

УДК 681.5.083.02/03.044.64:51(045)

Е. П. НЕЧИПОРУК, А. В. ПОПОВ*Национальный авиационный университет, Киев, Украина***ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЛОГИКО-ЛИНГВИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ
ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ**

Изложен метод оценки технического состояния сложных систем с многоуровневой структурой. Приведена экспериментальная логико-лингвистическая модель, отражающая причинно-следственные зависимости между типовыми комбинациями поврежденных конструктивных узлов проточной части и соответствующими им изменениями значений контролируемых параметров авиационного турбореактивного двухконтурного двигателя АИ-25 по результатам стендовых исследований. Описан способ преобразования экспертной модели к алгебраическим формам, позволяющим использовать для идентификации множественных (совместных) повреждений эффективные алгоритмы направленного перебора вариантов.

Ключевые слова: диагностирование, сложная система, авиационный двигатель, множественные отказы, экспертная модель, алгебраическая система, алгоритм направленного перебора.

Актуальность проблемы

Обзор работ в области диагностики технических систем показал отсутствие общего подхода к построению эффективных моделей и алгоритмов диагностирования причин возникновения отказов и анализа предаварийных ситуаций в объектах с многоуровневой структурой и числом дефектов до нескольких сотен единиц. Большой класс объектов различной технической природы и назначения можно представить экспертными логико-лингвистическими моделями, отражающими все множества событий и их взаимосвязей.

Введение

В общем случае экспертные модели диагностирования (ЭМД) сложной многоуровневой технической системы, в которой возможны множественные отказы, строятся по следующей схеме: <комбинация элементарных отказов> → <изменение значений подмножества характеристик состояния системы> [1].

При этом предполагается, что изменение значения каждой характеристики оценивается по отношению к заранее известному эталонному уровню. Допускается, что в случае невозможности количественного измерения той или иной характеристики состояния объекта диагностирования (ОД) она может быть задана на качественном уровне.

Экспертная модель диагностирования сложно-го объекта с многоуровневой структурой формируется из логических выражений, каждое из которых сопоставлено одному из классов типовых комбина-

ций элементарных отказов, приводящих к одинаковым изменениям одних и тех же характеристик состояния ОД:

$$Y_q \rightarrow \bigwedge_{\mu=0}^v F_{\mu}^{[r(q)]}; q = \overline{1, w}; v = 3, \quad (1)$$

где $r(q)$ – обозначение одной из типовых комбинаций элементарных отказов, входящих в состав подмножества R_q ;

Y_q – логическое высказывание, конкретизирующее совокупность типовых комбинаций элементарных отказов, входящих в состав подмножества R_q ;

$F_0^{(r)}$ – логическое высказывание, отражающее изменение характеристики $p_0(r)$ состояния ОД под влиянием r -й типовой комбинации элементарных отказов;

$F_1^{(r)}$ – сложное высказывание, описывающее изменение значений других, за исключением $p_0(r)$ -й характеристик состояния $j_0(r)$ -й подсистемы ОД в результате возникновения r -й комбинации элементарных отказов;

$F_2^{(r)}$ – составное высказывание, отражающее изменение значений характеристик состояния прочих подсистем $i_0(r)$ -го уровня ОД, взаимодействующих с $j_0(r)$ -й подсистемой, под влиянием r -й комбинации элементарных отказов;

$F_3^{(r)}$ – сложное высказывание, описывающее из-

менения значений характеристик состояния подсистем других, за исключением $i_0(r)$ -го уровней ОД вследствие возникновения r -й комбинации элементарных отказов. Очевидно, выражения $F_1^{(r)}$, $F_2^{(r)}$ и $F_3^{(r)}$ отражают побочные эффекты первого, второго и третьего рода.

Если последствия комбинаций элементарных отказов, возникающих в какой-либо подсистеме того или иного уровня ОД, не распространяются не только на подсистемы других уровней, но и на другие подсистемы того уровня, где происходят эти отказы, то из правой части выражений экспертной модели (1) исключаются высказывания $F_2^{(r)}$ и $F_3^{(r)}$.

При этом ЭМД сложного объекта может быть представлена в следующем виде:

$$Y_q \rightarrow F_0^{[r(q)]} \& F_1^{[r(q)]}; q = \overline{1, w}. \quad (2)$$

В этом случае задачу диагностирования можно решать для каждой подсистемы ОД в отдельности, считая каждую подсистему ОД автономным и неделимым объектом диагностирования.

Выражения, входящие в экспертную модель (1), приобретают упрощенную форму:

$$Y_q = \bigvee_{r \in R_q} \bigwedge_{k \in K^{(r)}} X(s_k); F_0^{(r)} = D[z_{p_0(r)}, h_{p_0(r)}^{(r)}]; \\ F_1^{(r)} = \bigwedge_{p \in \overline{P}^{(r)}} D[z_p, h_p^{(r)}]; q = \overline{1, w}; r \in R_q,$$

где $K^{(r)}$ – множество видов элементарных отказов в ОД, входящих в состав r -й типовой комбинации; $r = \overline{1, \rho}$;

$P^{(r)}$ – множество номеров характеристик состояния ОД, изменяющих свои значения под влиянием r -й комбинации элементарных отказов; $r = \overline{1, \rho}$;

$X(s_k)$ – простой предикат, описывающий элементарный отказ k -го вида в ОД, $k = \overline{1, \lambda}$;

$\overline{P}^{(r)}$ – множество номеров характеристик состояния ОД, изменяющих свои значения под влиянием r -й комбинации элементарных отказов, за исключением $p_0(r)$ -й: $\overline{P}^{(r)} = P^{(r)} \setminus \{p_0(r)\}$; $r = \overline{1, \rho}$.

Тождественные преобразования, основанные на выражении $(A \vee B \rightarrow C) \leftrightarrow (A \rightarrow C) \& (B \rightarrow C)$, позволяют представить модель (2) в более компактной форме:

$$Y^{(r)} \rightarrow F_0^{(r)} \& F_1^{(r)}; r = \overline{1, \rho}, \quad (3)$$

где $Y^{(r)} = \bigwedge_{k \in K^{(r)}} X(s_k)$, а тождество

$$(A \rightarrow B \& C) \leftrightarrow (A \rightarrow B) \& (A \rightarrow C),$$

дает возможность заменить модель (3) эквивалентной по смыслу системой более простых выражений:

$$\bigwedge_{k \in K^{(r)}} X(s_k) \rightarrow D[z_p, h_p^{(r)}]; r = \overline{1, \rho}; p \in P^{(r)}. \quad (4)$$

Это позволяет сформулировать данную задачу следующим образом: на основе наблюдаемых значений характеристик состояния ОД $z = (z_p | p = \overline{1, u})$ определить значения предикатов $X(s_k)$; $k = \overline{1, \lambda}$, удовлетворяющих системе (4).

Экспериментальная модель диагностирования авиационных двигателей

В качестве сложной многоуровневой системы рассмотрим авиационный турбореактивный двухконтурный двигатель (ТРДД) АИ-25, выполненный по двухвальтовой схеме.

Экспериментальное исследование двигателя проводилось с целью определения взаимосвязи между поврежденными конструктивными элементами проточной части (ПЧ), что соответствует тому или иному виду неисправности и значениями термогазодинамических параметров рабочего тела ПЧ ТРДД.

Данное исследование направлено на решение обратной задачи – диагностирование двигателя по изменению ранее указанных параметров, идентификация вида неисправности с дальнейшей локализацией неисправности.

Анализ данных эксплуатации ряда ТРДД свидетельствует про неоднозначность имеющихся отклонений от нормального состояния поверхности лопаток компрессора и турбины как отдельно, так и в комплексе (совместно).

Забойны, загибы, сколы, прогары, оплавление, отложение продуктов сгорания, коррозия, эрозия лопаток рабочих колес, сопловых и направляющих аппаратов, приводит в первую очередь к нарушению условий обтекания, то есть нарушается качество и геометрия обтекаемой поверхности. При проведении натурного эксперимента был учтен низкий уровень контролепригодности и эксплуатационной технологичности ОД. Методика проведения эксперимента приведена в работах [4, 5].

Для выбранного ОД характеристиками состояния в рамках эксперимента можно считать такие диагностические признаки:

– коэффициент полезного действия (КПД) ком-

прессора низкого давления (КНД) (z_1);

– КПД компрессора высокого давления (КВД) (z_2);

– КПД турбины высокого давления (ТВД) (z_3);

– КПД турбины низкого давления (ТНД) (z_4);

– степень повышения давления КНД (z_5);

– степень повышения давления КВД (z_6);

– степень понижения давления ТНД (z_7);

– степень понижения давления ТВД (z_8);

– скольжение роторов (z_9);

– приведенный расход рабочего тела во внутреннем контуре (z_{10});

– суммарный приведенный расход воздуха (z_{11});

– удельный расход топлива (z_{12});

– удельная тяга (z_{13});

– КПД горения (z_{14}).

В качестве подсистем ОД рассматриваются возможные места возникновения неисправностей (повреждений):

– КНД – (s_1);

– ТНД – (s_2);

– входной направляющий аппарат (ВНА) – (s_3);

– форсунки (Φ) (s_4).

С учётом принятых обозначений, экспертную модель определения множественных (совместных) повреждений в ТРДД АИ-25 можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 & X_1(s_3) \rightarrow D(z_1, \downarrow) \wedge D(z_2, \uparrow) \wedge D(z_3, \downarrow) \wedge D(z_4, \downarrow) \wedge D(z_5, \downarrow) \wedge \\
 & \wedge D(z_6, \downarrow) \wedge D(z_7, \downarrow) \wedge D(z_8, \downarrow) \wedge D(z_9, \downarrow) \wedge D(z_{10}, \downarrow) \wedge D(z_{11}, \downarrow) \wedge D(z_{12}, \uparrow) \wedge D(z_{13}, \uparrow) \wedge D(z_{14}, \downarrow); \\
 & X_1(s_3) \wedge X_1(s_1) \rightarrow D(z_1, \downarrow) \wedge D(z_2, \uparrow) \wedge D(z_3, \downarrow) \wedge D(z_4, \downarrow) \wedge D(z_5, \downarrow) \wedge \\
 & \wedge D(z_6, \downarrow) \wedge D(z_7, \downarrow) \wedge D(z_8, \downarrow) \wedge D(z_9, \downarrow) \wedge D(z_{10}, \downarrow) \wedge D(z_{11}, \downarrow) \wedge D(z_{12}, \uparrow) \wedge D(z_{13}, \uparrow) \wedge D(z_{14}, \downarrow); \\
 & X_1(s_3) \wedge X_1(s_1) \wedge X_2(s_4) \rightarrow D(z_1, \uparrow) \wedge D(z_2, \uparrow) \wedge D(z_3, \downarrow) \wedge D(z_4, \downarrow) \wedge D(z_5, \downarrow) \wedge \\
 & \wedge D(z_6, \downarrow) \wedge D(z_7, \downarrow) \wedge D(z_8, \downarrow) \wedge D(z_9, \uparrow) \wedge D(z_{10}, \uparrow) \wedge D(z_{11}, \downarrow) \wedge D(z_{12}, \uparrow) \wedge D(z_{13}, \downarrow) \wedge D(z_{14}, \downarrow); \\
 & X_2(s_4) \rightarrow D(z_1, \uparrow) \wedge D(z_2, \uparrow) \wedge D(z_3, \downarrow) \wedge D(z_4, \downarrow) \wedge D(z_5, \downarrow) \wedge \\
 & \wedge D(z_6, \downarrow) \wedge D(z_7, \downarrow) \wedge D(z_8, \downarrow) \wedge D(z_9, \uparrow) \wedge D(z_{10}, \downarrow) \wedge D(z_{11}, \downarrow) \wedge D(z_{12}, \uparrow) \wedge D(z_{13}, \uparrow) \wedge D(z_{14}, \downarrow); \\
 & X_1(s_3) \wedge X_2(s_4) \rightarrow D(z_1, \uparrow) \wedge D(z_2, \uparrow) \wedge D(z_3, \downarrow) \wedge D(z_4, \downarrow) \wedge D(z_5, \uparrow) \wedge \\
 & \wedge D(z_6, \downarrow) \wedge D(z_7, \downarrow) \wedge D(z_8, \downarrow) \wedge D(z_9, \downarrow) \wedge D(z_{10}, \downarrow) \wedge D(z_{11}, \downarrow) \wedge D(z_{12}, \uparrow) \wedge D(z_{13}, \uparrow) \wedge D(z_{14}, \downarrow); \\
 & X_1(s_1) \wedge X_2(s_4) \rightarrow D(z_1, \uparrow) \wedge D(z_2, \uparrow) \wedge D(z_3, \downarrow) \wedge D(z_4, \downarrow) \wedge D(z_5, \uparrow) \wedge \\
 & \wedge D(z_6, \uparrow) \wedge D(z_7, \downarrow) \wedge D(z_8, \downarrow) \wedge D(z_9, \downarrow) \wedge D(z_{10}, \downarrow) \wedge D(z_{11}, \downarrow) \wedge D(z_{12}, \downarrow) \wedge D(z_{13}, \uparrow) \wedge D(z_{14}, \downarrow); \\
 & X_1(s_1) \rightarrow D(z_1, \uparrow) \wedge D(z_2, \downarrow) \wedge D(z_3, \uparrow) \wedge D(z_4, \downarrow) \wedge D(z_5, \uparrow) \wedge \\
 & \wedge D(z_6, \uparrow) \wedge D(z_7, \downarrow) \wedge D(z_8, \uparrow) \wedge D(z_9, \downarrow) \wedge D(z_{10}, \downarrow) \wedge D(z_{11}, \downarrow) \wedge D(z_{12}, \downarrow) \wedge D(z_{13}, \uparrow) \wedge D(z_{14}, \downarrow); \quad (5) \\
 & X_1(s_1) \wedge X_1(s_2) \rightarrow D(z_1, \uparrow) \wedge D(z_2, \uparrow) \wedge D(z_3, \downarrow) \wedge D(z_4, \downarrow) \wedge D(z_5, \uparrow) \wedge \\
 & \wedge D(z_6, \uparrow) \wedge D(z_7, \downarrow) \wedge D(z_8, \downarrow) \wedge D(z_9, \downarrow) \wedge D(z_{10}, \downarrow) \wedge D(z_{11}, \downarrow) \wedge D(z_{12}, \uparrow) \wedge D(z_{13}, \uparrow) \wedge D(z_{14}, \downarrow); \\
 & X_1(s_1) \wedge X_1(s_2) \wedge X_1(s_3) \rightarrow D(z_1, \downarrow) \wedge D(z_2, \uparrow) \wedge D(z_3, \downarrow) \wedge D(z_4, \downarrow) \wedge D(z_5, \uparrow) \wedge \\
 & \wedge D(z_6, \uparrow) \wedge D(z_7, \uparrow) \wedge D(z_8, \downarrow) \wedge D(z_9, \downarrow) \wedge D(z_{10}, \downarrow) \wedge D(z_{11}, \downarrow) \wedge D(z_{12}, \uparrow) \wedge D(z_{13}, \uparrow) \wedge D(z_{14}, \downarrow); \\
 & X_1(s_1) \wedge X_1(s_2) \wedge X_1(s_3) \wedge X_2(s_4) \rightarrow D(z_1, \uparrow) \wedge D(z_2, \uparrow) \wedge D(z_3, \downarrow) \wedge D(z_4, \downarrow) \wedge D(z_5, \uparrow) \wedge \\
 & \wedge D(z_6, \uparrow) \wedge D(z_7, \uparrow) \wedge D(z_8, \downarrow) \wedge D(z_9, \downarrow) \wedge D(z_{10}, \downarrow) \wedge D(z_{11}, \downarrow) \wedge D(z_{12}, \uparrow) \wedge D(z_{13}, \uparrow) \wedge D(z_{14}, \downarrow); \\
 & X_1(s_2) \wedge X_1(s_3) \wedge X_2(s_4) \rightarrow D(z_1, \uparrow) \wedge D(z_2, \uparrow) \wedge D(z_3, \downarrow) \wedge D(z_4, \downarrow) \wedge D(z_5, \uparrow) \wedge \\
 & \wedge D(z_6, \uparrow) \wedge D(z_7, \downarrow) \wedge D(z_8, \downarrow) \wedge D(z_9, \downarrow) \wedge D(z_{10}, \downarrow) \wedge D(z_{11}, \uparrow) \wedge D(z_{12}, \uparrow) \wedge D(z_{13}, \uparrow) \wedge D(z_{14}, \downarrow); \\
 & X_1(s_2) \wedge X_2(s_4) \rightarrow D(z_1, \uparrow) \wedge D(z_2, \uparrow) \wedge D(z_3, \downarrow) \wedge D(z_4, \uparrow) \wedge D(z_5, \uparrow) \wedge \\
 & \wedge D(z_6, \uparrow) \wedge D(z_7, \downarrow) \wedge D(z_8, \downarrow) \wedge D(z_9, \downarrow) \wedge D(z_{10}, \downarrow) \wedge D(z_{11}, \downarrow) \wedge D(z_{12}, \uparrow) \wedge D(z_{13}, \uparrow) \wedge D(z_{14}, \downarrow);
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& X_1(s_1) \wedge X_1(s_2) \wedge X_2(s_4) \rightarrow D(z_1, \downarrow) \wedge D(z_2, \uparrow) \wedge D(z_3, \downarrow) \wedge D(z_4, \uparrow) \wedge D(z_5, \uparrow) \wedge \\
& \wedge D(z_6, \uparrow) \wedge D(z_7, \downarrow) \wedge D(z_8, \downarrow) \wedge D(z_9, \downarrow) \wedge D(z_{10}, \downarrow) \wedge D(z_{11}, \uparrow) \wedge D(z_{12}, \uparrow) \wedge D(z_{13}, \uparrow) \wedge D(z_{14}, \downarrow); \\
& X_1(s_2) \rightarrow D(z_1, \uparrow) \wedge D(z_2, \uparrow) \wedge D(z_3, \downarrow) \wedge D(z_4, \uparrow) \wedge D(z_5, \uparrow) \wedge \\
& \wedge D(z_6, \uparrow) \wedge D(z_7, \downarrow) \wedge D(z_8, \downarrow) \wedge D(z_9, \downarrow) \wedge D(z_{10}, \downarrow) \wedge D(z_{11}, \downarrow) \wedge D(z_{12}, \uparrow) \wedge D(z_{13}, \uparrow) \wedge D(z_{14}, \downarrow); \\
& X_1(s_2) \wedge X_1(s_3) \rightarrow D(z_1, \uparrow) \wedge D(z_2, \uparrow) \wedge D(z_3, \downarrow) \wedge D(z_4, \uparrow) \wedge D(z_5, \uparrow) \wedge \\
& \wedge D(z_6, \uparrow) \wedge D(z_7, \downarrow) \wedge D(z_8, \downarrow) \wedge D(z_9, \downarrow) \wedge D(z_{10}, \downarrow) \wedge D(z_{11}, \uparrow) \wedge D(z_{12}, \downarrow) \wedge D(z_{13}, \uparrow) \wedge D(z_{14}, \downarrow).
\end{aligned}$$

Изменение значений характеристик ОД обозначено следующими символами:

\downarrow – уменьшение значения характеристики;

\uparrow – увеличение значения характеристики;

$\downarrow\uparrow$ – отклонение значения характеристики от эталонного в ту или другую сторону.

Приведенная логическая модель (5) диагностирования двигателя АИ-25 не является окончательной и требует дальнейшего усовершенствования. В данной работе она используется лишь для иллюстрации предлагаемого подхода.

Для преобразования модели (4) в алгебраическую форму необходимо выполнить следующие действия.

1. Каждому предикату $X(s_k)$, описывающему элементарный отказ k -го вида в ОД, поставить в соответствие булеву переменную $x_k \in \{0, 1\}$, $k = \overline{1, \lambda}$.

2. Каждому выражению модели (4) сопоставить систему комбинаторных уравнений:

$$\prod_{k \in K^{(r)}} h_p^{(r)} x_k = \delta_p^{(r)}; r = \overline{1, \rho}; p \in P^{(r)}. \quad (6)$$

Вектор значений независимых булевых переменных $(x_k | k = \overline{1, \lambda})$, удовлетворяющий системе нелинейных комбинаторных уравнений (6), определяет комбинацию элементарных отказов в объекте диагностирования, приведших его в аномальное состояние.

С целью учета эффекта «наложения» последствий множества факторов аномального состояния ОД система уравнений (6) представляется в интегративной форме:

$$\sum_{r \in R(p)} \prod_{k \in K^{(r)}} h_p^{(r)} x_k = \delta_p; p = \overline{1, u}. \quad (7)$$

Необходимость учета разного рода погрешностей в оценке значений характеристик состояния ОД обуславливает представление комбинаторной модели (7), в виде системы нелинейных неравенств:

$$\begin{cases} \sum_{r \in R(p)} \prod_{k \in K^{(r)}} (h_p^{(r)} - \xi_p^{(r)}) x_k \leq \delta_p \\ \sum_{r \in R(p)} \prod_{k \in K^{(r)}} (h_p^{(r)} + \xi_p^{(r)}) x_k \geq \delta_p \end{cases}; p = \overline{1, u}. \quad (8)$$

С целью более компактного представления системы неравенств (8) введем следующие обозначения:

$$\begin{aligned}
a_{rp}^{(1)} &= h_p^{(r)} - \xi_p^{(r)}; a_{rp}^{(2)} = -h_p^{(r)} - \xi_p^{(r)}; \\
\delta_p^{(1)} &= \delta_p; \delta_p^{(2)} = -\delta_p.
\end{aligned}$$

Тогда систему (8) можно представить в следующем виде:

$$\sum_{r \in R(p)} \prod_{k \in K^{(r)}} a_{rp}^{(\omega)} x_k \leq \delta_p^{(\omega)}; p = \overline{1, u}; \omega \in \{1, 2\}. \quad (9)$$

Проведенные преобразования позволяют свести задачу определения множественных отказов в сложном объекте диагностирования на основе экспертной модели (2) к отысканию бивалентного вектора значений переменных $(x_k | k = \overline{1, \lambda})$, удовлетворяющего системе неравенств (9).

Смысл искоемых переменных интерпретируется следующим образом: если в результате решения системы (9) некоторая переменная x_{k^*} ($1 \leq k^* \leq \lambda$) принимает значение 1, это означает, что в ОД произошел отказ k^* -го вида; при $x_{k^*} = 0$ данное утверждение неверно. Совокупность независимых переменных, принявших значения 1, определяет виды множества отказов, возникших (одновременно, последовательно или последовательно-параллельно) в исследуемом объекте к моменту его диагностирования.

Как видно, система неравенств (9) имеет нелинейную структуру и носит комбинаторный характер. Бивалентность искоемых переменных, входящих в данную систему, дает возможность использовать для ее решения модифицированные алгоритмы направленного перебора вариантов, адаптированные под структуру указанной комбинаторной модели [2-3].

Выводы

Анализ результатов обработки данных регистрации указывает на незначительные отклонения параметров рабочего процесса двигателя при различных комбинациях технического состояния (ТС), что может негативным образом сказаться на достоверности диагноза. Проведена апробация предложенного теоретического подхода к решению вопроса диагностирования ТРДД с локализацией неисправности до конструктивного узла двигателя.

Для осуществления комплексной реализации процедуры идентификации ТС предложен метод определения множественных отказов, возникающих в сложном многоуровневом объекте диагностирования, с учетом эффекта наложения последствий влияния каждого из них на значения характеристик состояния объекта.

В основе метода лежит экспертная модель, отражающая причинно-следственные зависимости между типовыми комбинациями неисправностей и соответствующими им изменениями значений контролируемых параметров исследуемого объекта.

Поступила в редакцию 10.06.2014, рассмотрена на редколлегии 17.06.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. кафедры технологий аэропортов А.А. Тамаргазин, Национальный авиационный университет, Киев

Литература

1. Литвиненко, А. Е. Метод диагностирования сложных объектов с многоуровневой структурой [Текст] / А. Е. Литвиненко, Е. П. Нечипорук // *Black Sea: scientific journal of academic research*. – Tbilisi : Georgia, 2014. – № 3. – С. 35-42.
2. Вагин, В. Н. Дедукция и обобщение в системах принятия решений [Текст] : моногр. / В. Н. Вагин. – М. : Наука, 1988. – 384 с.
3. Литвиненко, А. Е. Метод направленного перебора в системах управления и диагностирования [Текст] : моногр. / А. Е. Литвиненко. – К. : Наук.-вид. центр НБУВ, 2007. – 328 с.
4. Попов, А. В. Исследование динамических характеристик ТРДД с перемежающимися неисправностями проточной части на установившихся режимах его работы [Текст] / А. В. Попов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2007. – № 2(38). – С. 63-67.
5. Кучер, А. Г. Определение технического состояния ТРДД по данным экспериментальных исследований с использованием нейронных сетей и методов распознавания образов [Текст] / А. Г. Кучер, С. А. Дмитриев, А. В. Попов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2007. – № 10(46). – С. 153-164.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЛОГІКО-ЛІНГВІСТИЧНА МОДЕЛЬ ДІАГНОСТУВАННЯ СКЛАДНИХ СИСТЕМ

О. П. Нечипорук, О. В. Попов

Викладено метод оцінки технічного стану складних систем з багаторівневою структурою. Наведено експериментальну логіко-лінгвістичну модель, що відображає причинно-наслідкові залежності між типовими комбінаціями пошкоджень конструктивних вузлів проточної частини і відповідними їм змінами значень параметрів, що реєструються на авіаційному турбореактивному двоконтурному двигуні AI-25 за результатами стендових досліджень. Описано спосіб перетворення експертної моделі до алгебраїчних форм, що дозволяє використовувати для ідентифікації множинних (спільних) відмов ефективні алгоритми спрямованого перебору варіантів.

Ключові слова: діагностування, складна система, авіаційний двигун, множинні відмови, експертна модель, алгебраїчна система, алгоритм спрямованого перебору.

LOGICAL-LINGUISTIC EXPERIMENTAL MODEL FOR DIAGNOSIS OF COMPLEX SYSTEMS

E. P. Nechiporuk, A. V. Popov

A method of estimation of technical condition complex systems with multi-level structure. The experimental shows the logical-linguistic model that reflects the causal relationship between the types of combinations damage of structural units of the flow part and the corresponding changes in the values of controlled parameters of the aircraft turbofan engine AI-25 on the results of stand research. Describes a method for converting expert model to algebraic forms, allowing for the identification of multiple use (of joint) damage efficient algorithms directional sorting options.

Key words: diagnosis, complex system, aircraft engine, multiple failures, the expert model, the algebraic system of directed enumeration algorithm.

Нечипорук Елена Петровна – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры компьютеризованных систем управления, Институт компьютерных информационных технологий, Национальный авиационный университет, Киев, Украина, e-mail: styop_el@bigmir.net.

Попов Александр Викторович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры сохранения лётной годности авиационной техники факультета летательных аппаратов, Аэрокосмический институт, Национальный авиационный университет, Киев, Украина, e-mail: popche@ukr.net.