

Гибридизация нечетких временных рядов и нечетких онтологий при диагностике сложных технических систем

В.С. Мошкин¹, Н.Г. Ярушкина¹, Г.Р. Ишмуратова¹, И.А. Андреев¹

¹Ульяновский государственный технический университет, Северный Венец 32, Ульяновск, Россия, 432027

Аннотация. В рамках данной работы была исследована методика построения нечетких онтологий и была разработана онтологическая модель состояния вертолетных агрегатов. В процессе интеграции нечетких временных рядов и нечеткой онтологии был реализован метод интегрирующий ВР и онтологию и разработан программный продукт, обеспечивающий интеграцию. Помимо этого, были проведены эксперименты по поиску аномальных ситуаций и поиску возможных неисправных агрегатов с использованием разработанного подхода к интеграции нечетких временных рядов и нечеткой онтологии.

1. Введение

В настоящее время неопределенность и неполнота информации являются неотъемлемой частью сложных организационно-технических систем, в которых качество функционирования процессов зависит от человека. Для моделирования, проектирования и анализа таких систем получили распространение экспертные системы, использующие оценки, основанные на опыте и знаниях эксперта.

Экспертные оценки представляют качественный аспект оцениваемого элемента системы и самой системы, выражаются в лингвистической форме.

Однако, классические языки онтологии и семантических сетей, используемых в процессе резюмирования и описания особенностей предметной области, не подходят для решения неопределенности и неточности в знаниях, которые присущи большинству приложений реального мира в рассматриваемой области.

Поскольку нечеткая теория множеств и нечеткая логика являются подходящими формализмами для обработки этих типов знаний, нечеткие онтологии являются адекватным средством формализации онтологий.

В настоящее время представление базы знаний в системах поддержки принятия решений (СППР) в виде нечетких онтологий – одно из наиболее эффективных решений в контексте достижения цели учета нечеткости и неопределенности в человеческих рассуждениях и оценках. Примерами применения нечетких онтологий являются: системы диагностики заболеваний [1], нечеткие поисковые системы [2], системы знаний, основанная на групповом принятии решений о важности данных [3] и др. Чаще всего данные системы оперируют фактами, объектами или терминами естественного языка, описывающими особенности рассматриваемой предметной области.

Одним из способов получения экспертных оценок, удовлетворяющих условиям полноты, непротиворечивости и адекватности, является использование инструмента нечетких временных рядов (НВР) [4].

Одной из основных областей приложений НВР является диагностика процессов. Диагностика – это процесс поиска неисправностей, проблем, дефектов, аномалий или их отсутствия. При решении задач экспертной деятельности с целью диагностики процессов, представленных в виде НВР, целесообразно применять методы контроля НВР. Эти методы могут включать сопоставление НВР, отражающего реализованную динамику процесса, с НВР с ожидаемой или требуемой динамикой.

Интерпретация полученных сопоставлений в виде экспертных оценок – одна из актуальных задач, требующих системного решения. В большинстве случаев резюмирование результатов анализа НВР осуществляется путем логического вывода с использованием систем правил, хранимых в базе знаний экспертной системы. В качестве базы знаний при решении данной задачи в настоящее время используются онтологии и подобные графовые формы представления знаний, позволяющие помимо логического вывода, учитывать семантические особенности объектов конкретной предметной области [5][6].

Интерпретация полученных сопоставлений в виде экспертных оценок, значения которых представлены смысловыми единицами соответствия данных некоторым классам нечеткой онтологии, учитывающего отклонения между реализованным и требуемым НВР, может быть получена при решении задачи интеграции нечетких временных рядов и нечеткой онтологии. Таким образом, целью данной работы является разработка моделей и алгоритмов интеграции нечетких онтологий и НВР в задачах диагностики сложных технических систем.

2. Нечеткие временные ряды и модель нечеткой онтологии

Модели, а также алгоритмы анализа и прогнозирования НВР подробно описаны в работах [7][8].

В настоящее время базовой нотацией представления нечеткой онтологии является стандарт FuzzyOWL [9-11]. В общем виде любая FuzzyOWL-онтология может быть представлена следующим образом:

$$I = (If, Cf, Pf, Af, Df, Qf, Lf, Modf),$$

где

- If – множество объектов классов онтологии;
- Cf – множество нечетких классов онтологии:

$$C_f = \{C_f^A, C_f^C\},$$

где C_f^A - множество абстрактных классов, C_f^C - множество конкретных классов онтологии;

- Pf – множество свойств объектов:

$$P_f = \{P_f^A, P_f^C\},$$

где P_f^A множество конкретных свойств, т.е. свойств объектов (ObjectProperty), P_f^C - множество абстрактных свойств, т.е. свойств типа данных (DatatypeProperty);

- Df – множество аксиом онтологии:

$$D_f = \{A_f^{ABox}, A_f^{TBox}, A_f^{RBox}\},$$

где A_f^{ABox} – множество утверждений об индивидах, A_f^{TBox} – множество терминологических аксиом, A_f^{RBox} - множество аксиом отношений(иерархия отношений). Часть аксиом может быть подклассом множества нечетких аксиом, которые предполагают истинность утверждения с определенной степенью.

- Of – множество значений степеней, которые могут быть добавлены к объекту нечеткой аксиомы:

$$Of = \{LD_f, MD_f, ND_f, Var_f\},$$

где LD_f – множество лингвистических переменных, MD_f – множество степеней модификации, ND_f – множество численных значений степеней, Var_f – множество переменных.

- L_f – множество операторов нечетких логик соответствующих типов.

$$L_f = \{L_f^{Luk}, L_f^{Zad}, L_f^{Goed}, L_f^{Prod}\},$$

где L_f^{Luk} – множество операторов логики Лукасевича, L_f^{Zad} – множество операторов логики Заде, L_f^{Goed} – множество операторов логики Геделя, L_f^{Prod} – множество операторов продукционной логики. Определяются с помощью встроенного отношения *hasSemantics*;

- $Modf$ – множество «нечетких модификаторов», т.е. функций модификации функций принадлежности, нечетких классов и нечетких отношений. Функции могут быть линейными или треугольными [12]. В таблице 1 приведены элементы нечетких аксиом FuzzyOWL, а также их возможное представление.

Таблица 1. Элементы нечетких аксиом в FuzzyOWL.

№	Элемент	Возможные значения	Представление в FuzzyOWL
1	LD_f – множество лингвистических значений степеней	«рост», «высокий», «низкий», «спад»	<code><AnnotationAssertion></code> <code><AnnotationProperty</code> <code>IRI="#fuzzyLabel"/></code> <code><IRI>#ВысокаяНагрузка</IRI></code> <code><Literal</code> <code>datatypeIRI="&rdf;PlainLiteral">fuz</code> <code>zyOwl2 fuzzyType="datatype";</code> <code>Datatype type="rightshoulder";</code> <code>a="15.0";</code> <code>b="30.0"/>fuzzyOwl2</Literal></code> <code></AnnotationAssertion></code>
2	MD_f – множество степеней модификации	«очень», «быстрый», «медленный»	<code>type="modified" modifier="очень"</code>
3	ND_f – множество численных значений степеней	$0 \leq ND \leq 1$	Degree Value=0,6
4	Var_f – множество переменных	a, b, c, k1, k2	b="30.0";
5	L_f – множество операторов нечетких логик соответствующих типов	Zadeh, Lukasiewicz Goedel and Product	hasSemantics="Zadeh"
6	$Modf$ – множество нечетких модификаторов	Linear, Triangular	<code><Datatype type="triangular" a="32.0"</code> <code>b="41.0" c="50.0" /></code>

3. Проблемная область

Рассмотрим применение подхода интеграции НВР и нечетких онтологий при решении задачи диагностики состояния вертолета. Диагностика вертолета заключается в проверке его агрегатов с целью установления их исправности и возможности эксплуатации вертолета в целом.

Результатом проведения диагностики будет оценка значений ключевых показателей физических величин. Основная цель – оценить опасность значений. Для решения этой задачи необходимо построить модели поведения выбранных узлов и с помощью моделей делать заключения об исправности узлов. Модели построены в виде экспертной базы суждений о поведении того или иного компонента.

Для построения НВР были определены параметры функций принадлежности (Табл.2).

Таблица 2. Параметры функции принадлежности.

Физический параметр	Границы диапазона	Опасно мало	Мало	Норма	Велико	Опасно велико
Температура вых. газов двигателя, °С	0-1000	a<100 b=200 c=200,5	a=100 b=275 c=350,5	a=350 b=560 c=600,5	a=600 b=700 c=720,5	a=720 b=800 c>1000
Температура масла в двигателе, °С	0-150	a<0 b=5 c=10,5	a=10 b=15 c=20,5	a=20 b=30 c=60,5	a=80 b=100 c=120,5	a=120 b=135 c>150
Давление масла в двигателе, кгс/см ²	0-20	a<0 b=1 c=2,05	a=2,0 b=3,5 c=5,05	a=5,00 b=8 c=10,5	a=10 b=12 c=15,5	a=15,2 b=17,5 c>20
Температура масла главного редуктора, °С	0-100	a<0 b=5 c=10,5	a=10 b=15 c=20,5	a=20 b=35 c=50,5	a=50 b=70 c=80,5	a=80 b=90 c>100
Давление масла главного редуктора, кгс/см ²	0-8	a<0 b=1 c=2,05	a=2,0 b=2,5 c=3,5	a=3,45 b=4 c=4,55	a=4,50 b=5 c=7,55	a=7,5 b=7,8 c>8

Таким образом, для каждой физической величины определено по 5 нечетких меток. Задача анализа технических рядов сводится к задаче поиска аномальных ситуаций во ВР показателей физических величин главного редуктора и силовой установки двигателя. Анализ представляет собой последовательность следующих шагов:

1. Формирование НВР на основе полученной информации о значениях ключевых физических величин после полета вертолета.
2. Поиск известных аномальных ситуаций в полученных НВР.
3. Определение корректности работы узлов. Работа будет считаться некорректной в случае обнаружения хотя бы одной аномальной ситуации.

Для проведения экспериментов была разработана нечеткая онтология. Разработанная FuzzyOWL-онтология имеет иерархическую структуру и включает в себя 55 классов, 8 объектных свойств, 40 типов данных.

В ходе выполнения работы были выделены следующие свойства объектов, представленные в таблице 3 (ДМ-давление масла, ТВГ – температура выхлопных газов, ТМ-температура масла).

Таблица 3. Свойства объектов.

Свойство	Домен	Диапазон
имеет ДМ главного редуктора	Главный редуктор	Давление масла главного редуктора
имеет ДМ левого двигателя	Силовая установка двигателя	Давление масла силовой установки двигателя
имеет ДМ правого двигателя	Силовая установка двигателя	Давление масла силовой установки двигателя
имеет ТВГ левого двигателя	Силовая установка двигателя	Температура выхлопных газов силовой установки двигателя
имеет ТВГ правого двигателя	Силовая установка двигателя	Температура выхлопных газов

имеет ТМ главного редуктора	Главный редуктор	силовой установки двигателя Температура масла главного редуктора
имеет ТМ левого двигателя	Силовая установка двигателя	Температура масла силовой установки двигателя
имеет ТМ правого двигателя	Силовая установка двигателя	Температура масла силовой установки двигателя

```

Пример объявления свойства «имеетДМГР»
<SubObjectPropertyOf>
  <ObjectProperty IRI="#имеетДМГР"/>
  <ObjectProperty IRI="owl:topObjectProperty"/>
</SubObjectPropertyOf>
<ObjectPropertyDomain>
  <ObjectProperty IRI="#имеетДМГР"/>
  <Class IRI="#ГлавныйРедуктор"/>
</ObjectPropertyDomain>
<ObjectPropertyRange>
  <ObjectProperty IRI="#имеетДМГР"/>
  <Class IRI="#ДавлениеМаслаГР"/>
</ObjectPropertyRange>
    
```

Помимо этого, было выделено 40 типов данных: по 5 нечетких меток, на 8 вариантов отношений. Параметры типов данных соответствуют параметрам функции принадлежности. Тип функции принадлежности во всех типах данных был выбран треугольный.

Пример объявления типа данных в нотации FuzzyOWL:

```

<AnnotationAssertion>
  <AnnotationProperty IRI="#fuzzyLabel"/>
  <IRI>#ВеликоДМГР</IRI>
  <Literal datatypeIRI="&rdf;PlainLiteral">
    <fuzzyOwl2 fuzzyType="datatype">
      <Datatype type="triangular" a="4.50" b="5" c="7.5" />
    </fuzzyOwl2>
  </Literal>
</AnnotationAssertion>
    
```

В качестве объекта экспериментов были исследованы временные ряды для диагностики вертолетных агрегатов и нечеткая онтология конструкции вертолетных агрегатов. В процессе проведения данных экспериментов были использованы алгоритмы интеграции нечетких временных рядов и нечетких онтологий.

4. Эксперименты

Диагностика вертолета заключается в проверке его агрегатов с целью установления их исправности и возможности эксплуатации вертолета в целом. Результатом проведения диагностики будет оценка значений ключевых физических величин. Основная цель – оценить опасность значений. Для проверки адекватности алгоритма интеграции нечетких временных рядов и нечеткой онтологии на основе FuzzyOWL, а также корректности работы программного продукта, реализующий данный алгоритм, был проведен ряд экспериментов, в рамках которых были возможные проблемные ситуации. В рамках эксперимента были проведены следующие действия:

1. Экспертом была разработана нечеткая онтология по стандарту FuzzyOWL. Для построения нечеткой онтологии был использован редактор Protégé [13] с подключенным плагином FuzzyOWL Plugin [14].
2. Типы данных в нечеткой онтологии FuzzyOWL содержат параметры функций принадлежности.

3. Типы данных в нечеткой онтологии FuzzyOWL содержат привязку к конкретному классу онтологии (Табл.4).

Таблица 4. Таблица описания типов данных.

Тип данных	Тип функции принадлежности	Связанный класс	a	b	c	d
ОпасноМалоТВГЛевДвигателя	треугольная	Силовая установка двигателя	100	200	200,5	0
МалоТВГЛевДвигателя	треугольная	Силовая установка двигателя	200	275	350,5	0
НормаТВГЛевДвигателя	треугольная	Силовая установка двигателя	350	560	600,5	0
ВеликоТВГЛевДвигателя	треугольная	Силовая установка двигателя	600	700	720,5	0
Опасно ВеликоТВГЛевДвигателя	треугольная	Силовая установка двигателя	720	800	1000	0
ОпасноМалоДМГ главного Редуктора	треугольная	Главный редуктор	0	1	2,05	0
МалоДМГ главного Редуктора	треугольная	Главный редуктор	2,0	2,5	3,5	0
НормаДМГ главного Редуктора	треугольная	Главный редуктор	3,45	4	4,55	0
ВеликоДМГ главного Редуктора	треугольная	Главный редуктор	4,5	5	7,55	0
ОпасноВеликоДМГ главного Редуктора	треугольная	Главный редуктор	7,5	7,8	8	0

Задача проведенных экспериментов - это поиск возможных неисправных агрегатов вертолета. Анализ представляет последовательность следующих шагов:

1. Формирование ВР на основе полученной информации о значениях ключевых физических величин после прогона машины.
2. Поиск неисправных агрегатов вертолета в полученных ВР.
3. Определение неисправных вертолетных агрегатов. Вертолетный агрегат будет считаться неисправным в случае обнаружения хотя бы одной аномальной ситуации, для физической величины, привязанному к конкретному классу онтологии, соответствующему данному неисправному агрегату.

Эффективность алгоритма диагностики технических систем может быть оценена при решении задачи моделирования поведения вертолетных агрегатов. Система должна правильно выявлять возможные неисправные вертолетные агрегаты. Для подтверждения эффективности необходимо проанализировать данные, характеризующие машины, как без дефектов, так и с возможными дефектами, после чего проанализировать информацию о неисправных агрегатах, полученную системой и полученную от эксперта.

Для эксперимента были получены данные о прогоне трех машин, сгенерированы данные, моделирующие те или иные аномальные ситуации. Описание рядов приведено в таблице 5.

Приняты следующие обозначения: TVG1- температура выхлопных газов левого двигателя, TVG2- температура выхлопных газов правого двигателя, Pm1 – давление масла левого двигателя, Pm2 – давление масла правого двигателя, Tm1 – температура масла левого двигателя, Tm2 – температура масла правого двигателя, Pmp – давление масла главного редуктора, Tmp – температура масла главного редуктора. Были проведены эксперименты с десятью рядами, результаты которых приведены в таблице 6.

Таблица 5. Описание временных рядов.

№ ряда	№ борта	Период	Tvg1	Tvg2	Pm1	Pm2	Pmp	Tm1	Tm2	Tmp
1	210111	15.09.2050	739,59	258,85	2,3	0,8	0	58,1	59,2	29,3
2	210111	16.09.2050	757,29	256,93	2,4	0,8	0	57,1	59	29,3
3	210111	30.09.2050	503	227,78	7,4	0,8	1,8	47,5	51,3	29
4	210111	12.04.2052	536,85	520,93	7,6	6,6	4	53,9	56,5	35
5	240111	11.09.2054	176,43	178	0,8	0,8	0	42,5	46	31,3
6	240111	12.09.2054	176,57	178	0,8	0,8	0	42,5	46	31,3
7	240111	13.11.2046	483	448,85	6,4	5,6	3,4	49,5	51,9	23,5
8	240111	11.08.2047	479,13	0	6,4	5,4	3,3	51,6	55,1	29
9	250111	22.01.2046	189,72	206,22	0,8	1	1,6	52,5	55,5	24,5
10	250111	23.01.2046	193,3	209,22	0,8	1	1,6	52,5	55,5	24,5

Таблица 6. Результаты экспериментов.

№	№ борта	Период	Tvg1	Tvg2	Pm1	Pm2	Pmp	Tm1	Tm2	Tmp	Неисправный агрегат
1	210111	15.09.2050	739,59	258,85	2,3	0,8	0	58,1	59,2	29,3	#СиловаяУстановкаДвигателя
2	210111	16.09.2050	757,29	256,93	2,4	0,8	0	57,1	59	29,3	#СиловаяУстановкаДвигателя
3	210111	30.09.2050	503	227,78	7,4	0,8	1,8	47,5	51,3	29	#СиловаяУстановкаДвигателя
4	210111	12.04.2052	536,85	520,93	7,6	6,6	4	53,9	56,5	35	Неисправных агрегатов нет
5	240111	11.09.2054	176,43	178	0,8	0,8	0	42,5	46	31,3	#ГлавныйРедуктор
6	240111	12.09.2054	176,57	178	0,8	0,8	0	42,5	46	31,3	#ГлавныйРедуктор
7	240111	13.11.2046	483	448,85	6,4	5,6	3,4	49,5	51,9	23,5	Неисправных агрегатов нет
8	240111	11.08.2047	479,13	0	6,4	5,4	3,3	51,6	55,1	29	#ГлавныйРедуктор
9	250111	22.01.2046	189,72	206,22	0,8	1	1,6	52,5	55,5	24,5	#СиловаяУстановкаДвигателя
10	250111	23.01.2046	193,3	209,22	0,8	1	1,6	52,5	55,5	24,5	#ГлавныйРедуктор

Как видно из результатов экспериментов, построение нечеткой онтологии нечетких временных рядов позволило сделать вывод о неисправности агрегата вертолета при анализе четких значений показателей агрегатов.

5. Заключение

В рамках данной работы была исследована методика построения нечетких онтологий и была разработана онтологическая модель состояния вертолетных агрегатов. В процессе интеграции нечетких временных рядов и нечеткой онтологии был реализован метод интегрирующий ВР и онтологию и разработан программный продукт, обеспечивающий интеграцию.

Помимо этого, были проведены эксперименты по поиску аномальных ситуаций и поиску возможных неисправных агрегатов с использованием разработанного подхода к интеграции нечетких временных рядов и нечеткой онтологии.

По итогам проведенных экспериментов можно сделать вывод о том, что предложенный подход гибридизации НВР и нечетких онтологий позволяет достоверно распознавать аномальные ситуации со степенью истинности, и находить возможные неисправные агрегаты, соответствующие каждой аномальной ситуации.

Работа является актуальной, так как феномен неопределенности, выражаемый терминами и понятиями, довольно распространен в человеческих знаниях.

6. Литература

- [1] Torshizi, A.D. A hybrid fuzzy-ontology based intelligent system to determine level of severity and treatment recommendation for Benign Prostatic Hyperplasia / A.D. Torshizi, M.H.F. Zarandi, G.D. Torshizi, K. Eghbali / *Computer Methods and Programs in Biomedicine*. – 2014. – Vol. 113(1). – P. 301-313.
- [2] Lai, L.F. Developing a fuzzy search engine based on fuzzy ontology and semantic search / L.F. Lai, C. Wu, P. Lin, L. Huang // *IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, 2011. – P. 2684-2689.
- [3] Morente-Moliner, J.A. Creating knowledge databases for storing and sharing people knowledge automatically using group decision making and fuzzy ontologies / J.A. Morente-Moliner, I.J. Pérez, M.R. Ureña, E. Herrera-Viedma // *Information Sciences*. – 2016. – Vol. 328. – P. 418-434.
- [4] Ярушкина, Н.Г. Интеллектуальный анализ временных рядов: учебное пособие / Н.Г. Ярушкина, Т.В. Афанасьева, И.Г. Перфильева. – Ульяновск: УлГТУ, 2010.
- [5] Noy, N.F. *Ontology Development 101: A Guide to Creating Your First Ontology* / N.F. Noy, D.L. McGuinness // *Stanford Knowledge Systems Laboratory Technical Report KSL-01-05 and Stanford Medical Informatics Technical*, 2001.
- [6] Мошкин, В.С. Методики построения нечетких онтологий сложных предметных областей / В.С. Мошкин, Н.Г. Ярушкина // *Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем (OSTIS): материалы V Междунар. научн.техн. конф.* – Минск: БГУИР, 2015. – С. 401-406.
- [7] Афанасьева, Т.В. Прогнозирование временных рядов: нечеткие модели / Т.В. Афанасьева, А.М. Наместников, И.Г. Перфильева, А.А. Романов, Н.Г. Ярушкина. – Ульяновск: УлГТУ, 2014.
- [8] Extraction and Forecasting Time Series Of Production Processes / A.A. Romanov, E.N. Egov, I.A. Moshkina, I.F. Dyakov // *Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference “Fuzzy Technologies in the Industry*. – Ulyanovsk, 2018. – P. 50-55.
- [9] Bobillo, F. Fuzzy ontology representation using OWL 2 / F. Bobillo, U. Straccia // *International Journal of Approximate Reasoning*. – 2011. – Vol. 52. – P. 1073-1094.
- [10] Lee, C.S. A fuzzy ontology and its application to news summarization / C.S. Lee, Z.-W. Jian, L.-K. Huang // *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. – 2005. – Vol. 5. – P. 859-880.
- [11] Straccia, U. Towards a Fuzzy Description Logic for the Semantic Web // *2nd European Semantic Web Conference*, 2005. – P. 167-181.
- [12] Мошкин, В.С. Логический вывод на основе нечетких онтологий / В.С. Мошкин, Н.Г. Ярушкина // *Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте. Сборник научных трудов VIII-й Международной научно-практической конференции*. – М.: Физматлит, 2015. – Т. 1. – С. 259-267.
- [13] Protégé: ontology editor [Electronic resource]. – Access mode: <https://protege.stanford.edu/> (03.12.2018).
- [14] Fuzzy Ontology Representation using OWL 2 [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.umbertostraccia.it/cs/software/FuzzyOWL/index.html> (03.12.2018).

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ. Проекты № 18-37-00450, № 19-07-00999 и 18-47-732007.

Hybridization of fuzzy time series and fuzzy ontologies in the diagnosis of complex technical systems

V.S. Moshkin¹, N.G. Yarushkina¹, G.R. Ishmuratova¹, I.A. Andreev¹

¹Ulyanovsk State Technical University, Severny Venetz street 32, Ulyanovsk, Russia, 432027

Abstract. A method for integrating fuzzy time series and fuzzy ontology was implemented and a software product was developed that provides integration. An ontological model of the state of helicopter units was also developed. In addition, experiments were conducted to search for anomalous situations and to search for possible faulty units using the developed approach.