

УДК 004.942

Н.Г. Ярушкина, В.В. Воронина, Е.Н. Эгов

## ПРИМЕНЕНИЕ ЭНТРОПИЙНОЙ МЕРЫ В ДИАГНОСТИКЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ

**Ярушкина Надежда Глебовна**, доктор технических наук, профессор, первый проректор – проректор по научной работе Ульяновского государственного технического университета. Окончила радиотехнический факультет Ульяновского государственного технического университета. Имеет более 250 работ в области мягких вычислений, нечеткой логики, гибридных систем. [e-mail:jng@ulstu.ru].

**Воронина Валерия Вадимовна**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные системы» Ульяновского государственного технического университета. Окончила факультет информационных систем и технологий УлГТУ. Имеет статьи в области интеллектуального анализа временных рядов. [e-mail: vvsh85@mail.ru].

**Эгов Евгений Николаевич**, ассистент кафедры «Информационные системы» Ульяновского государственного технического университета. Окончил факультет информационных систем и технологий Ульяновского государственного технического университета. Имеет статьи в области интеллектуальных информационных систем. [e-mail:e.egov@ulstu.ru].

### Аннотация

В статье рассматривается способ диагностики временных рядов (ВР) на основе меры неопределенности временного ряда. Определена формула нахождения меры энтропии для нечеткого временного ряда (НВР). Основным интересом представляет собой алгоритм нахождения меры энтропии для нечеткого временного ряда. Разработана модель экспертного правила диагностики агрегатов летательных аппаратов. Построены модели поведения таких объектов, как главный редуктор и силовая установка двигателя вертолета. С помощью анализа качества построенных моделей проведена интерпретация данных натурального эксперимента с целью диагностики работы узлов вертолета. Разработан комплекс программ для математического моделирования и прогнозирования поведения агрегатов летательных аппаратов на основе меры неопределенности нечеткого временного ряда.

В ходе выполнения экспериментов модель показала высокую точность определения характеристик временного ряда и выявления опасных участков. Разработанный алгоритм может применяться для диагностики и прогнозирования временных рядов.

Статья рассчитана на специалистов, диагностирующих технические системы.

Ключевые слова: мера энтропии, диагностика, временные ряды.

## ENTROPY APPLICATION TO THE DIAGNOSIS OF TECHNICAL TIME SERIES

**Nadezhda Glebovna Yarushkina**, Doctor of Engineering, Professor, First Vice-Rector – Vice-Rector for Science of Ulyanovsk State Technical University; graduated from the Faculty of Radioengineering of Ulyanovsk State Technical University; an author of more than 250 papers in the field of soft computing, fuzzy logic, and hybrid systems. e-mail: jng@ulstu.ru.

**Valeriia Vadimovna Voronina**, Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of Information Systems at Ulyanovsk State Technical University; graduated from the Faculty of Information Systems and Technologies of Ulyanovsk State Technical University; an author of articles in the field of intellectual analysis of time series. e-mail: vvsh85@mail.ru.

**Evgenii Nilolaevich Egov**, Assistant at the Department of Information Systems at Ulyanovsk State Technical University; graduated from the Faculty of Information Systems and Technologies of Ulyanovsk State Technical University; an author of articles in the field of intelligent information systems. e-mail: e.egov@ulstu.ru.

## Abstract

The article deals with the method for time series diagnosis based on the measure of the time series uncertainty. The formula for finding the measure of entropy for fuzzy time series is determined. The algorithm for finding the measure of entropy for fuzzy time series is of particular interest. A model of expert diagnostic rules for aircraft accessories is developed. The models of the behavior of objects such as the main gearbox and power plant engine helicopter are offered. Interpretation of natural experiment for the purpose of diagnosis of helicopter units held by analyzing the quality of the built models. A set of programs for mathematical modeling and predicting the behavior of aircraft accessories based on fuzzy measure of the uncertainty of the time series is developed.

The model showed high accuracy in determining the characteristics of the time series and the identification of dangerous areas while experimenting. The developed algorithm can be successfully applied for the diagnosis and prediction of time series.

This article is intended for specialists diagnosing technical systems.

Key words: measure of entropy, diagnosis, time series.

## ВВЕДЕНИЕ

Обычно состояние технической системы характеризуется набором параметров, описывающих поведение объекта. Анализ поведения технической системы может быть представлен в виде изменения во времени значений этих параметров. Изменения параметров во времени представляются во временных рядах. Через анализ временных рядов этих параметров можно проводить моделирование поведения объекта. При этом особое внимание следует уделять динамике поведения этих параметров. Внимание следует уделять тенденциям длительного роста (спада) или длительной стабильности определенного показателя, если его значение велико или слишком мало. Также важны моменты, когда тенденция параметра приходит в неустойчивое состояние. Подобные участки могут указывать на сбой в работе технической системы. Все данные о поведении параметров, в том числе и о длительности сохранения тенденции, выражаются в лингвистической форме.

В направлении Time-Series DataMining сложились альтернативные классическим методы анализа ВР. Основными методами этого направления являются, во-первых, моделирование и анализ процессов, характеризующихся большой степенью неопределенности (в том числе «нестохастической»). Во-вторых, методы этого направления нацелены на выявление скрытых закономерностей и извлечение новых знаний из ВР. Данное направление не является до конца сформированным, оно обозначено и в основном развивается в научных трудах иностранных ученых, таких как К. Сонг, Я. Капржик, В. Новак, В. Педрич, И. Перфильева и др. Среди отечественных ученых разработки в рамках данного направления ведут И. Батыршин, С. Ковалев, К. Дегтярев, Н. Ярушкина [1].

Основным понятием, связанным с направлением Time-Series DataMining, является понятие нечеткого временного ряда. НВР – упорядоченная во времени последовательность наблюдений над некоторым процессом, состояния которого изменяются во времени, при этом значение состояния процесса в некий момент времени может быть выражено с помощью нечеткой метки. К задачам анализа НВР относятся выявление общей тенденции ряда, прогноз следующей нечеткой метки и оценка уровней ряда в некий момент времени [2].

Нередко возникают ситуации, когда требуется оценить тенденцию изменения НВР на некотором промежутке времени, причем протяженность данного промежутка задается лингвистически («длинный», «короткий» и т.д.). В таком случае ряд будет иметь нечеткость не только по шкале значения, но и по шкале времени. Такого рода задачи возникают, когда необходимо применить экспертные знания о тенденциях изменения значений показателей при анализе НВР в экспертных системах или смоделировать работу системы в некоторых условиях путем применения «если-то» правил.

При этом любое изменение в поведении системы можно рассмотреть с точки зрения изменения ее меры неопределенности или меры энтропии. Так, если значение параметра системы на временном ряду будет колебаться около какого-то значения, то логично ожидать, что мера неопределенности этого ряда будет стремиться к нулю. И в обратную сторону, если будет наблюдаться резкое изменение параметра на временном ряду, то мера неопределенности этого ряда устремится в бесконечность.

## 1 Постановка задачи и алгоритм решения

В последнее время в связи с увеличением количества авиационной техники (АТ) с большим эксплуатационным периодом требуется уделять большое внимание надежности летательных аппаратов.

На безопасность полетов влияет множество факторов. На некоторые из этих факторов, такие как неблагоприятное стечение обстоятельств, нельзя ни повлиять, ни предугадать их влияние, однако некоторые факторы (состояние систем аппарата) допускают прогнозирование и, следовательно, снижение негативного влияния.

В настоящее время на все летательные аппараты устанавливаются системы контроля технического состояния. Рассмотрим задачу оценки технического состояния вертолета с целью снижения вероятности отказа оборудования.

Для осуществления полетов используется только авиатехника, находящаяся в исправном состоянии. При этом исправным считают аппарат, состояние которого соответствует всем требованиям конструкторской и нормативно-технической документации.

Так как проведение техосмотра – процесс трудоемкий и длительный, экспертная система может значительно облегчить и ускорить его за счет дополнительного анализа полученных показаний с датчиков перед предъявлением их эксперту.

Основная задача анализа – дать оценку значениям показателей и их тенденциям. Необходимо оценить опасность значения и тенденции того или иного показателя. Наличие опасных значений и тенденций может говорить о том, что узел ведет себя некорректно и, возможно, не стоит выпускать борт в рейс или же нужно принять решение о его повторном тестировании.

Применительно к авиационной технике все неисправности можно разделить на два вида: повреждение и отказ.

Повреждение – это нарушение исправного состояния объекта при сохранении его работоспособного состояния. По степени тяжести повреждения можно разделить на существенные и несущественные. Несущественные повреждения в конечном итоге могут привести к нарушению работоспособного состояния авиационной техники – отказу.

Отказ авиационной техники – это нарушение работоспособного состояния объекта (АТ). Если при рабочей эксплуатации объекта его работоспособное состояние характеризуется совокупностью значений нескольких технических параметров, тогда признаком возникновения отказа является выход значения любого из этих параметров за пределы допустимых ограничений.

По теории надежности все отказы АТ можно разделить на две группы:

1) отказы как следствие дефектов конструкции, ошибок в эксплуатационной документации, технологии производства;

2) отказы как следствие разброса характеристик комплектующих элементов в пределах установленных на них допусков или же как случайное неблагоприятное сочетание режимов эксплуатации.

Отказы АТ можно классифицировать следующим образом:

*По причинам возникновения:*

- конструктивные отказы – отказы, вызванные ошибками, допущенными при проектировании изделия, неточным учетом фактических условий работы изделия в процессе эксплуатации и др.;

- производственные отказы – отказы, вызванные несовершенством технологического процесса изготовления изделия или его нарушением, ошибками в организации метрологического обеспечения процессов производства и др.;

- эксплуатационные отказы – отказы, вызванные нарушением условий установленных эксплуатационных режимов изделий.

*По характеру изменения показателя качества изделия АТ:*

- внезапные отказы – отказы, характеризуемые скачкообразным изменением показателей одного или нескольких параметров изделия АТ;

- постепенные отказы – отказы, характеризуемые постепенным (медленным) изменением значений показателей одного или нескольких параметров изделия АТ. Причинами возникновения постепенных отказов АТ могут служить:

а) процесс старения элементов конструкции – постепенное изменение свойств материалов во времени;

б) износ – процесс постепенного изменения материала при трении;

в) процесс усталости элементов конструкции – процесс постепенного накопления повреждений материала.

*По характеру устойчивости неработоспособного состояния:*

- устойчивые отказы;

- перемежающиеся отказы;

- сбои.

*По возможности последующего использования изделия АТ:*

- полные отказы – неспособность изделия выполнять свои функции;

- частичные отказы – утрата только части функционала изделия.

*По наличию внешних проявлений отказа:*

- явный отказ;

- скрытый отказ.

*По возможности и целесообразности устранения отказа:*

- устранимые отказы;

- неустранимые отказы.

*По взаимной зависимости друг от друга:*

- независимые отказы – не зависит от других отказов;

- зависимые отказы – отказы, обусловленные отказом другого изделия или элемента.

*По степени влияния на безопасность полета:*

- отказы, приводящие к возникновению катастрофической ситуации;

- отказы, приводящие к возникновению аварийной ситуации;

- отказы, приводящие к возникновению сложной ситуации;

- отказы, приводящие к усложнению условий дальнейшего продолжения полета.

*По характеру выявления средствами информационно-измерительного контроля:*

- контролируемый отказ;

- неконтролируемый отказ.

На борту вертолета большое количество различных механических узлов и агрегатов, подверженных отказу. Контроль над всеми этими узлами и агрегатами вести невозможно, поэтому необходимо выделить основные из них.

В качестве основных элементов конструкции, требующих дополнительного контроля над своим состоянием в процессе эксплуатации, можно выделить два элемента:

- главный редуктор;

- силовая установка двигателя.

Для выявления возможных функциональных отказов и характера их проявления приводится описание функционирования каждого из элементов.

Главный редуктор предназначен для передачи крутящего момента от двигателей к несущему винту вертолета и для привода агрегатов, стоящих на редукторе. Снижение частоты вращения в главном редукторе достигается применением трех ступеней редукции. Редуктор состоит из следующих основных частей: привода вала несущего винта, вала несущего винта, привода рулевого винта и приводов агрегатов, картера, двух муфт свободного хода, трех магнитных пробок и масломерных стекол. Система смазки главного редуктора обеспечивает подачу масла под давлением к подшипникам и зубчатым колесам, их смазку, охлаждение и вынос продуктов изнашивания из редуктора.

В состав силовой установки вертолета входят два турбовальных двигателя. Особенностью конструкции двигателя является наличие свободной турбины, кинематически не связанной с ротором турбокомпрессора двигателя. Конструктивно двигатель состоит из следующих составных частей: приводов вспомогательных устройств, топливной системы, осевого компрессора, камеры сгорания, выхлопного устройства, системы отбора воздуха, системы запуска.

Для редуктора и силовой установки можно выделить список отказов и физические величины, которые их обозначают. Для главного редуктора это разрушение или износ масляного фильтра, а также разрушение или износ его деталей и узлов, которые возможно отследить по величине температуры и давления масла.

В список возможных причин отказов силовой установки можно внести следующие: разрушение или износ деталей и узлов свободной турбины, нелокализованное разрушение двигателя, разрушение стартера, выключение двигателя, разрушение или износ деталей и узлов турбокомпрессора, разрушение маслоагрегата двигателя. Эти отказы связаны с показаниями таких физических величин, как крутящий момент, температура выхлопных газов, температура масла на входе, давление масла.

В комплект летательного аппарата входят датчики, которые отслеживают значения выделенных физических величин и показания с которых можно легко получить для анализа. При корректной работе системы значения этих величин должны быть в допустимых пределах. Если вдруг значение какого-то показателя выходит за эти границы или же оно находится у одной из границ и наблюдается устойчивый рост (или спад) значения, то это может говорить об опасной ситуации при дальнейшей эксплуатации того или иного элемента. В таблице 1 представлен список физических величин с нормативными показателями, позволяющими судить о состоянии того или иного элемента.

Через меру неопределенности возможно провести диагностику временных рядов для выявления в них аномалий и

опасных тенденций.

Самой известной формулой нахождения энтропии является формула Шеннона [3]. Он предложил уравнение, напоминающее классическое выражение энтропии, найденное Больцманом.

$$H = \sum P_i \log_2 1/P_i = - \sum P_i \log P_i, \quad (1)$$

где  $P_i$  – вероятность наступления  $i$ -го события.

Энтропия Шеннона количественно характеризует достоверность информации и используется для расчета количества информации.

При анализе временных рядов количественной характеристики недостаточно, так как требуется оценивать изменчивость ряда во времени. Для определения этой изменчивости пользуются формулой расчета энтропии Колмогорова-Синяя [4].

$$h = \lim_{\substack{d(0) \rightarrow 0 \\ t \rightarrow \infty}} \frac{\ln [d(t)/d(0)]}{t}, \quad (2)$$

где  $d(t) = |x_2(t) - x_1(t)|$ ,  $x_2(t)$ ,  $x_1(t)$  – траектории фазовых точек  $x_2, x_1$ .

Величина  $h$  называется **энтропией Колмогорова-Синяя** или **КС-энтропией**. Используя КС-энтропию, можно определить, каким является исследуемый ряд – хаотическим или регулярным. В частности, КС-энтропия будет равна нулю ( $h = 0$ ), если динамика системы является периодической или квазипериодической, так как с течением времени расстояние  $d(t)$  не возрастает. Если динамика системы хаотична, то КС-энтропия больше нуля ( $h > 0$ ) [5].

Поскольку беспорядок есть понятие теории информации, то КС-энтропию, показывающую, насколько система хаотична, тоже можно определить через понятие энтропии Шеннона: **это средняя скорость потери информации о состоянии динамической системы с течением времени**.

Данные алгоритмы нахождения меры неопределенности временного ряда хорошо работают на обычных рядах, но не могут быть применены к нечетким временным рядам, поскольку в них вместо числовых значений находятся лингвистические значения в виде нечетких меток. Поэтому для определения меры энтропии НВР необходимо разработать новый алгоритм.

Таблица 1

Ключевые физические величины

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

За основу вычисления алгоритма меры потери информации для НВР будет взята основная формула для расчета энтропии – формула Шеннона. В качестве вероятности будет определяться статистическая вероятность принадлежности следующей точки временного ряда одной из нечетких меток. Причем эта вероятность будет зависеть от того, какой нечеткой метке принадлежит текущая точка временного ряда. Для этого необходимо создать матрицу для хранения информации о том, к какой метке относилась предыдущая точка временного ряда и к какой метке относится текущая точка. По строкам этой матрицы предполагаются нечеткие метки, к которым относится предыдущая точка, по столбцам – нечеткие метки для текущей точки. На пересечении столбца и строки располагается число, обозначающее, сколько раз встречалась ситуация «предыдущая нечеткая метка – текущая нечеткая метка». Учитывая зависимость новой точки от значения предыдущей точки, вероятность принадлежности точки какой-то метке должна определяться как совмещенная вероятность того, что предыдущая точка принадлежит какой-то метке. В результате формула нахождения вероятности будет следующей:

$$H = \sum P_A P_B \log(P_A P_B), \quad (3)$$

где  $P_A$  – статистическая вероятность принадлежности предыдущей точки некоторой метке;

$P_B$  – статистическая вероятность принадлежности текущей точки к некоторой метке, если предыдущая точка принадлежала нечеткой метке.

Как отмечалось ранее, просто иметь количественную характеристику меры энтропии недостаточно, чтобы делать выводы о поведении временного ряда. Для этого нужно отслеживать динамику изменения меры энтропии. И здесь можно выделить ряд особенностей:

1. Если мера энтропии на протяжении всего ряда выдает высокие значения и предел от этой меры стремится к бесконечности, то такой ряд будет хаотическим.

2. Если предел меры энтропии ряда будет стремиться к 0, то такой ряд имеет длительное стабильное значение, т.е. все точки ряда или отрезка ряда относятся к одной нечеткой метке.

3. Если на каком-то коротком отрезке временного ряда значение меры энтропии резко изменится, после чего вновь вернется в стабильное положение (предел снова будет стремиться к 0), то можно делать выводы о том, что новые точки имеют другую нечеткую метку по сравнению с предыдущими. Причем это может быть кратковременная смена нечеткой метки с последующим возвратом к старой метке (т. е. последующие точки будут иметь ту же метку, что и прежние точки, до «всплеска»), либо все последующие точки на длительном интервале временного ряда будут принадлежать новой метке.

Второй вариант получения энтропии базируется на функции принадлежности точки ряда к нечеткой метке [6].

$$d(\tilde{A}) = H(\tilde{A}) + H(\tilde{A}^c), \quad (4)$$

где

$$H(\tilde{A}) = -K \sum_{i=1}^n \mu_{\tilde{A}}(x_i) \ln(\mu_{\tilde{A}}(x_i)), \quad (5)$$

где  $K$  – положительная константа;

$H(\tilde{A}^c)$  – дополнение  $A$ .

Функция принадлежности может высчитываться по-разному, в зависимости от варианта преобразования временного ряда в нечеткий временной ряд. Например, при фаззификации функция принадлежности задается по формулам. Если брать треугольную функцию принадлежности, то она имеет вид

$$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b, \\ \frac{c-x}{c-b}, & b < x \leq c, \\ 0, & x < a, x > c. \end{cases} \quad (6)$$

Если нечеткий временной ряд получается методами кластеризации, то в качестве функции принадлежности берется матрица  $u$  (например, в *fcm*-кластеризации) [7].

Полученная на основе функции принадлежности мера энтропии не способна четко фиксировать смену нечетких меток временного ряда. Она лишь показывает, с какой вероятностью точка будет относиться к метке. При этом если энтропия близка или выше 1, то это говорит о том, что точка находится в «пограничном» положении и может относиться с равной долей вероятности к двум разным нечетким меткам. Поэтому данный способ нахождения меры энтропии мало пригоден при диагностике временных рядов и более востребован при прогнозировании временного ряда.

Вычисления меры энтропии НВР можно проводить не только по значениям нечетких меток точек ряда, но и по тенденциям или интенсивностям ряда. При этом изменения алгоритма будут минимальны и коснутся только использования другой матрицы для нахождения вероятностей.

Полученные результаты расчетов позволят судить о динамике системы, хаотичная она или регулярная. Также можно группировать точки ряда, в которых наблюдается стабильность показателя меры энтропии, так как в этом случае все точки такой группировки будут иметь идентичные значения нечетких меток (если мера энтропии рассчитывалась по ним) или идентичные показатели тенденции или интенсивности. Таким образом, временной ряд «сворачивается» в различные группы точек, в которых наблюдаются идентичные показатели, или, наоборот, в группы точек, в которых показатели постоянно меняются. На основе данных о динамике системы можно сделать вывод о возможности или невозможности выполнения операции прогнозирования. Операцию прогнозирования возможно выполнить над рядом, в котором показатель меры энтропии будет стремиться к 0. Если выполняется данное условие, то можно считать, что ряд имеет устойчивое значение на последних точках, и можно строить предположение, что прогнозируемая точка ряда будет иметь это же значение.

Помимо этого, благодаря наличию матриц перехода, можно также спрогнозировать вероятности перехода системы в любое другое состояние и сделать предположение, в какое состояние наиболее вероятен переход, в случае смены текущего состояния.

На основе вышеизложенного можно составить алгоритм определения поведения НВР с использованием меры энтропии:

Шаг 1: Получить значения меры энтропии  $E_i$  точек нечеткого временного ряда  $X_i^x$ .  
 $X_i^x \rightarrow E_i^x$ .

Шаг 2: Сгруппировать точки ряда в группы  $G^x$  по принципу: разница мер энтропии двух соседних точек меньше порогового значения.

$$if(E_i^x - E_{i+1}^x \leq \theta_1) then E_i^x, E_{i+1}^x \in G^x.$$

Шаг 3: Проанализировать полученные группы  $G^x$ . Если имеются группы длиной 1–3 точки, то их вполне можно считать аномалией.

$$if(length(G_j^x) \in [1, 3]) then G_j^x is anomaly.$$

Шаг 4: Определить тенденции ряда и получить значения меры энтропии тенденций ряда.

$$x_i \rightarrow \Delta x_i \rightarrow tend_j \rightarrow E_j^{tend}.$$

Шаг 5: Сгруппировать точки ряда в группы  $G^{tend}$  по принципу: разница мер энтропии тенденций двух соседних точек меньше порогового значения.

$$if(E_i^{tend} - E_{i+1}^{tend} \leq \theta_1) then E_i^{tend}, E_{i+1}^{tend} \in G^{tend}.$$

Шаг 6: Проанализировать полученные группы. Если имеются группы тенденций «Рост» или «Падение» длиной более 3 точек, то имеет место аномалия.

$$if(length(G_j^{pocm}) \geq 3 or length(G_j^{nadeenie}) \geq 3) then G_j^{tend} is anomaly.$$

## 2 ИССЛЕДУЕМЫЕ ВРЕМЕННЫЕ РЯДЫ

Для эксперимента были взяты временные ряды с информацией о прогоне трех машин и сгенерированы данные, моделирующие те или иные дефекты. Описание рядов приведено в таблице 2.

Описание временных рядов:

Температура выходных газов левого двигателя от ЭРД [Твг1ЭРД][град][1].

Температура выходных газов правого двигателя от ЭРД [Твг2ЭРД][град][1].

Давление масла левого двигателя [Рм1][кгс/см²][0].

Давление масла правого двигателя [Рм2][кгс/см²][0].

Давление масла главного редуктора [Рмр][кгс/см²][0].

Температура масла левого двигателя [Тм1][град][0].

Температура масла правого двигателя [Тм2][град][0].

Температура масла главного редуктора [Тмр][град][0].

Для главного редуктора и двигателя составим таблицу диапазонов для каждой нечеткой метки (табл. 3).

Таблица 2

Описание рядов

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

Таблица 3

Параметры функций принадлежности

Физический параметр	Границы диапазона	Опасно мало	Норма	Велико	Опасно велико
Температура вых. газов двигателя, °С	0–1000		a=0 b=560 c=600,5	a=600 b=700 c=720,5	a=720 b=800 c=1000
Температура масла в двигателе, °С	0–100	a=0 b=5 c=10	a=9,9 b=35 c=60,1		a=60 b=80 c=100
Давление масла в двигателе, кгс/см <sup>2</sup>	0–20	a=0 b=0,4 c=0,8	a=0,75 b=8 c=15,85		a=15,8 b=18 c=20
Температура масла главного редуктора, °С	0–100	a=0 b=5 c=10	a=9,9 b=35 c=60,1		a=60 b=80 c=100
Давление масла главного редуктора, кгс/см <sup>2</sup>	0–8	a=0 b=1 c=2	a=1,99 b=4 c=7,55		a=7,5 b=7,8 c=8

Считается, что агрегат с дефектом, если более 15 секунд значение величины находится в положении «опасно мало» или «опасно велико».

Модель экспертного правила диагностики будет следующей: если после группировки точек ряда по значению на основе меры энтропии наблюдаются группы, относящиеся к нечеткой метке «опасно мало» или «опасно велико» и имеющие длину более 15 точек, то считаем, что агрегат имеет дефект. Если хотя бы один агрегат (редуктор или один из двигателей) получает заключение «имеется дефект», то аппарат отправлять в полет нельзя.

$$\begin{aligned} & \text{if } (\text{length}(G_j^{\text{опасно мало}}) \geq 15 \\ & \text{or } \text{length}(G_j^{\text{опасно велико}}) \geq 15) \\ & \text{then } \text{дефект}(\text{агрегат}) \text{ is true.} \end{aligned}$$

### 3 План экспериментов

Для проведения эксперимента был разработан комплекс программ математического моделирования поведения агрегатов летательного аппарата. В его состав входят модули получения нечеткого временного ряда, модуль для расчета значений мер энтропии как по значениям, так и по тенденциям и модуль группировки полученных мер энтропии для получения экспертной оценки.

Для оценки эффективности метода будет произведено моделирование поведения главного редуктора и силовой установки двигателя вертолета. Задача системы – правильно диагностировать возможные дефекты или информировать об их отсутствии. Важно заметить, что данная версия программы не содержит правил вывода экспертной оценки, поэтому на данном этапе основная

задача системы будет сведена к корректной группировке данных, на основе которой можно быстро провести анализ поведения элементов. На вход системы будут поданы временные ряды, характеризующие машины без дефектов и с предполагаемыми дефектами, после чего необходимо будет определить число случаев, в которых система дала некорректную информацию. Если ошибка не будет превышать 10%, то система работает правильно.

### 4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В программе предусмотрено несколько вариантов загрузки: можно загрузить простой временной ряд, можно загрузить нечеткий временной ряд, можно загрузить НВР со значениями тенденций для каждой точки и со значениями интенсивностей. Если загружается простой временной ряд, предусмотрены функции получения нечеткого ряда двумя способами:

- фаззификация,
- кластеризация.

В дальнейшем для полученного нечеткого ряда определяются тенденция и интенсивность, если они не были загружены из файла, и рассчитываются меры неопределенности по нечетким меткам, интервалам изменения времени и тенденциям. На основе полученных значений проводятся анализ и группировка точек временного ряда.

На рисунке 1 представлены результаты работы программы на примере одного из рядов. В левой таблице представлены смены нечетких меток ряда, выявленные через анализ меры энтропии. Во второй таблице представлены смены нечетких меток ряда, выявленные через просмотр всего ряда. Темным цветом помечены совпадающие значения. Как видно из рисунка, алгоритм верно

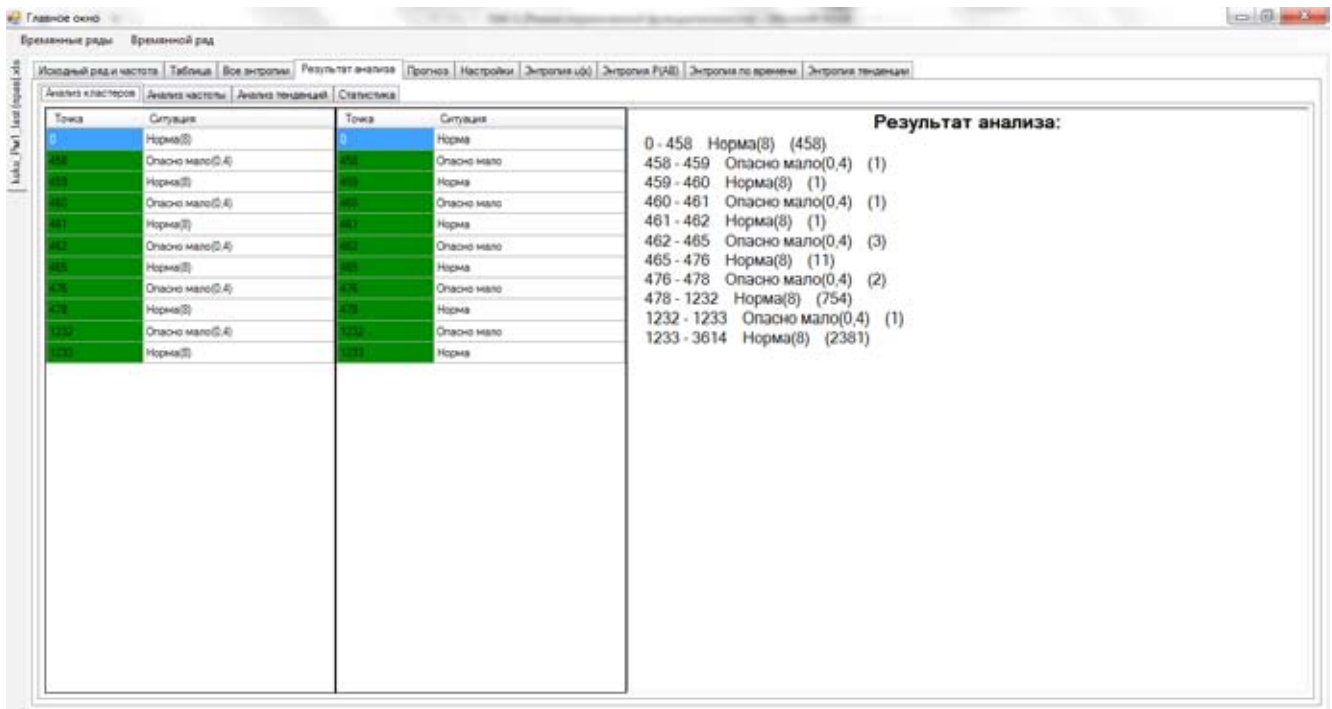


Рис 1. Результат анализа временного ряда

выявил все смены нечетких меток и в результат анализа записал интервалы точек, принадлежащих одной метке (с указанием метки и общим количеством точек в интервале), на основе которых можно делать выводы о состоянии диагностируемого устройства.

Были проведены эксперименты с 12-ю рядами, результаты которых приведены в таблице 4.

В ходе проведения экспериментов было выявлено, что с увеличением точек ряда фиксация «скачков» энтропии, получаемая как разность двух соседних показателей меры энтропии, должна становиться более чувствительной. Т. е. чем больше точек ряда, тем меньше значение дельты показателей меры может говорить о «скачке». На данный

момент существует проблема с определением коэффициента для правильной фиксации «скачка». Имеются случаи, когда фиксируется разность показателей меры энтропии, которая больше порогового значения для определения «скачка», но смены нечеткой метки в этой точке не происходит. В зависимости от подобранных коэффициентов количество ложных фиксаций можно сократить до 30–40%, но полностью от них избавиться не получается, так как при увеличении порога срабатывания возникают случаи, когда не фиксируются реальные смены меток. Полученный коэффициент для разных рядов при одинаковом проценте ложных срабатываний может отличаться в 10–20 раз в зависимости от стабильности ряда. Если во

Таблица 4

Результаты экспериментов с техническими рядами

Номер ряда	Бортовой номер	Время прогона, с	Дефект в двигателе	Дефект в главном редукторе	Заключение на основе полученных результатов
1	210111	3614	Нет	Нет	Выявлено верно
2	240111	4199	Нет	Нет	Выявлено верно
3	250111	1061	Нет	Нет	Выявлено верно
4	000	3614	Да	Нет	Выявлено верно
5	000	4199	Нет	Да	Выявлено верно
6	000	1061	Да	Да	Выявлено верно
7	000	3614	Да	Нет	Выявлено верно
8	000	4199	Да	Да	Выявлено верно
9	000	1061	Нет	Да	Выявлено верно
10	000	3614	Да	Нет	Выявлено верно
11	000	4199	Нет	Да	Выявлено верно
12	000	1061	Да	Да	Выявлено верно



временном ряду имеются участки, на которых нечеткая метка меняется часто (через 2–3 точки), то для них значение коэффициента порога требуется задавать меньше, по сравнению с рядом, в котором между сменами меток располагаются 10–20 точек ряда.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенного научного исследования были разработаны необходимые алгоритмы и модели диагностики агрегатов летательных аппаратов. В ходе выполнения вычислительных экспериментов модель показала высокую точность определения характеристик временного ряда и выявления опасных участков. Разработанный алгоритм может успешно применяться для диагностики и прогнозирования технических временных рядов сложных систем.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ярушклина Н.Г., Афанасьева Т.В., Перфильева И.Г. Интеллектуальный анализ временных рядов: учебное пособие. – Ульяновск : УлГТУ, 2010. – 320 с.
2. Воронина В.В. Математическое моделирование диагностических параметров агрегатов летательных аппаратов на основе гранулированных временных рядов: дис. ... канд. тех. наук: 05.13.18: защищена 23.12.2011/ Воронина Валерия Вадимовна. – Ульяновск, 2011. – 171 с.
3. Информационная энтропия [Электронный ресурс] / Википедия. – Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%98%D0%BD%D1%84%D0%BE%D1%80%D0%BC%D0%B0%D1%86%D0%B8%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F\\_%D1%8D%D0%BD%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BF%D0%B8%D1%8F](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%98%D0%BD%D1%84%D0%BE%D1%80%D0%BC%D0%B0%D1%86%D0%B8%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D1%8D%D0%BD%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BF%D0%B8%D1%8F) (дата обращения: 20.12.2014).
4. Энтропия Колмогорова-Синяя [Электронный ресурс] / Кафедра Информационных Компьютерных Технологий. – Режим доступа: [http://ikt.muctr.ru/html/17/lek17\\_2.html](http://ikt.muctr.ru/html/17/lek17_2.html) (дата обращения: 20.12.2014).

5. Лоскутов А.Ю. Анализ временных рядов: курс лекций. – М. : МГУ, (год неизвестен). – 113 с.
6. Ruey-Chyn Tsaur, Jia-Chi O Yang, Hsiao-Fan Wang. Fuzzy Relation Analysis in Fuzzy Time Series Model//. *Computers and Mathematics with Applications* 49 (2005).
7. Ярушклина Н.Г. Основы нечетких и гибридных сетей. – М. : Финансы и статистика, 2014г. – 320 с.

### REFERENCES

1. Yarushkina N.G., Afanaseva T.V., Perfilova I.G. *Intellektualnyi analiz vremennykh riadov: uchebnoe posobie* [Time Series Data Mining: Textbook]. Ulyanovsk, USTU Publ., 2010. 320 p.
2. Voronina V.V. *Matematicheskoe modelirovanie diagnosticheskikh parametrov agregatov letatelnykh apparatov na osnove granulirovannykh vremennykh riadov*. Diss. kand. tekhn. nauk [The Mathematical Modeling of Aircraft Accessories Diagnosis Parameters on the base of Grained Time Series. Cand. eng. sci. diss.]. Ulyanovsk, 2011. 171 p.
3. Informatsionnaia entropiia [Informational Entropy]. *Wikipedia*. Available at: [ru.wikipedia.org/wiki/%D0%98%D0%BD%D1%84%D0%BE%D1%80%D0%BC%D0%B0%D1%86%D0%B8%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F\\_%D1%8D%D0%BD%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BF%D0%B8%D1%8F](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%98%D0%BD%D1%84%D0%BE%D1%80%D0%BC%D0%B0%D1%86%D0%B8%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D1%8D%D0%BD%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BF%D0%B8%D1%8F) (accessed data: 20.12.2014).
4. *Entropiia Kolmogorova-Sinaia* [Kolmogorov-Sinai Entropy]. Kafedra Informatsionnykh Kompiuternykh Tekhnologii [Information Computer Technology Department]. Available at: [ikt.muctr.ru/html/17/lek17\\_2.html](http://ikt.muctr.ru/html/17/lek17_2.html) (accessed data: 20.12.2014).
5. Loskutov A.Yu. *Analiz vremennykh riadov: kurs lektsii* [Time Series Analysis: Series of Lectures]. Moscow, MGU Publ., (an unknown date). 113 p.
6. Ruey-Chyn Tsaur, Jia-Chi O Yang, Hsiao-Fan Wang. *Computers and Mathematics with Applications*, 2005, no. 49.
7. Yarushkina N.G. *Osnovy nechetkikh i gibridnykh setei* [Fundamentals of Fuzzy and Hybrid Networks]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 2014. 320 p.