко В.П., Зинченко Н.П., Броварская Н.И., Горин Ф.Н.* Подготовка специалистов в условиях наличия интегрированных пакетов программ // Перспективні засоби обчислюваної техніки та інформатики. – К.: НАН України. Ін-т кібернетики ім. В.М. Глушкова, 1999. – С. 37–43.

10. *Зинченко В.П., Радченко С.Г., Зинченко Н.П.* Метод расчета эластических весовых елементов с упругим шарниром // Вісн. НАУ. – 2001. – № 3 (10). – С. 99–108.

11. *Химмельблау Д.* Анализ процессов статистическими методами. – М.: Мир, 1973. – 975 с.

12. *Потемкин В.Г.* Система MachLab. – М.: Диалог – МИФИ, 1997. – 350 с.

13. *Очков В.Ф.* MathCAD 7 Pro для студентов и инженеров. – М.: КомпьютерПресс, 1998. – 384 с.

14. *Боровиков В.П., Боровиков И.П.* Statistica – Статистический анализ и обработка данных в среде Windows. – М.: Филинъ, 1998. – 608 с.

15. *Джонс Э., Саттон Д.* Библия пользователя Office 97. – К.: Диалектика, 1997. – 884 с.

16. *Зінченко В.П., Зінченко Н.П.* Методика проектування внутрімодельних тензовагів // Вест. НТУУ "КПИ". Машиностроение. – 1999. – Вып. № 34. – С. 319–328.

Стаття надійшла до редакції 04.11.02.

УДК 681.5.083.02/03.044.64:51(045)

система техническая
отказ сложной системы
модель логико-лингвистич.
моделирование матем

О.Є. Литвиненко, д-р техн. наук, доц.
(Національний авіаційний університет)

МАТЕМАТИЧНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ МНОЖИННИХ ВІДМОВ У СКЛАДНИХ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ

Розглянуто логіко-лінгвістичну модель визначення множинних відмов у складних технічних системах. Описано процедуру формування системи алгебричних рівнянь, до розв'язання якої зводиться задача діагностування на основі наведеної моделі. Викладено алгоритм розв'язання задачі діагностування, який реалізує стратегію направленого перебору варіантів.

Вступ. Підвищення складності технічних систем, що обумовлено об'єктивними тенденціями розвитку науки, техніки і технологій, призводить до зростання частки множинних відмов на загальному фоні чинників непрацездатності реальних об'єктів. Такі відмови можуть відбуватися одночасно в різних місцях (підсистемах) об'єкта контролю і мати неоднорідний характер [1–3].

Локалізація множинних відмов потребує застосування нетрадиційних методів діагностування, подібних тим, які використовують в експертних системах [4]. Такі методи передбачають наявність, принаймні, двох компонентів: логіко-лінгвістичних моделей, які відображають причинно-наслідкові зв'язки між системними об'єктами (вхідними впливами, вихідними сигналами, характеристиками стану і т.п.), а також ефективних алгоритмів виводу шуканого результату на основі аналізу цих моделей.

Формалізація задачі визначення множинних відмов. Нехай об'єкт діагностування (ОД) – складна технічна система з m взаємодіючих підсистем. У кожній i-й підсистемі можуть відбуватися відмови n_i видів, $i = \overline{1, m}$.

Стан ОД у деякий момент часу визначається вектором значень його характеристик $z^* = \left(z_p^*,\ p = \overline{1,u}\right)$.

Нехай e_p – еталонний рівень p-й характеристики стану ОД, ε_p – допустиме відхилення, δ_p – фактичне відхилення поточного значення цієї характеристики від еталонного:

$$\delta_p = \left|z_p^* - e_p\right|,\ p = \overline{1,u}.$$

Якщо для всіх характеристик стану ОД виконується умова $\delta_p \le \varepsilon_p$, $p = \overline{1,u}$, можна стверджувати, що ОД знаходиться в нормальному (справному, працездатному) стані, у протилежному випадку – в аномальному (несправному, непрацездатному). Перехід ОД в аномальний стан потребує розв'язання задачі діагностування, що полягає в установленні підсистем, в яких відбулися відмови, та видів цих відмов.

Експертну модель діагностування складної технічної системи, в якій можливі множинні відмови, пропонується будувати за схемою < комбінація елементарних відмов >→ <зміна характеристики стану системи>.

При цьому передбачається, що зміна значення кожної характеристики оцінюється щодо заздалегідь відомому еталонному рівню. Припускається, що у випадку неможливості кількісного виміру тої чи іншої характеристики стану ОД вона може бути задана на якісному рівні.

Експертна модель діагностування, яка побудована за зазначеною схемою, має таку структуру:

$$\bigvee_{r \in R_{pq}} \bigwedge_{i \in I_r} \bigwedge_{j \in J_{ri}} X_{ij} \to D\left(z_p, h_{pq}\right),\ p = \overline{1,u},\ q \in Q_p, \tag{1}$$

де R_{pq} – множина комбінацій елементарних відмов, що призводять до зміни значення p-й характеристики стану ОД на величину h_{pq}; I_r – множина підсистем ОД, відмови в яких складають r-ю комбінацію; J_{ri} – множина видів відмов в i-й підсистемі ОД, що входять до складу r-й комбінації; X_{ij} – логічне висловлення, що описує елементарну відмову j-го виду в i-й підсистемі ОД; $D\left(z_p, h_{pq}\right)$ – предикат, який відображає зміну значення характеристики z_p стану ОД на величину h_{pq} щодо еталонного рівня в результаті тої чи іншої комбінації елементарних відмов; u – кількість характеристик стану ОД, що контролюються; Q_p – множина можливих рівнів зміни значення p-й характеристики стану ОД у результаті тої чи іншої комбінації відмов.

Сукупність виразів (1) створює базу знань експертної системи діагностування складного об'єкта.

Для розв'язання задачі діагностування на основі експертної моделі (1) може бути використаний будь-який дедуктивний алгоритм логічного виводу [5]. Найбільше ефективним із них вважається алгоритм, що побудований на принципі резолюцій Дж. Робінзона [6]. Але навіть він має ряд суттєвих недоліків, основним з яких є слабка цілеспрямованість дії, що обумовлено наявністю евристичних елементів. Унаслідок цього в процесі аналізу логіко-лінгвістичної моделі формується великий обсяг проміжної інформації, яка в подальшому не використовується, але різко збільшує витрати машинного часу.

Прагнення поставити процес локалізації множинних відмов на сувору математичну основу обумовило розробку нового підходу до діагностування складних технічних систем. Він дозволяє трансформувати експертну логіко-лінгвістичну модель (1) у систему алгебричних рівнянь, для розв'язання якої створений достатньо ефективний алгоритм.

Побудова такої системи рівнянь потребує виконання таких дій.

1. Підмножини P^0 та P^1 номерів характеристик стану ОД, що знаходяться в припустимому діапазоні та що вийшли за його межі, фіксуються відповідно:

$$P^0 = \left\{p : 1 \le p \le u, \delta_p \le \varepsilon_p\right\},\ P^1 = \left\{p : 1 \le p \le u, \delta_p > \varepsilon_p\right\} = \{1, \ldots, p\} / P^0.$$

2. Для кожної характеристики z_p, $p \in P^1$ з множини $\{h_{pq}, q \in Q_p\}$ вибирається елемент h_{pq^*}, який є найбільше близьким за своїм значенням до величини поточного відхилення цієї характеристики δ_p:

$$\left|\delta_p - h_{pq^*}\right| = \min\left\{\left|\delta_p - h_{pq}\right| q \in Q_p\right\}.$$

Вибір константи h_{pq^*} визначає набір комбінацій елементарних відмов, які в подальшому будуть розглядатися як фактори недопустимої зміни значення p-й характеристики стану ОД. Тому, виходячи з досвіду експлуатації ОД, доцільно заздалегідь ввести обмеження на величину непогодженості між реальним і передбаченим експертною моделлю (1) відхиленнями значень усіх характеристик стану ОД:

$$\left|\delta_p - h_{pq^*}\right| = \xi_p;\ p = \overline{1,u},\ q^* \in Q_p \qquad (2)$$

Величини ξ_p, що входять до формули (2), задаються експертами і відображають вимоги до ступеня адекватності моделі (1) реальному ОД. Якщо серед множини $\{h_{pq}, q \in Q_p\}$, $p \in P^1$ не знаходиться елемента, який задовольняє умову (2), це означає, що експертна модель (1) недостатньо адекватна об'єкту діагностування, що розглядається, або в ньому відбулися відмови, які не були передбачені експертами на етапі формування даної моделі.

Якщо яка-небудь характеристика z_p стану ОД не піддається кількісному виміру, то відповідні їй величини e_p, ε_p, δ_p, h_{pq}, ξ_p $(p = \overline{1,u},\ q \in Q_p)$ визначаються якісними категоріями.

3. У випадку виконання умови (2) для всіх характеристик стану ОД z_p, $p \in P^1$ кожна з підмножин Q_p, $p \in P^1$ розбивається на дві частини: $Q_p^1 = \{q^*\}$, $Q_p^0 = Q_p / \{q^*\}$.

Орієнтуючись на загальний випадок, у подальшому будемо вважати, що $\left|Q_p\right| > 1$, отже $Q_p^0 \neq \varnothing$.

4. Кожному логічному висловленню X_{ij}, що описує відмова j-го виду в i-й підсистемі ОД, відповідає булева змінна $x_{ij} \in \{0,1\}$, $i = \overline{1,m}$, $j = \overline{1,n_i}$.

Виконання перерахованих дій дає можливість сформувати систему алгебричних рівнянь, відповідну експертної моделі (1) і поточному стану ОД:

$$\sum_{r \in R_{pq}} \prod_{i \in I_r} \prod_{j \in J_{ri}} x_{ij} = b_{pq};\ p = \overline{1,u},\ q \in Q_p, \qquad (3)$$

де

$$b_{pq} = \begin{cases} 0 \text{ для всіх } p \in P^0, q \in Q_p \text{ та } p \in P^1, q \in Q_p^0; \\ 1 \text{ для всіх } p \in P^0, q \in Q_p^1. \end{cases}$$

Це, в свою чергу, дозволяє звести задачу визначення множинних відмов у складному ОД до відшукання вектора значень змінних $\left(x_{ij}; i = \overline{1,m}, j = \overline{1,n_i}\right)$, що задовольняє систему рівнянь (3) і умову бівалентності. Сенс шуканих змінних інтерпретується так: якщо в результаті розв'язання системи (3) змінна $x_{i^*j^*}$ набуває значення 1, отже, в i^*-й підсистемі ОД відбулася відмова j^*-го виду. При $x_{i^*j^*} = 0$ дане твердження невірне.

Система рівнянь (3) має нелінійну структуру і унімодулярну матрицю коефіцієнтів та вільних членів. Бівалентність шуканих змінних у сукупності з зазначеними характеристиками даної системи дає підставу вважати, що для її розв'язання доцільно вибрати алгоритм направленого перебору варіантів [7], адаптований під структуру математичних виразів (3).

Алгоритмізація задачі визначення множинних відмов. Стосовно до задачі, яка розглядається, даний алгоритм передбачає послідовне дроблення початкової множини G варіантів розв'язання системи рівнянь (3), що здійснюється до тих пір, поки не буде встановлений вектор значень шуканих змінних, який задовольняє цю систему, або факт її несумісності. Розбиття множини G і наступних її підмножин здійснюється фіксацією значень шуканих змінних. Для подальшого розбиття на кожному етапі розв'язання задачі вибирається та підмножина варіантів, якій відповідає мінімальна кількість змінних, що одержали фіксовані значення. Підмножини варіантів, що виділяються, піддаються формальному аналізу з метою максимально звузити область подальшого пошуку, скоротити обсяг інформації, що обробляється, і тим самим прискорити процес одержання шуканого результату.

Повна множина G варіантів розв'язання системи (3) складається з 2^s векторів значень змінних x_{ij}, $i=\overline{1,m}$, $j=\overline{1,n_i}$, де $s=\sum_{i=1}^{m} n_i$.

Припустимо, на початок якогось етапу розв'язання задачі в повній множині варіантів виділені λ неперетинних підмножин, які утримують припустимі вектори значень шуканих змінних, $k=\overline{1,\lambda}$.

Абстрагуючись від фізичного змісту задачі, що розглядається, і враховуючи, що всі змінні та рівняння системи (3) мають подвійну індексацію, впровадимо такі позначення:

I_k^0 і I_k^1 – множини перших індексів шуканих змінних, які одержали у векторах підмножини G_k значення 0 та 1 відповідно:

$$I_k^0=\left\{i:1\le i\le m, \exists j\left[(1\le j\le n_i)\&\left(x_{ij}=0\right)\right]\right\};$$

$$I_k^1=\left\{i:1\le i\le m, \exists j\left[(1\le j\le n_i)\&\left(x_{ij}=1\right)\right]\right\};$$

I_k – множина перших індексів шуканих змінних, значення яких у векторах підмножини G_k не зафіксовані:

$$I_k=\left\{i:1\le i\le m, J_{ik}\ne\varnothing\right\};$$

J_{ik}^0 і J_{ik}^1 – множини других індексів змінних x_{ij}, $i\in I_k^0$ та x_{ij}, $i\in I_k^1$ відповідно, що одержали у векторах підмножини G_k значення 0 та 1:

$$J_{ik}^0=\left\{i:1\le j\le n, x_{ij}=0\right\},\quad i\in I_k^0;$$

$$J_{ik}^1=\left\{i:1\le j\le n, x_{ij}=1\right\},\quad i\in I_k^1;$$

J_{ik} – множина других індексів змінних x_{ij}, $i\in I_k$, значення яких в векторах підмножини G_k не зафіксовані:

$$J_{ik}=\left\{1,\ldots,n_i\right\}/\left(J_{ik}^0\cup J_{ik}^1\right),\quad i\in I_k.$$

Набір значень змінних x_{ij}, $i\in I_k^0\cup I_k^1$, $j\in J_{ik}^0\cup J_{ik}^1$, такий, що

$$\left(\forall i\in I_k^0\right)\left(\forall j\in J_{ik}^0\right)\left(x_{ij}=0\right)\&\left(\forall i\in I_k^1\right)\left(\forall j\in J_{ik}^1\right)\left(x_{ij}=1\right),$$

будемо називати частковим планом k-ї підмножини варіантів, а кожний набір значень змінних x_{ij}, $i\in I_k$ $j\in J_{ik}$, що задовольняють умову бівалентності $x_{ij}\in\{0,1\}$, – доповнювальним планом даної підмножини G_k.

Підстановка часткового плану кожної k-ї $(1\le k\le\lambda)$ підмножини варіантів у початкову систему рівнянь (3) перетворює її до часткової форми, відповідної цій підмножині. Для зображення такої часткової форми на множинах R_{pq}, I_r, J_{ri} виділяються такі підмножини:

$$R_{pqk}^0=\left\{r\in R_{pq}:\left(\exists i\in I_r\right)\left(J_{ri}\cap J_{ik}^0\ne\varnothing\right)\right\};$$

$$R_{pqk}^1=\left\{r\in R_{pq}:\left(\exists i\in I_r\right)\left(J_{ri}\subseteq J_{ik}\right)\right\};$$

$R_{pqk} = R_{pq} / (R^0_{pqk} \bigcup R^1_{pqk}),\quad p = \overline{1,u},\quad q \in Q_p$;

$I_{rk} = \{i \in I_r : J_{ri} \bigcap J_{ik} \neq \varnothing\},\quad r \in R_{pqk}$;

$I_{rik} = J_{ri} \bigcap J_{ik};\quad r \in R_{pqk},\quad i \in I_{rk}$.

Рівняння системи (3), якому не задовольняє хоча б один із доповнювальних планів підмножини G_k, називається активним щодо планів підмножини варіантів. Нехай P_k і Q_{pk} – множини перших і других номерів таких рівнянь відповідно:

$P_k = \{p : 1 \leq p \leq u,\quad Q_{pq} \neq \varnothing\}$;

$Q_{pk} = \{q \in Q_p :\quad R_{pqk} \neq \varnothing\}$.

З урахуванням уведених позначень систему рівнянь (3), що зведена до відповідності k-ї підмножини варіантів, можна зобразити в такій формі:

$$\sum_{r \in R_{pqk}} \prod_{i \in I_{rk}} \prod_{j \in J_{rik}} x_{ij} = b_{pq};\qquad p \in P_k,\ q \in Q_{pk}. \tag{4}$$

Алгоритм розв'язання системи рівнянь (3), що реалізує стратегію направленого перебору варіантів, передбачає виконання на кожному етапі обчислювального процесу такої послідовності дій.

Вибір підмножини варіантів, що підлягає розбитті. Оскільки задачі діагностування за своїм фізичним змістом не є оптимізаційними, як критерій вибору підмножини варіантів для подальшого розбиття доцільно використовувати кількість змінних, які в підмножинах G_k, $k = \overline{1,\lambda}$ мають фіксовані значення. Це означає, що для подальшого розбиття вибирають підмножину варіантів G_{k*}, $1 \leq k* \leq \lambda$, якій відповідає частковий план максимальної потужності:

$$S_{k*} = \max\{S_k,\ k = \overline{1,\lambda}\},\ \text{ де } S_k = \sum_{\vartheta=0}^{1} \sum_{i \in I_k^{\vartheta}} \left|J_{ik}^{\vartheta}\right|.$$

Такий критерій відповідає прагненню досягти шуканого результату обчислень за мінімальну кількість кроків алгоритму.

Вибір змінної, значення якої підлягають фіксації. Виходячи з наведених міркувань, для даної операції доцільно вибрати змінну, фіксація значень якої призводить або може в подальшому призвести до істотного спрощення системи рівнянь (4), що відповідає підмножині варіантів G_{k*}. Такою властивістю може володіти змінна, що не має взагалі (чи має мінімальну кількість) співмножників в одному з добутків змінних, які входять до рівняння системи (4). Тому спочатку на множині

$$R_{k*} = \bigcup_{p \in P_{k*}} \bigcup_{q \in Q_{pk*}} R_{pqk*}$$

встановлюється елемент $r^* \in R_{k*}$, ідентифікуючий добуток змінних з мінімальною кількістю співмножників:

$\sigma_{r^*k*} = \min\{\sigma_{rk*},\quad r \in R_{k*}\}$;

$\sigma_{rk} = \sum_{i \in I_{rk}} \left|J_{rik}\right|$.

Для присвоювання значень вибирають будь-яку змінну $x_{i^*j^*}$ із множини $\{x_{ij}, i \in I_{r^*k^*}, j \in J_{r^*ik^*}\}$.

Розбиття підмножини варіантів G_{k*}. Шляхом фіксації значень змінної $x_{i^*j^*}$ підмножина G_{k*} розбивається на дві непертинні підмножини варіантів G^0_{k*} та G^1_{k*}. В усіх планах першого з них $x_{i^*j^*} = 0$, у планах другого – $x_{i^*j^*} = 1$. Ці значення по черзі підставляються в рівняння системи (4), внаслідок чого формуються дві нові системи рівнянь, відповідні двом новим підмножинам варіантів G^0_{k*} та G^1_{k*}.

Аналіз підмножин варіантів G^0_{k*} та G^1_{k*}. В основу формального аналізу кожної підмножини варіантів G_k, $1 \le k \le \lambda$ покладено чотири твердження, безперечність яких звільняє від необхідності їх підтверджувати.

Твердження 1. Система (4) несумісна, якщо для деякого рівняння, що ідентифікується парою індексів $(p \in P_k, \quad q \in Q_{pk})$, виконується умова

$$\left(\left|R^1_{pqk}\right| > b_{pq}\right) \vee \left(R^1_{pqk} = \varnothing\right) \& \left(R_{pqk} = \varnothing\right) \& \left(b_{pq} = 1\right).$$

Твердження 2. Рівняння системи (4), що ідентифікується парою індексів $(p \in P_k, \quad q \in Q_{pk})$, не є активним стосовно до планів підмножини G_k, якщо для нього виконується умова

$$\left(R_{pqk} = \varnothing\right) \& \left[\left(R^1_{pqk} = \varnothing\right) \& \left(b_{pq} = 0\right) \vee \left(\left|R^1_{pqk}\right| = 1\right) \& \left(b_{pq} = 1\right)\right].$$

Твердження 3. Якщо для деякого рівняння системи (4), що ідентифікується парою індексів $(p \in P_k, \quad q \in Q_{pk})$, виконується умова

$$\left(R^1_{pqk} = \varnothing\right) \& \left(\left|R_{pqk}\right| = 1\right) \& \left(b_{pq} = 1\right),$$

то з доповнювальних планів підмножини варіантів G_k припустимими можуть бути лише ті, в яких

$$\prod_{i \in I_{rk}} \prod_{j \in J_{rk}} x_{ij} = 1, \quad r \in R_{pqk}.$$

Твердження 4. Якщо для деякого рівняння системи (4), що ідентифікується парою індексів $(p \in P_k, \quad q \in Q_{pk})$, виконується умова

$$\left(R^1_{pqk} = \varnothing\right) \& \left(\left|R_{pqk}\right| = 1\right) \& \left(b_{pq} = 0\right),$$

то з доповнювальних планів підмножини варіантів G_k припустимими можуть бути лише ті, в яких

$$\prod_{i \in I_{rk}} \prod_{j \in J_{rk}} x_{ij} = 0, \quad r \in R_{pqk}.$$

Процедура аналізу підмножини варіантів G_k, $1 \le k \le \lambda$ полягає в послідовній перевірці виконання умов кожного із сформульованих тверджень для всіх рівнянь системи (4). Залежно від результатів цієї перевірки в циклі аналізу здійснюється та чи інша сукупність дій.

1. Якщо для деякого рівняння системи (4) виконується умова твердження 1, то аналізована підмножина варіантів G_k виключається з подальшого розгляду, як не утримуюча припустимих планів, а процедура аналізу на цьому завершується. У протилежному випадку здійснюється перехід до наступного пункту даної процедури.

2. Якщо для деякого рівняння системи (4), що ідентифікується парою індексів $(p' \in P_k, q' \in Q_{pk})$, виконується умова твердження 2, то воно виключається з системи (4) як нездатне впливати на вибір доповнювального плану підмножини варіантів G_k. Після цього коректується склад множин P_k і Q_{pk}, елементи яких ідентифікують рівняння, що є активними стосовно до планів даної підмножини. Оновлений склад відмічених множин визначають за формулами:

$$Q'_{pk} = Q_{pk} \setminus \{q'\}, \quad P'_k = \begin{cases} P_k \setminus \{p'\}, \text{ якщо } Q'_{pk} = \varnothing; \\ P_k \text{ у протилежному випадку.} \end{cases}$$

Далі, якщо розглянуте рівняння не є останнім у системі (4), умова твердження 3 перевіряється для наступного рівняння і т. д.

Якщо виявляється, що $P'_k = \varnothing$, то систему рівнянь (4) задовольняють усі доповнювальні плани підмножини варіантів G_k. На цьому обчислювальний процес закінчується, оскільки розв'язок системи рівнянь (3) знайдено. Таким розв'язком є вектор значень шуканих змінних, що складається з часткового та будь-якого доповнювального планів підмножини G_k.

Якщо після перевірки виконання умови твердження 2 для всіх рівнянь системи (4) виявляється, що $P_k^{\prime}=\varnothing$, то здійснюється перехід до наступного пункту процедури аналізу підмножини варіантів G_k.

3. Якщо для деякого рівняння системи (4), що ідентифікується парою індексів $\left(p\in P_k^{\prime}, q\in Q_{pk}^{\prime}\right)$, виконується умова твердження 3, то змінним x_{ij}, $r\in R_{pqk}$, $i\in I_{rk}$, $j\in J_{rik}$ присвоюються значення 1. Ці значення підставляються у всі активні (щодо планів підмножини G_k) рівняння системи (4). Після цього проводиться повторний цикл аналізу k-ї підмножини варіантів, починаючи з першого пункту. Перевірку виконання умови твердження 1 для даного рівняння в повторному циклі можна випустити.

У протилежному випадку здійснюється перехід до наступного пункту процедури аналізу підмножини G_k.

4. Якщо для деякого рівняння системи (4), що ідентифікується парою індексів $\left(p\in P_k^{\prime}, q\in Q_{pk}\right)$, виконується умова твердження 4 і при цьому $|I_{rk}|=|J_{rik}|=1$, то змінній x_{ij}, $r\in R_{pqk}$, $i\in I_{rk}$, $j\in J_{rik}$ присвоюється значення 0. Це значення підставляється у всі активні (щодо планів підмножини G_k) рівняння системи (4). Після цього проводиться повторний цикл аналізу k-ї підмножини варіантів, починаючи з першого пункту. Перевірку виконання умови твердження 1 для даного рівняння в повторному циклі випускається.

У протилежному випадку процедура аналізу підмножини варіантів G_k завершується.

Описана процедура по черзі виконується щодо нових підмножин варіантів $G_{k^*}^0$ і $G_{k^*}^1$. Після цього (якщо шуканий розв'язок не знайдено) усі підмножини варіантів, що залишилися в полі розгляду, перенумеровуються, починаючи з одиниці.

Перевірка умов закінчення обчислювального процесу. Після знаходження розв'язку (множини розв'язків) системи рівнянь (3) чи установлення факту її несумісності обчислювальний процес завершується.

Формальною ознакою знаходження розв'язку системи (3) служить відсутність рівнянь, які є активними щодо планів деякої підмножини варіантів G_k, $1\le k\le\lambda$.

Система рівнянь (3) має єдиний розв'язок, якщо

$(k=\lambda=1)\&\left(P_k^{\prime}=\varnothing\right)\&\left(I_k=\varnothing\right)\&\left(J_{ik}=\varnothing\right)$.

Якщо же $\left(P_k^{\prime}=\varnothing\right)\&\left(I_k=\varnothing\right)$, то лише одна підмножина G_k містить стільки розв'язків системи рівнянь (3), скільки і доповнювальних планів.

Формальною ознакою несумісності системи рівнянь (3) служить відсутність підмножин варіантів, що залишилися в полі розгляду після виконання процедури аналізу на якому-небудь етапі обчислювального процесу: $\lambda=0$.

Якщо на поточному етапі умови закінчення обчислювального процесу не виконуються, то здійснюється наступний етап реалізації описаного алгоритму.

Вектор значень шуканих змінних $x^*=\left(x_{ij}^*, i=\overline{1,m}, j=\overline{1,n_i}\right)$, що є єдиним розв'язком системи рівнянь (3), визначає підсистеми ОД, в яких відбулися множинні відмови, і характер цих відмов.

Наявність множини розв'язків системи рівнянь (3) свідчить про недостатню глибину деталізації експертної моделі діагностування (1), а відсутність розв'язків – про суперечливість і, отже, повну непридатність цієї моделі для практичних цілей.

Починати розв'язання задачі доцільно з аналізу повної множини варіантів G. У деяких випадках це дозволяє без процедури розбиття визначити розв'язок системи рівнянь (3), установити факт її несумісності чи принаймі, істотно звузити область подальшого пошуку розв'язків.

Наведений алгоритм має властивість повноти. Це обумовлено тим, що ні одна з підмножин варіантів, що виділяється в процесі обчислювань, не виключається з поля розгляду до встановлення факту несумісності системи рівнянь, що їй відповідає.

Алгоритм реалізований у середовищі Delphi 3.0 з використанням мови Object Pascal.

Список літератури

1. *Курочкин Ю.А., Смирнов А.С., Степанов В.А.* Надежность и диагностирование цифровых устройств и систем. – СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 1993. – 320 с.

2. *Мироновский Л.А.* Функциональное диагностирование динамических систем. – М.: Наука, 1998. – 256 с.

3. *Рябинин И.А.* Надежность и безопасность структурно-сложных систем. – СПб.: Политехника, 2000. – 248 с.

4. *Попов Э.В.* Экспертные системы: решение неформализованных задач в диалоге с ЭВМ. – М.: Наука, 1987. – 288 с.

5. *Искусственный* интеллект. Кн. 2. Модели и методы: Справочник // Под ред. Д.А. Поспелова. М.: Радио и связь, 1990. – 304 с.

6. *Вагин В.Н.* Дедукция и обобщение в системах принятия решений. – М.: Наука, 1988. – 384 с.

7. *Литвиненко А.Е.* Определение класса истинности логических формул методом направленного перебора // Кибернетика и системный анализ. – 2000. – № 5. – С. 23–31.

Стаття надійшла до редакції 03.12.02.

052-01-07864.0

УДК 629.7.018:519.87(045)

характеристика аэродинамич. ЛА, процесс случай
повреждение ЛА, система управления,
поверхность ЛА, повреждение поверхости
поверхность аэродинамическая

С.В. Ліпіхін, старш. виклад.
(Національний авіаційний університет)

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВХІДНИХ ДЕГРАДУЮЧИХ ФАКТОРІВ

Розглянуто завдання визначення співвідношень між виходами заданої лінійної стаціонарної багатовимірної системи з певною множиною стаціонарних випадкових вхідних впливів. Показано можливість заміни випадкових процесів на вході системи керування еквівалентними детермінованими впливами при побудові математичної моделі вхідних деградуючих факторів.

Еквівалентні вхідні впливи являють собою деякий набір детермінованих функцій часу, що визначаються спектральною матрицею випадкових вхідних впливів і не залежать від лінійної стаціонарної багатовимірної системи у разі припущення, що система не може сама впливати на свої входи. За наявності окремої моделі атмосферної турбулентності і моделі динаміки літального апарата (ЛА) з'являється можливість протабулювати еквівалентні вхідні впливи для ЛА, що має пошкодження елементів конструкції, які викликані механічними впливами. У разі відповідної зміни масштабів часу й амплітуд сигналів ці вхідні впливи можуть бути послідовно використані при будь-яких аеродинамічних формах ЛА.

Під час дослідження впливу випадкових пошкоджень на поверхню ЛА як аналізовані параметри можуть використовуватися обчислені ймовірності помилки, період відновлення, довговічність, відношення сигнал/шум, ступінь комфортності, запас міцності від утомленості і т.п. Приймаючи як випадковий процес гауссівский його розподіл, можливо для будь-якої конкретної змінної d_k, яка може бути лінійною комбінацією фазових змінних, що визначають стан системи, одержання зазначених характеристик за наявності середньоквадратичних значень: $\langle d_k^2 \rangle$ і $\langle \dot{d}_k^2 \rangle$. Так, визначення реакції системи часто адекватно визначенню кожної з цих двох величин.

Маючи кореляційну матрицю $C_{dd}(\tau)$ або спектральну матрицю $\Phi_{dd}(\omega)$ виходу, можна одержати обидва середньоквадратичних значення. Оскільки $C_{dd}(\tau)$ і $\Phi_{dd}(\omega)$ є пов'язаними між собою інтегралами Фур'є, значення одного з них обумовлює знання іншого [1].