

УДК 007.51:681.5(075.8)

О.А. Усенко**МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В УСЛОВИЯХ
НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ В ПРИЛОЖЕНИИ К ЗАДАЧАМ ДИАГНОСТИКИ
СОСТОЯНИЙ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ**

Рассматриваются вопросы диагностики состояния сложных технических объектов в условиях неопределенности. Указанная проблема является актуальной в задачах обеспечения качества, надежности и эффективного функционирования технических объектов. Новизна предложенных методов обработки информации состоит в использовании математического аппарата нечеткой логики для формализации знаний экспертов о видах неисправностей и принятии решений, а также в применении интервальных оценок при выявлении оптимальных по Парето решений в многокритериальной задаче. Предложенные методы формализованы, удобны для компьютерной реализации и последующей их верификации при диагностике различных технических объектов.

Неопределенность; обработка информации; нечеткая логика; диагностика; принятие решений; многокритериальность; интервальная арифметика.

О.А. Usenko**METHODS OF INFORMATION PROCESSING IN UNCERTAINTY
CONDITIONS FOR THE PROBLEMS DECISION OF DIAGNOSTICS
OF TECHNICAL OBJECTS CONDITIONS**

The paper considers the questions of diagnostics of complex technical objects in conditions of uncertainty. This problem is topical in the problems of, ensuring quality, reliability and efficient operation of technical facilities. The novelty of the proposed methods of information processing is to use the mathematical apparatus of fuzzy logic for the formalization of the expert knowledge about the types of problems and decision-making, as well as in the application of interval estimates in identifying the best of Pareto solutions in a multi-criteria problem. The proposed methods of formalized, convenient for computer realization and their subsequent verification in the diagnosis of various technical objects.

Uncertainty; information processing; fuzzy logic; diagnosis; decision making; multiple criteria; interval arithmetic.

Комплексное решение задач контроля и диагностирования современных технологических объектов (ТО) неразрывно связано с естественным стремлением к достижению наибольшей эффективности их функционирования при ограниченных ресурсах, прочности, надежности и технологических затратах и всегда оставалась актуальной проблемой. Проведение диагностических процедур на системном уровне обусловлено свойствами самого сложного ТО, а также неоднозначным его поведением и взаимодействием с внешней по отношению к нему средой и другими объектами, ограниченностью и противоречивостью идентификационной информации. Примерами таких ТО, характеризующихся малоинерционностью, иерархичностью, многорежимностью, неопределенностью поведения, большим количеством коррелированных контролируемых параметров, которые наряду со случайными изменениями внутри определенных, согласно проектного расчета, допусков имеют тенденцию к случайным выбросам значений за его пределы (в сторону увеличения или уменьшения), являются энергосиловые установки, авиационные двигатели, паросиловые, газотурбинные и автономные дизельные судовые энергосистемы и др. [1–4]. В общем случае их состояние характеризуется как количественными, так и качественными показателями, заданными с использованием различных квалиметрических шкал, различной степенью неопределенности или погреш-

ности. Известные методы контроля и диагностики, как правило, используют односторонний подход, например, производят оценку состояния только на основе допускового контроля или только на основе экспертных знаний, и не позволяют интегрировать различные данные в единую комплексную модель.

Целью работы явилась разработка и исследование специального подхода к диагностике ТО, основанного на методах обработки информации в условиях неопределенности. С целью обеспечения функционального контроля и диагностики сложного ТО в нештатных режимах без разборочно-сборочных работ с заданной достоверностью при минимальных затратах необходимо в рамках многомодельного подхода разработать и исследовать метод локализации неисправностей ТО на основе неточных и/или неполных знаний о ТО с использованием элементов нечеткой логики и нечисловой статистики.

Неопределенность является сложным понятием, которому трудно дать однозначное определение или четко его классифицировать [5]. Источник неопределенности и ее природа могут быть самыми различными, и в любой процедуре принятия решения, в частности, при оценке состояния и диагностике возможных отказов технических объектов присутствие неопределенности одного или нескольких типов неизбежно. Использование современных информационных технологий позволяет минимизировать влияние неопределенности, однако не может полностью ее исключить, поэтому недопустимо отбрасывание фактора неопределенности в задачах диагностики состояния технических объектов. В современных источниках [5,6] выделяют следующую классификацию неопределенностей (рис. 1).

При проведении процедуры локализации неисправностей сложных технических объектов (ТО) следует различать два вида диагностических параметров: 1) параметры, являющиеся выходными сигналами некоторого функционального или структурного блока/элемента. Ухудшение работоспособности ТО по такому обобщенному параметру однозначно определяет дефектный блок/элемент ТО; 2) параметры, являющиеся обобщенными выходными сигналами совокупности блоков/элементов, подсистем. Ухудшение работоспособности ТО по данному виду параметров не позволяет однозначно локализовать отказавший элемент, для этого необходимо учитывать значения других контролируемых параметров и дополнительные признаки.



Рис. 1. Классификация видов неопределенности

Для сложных ТО характерно наличие значительной доли параметров второго вида, находящихся в неоднозначной зависимости между собой в различных режимах функционирования ТО, что при ограниченности априорных данных и недостатке знаний о структуре и происходящих в ТО процессах обуславливает отсутствие четкой процедуры диагностики, а следовательно установление однозначного диагноза. Например, специалисты отмечают [1-4], что неисправности двигателя

проявляются не только в ухудшении основных контролируемых параметров (мощность, расход топлива и т.п.), но и по неизмеряемым, иногда субъективным признакам в виде, например, посторонних шумов, изменения цвета выхлопа, подтекания рабочих жидкостей. Как следствие, правильность диагноза и время, затрачиваемое на его установление, во многом определяется опытом и интуицией специалистов, знания которых трудноформализуемы, содержат неопределенности и неточности относительно признаков конкретных отказов.

Для формализации такого рода неопределенностей используют нечеткую логику [7], в которой неточность высказываний экспертов может быть отображена функциями принадлежности, имеющими смысл степени уверенности эксперта относительно аргумента функции. Применение принципов нечеткой логики и нечисловой статистики позволит согласовать количественное описание контролируемых сигналов с качественными оценками специалистов-диагностов в условиях неопределенности. Поэтому предлагается следующая методика локализации неисправностей сложного ТО в условиях неопределенности:

1. Знания экспертов или специалистов о сложном ТО в нештатном режиме отображаются в виде совокупности функций принадлежности возможных отказов по значениям каждого из N_d диагностически значимых параметров (рис. 2).

Если мнения экспертов расходятся, то наиболее вероятный диагноз формируется из решения оптимизационной задачи по поиску медианы Кемени [8]: пусть $A_1, A_2, A_3, \dots, A_p$ – ответы p экспертов, представленные в виде бинарных отношений, тогда медиана Кемени определяется как $\arg \min \sum D(A_i, A)$, где $\arg \min$ – то или те значения A , при которых достигает минимума указанная сумма расстояний Кемени от ответов экспертов до текущей переменной A , по которой и проводится минимизация. Целесообразность использования медианы Кемени для данной задачи связана с тем, что законы больших чисел показывают, во-первых, что медиана Кемени обладает устойчивостью по отношению к незначительному изменению состава экспертной комиссии; во-вторых, при увеличении числа экспертов она приближается к некоторому пределу. Его естественно рассматривать как истинное мнение экспертов, от которого каждый из них несколько отклонился по случайным причинам [8]. Вычисление медианы Кемени – задача целочисленного программирования и для ее решения можно использовать различные известные алгоритмы дискретной математики (на основе метода ветвей и границ, случайного поиска и т.п.).

2. Результаты обработки статистических данных о выбросах контролируемых параметров за допусковые зоны представляют в виде неоднородной марковской модели, анализируя которую определяют дрейфующие или нестабильные параметры, свидетельствующие об ухудшении работоспособности ТО. Локализация неисправности осуществляется в зависимости от характера и количества нестабильных параметров.

2.1. Из множества нестабильных параметров, свидетельствующих о неисправности, выделяют параметры первого вида, однозначно определяющие состояние конкретного блока, и выявляют отказавший блок или несколько блоков в случае кратного отказа.

2.2. При наличии единственного нестабильного параметра второго вида локализация неисправностей заключается в определении множества возможных отказов при данном значении параметра и вероятности этих отказов по совокупности функций принадлежности путем восстановления перпендикуляра от точки текущего значения параметра $x_{\text{тек}}$ на оси абсцисс до пересечения с соответствующими функциями принадлежности (на рис. 2 пунктирная линия). Результат представляют в виде ранжированного ряда вероятностей возможных отказов ТО:

$$P_i > \dots > P_j > \dots > P_k, \quad (1)$$

максимальный элемент которого определит наиболее вероятный отказ и блок, подлежащий замене.

2.3. При наличии двух и более нестабильных параметров второго вида множество возможных отказов ТО предварительно определяют отдельно по каждому параметру, аналогично п. 2.2. Полученные ранжированные ряды вероятностей неисправностей вида (1) по каждому из нестабильных параметров образуют строки квазиматрицы:

$$\left[\begin{array}{l} P_i^1 > \dots > P_j^1 > \dots > P_k^1 \\ \dots \\ P_p^{N_d} > \dots > P_q^{N_d} > \dots > P_r^{N_d} \end{array} \right], \quad (2)$$

где P_i^k – вероятность i -го отказа при нестабильности k -го контролируемого параметра.

3. Общий ранжированный ряд неисправностей получают путем последовательного выделения максимального элемента квазиматрицы (2). Однако такой ряд в общем случае будет содержать несколько вероятностей, соответствующих одному отказу, или равные вероятности различных отказов. Это обусловлено тем, что различные диагностические параметры могут указывать на одну неисправность или на наличие кратного отказа.

Для исключения такого рода неоднозначностей в общем ранжированном ряде, начиная с максимального элемента, исключают все вероятности уже встречавшейся неисправности, а при наличии равенства двух впервые встретившихся различных отказов их ранжируют в зависимости от соотношения очередных значений соответствующих отказов, т.е. если имеются две равные вероятности P_i^q и P_j^r , соответствующие i -му и j -му отказам по q -му и r -му параметрам, то, продолжая просматривать ряд, определяют очередные вероятности P_i^s и P_j^t , соотношение которых ($P_i^s > P_j^t$ или $P_i^s < P_j^t$) и определит ранжирование i -го и j -го отказов. В результате такой процедуры будет получен ранжированный ряд максимальных вероятностей возможных отказов.

4. Принятие решение о ТО (возможно регулирование и доводка параметра или необходима замена блока) по ранжированным рядам, полученным в п. 2.2 или 2.3, осуществляют с использованием функций принадлежности управляющих воздействий [9]. Функции принадлежности управляющих воздействий представлены на рис. 2 и являются одинаковыми для всех выходных (диагностических параметров). Состояние выхода представлено тремя функциями принадлежности, названными нормальное, регулирование и замена блока.

При наличии более одного критерия для оценки состояния ТО необходимо привлекать методы решения многокритериальных задач, в частности, например, метод оптимизации по Парето [10]. Однако известная процедура выявления Парето-оптимальных решений не адаптирована на обработку неопределенных данных. Поэтому предлагается неопределенные данные представлять в виде интервальных оценок [8]. Для реализации процедуры сравнения интервальных оценок выявлены 7 базовых отношений, характеризующих предпочтительность рассматриваемой альтернативы по сравнению с другими. При двух частных критериях оптимизации установлены более 60 случаев возможных нечетких отношений, среди которых только треть составляют оптимальные по Парето решения, остальные позволили установить более предпочтительное решение. При наличии большего числа частных критериев процедура требует обобщения: а) производится выявление опти-

мальных по Парето решений для двух критериев, б) оптимальные по Парето решения исключают из рассмотрения и выбирают новую пару частных критериев, в) процедура выявления оптимальных по Парето решений повторяется до тех пор, пока не будут выявлены все оптимальные по Парето решения.

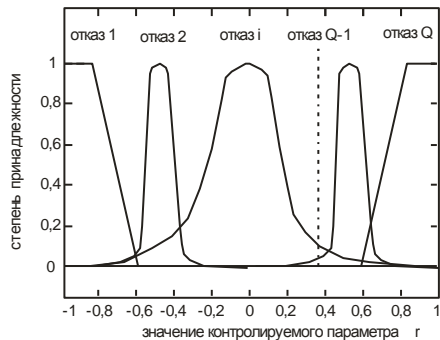


Рис. 2. Формализация знаний экспертов о ТО

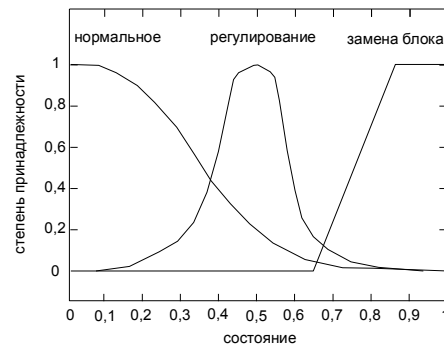


Рис. 3. Функции принадлежности управляющих воздействий

Таким образом, при решении задачи построения модели диагностики сложных объектов в условиях неопределенности были получены следующие результаты: 1) применение нечеткой логики и порядковой статистики позволило по мгновенным значениям контролируемых параметров строить непрерывные модели оценки работоспособности, а также производить локализацию одиночных и кратных отказов ТО в условиях неопределенности знаний о структуре происходящих в ТО процессах и признаках конкретных неисправностей; 2) использование элементов статистики нечисловых данных сделало возможным согласовать качественную информацию о состоянии сложного ТО, получаемую от разных экспертов; и, наконец, 3) предложен метод выявления Парето-оптимальных решений на основе данных, представленных интервальными оценками.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фролов К.В., Соколова А.Г. Современные методы вибромониторинга и виброакустической диагностики машин // Наука – производству. – 1998. – № 10 (12). – С. 13-19.
2. Диагностирование и прогнозирование технического состояния авиационного оборудования / Под ред. Синдеева И.М. – М.: Транспорт, 1984.
3. Рубцов Ю.Ф. Вибродиагностические экспертные системы // Приборы и системы. – 2000. – № 6. – С. 61-62.
4. Добролюбов И.П., Альт В.В., Савченко О.Ф. Измерительная экспертная система для определения технического состояния двигателей внутреннего сгорания // Приборы и системы управления. – 1998. – № 12. – С. 56-59.
5. <http://www.masters.donntu.edu.ua/2008/kita/prihodchenko/library/4.htm>.
6. <http://www.beintrend.ru/14>.
7. Блюмин С.Л., Шуйкова И.А., Сараев П.В. Нечеткая логика: алгебраические основы и приложения. – М.: ЛЭГИ, 2002. – 113 с.
8. Орлов А.И. Экспертные оценки: Учебное пособие. – М., 2002. – 32 с.
9. Петров С.Ю., Шифрин Б.М. Модель управления установкой для получения целлюлозы на основе нечеткой логики // Приборы и системы. Управление, контроль и диагностика. – 2002. – № 2. – С. 7-10.
10. Подиновский В.В., Ногин В.Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. – М.: Наука, 1982.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.Л. Беляков.

Усенко Ольга Александровна – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: Usenko_olga77@mail.ru; 347900, г. Таганрог, ул. Петровская, 81; тел.: 88634328025; кафедра микропроцессорных систем; к.т.н.; доцент.

Usenko Ol'ga Aleksandrovna – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: sergkmps@mail.ru; 81, Petrovsky, Taganrog, 347900, Russia; phone: +78634328025; the department of microprocessor systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 683.22.15

Н.Н. Кисель, С.Г. Грищенко, В.А. Черемисов

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЧАСТОТНО-СЕЛЕКТИВНЫХ
ПОВЕРХНОСТЕЙ НА ОСНОВЕ ЭЛЕМЕНТОВ В ВИДЕ КВАДРАТНЫХ
ДВОЙНЫХ РЕЗОНАТОРОВ**

Метаматериалы – это искусственные материалы, обладающие уникальными электрофизическими, радиофизическими и оптическими свойствами, отсутствующими в природных материалах. Они представляют собой набор элементов разнообразных форм, объединенных в периодические структуры. Необычайные их свойства обусловлены резонансным взаимодействием электромагнитной волны, распространяющейся в гетерогенной среде, наполненной включениями, которые имеют специальную форму, обеспечивающую резонансное возбуждение токов во включениях. Исследовано рассеяние плоской монохроматической волны на периодической решетке из квадратных двойных резонаторов. Показано, что в такой решетке наблюдается резонансное отражение падающей волны. Рассмотрено влияние геометрических размеров решетки (высота элементов и ширина разреза) на положение минимума коэффициента прохождения. Приведены результаты численного моделирования периодических структур с использованием пакета FEKO. Результаты представлены в виде обобщенных номограмм для периодических структур, расположенных в свободном пространстве и на подложке.

Метаматериал; частотно-селективная поверхность; периодические структуры.

N.N. Kisel', S.G. Grishchenko, V.A. Cheremisov

**RESEARCH OF CHARACTERISTICS OF FREQUENCY-SELECTIVE
SURFACES ON THE BASIS OF ELEMENTS IN THE FORM OF SQUARE
DOUBLE RESONATORS**

Metamaterials are artificial materials engineered to have properties that may not be found in nature. They are assemblies of multiple individual elements fashioned from conventional microscopic materials which it are usually arranged in periodic patterns. Unusual properties due to the resonant interaction of an electromagnetic wave propagating in a heterogeneous environment filled with inclusions, which have a special shape that provides a resonant excitation currents in the inclusions. Dispersion of a plane wave on a periodic structure from square double resonators is investigated. It is shown that in such structure resonant reflection of a falling plane wave is observed. Influence of the geometrical sizes of elements of structure (height of elements and section width) on the provision of a minimum of coefficient of transmission is considered. Results of numerical modeling of periodic structures with software FEKO use are given. Results are presented in the form of the generalized nomograms for the periodic structures located in a free space and on a dielectric substrate.

Metamaterial; frequency-selective surface; periodic structure.

Метаматериалы – это искусственные материалы со свойствами, которые невозможно реализовать для материалов, существующих в природе, представляющие упорядоченный набор элементов различной геометрии. Плотность располо-