

УДК 697.94 + 699.87

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СИСТЕМ СПЕЦИАЛЬНОЙ ФИЛЬТРОВЕНТИЛЯЦИИ

Некрасов И.Н., Моторин В.М., Глуханов А.С.

*ФГКВОО ВПО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского»,
Санкт-Петербург, e-mail: vka@mail.ru*

В статье исследуется вопрос построения математической модели диагностирования систем вентиляции и кондиционирования воздуха. В принятом подходе к построению моделей учтен случайный характер появления отказов в данных системах. В связи с этим на множестве видов технических состояний используется дискретное распределение вероятностей. Для получения решений о техническом состоянии систем вентиляции и кондиционирования воздуха необходима разработка таких программ диагностирования, которые описывают последовательность логических условий и переходов в процессе принятия решений. Выполнена формализация последовательности выполнения проверок контролируемых признаков и сформулирована общая постановка задачи оптимизации процесса принятия решений о техническом состоянии систем специальной фильтрации. Сформирована структура целевой функции и ограничений на ресурсы при оптимизации по критерию максимума средней вероятности принятия правильного решения о техническом состоянии систем вентиляции и кондиционирования воздуха.

Ключевые слова: техническое диагностирование, контролируемый признак, проверка, программа диагностирования, система вентиляции и кондиционирования воздуха

MATHEMATICAL MODEL DIAGNOSIS CATERS FILTRATION SYSTEMS

Nekrasov I.N., Motorin V.M., Glukhanov A.S.

Mozhaisky Military Space Academy, Sankt-Petersburg, e-mail: vka@mail.ru

The article explores a mathematical model of diagnosing ventilation and air-conditioning. The adopted approach to the construction of models accounted for the random nature of failures in these systems. In this regard, the plurality of types of technical state uses a discrete probability distribution. For decisions on the technical condition of ventilation and air-conditioning is necessary to develop such programs diagnosis that describes a sequence of logical conditions and transitions in the decision-making process. Made formalization sequence checks are performed controlled symptoms and formulated the general problem of optimization of the decision making process on the technical condition of special systems Filtration systems. A structure of the objective function and constraints on resources in the optimization criterion of the maximum average probability of making the right decision about the technical condition of ventilation and air-conditioning.

Keywords: technical diagnostics, controlled sign, verification, software diagnostics, ventilation and air-conditioning

Важнейшей составляющей в общем комплексе мероприятий по повышению надежности систем вентиляции и кондиционирования воздуха (СВ и КВ) объектов космической инфраструктуры является совершенствование процесса их эксплуатации, в частности технического обслуживания. Но эффективная организация технического обслуживания невозможна без информации о фактическом техническом состоянии оборудования, т.е. без проведения контроля и диагностирования. Необходимы разработка и внедрение современного методического и аппаратного обеспечения получения объективной информации о состоянии СВ и КВ.

Цель исследования заключается в построении математической модели диагностирования как основы методики диагностирования СВ и КВ по параметрам основных рабочих процессов.

Исходные предположения и допущения метода исследования

Для разработки математического и методического обеспечения диагностирования СВ и КВ применены как методы параметрической статистики для определения допустимых пределов изменения контролируемых признаков (КП) на нижележащих уровнях иерархии системы, так и методы теории распознавания образов. Указанные методы позволяют формировать изображения видов технического состояния СВ и КВ, соответствующие отказам подсистем и функциональных элементов (ФЭ) посредством реализации процедуры обучения при отсутствии сведений о законе распределения значений КП.

В ходе исследований по каждому виду технического состояния СВ и КВ получена обучающая выборка

$$\{S_k^i | k = \overline{1, N_i}\}, \quad i = \overline{1, m}, \quad (1)$$

а координаты e_{ij} изображений выражены как среднее арифметическое соответствующих координат элементов выборки

$$e_{ij} = \frac{1}{N_i} \sum_{k=1}^{N_i} s_{kj}^i, \quad e_{ij} \in [-1, 1],$$

$$i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}. \quad (2)$$

Разработка модели

Применение выражения (2) позволяет получить изображения

$$E_i^* = (e_{i1}, e_{i2}, \dots, e_{in})^T, \quad i = \overline{1, m},$$

которые наилучшим образом (с точки зрения достоверности диагностирования) описывают свойства каждого вида ТС.

Кроме того? в работе предложен способ уточнения изображений на основе процедуры дообучения посредством использования дополнительной диагностической информации

$$\{S_k^i | k = \overline{N_i + 1, N_i}\}, \quad (3)$$

где S_k^i в выборке (3) – дополнительные обучающие образы, полученные на этапе эксплуатации системы контроля и диагностирования.

Адаптированное (уточненное) изображение i -го вида технического состояния СВ и КВ определяется выражением

$$E_i' = \frac{1}{N_i} \sum_{k=1}^{N_i} s_{kj} + \frac{1}{N_i' - N_i} \sum_{k=1}^{N_i' - N_i} s_{kj}. \quad (4)$$

Решающие правила, применяемые в теории распознавания образов, для задач контроля и диагностирования СВ и КВ в исходном виде неприменимы. Необходимо их доработка с учётом особенностей целевого содержания указанных задач и применяемых методов распознавания. Выделяются два метода распознавания – комбинационный и последовательный. При комбинационном распознавании решение принимается на основе анализа результатов всех проверок из заданного множества, которые могут выполняться в произвольном порядке. При последовательном распознавании соблюдается некоторая очерёдность выполнения проверок.

Для каждого из рассматриваемых методов распознавания разработаны решающие правила. При диагностировании СВ и КВ последовательным методом указанное правило имеет вид

$$\pi_j = \pi_{ij}^{r_{ij}}, \text{ если } \begin{cases} |y_j - e_{ij}| = \min_{f=1, m} \{|y_j - e_{if}|\}, \\ \min_{f=1, m} \{e_{if}\} \leq y_{ij} \leq \max_{f=1, m} \{e_{if}\} \end{cases} \quad (5)$$

или

$$\frac{1}{2(m-1)} \max_{\substack{p, f=1, m \\ p \neq f}} \{|e_{pj} - e_{if}|\} \geq \begin{cases} y_j - e_{ij}, & \text{если } y_j > \max_{k=1, m} \{e_{kj}\}, \\ |y_j - e_{ij}|, & \text{если } y_j < \min_{k=1, m} \{e_{kj}\}, \end{cases} \quad (5')$$

где $\pi_{ij}^{r_{ij}}$ – исход проверки; $r_{ij} = \overline{1, \omega_j}$; y_j – текущее значение j -го контролируемого признака; e_{ij} – j -я координата изображения i -го вида ТС.

Преимущество решающего правила (5) перед известными в том, что оно инвариантно к физической природе характеристик выходных процессов СВ и КВ. Это обеспечивает возможность унификации описания процесса принятия решений о ТС любого объекта из состава СВ и КВ.

Предложено формальное описание последовательности выполнения проверок КП, в рамках которого процесс диагностирования рассматривается как случайный эксперимент.

Если в качестве эффективности рассматриваемого процесса принимается достоверность решений о ТС, соотносённая с затратами динамических ресурсов, то в качестве показателя эффективности может быть принята средняя вероятность ED получения правильного решения с учётом ограничений на указанные виды ресурсов. Оптимизационная задача в данном случае заключается в нахождении упорядоченных подмножеств $\pi_i \subseteq \Pi$, $i = \overline{1, m}$, таких, что

$$ED = \max_{p \in m\Pi} \left\{ \sum_{i=1}^m P(E_i) \left(\prod_{\pi_j \in \Pi_i} \gamma_{ii}(\pi_j) \right) \right\};$$

$$\sum_{i=1}^m P(E_i) \sum_{\pi_j \in \Pi_i} t(\pi_j) \leq M_t; \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^m P(E_i) \sum_{\pi_j \in \Pi_i} c(\pi_j) \leq M_c,$$

где $P(E_i)$ – вероятность i -го вида ТС; $\gamma_{ii}(\pi_j)$ – величины, определяемые через вероятности ошибок первого и второго рода j -й проверки; M_t , M_c – максимально допустимые расходы временного и трудового ресурсов соответственно; $t(\pi_j)$, $c(\pi_j)$ – затраты времени и трудовых ресурсов на выполнение j -й проверки; $m\Pi$ – множество перестановок на множестве проверок.

Средняя вероятность принятия правильного решения о техническом состоянии СВ и КВ находится из выражения

$$ED = \prod_{k=1}^3 ED_k, \quad (7)$$

где ED_k – средняя вероятность принятия правильного решения на k -м уровне.

При этом справедливы выражения

$$ED_1 = \prod_{j=1}^5 (1 - \alpha_j); \quad ED_2 = \prod_{\pi_j \in \Pi_2} (1 - \gamma_{if}(\pi_j)); \quad ED_3 = \prod_{\pi_j \in \Pi_3} (1 - \gamma_{if}(\pi_j)), \quad (8)$$

где α_j – вероятность ошибки первого рода j -й проверки; Π_2, Π_3 – множество проверок КП на втором и третьем уровнях; β_j – вероятность ошибки второго рода j -й проверки;

$$\gamma_{if}(\pi_j) = \begin{cases} 1 - \alpha_j & \text{если } |y_{ij} - e_{ij}| = \min_{f=0, \overline{m}} \{|y_{ij} - e_{if}|\}, \quad i = 0; \\ 1 - \beta_j & \text{если } |y_{ij} - e_{ij}| = \min_{f=1, \overline{m}} \{|y_{ij} - e_{if}|\}, \quad i = 1, \overline{m}; \\ \alpha_j, & \text{если } |y_{ij} - e_{ij}| = \min_{f=1, \overline{m}} \{|y_{ij} - e_{if}|\}, \quad i = 0; \\ \beta_j, & \text{если } |y_{ij} - e_{ij}| = \min_{f=1, \overline{m}} \{|y_{ij} - e_{if}|\}, \quad f = 0. \end{cases}$$

В целях формирования обучающей выборки о работоспособном состоянии СВ и КВ были проведены экспериментальные исследования на лабораторном образце кафедры «Системы жизнеобеспечения объектов наземной космической инфраструктуры» ВКА имени А.Ф. Можайского. Математическая модель диагностирования (поиска отказов) разработана как с использованием обучающей выборки о работоспособном состоянии СВ и КВ, так и экспериментальных данных по отказам. Посредством машинной реали-

зации процесса обучения построены изображения всех видов технического состояния СВ и КВ в виде векторов числовых величин. При этом использовались как экспериментальные данные, так и обучающие образы, полученные путём имитационного моделирования. На множестве видов ТС задано дискретное распределение вероятностей. Определены регрессионные зависимости КП второго уровня от входных воздействий этого же уровня СВ и КВ, функционирующей в режиме фильтрации (табл. 2).

Таблица 1

Математическая модель контроля работоспособности СВ и КВ

№ п/п	Регрессионная зависимость $y_j = f(u_i)$	Вычисленное значение F	Критическое значение F
1	$y_7 = 37,2 + 0,84u_3 - 1,83u_3^3$	95,6	6,1
2	$y_9 = 1,93u_1^2 + 2,2u_4^2 - 0,6u_4 - 73,25u_3 + 41,03$	101,2	5,8
3	$y_{23} = 3,24u_8^2 - 18,7u_8 + 47,71$	37,2	6,1

Таблица 2

Регрессионные зависимости КП от входных переменных для СВ и КВ, функционирующей в режиме фильтрации

№ п/п	Регрессионная зависимость $y_j = f(u_i)$	Вычисленное значение F	Критическое значение F
1	$y_4 = 33,7 + 10,35u_1 - 0,64u_3^2$	95,6	6,1
2	$y_{19} = 73,4 - 0,114u_1$	110	5,4
3	$y_1 = 37,2 + 0,84u_3 - 1,83u_3^3$	540	6,1
4	$y_3 = 410,4 + 0,84u_1 - 2,12u_1^2$	210	6,1
5	$y_6 = 215,2 + 0,27u_1 - 0,48u_1^2$	123	6,1
6	$y_2 = 22,7 - 40,8u_1 + 33,4u_1^2$	245	6,1
7	$y_{22} = 2,1 - 17,4u_2 + 0,41u_2^2$	225	6,1
8	$y_{24} = 45,4 + 2,15u_3 - 0,42u_3^2$	54	6,1
9	$y_{20} = 0,43u_1^2 + 4,5u_4^2 - 11,4u_4 - 47,35u_3 + 77,4$	101,2	5,8
10	$y_{10} = 7,03u_1^2 - 22,6u_1 - 819,3$	211	6,1
11	$y_{11} = 0,43u_1^2 - 11,4u_1 - 707,4$	140	6,1
12	$y_{25} = 2,6u_1^2 + 3,7u_2^2 - 1,32u_1 - 4,58u_2 + 7,7$	150	5,8

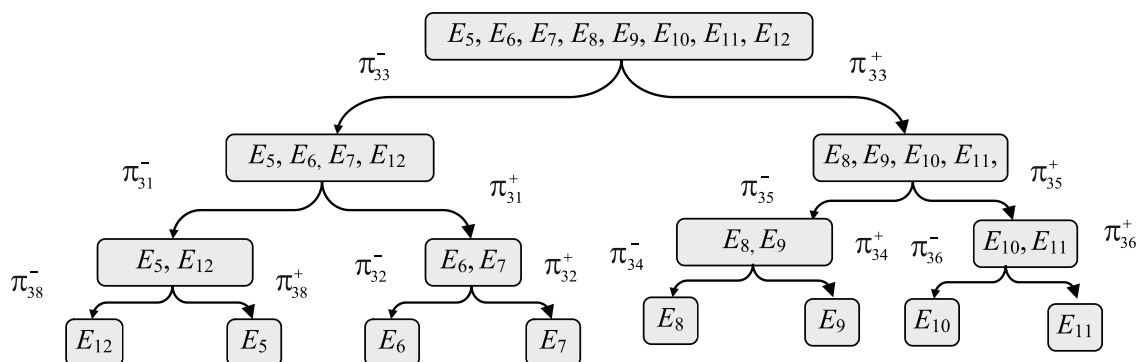


Рис. 1. Гибкая программа диагностирования системы специальной фильтрации (третий уровень)

На основе полученных результатов построена гибкая программа диагностирования на третьем уровне иерархии (рис. 1), оптимальная по критерию максимума средней вероятности получения правильного решения о техническом состоянии СВ и КВ. При разработке программы реализовывалось решающее правило (5). Данная программа представляет собой составную часть модели, но одновременно является выходным документом по организации диагностирования, т.е. методическим обеспечением указанных работ.

На основе изложенной последовательности определения технического состояния СВ и КВ и её реализации на оборудовании конкретного типа разработана блок-схема

методики контроля и диагностирования (рис. 2). Она отражает все этапы подготовки исходных данных, их обработки, построения математического обеспечения, проверки его адекватности и принятия решений о техническом состоянии СВ и КВ, а также взаимосвязь этих этапов между собой. Применение методики для контроля и диагностирования СВ и КВ на других объектах космической инфраструктуры требует реализации только части этапов по формированию обучающей выборки о работоспособном состоянии СВ и КВ и вычислению коэффициентов регрессии. Необходимость в построении второго и третьего уровней модели, определении структуры уравнений регрессии отпадает.

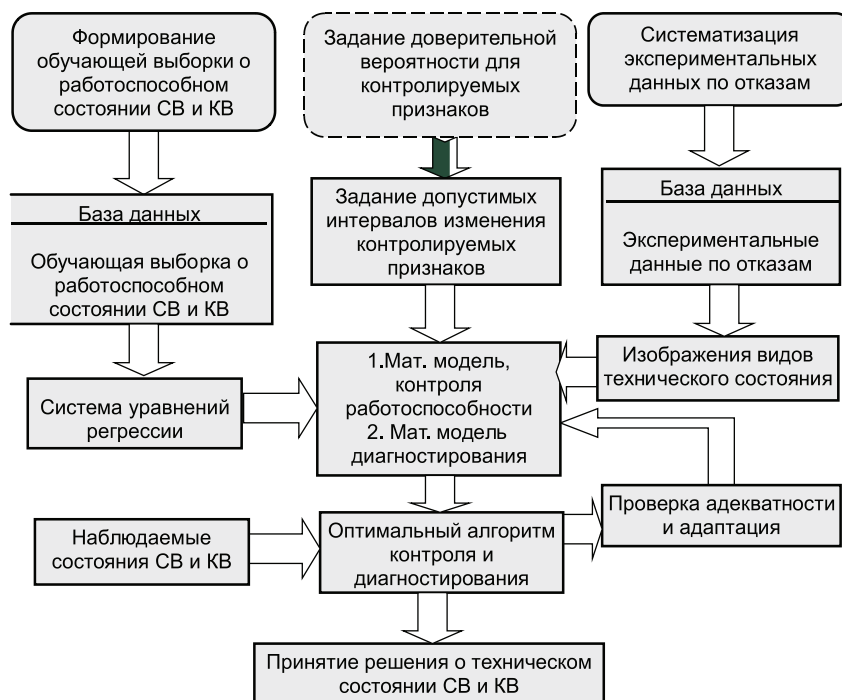


Рис. 2. Блок-схема методики контроля и диагностирования систем вентиляции и кондиционирования воздуха

Выводы

В принятом подходе к построению моделей учитывается случайный характер появления отказов СВ и КВ. В связи с этим на множестве видов ТС используется дискретное распределение вероятностей. Для получения решений о техническом состоянии СВ и КВ необходима разработка таких программ диагностирования, которые описывают последовательность логических условий и переходов в процессе принятия решений. Выполнена формализация последовательности выполнения проверок КП и сформулирована общая постановка задачи оптимизации процесса принятия решений о техническом состоянии СВ и КВ. Сформирована структура целевой функции и ограничений на ресурсы при оптимизации по критерию максимума средней вероятности принятия правильного решения о техническом состоянии СВ и КВ.

Список литературы

1. Айвазян С.Л. Прикладная статистика и основы эконометрики / С.Л. Айвазян, В.С. Мхитарян. – М.: ЮНИТИ, 1998. – 1022 с.
2. Банди Б. Методы оптимизации. Вводный курс: пер. с англ. О.В. Шихеевой. – М.: Радио и связь, 1989. – 179 с.
3. Беллман Р. Динамическое программирование и современная теория управления: пер. с англ. / под ред. Б.С. Разумихина / Р. Беллман, Р. Калаба. – М.: Наука, 1969. – 118 с.
4. Кокорин О.Я. Установки кондиционирования воздуха. – М.: Машиностроение. 1978. – 263 с.
5. Некрасов И.Н. Ограничения в задачах построения оптимальных алгоритмов определения технического состояния / И.Н. Некрасов, В.И. Сеньченков // Приборостроение. Издание СПбНИУИТМО. – 2014. – Т. 57, № 10. – С. 5–11.

6. Пархоменко П.П., Согомонян Е.С. Основы технической диагностики: Оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратные средства. – М.: Энергия, 1981. – 320 с.

7. Резников Б.А. Системный анализ и методы системной техники. Ч.1. Методология системных исследований. Моделирование сложных систем. – МО, 1989. – 522 с.

8. Ту Дж. Принципы распознавания образов / Дж. Ту, Р. Гонсалес. – М.: Мир, 1978. – 411 с.

References

1. Ajvazjan, S.L. Prikladnaja statistika i osnovy jekonometriki / S.L. Ajvazjan, V.S. Mhitarjan. M.: JuNITI, 1998. pp. 1022.
2. Bandi, B. Metody optimizacii. Vvodnyj kurs: Per. s angl. O.V. Shiheevoy / B. Bandi / – M.: Radio i svjaz, 1989. pp. 179.
3. Bellman R. Dinamicheskoe programmirovaniye i sovremennaja teoriya upravleniya: Per. s angl. / Pod red. B.S. Razumihina / R. Bellman, R. Kalaba. M.: Nauka, 1969. p. 118.
4. Kokorin, O.Ja. Ustanovki kondicionirovaniya vozduha. M.: Ma-shinostroenie. 1978. pp. 263.
5. Nekrasov I.N. Ogranicheniya v zadachah postroeniya optimalnyh algoritmov opredeleniya tehnicheskogo sostojaniya / I.N. Nekrasov, V.I. Senchenkov // Priborostroenie.: Izdanie SPbNIUITMO.–2014. T.57, no. 10. pp. 5–11.
6. Parhomenko P.P., Sogomonjan E.S. Osnovy tehniche-skoj diagnostiki: Optimiza-cija algoritmov diagnostirovaniya, apparaturnye sredstva. M.: Jenergiya, 1981. pp. 320.
7. Reznikov B.A. Sistemnyj analiz i metody sistemoteh-niki. Ch.1. Metodologija sistemnyh issledovaniy. Modelirovanie slozhnyh sistem. MO, 1989. p. 522.
8. Tu Dzh. Principy raspoznavaniya obrazov / Dzh. Tu, R. Gonsales. M.: Mir, 1978. pp. 411.

Рецензенты:

Сеньченков В.И., д.т.н. профессор, ФГКВОО ВПО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» Министерства обороны РФ, г. Санкт-Петербург;

Авсюкевич Д.А., д.т.н., профессор, ФГКВОО ВПО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» Министерства обороны РФ, г. Санкт-Петербург.