

УДК 681.3

Н.Г. Ярушкина, В.В. Воронина, Т.В. Афанасьева

## ДИАГНОСТИКА УЗЛОВ ВЕРТОЛЕТА НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ГРАНУЛИРОВАННОГО ВРЕМЕННОГО РЯДА

**Ярушкина Надежда Глебовна**, доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе, заведующая кафедрой «Информационные системы» Ульяновского государственного технического университета. Имеет статьи, монографии в области интеллектуального анализа данных. [e-mail: jng@ulstu.ru].

**Воронина Валерия Вадимовна**, аспирант кафедры «Информационные системы» УлГТУ, окончила факультет информационных систем и технологий УлГТУ. Имеет статьи в области интеллектуальных систем хранения и обработки информации. [e-mail: vvsh85@mail.ru].

**Афанасьева Татьяна Васильевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Прикладная математика и информатика» УлГТУ. Имеет статьи, монографию в области интеллектуального анализа данных. [e-mail: tv.afanaseva@mail.ru].

### Аннотация

В данной работе рассматривается решение задачи диагностики узлов вертолета. Диагностика осуществляется путем анализа временных рядов (ВР) ключевых физических величин на основе экспертной базы правил, содержащей суждения о значимости тенденций изменения этих величин. Также в работе сформулированы экспертные правила для таких узлов вертолета, как силовая установка двигателя и главный редуктор.

Ключевые слова: диагностика, временной ряд, вертолеты, экспертная база правил.

**Nadezhda Glebovna Yarushkina**, Doctor of Engineering, Professor; Pro-Rector for Science; head of the Chair 'Information Systems' at Ulyanovsk State Technical University; author of articles and monographs in the field of intellectual analysis of data. e-mail: jng@ulstu.ru.

**Valeria Vadimovna Voronina**, post-graduate student at the Chair 'Information Systems' of Ulyanovsk State Technical University; graduated from the Faculty of Information Systems and Technology of Ulyanovsk State Technical University; author of articles in the field of intellectual systems for storage and processing of data. e-mail: vvsh85@mail.ru.

**Tatiana Vasilyevna Afanasyeva**, Candidate of Engineering, Associate Professor at the Chair 'Applied Mathematics and Information Science' of Ulyanovsk State Technical University; author of articles, a monograph in the field of intellectual analysis of data. e-mail: tv.afanaseva@mail.ru.

### Abstract

In the present paper the authors consider a solution to the problem of diagnostics of helicopter nodes. The diagnostics is carried out by analyzing time series of key physical quantities, based on an expert rulebase containing statements on the significance of trends of change of these variables. In the paper, some expert rules for the helicopter nodes such as a helicopter propulsion engine and main gearbox, are also formulated.

Key words: diagnostics, time series, helicopters, expert rulebase.

### ВВЕДЕНИЕ

На безопасность полетов вертолетной техники влияет множество факторов, от которых зависит уровень безопасности летательного аппарата. Среди них выделим ключевые факторы: надежность силовой установки двигателя и главного редуктора.

Физические величины, измерение которых необходимо для выявления отклонений в функционировании ключевых факторов, представлены в таблице 1.

Агрегаты вертолета имеют ограниченный ресурс и эксплуатируются до выработки заранее определенного

его объема. По достижении этого объема происходит их замена или плановый технический осмотр. Однако отказ оборудования может наступить и до проведения регламентных работ.

Для повышения безопасности полетов необходим дополнительный инструмент, который может не только оценивать текущий уровень безопасности (средства интерпретации), но и прогнозировать его изменения (средства прогнозтики) между техническими осмотрами, а также формировать своевременные рекомендации (рекомендательные средства) с целью предотвращения критических ситуаций.

Таблица 1

Контролируемые физические величины для задачи диагностики

Физический параметр	Главный редуктор, допустимый диапазон	Силовая установка, допустимый диапазон
Крутящий момент двигателя, %		0 – 128
Температура выхлопных газов двигателя, °С		0 – 1000
Температура масла в двигателе, °С		-50 – 200
Давление масла в двигателе, кг/см <sup>2</sup>		0 – 8
Температура масла главного редуктора, °С	-50 – 150	
Давление масла главного редуктора, кг/см <sup>2</sup>	0 – 8	

В качестве такого инструмента предлагается использовать авторскую экспертную систему (ЭС), реализующую диагностику узлов вертолета по временным рядам изменения их ключевых физических величин с привлечением экспертных оценок значений и тенденций.

#### ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЭКСПЕРТНЫХ ОЦЕНОК ЗНАЧЕНИЙ И ТЕНДЕНЦИЙ

Экспертная оценка некоторой величины, описывающей отдельное состояние процесса, системы, объекта, полученная в некоторый момент времени, является по существу качественной интервальной оценкой локального состояния. Упорядоченная во времени последовательность таких оценок состояний системы и объектов представляет собой временной ряд экспертных оценок. Характерной особенностью такого ВР является нечеткость его значений, вытекающая из природы экспертных оценок, поэтому такой ВР относится к классу *нечетких временных рядов (НВР)*.

**Определение 1.** *Нечетким временным рядом [1] называют упорядоченную в равноотстоящие моменты времени последовательность наблюдений над некоторым процессом, состояния которого изменяются во времени, если значение состояния процесса в момент  $t_i$  может быть выражено с помощью нечеткой метки  $\tilde{x}_i$ .*

Согласно определению нечеткой тенденции [1], каждая нечеткая тенденция  $\tau_k$  НВР  $\tilde{Y} = \{t_i, \tilde{x}_i\}, i \in [1, n]$ ,  $\tilde{x}_i \in \tilde{X}$  может быть представлена нечеткой меткой, выражающей характер поведения НВР.

В результате анализа уровня безопасности узлов вертолета необходимо присвоить нечеткую метку значениям ключевых физических величин и их тенденциям. Основная задача в данном случае оценить опасность значения и тенденции того или иного показателя. Для этих целей воспользуемся специальной *ACL-шкалой (Absolute&Comparative Linguistic)* [2]. Абсолютные оценки (метки), полученные по *ACL-шкале*, соответствуют нечетким оценкам значений, а сравнительные оценки – нечетким тенденциям.

Таким образом, задача состоит в преобразовании исходного ВР значений отдельной физической величины в НВР нечетких меток (экспертных оценок) с помощью *ACL-шкалы* и погружении их в базу знаний ЭС.

Представим правила базы знаний ЭС в виде:  
«Если значение величины  $A$  и тенденция  $B$ , то это позволяет говорить о ...».

В данном случае литера  $A$  обозначает экспертную оценку величины (например, «большое значение» или «малое значение»), а  $B$  – характеристику тенденции. В характеристику тенденции в данном случае включается ее направление (рост, спад), ее интенсивность (малая, большая) и ее длительность (короткая, средняя). Тогда каждая точка ВР будет включена в более высокий уровень абстракции – тенденцию определенного направления, длительности и интенсивности. Если мы говорим, что объектом анализа становятся не конкретные значения показателей, а тенденции их изменения, это означает облачение данных в новую форму представления знаний – гранулы.

#### ГРАНУЛЯРНАЯ МОДЕЛЬ ВРЕМЕННОГО РЯДА ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Понятие нечеткой информационной грануляции впервые было предложено Заде [3]: «Грануляция объекта  $A$  ведет к помещению вместе (в одну гранулу) объектов, имеющих какое-либо сходство между собой (например, схожее функциональное назначение). В основе теории нечеткой информационной грануляции (TFIG – Theory of Fuzzy Information Granularity) лежат человеческие способности обобщения (грануляции) информации и рассуждения с помощью обобщений (гранул). TFIG формируется на базе существующего оборудования нечеткой информационной грануляции в нечеткой логике, но передает это значительно более высокому уровню общности, укрепляет свои основания и предлагает новые направления. ГрВ – расширенный набор теории нечеткой информационной грануляции, теории грубых множеств и интервальных вычислений и, кроме того, подмножество гранулярной математики».

Гранулы построены и определены, основываясь на понятии обобщенных ограничений.

Для формирования гранул сформулируем следующие ограничения. Определим исходный ВР, на котором будет происходить грануляция как совокупность объектов:

$$TS = \{O_1 \dots O_N\}, \quad (1)$$

где  $TS$  – временной ряд,

$O_i$  – элемент временного ряда.

Каждый объект  $O_i$ , точка ВР, может быть представлен парой характеристик:

$$O_i = [t_i, V_{t_i}], \quad (2)$$

где  $t_i$  – момент времени  $i$ -й точки ряда,

$V_{t_i}$  – значение наблюдаемой величины в данный момент времени.

Тогда, исходя из теории гранулярных вычислений, необходимо определить ограничения на эти характеристики, на основе которых будет происходить помещение объектов в гранулы.

**Ограничение 1.** Неразрывность времени. Так как основной характеристикой любого ВР является упорядоченность элементов во времени, то при помещении объектов в гранулу должна соблюдаться данная упорядоченность. То есть, пусть на исходном ВР определена гранула  $A_{TS}$ , тогда для объектов  $O_1, O_2, O_3$  должно выполняться следующее условие: если  $t_1 < t_2 < t_3$  и  $O_1 \in A_{TS}$  и  $O_3 \in A_{TS}$ , тогда  $O_2 \in A_{TS}$ .

Следующее ограничение будет зависеть от характера ряда, а точнее от того, имеет ли ряд выраженную сезонность или нет. Поэтому разобьем его на два.

**Ограничение 2.1.** (Для рядов, обладающих выраженной сезонностью). Ограничение окна шириной  $k$ . Для рядов с выраженной сезонностью можно ввести разбивку на последовательные промежутки шириной  $k$ , где  $k$  – длительность минимального сезонного периода. Тогда все точки, входящие в этот промежуток, будут отнесены к одной грануле.

**Ограничение 2.2.** (Для рядов, не обладающих выраженной сезонностью). Сохранение направления изменения. Пусть на исходном ВР определены гранулы  $A_{TS}$  и  $B_{TS}$ . Если наблюдаем одну из следующих ситуаций:

$$1. V_{t_1} > V_{t_2} \text{ и } V_{t_2} < V_{t_3}, \quad (3)$$

$$2. V_{t_1} = V_{t_2} \text{ и } V_{t_2} \neq V_{t_3}, \quad (4)$$

$$3. V_{t_1} < V_{t_2} \text{ и } V_{t_2} > V_{t_3}, \quad (5)$$

$$4. V_{t_1} \neq V_{t_2} \text{ и } V_{t_2} = V_{t_3}, \quad (6)$$

то  $O_1 \in A_{TS}$ ,  $O_3 \in B_{TS}$ ,  $O_2 = A_{TS} \cap B_{TS}$ . Объект  $O_2$  в данном случае будет точкой пересечения гранул  $A_{TS}$  и  $B_{TS}$ , и, во избежание неоднозначности, примем, что объект будет принадлежать грануле  $A_{TS}$ .

Направление изменения величины может быть либо в сторону уменьшения, либо в сторону увеличения, либо отсутствовать. Следует заметить, что данная модель может быть определена не только для четкого ВР исследуемой величины. Значения  $Vt$  могут быть выражены в лингвистической форме, то есть область значения величины  $Vt$  может быть совокупностью нечетких множеств (меток):

$$\sim V_{\mu} = \{(\sim V_{t_1}, \mu_1) \dots (\sim V_{t_N}, \mu_N)\}, \quad (7)$$

где  $\sim V_{t_i}$  – нечеткая метка,

$\mu_i$  – степень принадлежности значения исходного ряда данной метке.

Тогда для ограничения 2 на  $\sim V_{\mu}$  определяются нечеткие отношения ( $\sim <$ ,  $\sim >$ ,  $\sim =$ ). Тогда выделенные на исходном ВР промежутки сохранения направления изменения величины будут определять гранулы.

Полученные гранулы исходного ВР можно представить в виде пары:

$$G_{TS} = (\Delta t, T * dif), \quad (8)$$

где  $T$  – направление изменения ( $-1$  – уменьшение,  $1$  – увеличение,  $0$  – отсутствует);

$\Delta t$  – длительность промежутка времени сохранения изменения;

$dif$  – степень изменения величины на данном отрезке времени.

Любая пара  $G_{TS}$  может быть вербализована, используя метку на естественном языке. Таким образом, гранулированный ВР может быть определен как упорядоченная во времени последовательность нечетких меток, где нечеткое множество характеризуется временным интервалом и значениями временного ряда, вошедшими в данный интервал. Примеры меток: «короткий интенсивный спад», «длительный незначительный рост» и т. д. Формально модель вербализованной гранулы ВР будет иметь вид:

$$G_{TS}^V = (\sim Trend, \sim t, \sim Intens), \quad (9)$$

где  $\sim Trend$  – лингвистическая оценка характера изменения исходного ВР;

$\sim t$  – нечеткое значение промежутка времени, на котором наблюдалось изменение;

$\sim Intens$  – лингвистическая оценка интенсивности изменения величины на данном отрезке времени.

Каждая гранула  $G_{TS}^V$  может быть определена также как множество объектов  $\{O_1 \dots O_N\} \in TS$ . Тогда гранулированный ВР  $TS^G$  – упорядоченная во времени совокупность множеств  $\{G_{TS(1)}^V \dots G_{TS(N)}^V\}$ .

В общем случае правило экспертной базы можно описать как модель:

$$R = (Vh = \{A, T, D, I\}, Vih = \{O\}), \quad (10)$$

где  $Vh$  – подмножество, описывающее условие;

$A$  – нечеткая метка, характеризующая величину;

$T$  – направления тенденции;

$D$  – лингвистическое выражение длительности;

$I$  – лингвистическое выражение интенсивности;

$Vih$  – подмножество, описывающее результат;

$O$  – лингвистическое выражение результата.

Если же мы применяем гранулы, то модель экспертного правила можно переписать в виде:

$$R = (Vh = \{A, G\}, Vih = \{O\}). \quad (11)$$

Тогда применительно к задаче характеристики ряда в терминах экспертной базы правил необходимо привязать семантическую интерпретацию каждой из возможных гранул.

#### АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ ГРАНУЛИРОВАННОГО ВРЕМЕННОГО РЯДА

Используем гранулированный ВР для решения задачи диагностики узлов вертолета по ключевым физическим параметрам.

*Первый шаг* в достижении поставленной цели – формализация экспертных знаний относительно рассматриваемых физических величин. Для оценки уровня значения показателя эксперт выделил 5 понятий (нечетких множеств)  $A = \{\text{«Очень мало»}, \text{«Мало»}, \text{«Нормально»}, \text{«Велико»}, \text{«Опасно велико»}\}$ . В таблице 2 представлены виды функций принадлежности и значения их коэффициентов для каждой из описанных выше физических величин.

*Второй шаг* – определить значимые виды тенденций и их интенсивности. В нашем случае это будет  $T = \{\text{«Рост»}, \text{«Стабильность»}, \text{«Спад»}\}$  и  $I = \{\text{«Малая»}, \text{«Средняя»}, \text{«Большая»}\}$  соответственно.

*Третий шаг* – определить список понятий для характеристики длительности сохранения тенденции. В нашем случае это будет  $D = \{\text{«Короткий»}, \text{«Средний»}, \text{«Длительный»}\}$ . Время измеряется в секундах. Коэффициенты функций принадлежности этих нечетких множеств будут следующими:

Короткий –  $a < 0; b = 0; c = 5;$

Средний –  $a = 4; b = 6; c = 10;$

Длительный –  $a = 9; b = 14; c > 16.$

*Четвертый шаг* – определить правила для оценки корректности работы узла. По сути это будет оцен-

ка того, насколько опасна наблюдаемая ситуация. Для оценки ситуации будем использовать следующие понятия  $E = \{\text{«Нормально»}, \text{«Возможно, опасно»}, \text{«Опасно»}, \text{«Очень опасно»}\}$ . Правила в данном случае будут иметь вид:

*«Если наблюдается (прогнозируется) значение показателя  $A_i$  и наблюдается (прогнозируется) тенденция  $T_j$  с интенсивностью  $I_k$  и длительностью  $D_l$ , то ситуация следует расценивать как  $E_r$ ».*

Тогда, параметры  $B$  и  $C$  для какой-либо величины:

$G1 = \text{«Длительная стабильность»}$  или  $G2 = \text{«Средняя стабильность»}$  при величине «Опасно велико» или «Опасно мало». Частое появление гранул  $G3 = \text{«Короткий интенсивный рост»}$  или  $G4 = \text{«Короткий интенсивный спад»}$  при величине «Нормально» или  $G5 = \text{«Короткий малый рост»}$  при величине «Велико» или  $G6 = \text{«Короткий малый спад»}$  при величине «Мало».

Правая часть правил в данном случае будет характеризовать уровень опасности  $D$  как:  $G1 \Rightarrow \text{«Опасно»}, G2, G3, G4, G5, G6 \Rightarrow \text{«Возможно, опасно»}.$

Таким образом, алгоритм диагностики узлов вертолета на основе модели гранулированного ВР будет представлять собой последовательность следующих шагов:

1. Получение информации о значениях ключевых физических величин после прогона (полета) машины.
2. Формирование ВР для каждой из этих величин.
3. Переход к гранулированному ВР.
4. Определение корректности работы узлов. Корректной будем считать работу в том случае, если ни одна из величин не попала в ситуацию опасности.
5. Если на некорректность работы указывают менее чем 5% величин, то необходимо повторное тестирование. Иначе необходимо провести технический осмотр проблемного узла.

Таблица 2

Экспертные оценки физических величин

Физический параметр	Границы диапазона	Опасно мало	Мало	Нормально	Велико	Опасно велико
Крутящий момент двигателя, град	0 – 128			$a < 0$ $b = 60$ $c = 65,5$	$a = 65$ $b = 75$ $c = 88,6$	$a = 88,5$ $b = 90$ $c > 128$
Температура вых. газов двигателя, °С	0 – 1000			$a, b < 0$ $c = 560$ $d = 600,5$	$a = 600$ $b = 700$ $c = 720,5$	$a = 720$ $b = 800$ $c > 1000$
Температура масла в двигателе, °С	-50 – 200	$a < -60$ $b = -50$ $c = -40$	$a = -39,9$ $b = -30$ $c = -5$	$a = -4,9$ $b = 80$ $c = 110,1$	$a = 110$ $b = 115$ $c = 120,1$	$a = 120$ $b = 150$ $c > 200$
Давление масла в двигателе, кг/см <sup>2</sup>	0 – 8	$a < 0$ $b = 1$ $c = 2$	$a = 1,99$ $b = 2,2$ $c = 2,5$	$a = 2,45$ $b = 3$ $c = 4,05$	$a = 4$ $b = 4,2$ $c = 4,55$	$a = 4,5$ $b = 5$ $c > 8$
Температура масла главного редуктора, °С	-50 – 150	$a < -60$ $b = -50$ $c = -40$	$a = -39,9$ $b = -30$ $c = -15$	$a = -14,9$ $b = 60$ $c = 70,1$	$a = 70$ $b = 80$ $c = 90,1$	$a = 90$ $b = 100$ $c > 150$
Давление масла главного редуктора, кг/см <sup>2</sup>	0 – 8	$a < 0$ $b = 1$ $c = 2$	$a = 1,99$ $b = 2,2$ $c = 3,5$	$a = 3,45$ $b = 4$ $c = 4,55$	$a = 4,55$ $b = 5$ $c = 7,55$	$a = 7,5$ $b = 7,8$ $c > 8$

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА**

Метод реализован в виде web-сервиса и интегрирован в систему анализа данных о состоянии узлов вертолета. Эта система представляет собой локальное приложение, для своей работы от пользователя требует файл с данными о значениях физических величин, полученными после полета (прогона) машины. В результате выдается файл с отчетом о корректности/некорректности работы описанных выше узлов. Система является настраиваемой и позволяет конфигурировать параметры ACL-шкал оценок физических величин и длительностей сохранения тенденций в зависимости от эксперта.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Разработанная ЭС для целей диагностики таких узлов вертолетной техники, как двигатель и главный редуктор, основана на гранулярном представлении ВР физических параметров, учитывающих оценки их нечетких тенденций. Такое представление позволяет оперировать экспертными оценками и генерировать результаты диагностики в лингвистической форме. Экспериментальная проверка работоспособности ЭС на приведенных примерах показала, что она безошибочно диагностирует опасные ситуации. Это позволяет сделать вывод о полезности разработанной экспертной системы при решении задач повышения уровня безопасности вертолетной техники.

Таблица 3

Результаты экспериментов с системой

Номер ряда	Бортовой номер	Время прогона	Дефект в двигателе	Дефект в главном редукторе	Заключение системы
1	210111	3614	Нет	Нет	Норма
2	240111	4199	Нет	Нет	Норма
3	250111	1061	Нет	Нет	Норма
4	000	3614	Да	Нет	Возможно, опасно
5	000	4199	Нет	Да	Возможно, опасно
6	000	1061	Да	Да	Опасно
7	000	3614	Да	Нет	Возможно, опасно
8	000	4199	Да	Да	Опасно
9	000	1061	Нет	Да	Возможно, опасно
10	000	3614	Да	Нет	Возможно, опасно
11	000	4199	Нет	Да	Возможно, опасно
12	000	1061	Да	Да	Опасно

В ходе исследования был проведен ряд экспериментов. Были взяты данные о тестовом прогоне трех машин, а также искусственно сгенерировано несколько рядов, моделирующих работу машин с дефектом. Задача системы была определить, какие из машин работают некорректно, и в чем именно данная некорректность состоит. Результаты экспериментов представлены в таблице 3.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Ярушкина Н.Г. Основы теории нечетких и гибридных систем. – М. : Финансы и статистика, 2004. – 320 с.
2. Афанасьева Т.В., Ярушкина Н.Г. Нечеткое моделирование временных рядов и анализ нечетких тенденций. – Ульяновск : УлГТУ, 2009. – 299 с.
3. Zadeh Lotfi A. Toward a theory of fuzzy information granulation and its centrality in human reasoning and fuzzy logic // Fuzzy Sets and Systems. – 1997. – Vol. 90. – pp. 111–127.