Интернет-журнал «Транспортные сооружения» <https://t-s.today>
Russian journal of transport engineering

2018, №1, Том 5 / 2018, No 1, Vol 5 <https://t-s.today/issue-1-2018.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/12SATS118.pdf>

DOI: 10.15862/12SATS118 (<http://dx.doi.org/10.15862/12SATS118>)

Статья поступила в редакцию 20.02.2018; опубликована 13.04.2018

Ссылка для цитирования этой статьи:

Шварц А.Ю., Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Долинина О.Н., Нигаматова О.И. О разработке интеллектуальных систем проектирования и оценке технического состояния мостовых сооружений. Часть 2 // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2018 №1, <https://t-s.today/PDF/12SATS118.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/12SATS118

For citation:

Shvarts A.Yu., Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Dolinina O.N., Nigmatova O.I. (2018). About development of intellectual systems of design and assessment of technical condition of bridge constructions. Part 2. *Russian journal of transport engineering*, [online] 1(5). Available at: <https://t-s.today/PDF/12SATS118.pdf> (in Russian) DOI: 10.15862/12SATS118

УДК 624.04

Шварц Александр Юрьевич

ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Саратов, Россия
Ассистент
Кандидат технических наук
E-mail: shvartsaleksandr@gmail.com

Овчинников Илья Игоревич

ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Саратов, Россия
ФГБОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)»
Сочинский институт транспорта, Россия
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: bridgeart@mail.ru

Овчинников Игорь Георгиевич

ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, Россия
ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Саратов, Россия
ФГБОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)»
Сочинский институт транспорта, Россия
Доктор технических наук, профессор
E-mail: bridgesar@mail.ru

Долинина Ольга Николаевна

ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Саратов, Россия
Зав. кафедрой
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: olga@sstu.ru

Нигаматова Ольга Ивановна

ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет путей сообщения», Екатеринбург, Россия
Аспирант
E-mail: olganigmatova@ya.ru

О разработке интеллектуальных систем проектирования и оценки технического состояния мостовых сооружений. Часть 2

Аннотация. В работе кратко рассмотрены особенности создания интеллектуальных систем, при этом жизненный цикл этих систем разделяется на этапы: идентификация, концептуализация, формализация, выполнение, отладка, опытная эксплуатация. Отмечается, что реальный процесс создания интеллектуальной (экспертной) системы не всегда строго следует приведенному порядку: возможны возвраты на один или несколько этапов назад, повторения этапов, причиной чего является наличие ошибок или недоработок, допущенных на предыдущих этапах и выявляемых только на последующих. Поэтому создание интеллектуальной системы это собой длительный и трудозатратный процесс, сроки завершения которого не всегда возможно прогнозировать в начале разработки.

Для описания неуверенности или неполноты знаний экспертов в данной работе используется теория нечетких множеств.

Приводится описание интеллектуальной системы «BridgeTCA» для решения задачи оценки технического состояния мостовых сооружений. Разработанная интеллектуальная система, включающая каскадную базу знаний, интерфейс пользователя, решающий и обучающий компоненты, позволяет накапливать и обрабатывать экспертные знания, принимать решение о техническом состоянии мостового сооружения и необходимых мерах для восстановления долговечности, безопасности и грузоподъемности.

Эта интеллектуальная система «BridgeTCA» прошла апробацию на примере задачи оценки технического состояния 5 мостовых сооружений. Полученные с помощью системы оценки и рекомендации эксперты признали достоверными. В разработанной интеллектуальной системе был применен алгоритм повышения эффективности нечеткого вывода. В зависимости от количества параллельных потоков выполнения было достигнуто сокращение времени, затрачиваемого на нечеткий вывод, на 79-83 %.

Ключевые слова: интеллектуальные системы; экспертные системы; проектирование мостов; обследование мостов; оценка состояния мостов; долговечность мостов; безопасность мостов

Введение

В первой части данной работы [1] были рассмотрены четыре этапа жизненного цикла мостового сооружения: проектирование, изготовление, строительство (монтаж), эксплуатация и отмечалось, что этап эксплуатации является самым длительным и составляет десятки лет. Поэтому проблемам длительного обеспечения безопасности и грузоподъемности мостовых сооружений необходимо уделять особое внимание. Далее в [1] рассматривались вопросы обследования мостовых сооружений и обработки полученной информации с целью получения краткого, но емкого заключения о состоянии мостового сооружения. При этом рассмотрены несколько методик обработки информации с целью получения такого заключения. Отмечалась важность автоматизация процесса оценки состояния мостового сооружения путем разработки интеллектуальной системы, которая бы позволяла хранить и обрабатывать экспертные знания в данной области.

Затем были рассмотрены некоторые интеллектуальные (экспертные) системы для проектирования мостовых сооружений, причем упор делался на иностранные разработки. Рассматривалась Bridge Design Expert System для проектирования пролетных строений малых

и средних мостов, и ряд других экспертных систем. В качестве примера более детально описаны особенности экспертной системы «Bentley LEAP Bridge Enterprise», которая широко используется для проектирования малых железобетонных мостов в США, а также экспертной системы «LEAP Bridge Steel» (той же фирмы Bentley) позволяющей выполнять проектирование, трехмерное моделирование, расчетный анализ, оценку грузоподъемности металлических мостов.

1. Состояние проблемы

Интеллектуальной системой (ИС) называется программная или техническая система, основанная на знаниях и решающая прикладную задачу (классификация, прогнозирование, управление и т. д.) в определенной предметной области [2, 3].

Знаниями называется совокупность некоторых сведений, образующих целостное описание, соответствующее некоторому уровню осведомленности об описываемом вопросе, предмете, процессе, явлении и т. д.

Кратко рассмотрим особенности создания интеллектуальных систем. В ходе исследований в этой области [2, 3, 4] жизненный цикл ИС был условно разделен на следующие последовательные этапы: идентификация, концептуализация, формализация, выполнение, отладка, опытная эксплуатация. Однако реальный процесс создания ИС не всегда строго следует приведенному порядку: возможны возвраты на один или несколько этапов назад, повторения этапов. Чаще всего это происходит по причине ошибок или недоработок, допущенных на предыдущих этапах и выявляемых только на последующих. Таким образом, можно утверждать, что создание ИС представляет собой длительный и трудозатратный процесс [4, 5], сроки завершения которого не всегда возможно прогнозировать в начале разработки.

Независимо от предметной области, одними из наиболее важных и вызывающих наибольшие трудности этапов разработки являются неразрывно связанные друг с другом формализация (выбор способа представления и обработки знаний) и выполнение (наполнение базы знаний). На данный момент известен ряд моделей представления знаний в ИС [6-19], каждая из которых обладает рядом отличительных особенностей и ориентирована на использование в системах, решающих определенный круг задач.

Отметим логические модели, к достоинствам которых при использовании в ИС относится наличие ясной формальной семантики и алгоритмов логического вывода, что упрощает процесс формирования базы знаний и программирования механизма принятия решений. Однако логические модели не предоставляют возможности описания эвристик (вероятностей, неуверенностей, неточностей), характерных подавляющему большинству предметных областей.

Известны также сетевые модели, например, предложенные М. Куиллианом [26] семантические сети. Среди положительных сторон сетевых моделей представления знаний отметим схожесть с представлением человеком связей между объектами и явлениями реального мира. К семантическим сетям могут быть применены многие формальные и проработанные методы теории графов. Недостатком же сетевых моделей является относительно высокая сложность организации процедуры вывода.

Отметим также фреймовые модели [7], главным достоинством которых является концептуальная схожесть с реляционной моделью данных [11] и понятиями объектно-ориентированного программирования [12]. Изначальная структура фреймов предполагает возможность интеграции с другими моделями представления знаний, однако без использования

процедур и элементов семантических сетей фреймы не позволяют полно описывать знания и методы работы с ними в сложных системах.

Еще один вид моделей – это искусственные нейронные сети (ИНС) [31], применяемые при решении задач классификации [10, 11], прогнозирования [13, 14], управления [13, 15]. Главной особенностью этой модели представления знаний в интеллектуальных системах является способность к обучению или самоорганизации, которая позволяет минимизировать участие экспертов в построении базы знаний. С другой стороны, требуются обучающие и тестовые выборки достаточной репрезентативности для получения ИС, обладающих одновременно высокой точностью и способностью к обобщению. К отрицательным сторонам ИНС можно отнести схожесть данной модели с «черным ящиком»: способ принятия решения далек от образа мышления человека, что приводит к сложности разработки объяснительного компонента, отладки и тестирования ИС.

Наконец, применение находят продукционные системы [16], причем ядро продукции может быть как детерминированным, так и недетерминированным. Продукции с детерминированным ядром описывают строгое следование заключения из посылок. Продукции с недетерминированным ядром предполагают определение некоторой степени неточности, неуверенности или неполноты знаний о следовании заключения из посылок. Недетерминированность может быть выражена лингвистически («часто», «иногда», «редко», «скорее всего», «маловероятно», «возможно» и т. д.) или статистически («с вероятностью p »). При описании реальных предметных областей в большинстве случаев возникает необходимость использования продукций с недетерминированным ядром.

Системы продукций обладают рядом преимуществ, которые позволяют им широко применяться в системах искусственного интеллекта: модульность (добавление, модификация или удаление одной продукции из базы знаний не влечет за собой изменений в других продукциях); схожесть с человеческим образом рассуждений с точки зрения описания причинно-следственных связей; естественный параллелизм (независимость продукций друг от друга позволяет повышать скорость принятия решений за счет параллельных вычислений). Недостатки продукционных систем: сложность проверки системы на непротиворечивость и корректность; отсутствие одновременно универсальных и эффективных методов управления большими базами продукций.

Кроме того, важный вопрос – выбор способа описания неуверенности или неполноты знаний экспертов. По этой причине на данный момент многими исследователями [17-36] используется теория нечетких множеств, предложенная Л. Заде в работе [37].

Мы не будем далее анализировать особенности применения нечетких множеств для моделирования неполноты и недостаточности знаний экспертов. Отметим только, что этот вопрос поднимался в работах [38-41].

2. Интеллектуальная система оценки состояния мостовых сооружений

2.1 Структура интеллектуальной системы

Для решения задачи оценки эксплуатационного состояния железобетонных балочных мостовых сооружений была разработана интеллектуальная система (ИС) «BridgeTCA» [46], в состав которой входят 5 компонентов (рис. 1):

Рисунок 1. Структурная схема ИС «BridgeTCA». Обозначения: $Y_{\text{мост}} = \{y_1, \dots, y_{12}\}$ – множество выходных параметров ИС; $X_{\text{мост}} = \{x_1, \dots, x_{161}\}$ – множество входных параметров ИС; $KBC_{\text{мост}}$ – каскадная модель базы знаний (составлен авторами)

- Подсистемы ввода и вывода предназначены для визуального отображения результатов работы ИС и обработки команд, получаемых с устройств ввода, соответственно.
- База знаний используется для хранения лингвистических переменных, термов, нечетких правил, групп выполнения и групп дефаззификации.
- Решатель выполняет нечеткий вывод на основе полученных от пользователя данных и базы знаний. Решатель использует разработанные алгоритмы информированного нечеткого вывода.
- Обучающий компонент используется для внесения изменений в базу знаний пользователем. Такие изменения необходимы для устранения возможных ошибок в принятых ИС решениях. Кроме того, после внесения изменений, обучающий компонент выполняет повторную генерацию каскадной модели, используя разработанные алгоритмы.

Мостовое сооружение представляется в виде системы конструктивных элементов (рис. 2), к каждому из которых относится подмножество входных параметров и один из выходных параметров.

Рисунок 2. Схема конструктивных элементов мостового сооружения, с которыми сопоставлены входные параметры ИС «BridgeTCA» (составлен авторами)

Множество $X_{\text{мост}}$ представляется в следующем виде:

$$X_{\text{мост}} = X_{\text{пер}} \cup X_{\text{ПС}} \cup X_{\text{оп}} \cup X_{\text{Оч}} \cup X_{\text{ФО}} \cup X_{\text{МП}} \cup X_{\text{Дш}} \cup X_{\text{УРК}} \cup X_{\text{отк}} \cup X_{\text{подх}} \cup X_{\text{ЭО}} \quad (1)$$

где: $X_{\text{пер}} = \{x_{13}, x_{14}, x_{15}\}$ – множество входных параметров, описывающих автодорожный мостовой переход;

$X_{\text{ПС}} = \{x_{12}, x_{22}, x_{41}, x_{45}, x_{57}, x_{65}, x_{67}, x_{69}, x_{71}, x_{73}, x_{80}, x_{89}, x_{96}, x_{116}, x_{119}, x_{128}, x_{131}, x_{146}, x_{149}\}$ – множество входных параметров, описывающих пролетное строение;

$X_{\text{оп}} = \{x_1, x_{10}, x_{19}, x_{21}, x_{28}, x_{31}, x_{40}, x_{44}, x_{47}, x_{56}, x_{64}, x_{66}, x_{68}, x_{70}, x_{72}, x_{76}, x_{95}, x_{101}, x_{115}, x_{118}, x_{121}, x_{123}, x_{125}, x_{127}, x_{129}, x_{144}, x_{145}, x_{148}, x_{151}, x_{153}, x_{155}, x_{156}, x_{157}\}$ – множество входных параметров, описывающих опоры;

$X_{\text{Оч}} = \{x_{26}, x_{27}, x_{29}, x_{43}, x_{85}, x_{114}, x_{158}\}$ – множество входных параметров, описывающих узлы опирания и опорные части;

$X_{\text{Ф0}} = \{x_{12}, x_{20}, x_{23}, x_{42}, x_{46}, x_{58}, x_{74}, x_{97}, x_{117}, x_{120}, x_{122}, x_{124}, x_{126}, x_{129}, x_{132}, x_{147}, x_{150}, x_{154}\}$ – множество входных параметров, описывающих фундамент опоры;

$X_{\text{МП}} = \{x_2, x_3, x_4, x_5, x_{16}, x_{17}, x_{18}, x_{24}, x_{30}, x_{32}, x_{33}, x_{35}, x_{36}, x_{37}, x_{38}, x_{50}, x_{51}, x_{52}, x_{53}, x_{54}, x_{55}, x_{59}, x_{60}, x_{61}, x_{62}, x_{63}, x_{77}, x_{79}, x_{81}, x_{82}, x_{83}, x_{84}, x_{87}, x_{88}, x_{90}, x_{91}, x_{93}, x_{94}, x_{98}, x_{103}, x_{110}, x_{111}, x_{134}, x_{135}, x_{140}, x_{141}, x_{142}, x_{143}, x_{159}, x_{160}\}$ – множество входных параметров, описывающих мостовое полотно;

$X_{\text{ДШ}} = \{x_{49}, x_{108}, x_{113}, x_{133}, x_{139}, x_{161}\}$ – множество входных параметров, описывающих деформационный шов;

$X_{\text{УРК}} = \{x_{137}\}$ – множество входных параметров, описывающих удерживающие и регуляционные конструкции;

$X_{\text{отк}} = \{x_{25}, x_{92}, x_{99}, x_{100}, x_{112}, x_{138}\}$ – множество входных параметров, описывающих укрепление откосов;

$X_{\text{подх}} = \{x_6, x_7, x_8, x_9, x_{39}, x_{48}, x_{75}, x_{78}, x_{104}, x_{105}, x_{106}, x_{107}, x_{109}, x_{136}\}$ – множество входных параметров, описывающих подходы;

$X_{\text{Э0}} = \{x_{34}, x_{86}, x_{102}, x_{152}\}$ – множество входных параметров, описывающих эксплуатационные устройства.

Каждый входной параметр $x_j \in X_{\text{мост}}$ относится к одному из типов:

1. Логические («да»/«нет»).
2. Категориальные (значения из фиксированного перечня, например, «низкий»/«средний»/«высокий»).
3. Числовые (например, значения измерений).

Множество $Y_{\text{мост}} = \{y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6, y_7, y_8, y_9, y_{10}, y_{11}, y_{12}\}$ включает выходные параметры, относящиеся к описанным выше конструктивным элементам ($y_2, \dots, y_{12}$), так и выходной параметр, описывающий мостовое сооружение в целом (y_1) (таблица 1).

Таблица 1

Выходные параметры ИС «BridgeTCA»

Обозначение параметра	Название параметра
y_1	Оценка состояния мостового сооружения
y_2	Оценка состояния автодорожного мостового перехода
y_3	Оценка состояния пролетного строения
y_4	Оценка состояния опор

Обозначение параметра	Название параметра
y_5	Оценка состояния фундамента опор
y_6	Оценка состояния узлов опирания и опорных частей
y_7	Оценка состояния мостового полотна
y_8	Оценка состояния деформационного шва
y_9	Оценка состояния эксплуатационных обустройств
y_{10}	Оценка состояния удерживающих и регулиционных конструкций
y_{11}	Оценка состояния укрепления откосов
y_{12}	Оценка состояния подходов

Составлена авторами

Так как выходные параметры $x_1, \dots, x_{161}$ и выходные параметры $y_2, \dots, y_{12}$ относятся к конструктивным элементам, то процесс принятия решения можно представить в виде схемы (рис. 3). На приведенной схеме $S_{\text{пер}}$, $S_{\text{ПС}}$, $S_{\text{оп}}$, $S_{\text{Оч}}$, $S_{\text{ФО}}$, $S_{\text{МП}}$, $S_{\text{ДШ}}$, $S_{\text{УРК}}$, $S_{\text{отк}}$, $S_{\text{подх}}$, $S_{\text{ЭО}}$ – подсистемы принятия решения по отдельным конструктивным элементам на основе соответствующих множеств входных параметров; $S_{\text{мост}}$ – подсистема принятия решения по оценке технического состояния мостового сооружения в целом.

Рисунок 3. Декомпозиционная схема процесса принятия решения в ИС «BridgeTCA» (составлен авторами)

2.2 База знаний интеллектуальной системы

Для разрабатываемой системы источниками знаний послужили методические рекомендации Росавтодора [42, 43] и знания экспертов в области эксплуатации мостовых сооружений, к.т.н., доцента Овчинникова И.И. д.т.н., профессора Овчинникова И.Г., ведущего инженера Нигаматовой О.И.

В первую очередь была решена задача формирования множества лингвистических переменных $V_{\text{мост}}$ ($|V_{\text{мост}}| = 173$). Каждая входная лингвистическая переменная $i_j \in I_{\text{мост}}$ поставлена в соответствие входному параметру ИС $x_j \in X_{\text{мост}}$. Каждая выходная

лингвистическая переменная $g_q \in G_{\text{мост}}$ поставлена в соответствие входному параметру ИС $y_q \in Y_{\text{мост}}$.

Для каждой переменной $v_k \in V_{\text{мост}}$ было сформировано множество термов $T(v_k)$ с функциями принадлежности (рис. 4 и 5).

Рисунок 4. Пример функций принадлежности для термов лингвистической переменной «Колейность покрытия» (составлен авторами)

Рисунок 5. Пример функций принадлежности для термов лингвистической переменной «Оценка состояния мостового сооружения» (составлен авторами)

Множество правил $RB_{\text{мост}}$ ($|RB_{\text{мост}}| = 6876$) описано с использованием структура правил Мамдани [17]. Примеры разработанных правил приведены далее. Рассмотрим одно из правил:

ЕСЛИ [Габарит приближения конструкций по высоте не соответствует нормам] = [Сильное несоответствие нормам]
И [Габарит приближения конструкций по ширине не соответствует нормам] = [Незначительное несоответствие нормам]
И [Габарит подмостовой для судоходных пролетов] = [Сильное несоответствие нормам]
ТО [Оценка состояния мостового сооружения] = [Предаварийное] (2)

где: «Габарит приближения конструкций по высоте не соответствует нормам», «Габарит приближения конструкций по ширине не соответствует нормам», «Габарит подмостовой для судоходных пролетов» и «Оценка состояния мостового сооружения» – названия лингвистических переменных;

«Сильное несоответствие нормам», «Незначительное несоответствие нормам» и «Предаварийное» – названия соответствующих термов (значений лингвистических переменных).

Функции принадлежности термов, использующихся в правиле (2), представлены в таблице 2.

Таблица 2

Примеры функций принадлежности термов лингвистических переменных

Лингвистическая переменная	Терм	График функции принадлежности
Габарит приближения конструкций по высоте не соответствует нормам	Сильное несоответствие нормам	<p>Отношение реального габарита к требуемому</p>
Габарит приближения конструкций по ширине не соответствует нормам	Незначительное несоответствие нормам	<p>Отношение реального габарита к требуемому</p>
Габарит подмостовой для судоходных пролетов не соответствует нормам	Сильное несоответствие нормам	<p>Отношение реального габарита к требуемому</p>
Оценка состояния мостового сооружения	Предаварийное	<p>Балльная оценка</p>

Составлена авторами

2.3 Требования к программному обеспечению

С учетом специфики поставленной задачи, предложенной структуры ИС и каскадной базы знаний, были сформулированы функциональные требования к программному обеспечению ИС оценки технического состояния мостовых сооружений:

- ввод данных, полученных в ходе обследования мостового сооружения;
- определение оценки технического состояния всего сооружения и отдельных составных частей;
- формирование рекомендаций по восстановлению технического состояния всего сооружения и отдельных составных частей.

Также для наполнения и дальнейшей модификации базы знаний программное обеспечение должно реализовывать следующие дополнительные функции:

- просмотр, создание, модификация и удаление правил;
- просмотр, создание, модификация и удаление лингвистических переменных и их термов;

- просмотр, создание, модификация и удаление нечетких правил;
- организацию лингвистических переменных в древовидную структуру (каталог);
- просмотр, создание, модификация и удаление элементов каталога лингвистических переменных.

Программное обеспечение должно быть кроссплатформенным, т.е. выполняться на большинстве современных операционных систем персональных компьютеров и не зависеть от аппаратного обеспечения.

2.4 Описание реализации программного обеспечения

Для разработки ПО был выбран объектно-ориентированный язык Java и платформа JDK 1.8. Использование виртуальной машины JVM [44] позволяет выполнить требования к кроссплатформенности приложения и реализовать весь необходимый функционал. Графический интерфейс пользователя был разработан с использованием библиотеки JavaFX 2.2 [45]. Схема работы программного обеспечения интеллектуальной системы приведена на рис. 6.

Рисунок 6. Схема работы ПО ИС «BridgeTCA» (составлен авторами)

Основные принципы работы ПО ИС «BridgeTCA»:

- Взаимодействие ПО с пользователем осуществляется с помощью библиотеки JavaFX, которая обрабатывает команды, отправляемые пользователем с помощью устройств ввода (клавиатуры и мыши), и отображает результаты работы на элементах графического интерфейса, структура которых описана в модуле *views*.
- Данные о действиях пользователя передаются в т. н. «контроллеры» (модуль *controllers*) – классы, описывающие логику обработки пользовательских команд и данных, а также выполняющие дальнейшее взаимодействие с другими модулями и инициирующие изменения в графическом интерфейсе.
- Библиотека *f.jar*, структура и функционал которой более подробно описаны в третьей главе, реализует алгоритмы нечеткого вывода, подготовки БЗ к

выполнению информированного вывода и операции чтения/записи файлов с расширением. fuz, хранящих структуру БЗ.

- Модуль *model* описывает структуру и функционал каталога лингвистических переменных для более структурированного отображения и программной обработки.
- Модуль *events* реализует событийно-ориентированный подход и предназначен для обмена данными между отдельными модулями всей системы.

Графический интерфейс ПО ИС «BridgeTCA» содержит 4 главных экранных формы: «Переменные», «Правила», «Структура» и «Оценка состояния». Переключение между формами может быть осуществлено в любой момент работы с программой.

Экранная форма «Переменные» (рис. 7) необходима для просмотра, создания, удаления и модификации лингвистических переменных и их термов. Информация о лингвистической переменной включает ее название, границы области определения (интервал) и перечень термов. Информация о каждом терме переменной включает его название, тип функции принадлежности и ее параметры (A, B, C и D в зависимости от типа). Для наглядности график функции принадлежности терма также отображается на экранной форме.

Рисунок 7. Экранная форма «Переменные» (составлен авторами)

Экранная форма «Правила» (рис. 8) необходима для просмотра, создания, удаления и модификации правил. Информация об одном правиле содержит список нечетких утверждений (пар «переменная-терм»), составляющих часть «ЕСЛИ...» (посылки правила), а также одно нечеткое утверждение, содержащееся в части «...ТО...» (заключение правила). Для наглядности текстовое представление всего правила также отображается на экранной форме. Каждое правило после создания может быть модифицировано.

Рисунок 8. Экранная форма «Правила» (составлен авторами)

Экранная форма «Структура» (рис. 9) необходима для просмотра, создания, удаления и модификации элементов древовидной структуры (каталога) лингвистических переменных. Каждый элемент каталога может содержать произвольное количество лингвистических переменных (0 и более) и произвольное количество вложенных элементов каталога (0 и более). Такая система элементов необходима для представления всего мостового сооружения в виде системы отдельных конструкций, каждая из которых, в свою очередь также может являться сложной системой. К каждой из таких систем или их элементов можно отнести произвольное подмножество множества лингвистических переменных. Отметим, что одна лингвистическая переменная может относиться одновременно к 2 и более элементам каталога. Подобный способ организации лингвистических переменных предназначен для облегчения работы пользователей с базами знаний большой размерности.

Экранная форма «Оценка состояния» (рис. 10) необходима для получения балльной оценки и промежуточных показателей на основе данных, полученных в результате обследования мостового сооружения. Пользователю предлагается выбрать нужные элементы каталога и задать четкие значения, соответствующие лингвистическим переменным внутри данных элементов. В текстовом поле справа отобразятся результаты вычислений.

Рисунок 9. Экранная форма «Структура» (составлен авторами)

Рисунок 10. Экранная форма «Оценка состояния» (составлен авторами)

3. Апробация интеллектуальной системы «BridgeTCA»

Для апробации разработанной интеллектуальной системы была выбрана задача оценки технического состояния путепровода через железную дорогу Москва – Казань, находящегося на км 732+221 автомобильной дороги М-7 «Волга» Москва – Владимир – Нижний Новгород – Казань – Уфа. В таблице 3 приведены основные характеристики данного путепровода.

Таблица 3

Характеристики обследованного путепровода

Характеристика		Значение
Год постройки		1994
Категория автомобильной дороги		II
Среднесуточная интенсивность движения (2014 г.)		9051 авт./сут.
Полная длина путепровода		130,5 м
Габарит проезда по путепроводу		10,93 м
Ширина тротуаров	Левый	1,05 м
	Правый	1,035 м
Нормативные временные вертикальные нагрузки		A11 и НК-80 [111]
Система сооружения		Температурно-неразрезная
Количество пролетов		5
Полная длина пролетных строений	№1 и №2	24,0 м (расчетный пролет 23,4 м)
	№3	33,0 м (расчетный пролет 32,4 м)
	№4 и №5	24,0 м (расчетный пролет 23,4 м)

Составлена авторами

Обследование путепровода проводилось в июле 2015 года в дневное время при естественном освещении в солнечную погоду при температуре воздуха +18...+20 °С. При обследовании использовались следующие способы осмотра и наблюдений:

- визуальный осмотр конструкций с контрольным обмером отдельных элементов механической рулеткой длиной 5,0 м и лазерной рулеткой;
- фотографирование общих видов и узлов мостовых конструкций, ситуации;

- измерение прочности бетона в конструкциях производилось неразрушающим методом при помощи молотка Шмидта;
- измерение трещин при помощи измерительного микроскопа МПБ-2;
- инструментальная съемка элементов конструкций производилась электронным тахеометром.

На основе осмотра конструкций по фасадам и снизу, инженеры сделали предварительное заключение о том, что конструкции сооружения имеют удовлетворительное состояние. Однако были обнаружены локальные повреждения отдельных элементов, загрязнения части конструкций, потеки, известковые отложения. Приведем основные результаты обследования:

- Существующий габарит проезжей части (10,93 м) не соответствует требованиям к минимальному габариту автодорог II категории на мостах (11.5 м).
- Фактическая толщина дорожной одежды (до 33 см) превышает нормативные значения (17 см).
- Значения продольных (6-8 ‰) и поперечных (11-19 ‰) уклонов не соответствуют нормам обеспечения водоотвода с поверхности одежды.
- Частичные разрушения защитных козырьков на консолях пролетного строения.
- Водоотводные трубы загрязнены.
- На всех опорах отсутствуют сливные призмы.
- Фактическая удерживающая способность ограждения (110 кДж) ниже требуемой (250 кДж).
- На всем протяжении сооружения разрушено асфальтобетонное покрытие тротуаров.
- Коррозия на перильном ограждении тротуаров.
- Частично нарушены конструкции деформационных швов; имеются протечки; нарушены заполнения деформационных швов над концевыми опорами.
- Деградационное разрушение консольных свесов плиты.
- Локальные следы выщелачивания на пролетных строениях.
- Обнажение рабочей арматуры железобетонных балок пролетных строений.
- Незначительные разрушения верхней поверхности насадки опоры №6.
- Неглубокие разрушения защитного слоя бетона шкафных стенок опор №1 и №6, локальные участки оголения и коррозии арматуры.
- Незначительные повреждения монолитной части укрепления подхода №2.
- Грузоподъемность сооружения не обеспечивает пропуск проектных нагрузок А11 и НК-80.

Проведенная по ОДМ 218.3.014-2011 оценка технического состояния сооружения – «неудовлетворительно». Было принято решение о регулировании движения автотранспорта с установкой дорожных знаков:

- Ограничение массы транспортных средств в потоке до 9 тонн (установка знаков «Ограничение массы»).
- Ограничение нагрузки на ось транспортных средств в потоке до 25 тонн (установка знаков «Ограничение нагрузки на ось»).

Для проверки работоспособности разработанной ИС «BridgeTCA» результаты осмотра были поданы ей на вход в виде множества значений $X_{\text{мост}}$. Полученные оценки представлены в таблице 4.

Таблица 4

**Оценки конструктивных элементов путепровода через
железную дорогу Москва-Казань, полученные с помощью ИС «BridgeTCA»**

Объект оценки	Категория состояния
Мостовое сооружение (в целом)	Неудовлетворительно
Автомобильный мостовой переход	Удовлетворительно
Пролетные строения	Удовлетворительно
Опоры	Удовлетворительно
Фундамент опор	Хорошо
Узлы опирания и опорные части	Удовлетворительно
Мостовое полотно	Неудовлетворительно
Деформационные швы	Неудовлетворительно
Эксплуатационные устройства	Хорошо
Удерживающие и регулирующие конструкции	Неудовлетворительно
Укрепления откосов	Удовлетворительно
Подходы	Хорошо

Составлена авторами

Общая оценка мостового сооружения, полученная с помощью, разработанной ИС, совпадает с оценкой по ОДМ 218.3.014-2011. Оценки отдельных конструктивных элементов эксперты признали адекватными реальному состоянию.

Также системой на основе входных данных и полученных оценок были сформированы рекомендации для инженеров. С учетом сформированных системой рекомендаций инженерами было принято решение о выполнении ремонта сооружения с доведением грузоподъемности и габарита моста до норм, установленных для II категории автодорог. Проект ремонта предусматривал следующие мероприятия:

- ремонт опор;
- ремонт несущих конструкций мостового полотна и пролетных строений;
- устройство бетонных сливов на опорах;
- удаление лишних слоев покрытия с заменой всех слоев дорожной одежды мостового полотна и устройством гидроизоляции;
- восстановление системы водоотвода с проезжей части моста и подходов;
- замена перильного ограждения;
- замена ограждения безопасности проезда на сооружении;
- увеличение габарита проезда за счет переустройства тротуаров;
- устройство конструкции мостового полотна с установкой деформационных швов соответствующего типа;

- ремонт конструкций сопряжения моста с подходами;
- ремонт укрепления конусов насыпи на подходах;
- гидрофобизация балок пролетного строения и других конструкций.

Таким образом, ИС «BridgeTCA» была успешно применена для поддержки принятия решения по оценке состояния и проведению ремонтных работ.

Для подтверждения работоспособности ИС «BridgeTCA» для разных наборов входных данных, она была аналогичным образом апробирована на ряде мостовых сооружений, находящихся в различном техническом состоянии. Результаты апробации приведены в таблице 5.

Таблица 5

Оценки мостовых сооружений, полученные с помощью ИС «BridgeTCA»

Краткое описание сооружения	Оценка ИС «BridgeTCA»	Оценка по результатам обследования
Мост через р. Белая на км 118+187 автомобильной дороги Оренбург – Соль – Илецк – Акбулак – гр. Республики Казахстан, Акбулакский район Оренбургской области	Удовлетворительное	Удовлетворительное
Путепровод через железную дорогу на км 1869+030 автомобильной дороги М-5 «Урал» Москва – Рязань – Пенза – Самара – Уфу – Челябинск, Челябинская область	Неудовлетворительное	Неудовлетворительное
Мост через реку Каряка и реку Кармасан км 1305+140 на федеральной автомобильной дороге М-7 «Волга» Москва – Владимир – Нижний Новгород – Казань – Уфа, Республика Башкортостан	Хорошее	Хорошее
Мостовой переход через реку Сакмара на км 3+300 автомобильной дороги Казань – Оренбург, Сакмарский район Оренбургской области	Хорошее	Хорошее

Составлена авторами

Оценки состояния рассмотренных мостовых сооружений эксперты признали адекватными. Оценки отдельных конструктивных элементов рассмотренных сооружений эксперты признали адекватными реальному состоянию. Таким образом, была показана работоспособность ИС «BridgeTCA» на примере оценки 5 мостовых сооружений.

4. Применение алгоритма повышения эффективности нечеткого вывода

Разработанный алгоритм повышения эффективности нечеткого вывода был применен к полученной БЗ ИС «BridgeTCA». В первую очередь, были выполнены алгоритмы построения каскадной модели БЗ и измерено время их выполнения (таблица 6).

Таблица 6

Время выполнения алгоритмов построения каскадной модели БЗ

Алгоритм	Время выполнения
Алгоритм генерации матрицы зависимостей правил	335 мс
Алгоритм ранжирования правил	16 мс
Алгоритм генерации матрицы зависимостей переменных	29 мс
Алгоритм ранжирования переменных	2 мс

Составлена авторами

Полученная каскадная БЗ содержит $|VG| = 3$ группы дефазификации лингвистических переменных и $|RG| = 2$ группы выполнения правил (рис. 11).

Рисунок 11. Схема каскадной модели базы знаний ИС «BridgeTCA» (составлен авторами)

Далее каскадная БЗ использовалась алгоритмами нечеткого вывода. Каждый алгоритм было выполнено $n = 100$ раз, усредненное экспериментальное время выполнения для каждого алгоритма вычислялось по формуле

$$\bar{t}_i = \frac{\sum_{j=1}^n \hat{t}_{i,j}}{n} \quad (3)$$

где: i – номер алгоритма (1 – неинформированный; 2 – информированный; 3 – информированный в 2 потоках; 4 – информированный в 3 потоках; 5 – информированный в 4 потоках), j – номер наблюдения, $\hat{t}_{i,j}$ – экспериментальное время выполнения алгоритма в j -м наблюдении.

Было произведено сравнение полученных усредненных экспериментальных значений с модельными (рис. 12). Таким образом, была показана адекватность полученных регрессионных моделей (таблица 7), когда наибольшее отклонение экспериментальных значений от модельных составляет 2,55 %.

Рисунок 12. Время выполнения алгоритмов нечеткого вывода (составлен авторами)

Таблица 7

**Относительное сокращение времени информированного
нечеткого вывода в сравнении с неинформированным выводом в ИС «BridgeTCA»**

Алгоритм	Относительное сокращение времени вывода
Информированный	79,26 %
Информированный (2 потока)	82,19 %
Информированный (3 потока)	82,61 %
Информированный (4 потока)	82,96 %

Получение оценки технического состояния в базовом случае производится однократно по результатам последнего обследования конкретного мостового сооружения. Однако на практике экспертные знания и нормативные требования могут со временем изменяться. Следовательно, появляется необходимость во внесении изменений в БЗ, перерасчета оценок, полученных по результатам многих предыдущих обследований сразу для большого количества сооружений (например, в пределах региона). Это позволит отслеживать динамику изменения состояния каждого сооружения, производить сравнение оценок различных сооружений. Таким образом, повышение быстродействия ИС «BridgeTCA» при вычислении большого количества оценок будет положительным образом сказываться на временных затратах инженеров, использующих данную систему.

5. Примеры правил из базы знаний ИС «BridgeTCA»

<i>RB_{ex1}</i>	
Лингвистическая переменная	Значение
ЕСЛИ	
Габарит приближения конструкций по высоте не соответствует нормам	Сильное несоответствие нормам
И	
Габарит приближения конструкций по ширине не соответствует нормам	Сильное несоответствие нормам
ТО	
Оценка состояния автодорожного мостового перехода	Неудовлетворительное

<i>RB_{ex2}</i>	
Лингвистическая переменная	Значение
ЕСЛИ	
Габарит приближения конструкций по высоте не соответствует нормам	Соответствие нормам
И	
Габарит приближения конструкций по ширине не соответствует нормам	Соответствие нормам
ТО	
Оценка состояния автодорожного мостового перехода	Отличное

<i>RB_{ex3}</i>	
Лингвистическая переменная	Значение
ЕСЛИ	
Габарит подмостовой для судоходных пролетов не соответствует нормам	Сильное несоответствие нормам
ТО	
Оценка состояния автодорожного мостового перехода	Неудовлетворительное

<i>RB_{ex4}</i>	
Лингвистическая переменная	Значение
ЕСЛИ	
Габарит приближения конструкций по высоте не соответствует нормам	Незначительное несоответствие нормам
И	
Габарит приближения конструкций по ширине не соответствует нормам	Незначительное несоответствие нормам
ТО	
Оценка состояния автодорожного мостового перехода	Удовлетворительное

<i>RB_{ex5}</i>	
Лингвистическая переменная	Значение
ЕСЛИ	
Разрыв рабочей арматуры пролетного строения	Работоспособность конструкции утрачена
ТО	
Оценка состояния пролетного строения	Предаварийное

<i>RB_{ex6}</i>	
Лингвистическая переменная	Значение
ЕСЛИ	
Деградационное разрушение бетона с обнажением арматуры пролетного строения	Да
И	
Коррозия рабочей арматуры пролетного строения	Поверхностный налет окислов
ТО	
Оценка состояния пролетного строения	Удовлетворительное

<i>RB_{ex7}</i>	
Лингвистическая переменная	Значение
ЕСЛИ	
Деградационное разрушение бетона с обнажением арматуры пролетного строения	Да
И	
Коррозия рабочей арматуры пролетного строения	Толстые окислы, несущая способность ниже уровня проектных нагрузок
ТО	
Оценка состояния пролетного строения	Неудовлетворительное

<i>RB_{ex8}</i>	
Лингвистическая переменная	Значение
ЕСЛИ	
Деградационное разрушение бетона с обнажением арматуры пролетного строения	Да
И	
Коррозия рабочей арматуры пролетного строения	Толстые окислы, работоспособность конструкции утрачена
ТО	
Оценка состояния пролетного строения	Предаварийное

<i>RB_{ex9}</i>	
Лингвистическая переменная	Значение
ЕСЛИ	
«Биение» конструкции под временной нагрузкой из-за неплотностей в контакте опирания	Значительное
ТО	
Оценка состояния опор	Неудовлетворительное

<i>RB_{ex10}</i>	
Лингвистическая переменная	Значение
ЕСЛИ	
Сеть хаотических поверхностных трещин в бетоне пролетного строения	Обширная
И	
Поверхностное шелушение бетона пролетного строения	Обширное
ТО	
Оценка состояния пролетного строения	Удовлетворительное

<i>RB_{ex11}</i>	
Лингвистическая переменная	Значение
ЕСЛИ	
Положение конструкции в результате осадки	Минимальная
И	
Крен (отклонение от начального положения)	Минимальный
ТО	
Оценка состояния опор	Хорошее

<i>RB_{ex12}</i>	
Лингвистическая переменная	Значение
ЕСЛИ	
Трещина сквозная, расчленяющая конструкцию в зоне восприятия усилий от опираемой конструкции	Да
ТО	
Оценка состояния опор	Предаварийное

<i>RB_{ex13}</i>	
Лингвистическая переменная	Значение
ЕСЛИ	
Сдвиг относительно нижерасположенной конструкции	Значительный
ТО	
Оценка состояния опор	Предаварийное

<i>RB_{ex14}</i>	
Лингвистическая переменная	Значение
ЕСЛИ	
Выщелачивание цементного камня с отложением солей на поверхности опоры	Интенсивное распространенное с образованием сталактитов
И	
Глубина разрушения бетона опоры	Поверхностное (до 3 см)
ТО	
Оценка состояния опор	Удовлетворительное

<i>RB_{ex15}</i>	
Лингвистическая переменная	Значение
ЕСЛИ	
«Биение» конструкции под временной нагрузкой из-за неплотностей в контакте опирания	Нет
И	
Сдвиг относительно нижерасположенной конструкции	Нет
ТО	
Оценка состояния опор	Хорошее

<i>RB_{ex16}</i>	
Лингвистическая переменная	Значение
ЕСЛИ	
Завал опорной части	Незначительный
И	
Загрязнение контактных рабочих поверхностей опорных частей	Значительное
ТО	
Оценка состояния узлов опирания и опорных частей	Удовлетворительное

<i>RB_{ex17}</i>	
Лингвистическая переменная	Значение
ЕСЛИ	
Завал опорной части	Значительный
ТО	
Оценка состояния узлов опирания и опорных частей	Неудовлетворительное

<i>RB_{ex18}</i>	
Лингвистическая переменная	Значение
ЕСЛИ	
Отсутствует защитный футляр (при его необходимости)	Да
И	
Коррозия металла	Толстые окислы
ТО	
Оценка состояния узлов опирания и опорных частей	Неудовлетворительное

<i>RB_{ex19}</i>	
Лингвистическая переменная	Значение
ЕСЛИ	
Раскрытие температурных вертикальных трещин в монолитной кладке фундамента опоры	Значительное
И	
Раскрытие трещин по шву бетонирования монолитной кладки фундамента опоры	Значительное
ТО	
Оценка состояния фундамента опор	Неудовлетворительное

<i>RB_{ex20}</i>	
Лингвистическая переменная	Значение
ЕСЛИ	
Обнажение зерен крупного заполнителя бетона фундамента опоры	Повсеместное
ТО	
Оценка состояния фундамента опор	Удовлетворительное

<i>RB_{ex21}</i>	
Лингвистическая переменная	Значение
ЕСЛИ	
Деградиционное разрушение бетона с обнажением арматуры фундамента опоры	Да
И	
Коррозия рабочей арматуры фундамента опоры	Толстый налет окислов
ТО	
Оценка состояния фундамента опор	Неудовлетворительное

<i>RB_{ex22}</i>	
Лингвистическая переменная	Значение
ЕСЛИ	
Отсутствует гидроизоляция (при её необходимости)	Да
И	
Отсутствуют водоотводные трубки (при их необходимости)	Да
И	
Отсутствуют защитные карнизные козырьки (при их необходимости)	Да
ТО	
Оценка состояния мостового полотна	Неудовлетворительное

<i>RB_{ex23}</i>	
Лингвистическая переменная	Значение
ЕСЛИ	
Колейность покрытия	Высокая
ТО	
Оценка состояния мостового полотна	Неудовлетворительное

<i>RB_{ex24}</i>	
Лингвистическая переменная	Значение
ЕСЛИ	
Недостаточные водоотводящие поперечные уклоны при продольном уклоне до 10 ‰	Да
И	
Расстройство конструкции водоотводной трубки	Значительное
И	
Застой воды на проезде (при дождевых осадках, снеготаянии)	Значительный
ТО	
Оценка состояния мостового полотна	Неудовлетворительное

<i>RB_{ex25}</i>	
Лингвистическая переменная	Значение
ЕСЛИ	
Удерживающая способность конструкции ограждения: отношение фактического значения к требуемому	Незначительное отклонение от нормы
И	
Недостаточная высота ограждения	Незначительное отклонение от нормы
ТО	
Оценка состояния мостового полотна	Удовлетворительное

<i>RB_{ex26}</i>	
Лингвистическая переменная	Значение
ЕСЛИ	
Колейность покрытия	Незначительная
И	
Выбоины по полосам движения (множественные)	Нет
И	
Сверхнормативная толщина покрытия	Нет
ТО	
Оценка состояния мостового полотна	Отличное

<i>RB_{ex27}</i>	
Лингвистическая переменная	Значение
ЕСЛИ	
Отсутствует ограждение безопасности	Да
ТО	
Оценка состояния мостового полотна	Неудовлетворительное

<i>RB_{ex28}</i>	
Лингвистическая переменная	Значение
ЕСЛИ	
Разрушение конструкции деформационного шва	Присутствует, без угрозы безопасности движения
И	
Протечки через конструкцию деформационного шва	Да
ТО	
Оценка состояния деформационного шва	Неудовлетворительное

<i>RB_{ex29}</i>	
Лингвистическая переменная	Значение
ЕСЛИ	
Разрушение конструкции деформационного шва	Присутствует, с угрозой безопасности движения
ТО	
Оценка состояния деформационного шва	Неудовлетворительное

<i>RB_{ex30}</i>	
Лингвистическая переменная	Значение
ЕСЛИ	
Чрезмерная ширина зазора деформационного шва открытого типа	Значительная ширина
ТО	
Оценка состояния деформационного шва	Неудовлетворительное

<i>RB_{ex31}</i>	
Лингвистическая переменная	Значение
ЕСЛИ	
Разрушение конструкции деформационного шва	Нет
И	
Расстройство заполнения деформационного зазора	Нет
И	
Расстройство поддерживающей заполнение конструкции	Нет
ТО	
Оценка состояния деформационного шва	Отличное

<i>RB_{ex32}</i>	
Лингвистическая переменная	Значение
ЕСЛИ	
Расстройство конструкции прохода	Значительное повреждение, работоспособность конструкции утрачена
ТО	
Оценка состояния удерживающих и регуляционных конструкций	Неудовлетворительное

<i>RB_{ex33}</i>	
Лингвистическая переменная	Значение
ЕСЛИ	
Повреждение бетона	Незначительное
И	
Повреждение материала плит	Незначительное
И	
Расстройство монолитных швов между плитами	Незначительное
ТО	
Оценка состояния укрепления откосов	Хорошее

<i>RB_{ex34}</i>	
Лингвистическая переменная	Значение
ЕСЛИ	
Деформации ковра мощения	В массовом порядке
И	
Разрушение ковра мощения	Да, вне зоны подтопления
ТО	
Оценка состояния укрепления откосов	Неудовлетворительное

<i>RB_{ex35}</i>	
Лингвистическая переменная	Значение
ЕСЛИ	
Разрушение ковра мощения	Да, в зоне подтопления
ТО	
Оценка состояния укрепления откосов	Предаварийное

<i>RB_{ex36}</i>	
Лингвистическая переменная	Значение
ЕСЛИ	
Пустоты в грунтовом массиве в зоне опирания конструкции на насыпь	Обширные
И	
Расстройство конструкции переходной плиты	Значительное повреждение, работоспособность конструкции ограничена
ТО	
Оценка состояния подходов	Предаварийное

<i>RB_{ex37}</i>	
Лингвистическая переменная	Значение
ЕСЛИ	
Обрушение конструкции опорной плиты	Да
ТО	
Оценка состояния подходов	Аварийное

<i>RB_{ex38}</i>	
Лингвистическая переменная	Значение
ЕСЛИ	
Расстройство конструкции переходной плиты	Нет
И	
Крутизна откоса более нормативной	Нет
И	
Продольные трещины оползания грунтового массива в пределах ширины проезда	Нет
ТО	
Оценка состояния подходов	Отличное

<i>RB_{ex39}</i>	
Лингвистическая переменная	Значение
ЕСЛИ	
Отсутствует конструктивный элемент, предусмотренный проектом	Да
ТО	
Оценка состояния эксплуатационных обустройств	Неудовлетворительное

<i>RB_{ex40}</i>	
Лингвистическая переменная	Значение
ЕСЛИ	
Препятствие, затрудняющее проход по откосному лестничному сходу	Да
И	
Скользкая поверхность конструкции прохода	Да
ТО	
Оценка состояния эксплуатационных обустройств	Неудовлетворительное

<i>RB_{ex41}</i>	
Лингвистическая переменная	Значение
ЕСЛИ	
Препятствие, затрудняющее проход по откосному лестничному сходу	Нет
И	
Скользкая поверхность конструкции прохода	Нет
И	
Затруднение прохода в результате загрязнения поверхности движения	Нет
ТО	
Оценка состояния эксплуатационных обустройств	Отличное

<i>RB_{ex42}</i>	
Лингвистическая переменная	Значение
ЕСЛИ	
Деградационное разрушение бетона с обнажением арматуры пролетного строения	Да
И	
Коррозия рабочей арматуры пролетного строения	Толстые окислы, работоспособность конструкции утрачена
ТО	
Оценка состояния мостового сооружения	Предаварийное

<i>RB_{ex43}</i>	
Лингвистическая переменная	Значение
ЕСЛИ	
Обрушение конструкции опорной плиты	Да
ТО	
Оценка состояния мостового сооружения	Аварийное

<i>RB_{ex44}</i>	
Лингвистическая переменная	Значение
ЕСЛИ	
Разрушение ковра мощения	Да, в зоне подтопления
ТО	
Оценка состояния мостового сооружения	Предаварийное

<i>RB_{ex45}</i>	
Лингвистическая переменная	Значение
ЕСЛИ	
Оценка состояния автодорожного мостового перехода	Аварийное
ТО	
Оценка состояния мостового сооружения	Аварийное

<i>RB_{ex46}</i>	
Лингвистическая переменная	Значение
ЕСЛИ	
Оценка состояния опор	Аварийное
ТО	
Оценка состояния мостового сооружения	Аварийное

<i>RB_{ex47}</i>	
Лингвистическая переменная	Значение
ЕСЛИ	
Оценка состояния пролетного строения	Аварийное
ТО	
Оценка состояния мостового сооружения	Аварийное

<i>RB_{ex48}</i>	
Лингвистическая переменная	Значение
ЕСЛИ	
Оценка состояния опор	Неудовлетворительное
И	
Оценка фундамента опор	Неудовлетворительное
ТО	
Оценка состояния мостового сооружения	Предаварийное

<i>RB_{ex49}</i>	
Лингвистическая переменная	Значение
ЕСЛИ	
Оценка состояния пролетного строения	Неудовлетворительное
И	
Оценка фундамента мостового полотна	Неудовлетворительное
ТО	
Оценка состояния мостового сооружения	Предаварийное

<i>RB_{ex50}</i>	
Лингвистическая переменная	Значение
ЕСЛИ	
Оценка состояния автодорожного мостового перехода	Отличное
И	
Оценка состояния пролетного строения	Отличное
И	
Оценка состояния опор	Отличное
И	
Оценка состояния фундамента опор	Отличное
И	
Оценка состояния узлов опирания и опорных частей	Отличное
ТО	
Оценка состояния мостового сооружения	Отличное

Заключение

В работе кратко рассмотрены особенности создания интеллектуальных систем, при этом жизненный цикл этих систем разделяется на этапы: идентификация, концептуализация, формализация, выполнение, отладка, опытная эксплуатация. Отмечается, что реальный процесс создания интеллектуальной (экспертной) системы не всегда строго следует приведенному порядку: возможны возвраты на один или несколько этапов назад, повторения этапов, причиной чего является наличие ошибок или недоработок, допущенных на предыдущих этапах и выявляемых только на последующих. Поэтому создание интеллектуальной системы это собой длительный и трудозатратный процесс, сроки завершения которого не всегда возможно прогнозировать в начале разработки.

Для описания неуверенности или неполноты знаний экспертов в данной работе используется теория нечетких множеств

Приводится описание интеллектуальной системы «BridgeTCA» для решения задачи оценки технического состояния мостовых сооружений. Разработанная интеллектуальная система, включающая каскадную базу знаний, интерфейс пользователя, решающий и обучающий компоненты, позволяет накапливать и обрабатывать экспертные знания,

принимать решение о техническом состоянии мостового сооружения и необходимых мерах для восстановления долговечности, безопасности и грузоподъемности.

Эта интеллектуальная система «BridgeTCA» прошла апробацию на примере задачи оценки технического состояния 5 мостовых сооружений. Полученные с помощью системы оценки и рекомендации эксперты признали достоверными. В разработанной интеллектуальной системе был применен алгоритм повышения эффективности нечеткого вывода. В зависимости от количества параллельных потоков выполнения было достигнуто сокращение времени, затрачиваемого на нечеткий вывод, на 79-83 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нигаматова О.И., Овчинников И.Г., Шварц А.Ю., Овчинников И.И. О разработке интеллектуальных систем проектирования и оценки технического состояния мостовых сооружений. Часть 1 // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2018 No1, <https://t-s.today/PDF/10SATS118.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/10SATS118.
2. Поспелов Г.С. Системный анализ и искусственный интеллект. – Москва: Препринт ВЦ АН СССР, 1980. – 370 с.
3. Аверкин А.Н., Гаазе-Рапопорт М.Г., Поспелов Д.А. Толковый словарь по искусственному интеллекту. М.: Радио и связь, 1992. – 256 с.
4. Искусственный интеллект. Справочник в трёх томах М.: Радио и связь, 1990 / под ред. В.Н. Захарова, Э.В. Попова, Д.А. Поспелова, В.Ф. Хорошевского.
5. Долинина О.Н. Разработка метода тестирования продукционных баз знаний экспертных систем с учётом ошибок типа “забывание об исключении”. – Саратов: [б.н.], 1997 г. – Деп. в ВИНТИ №678-B97. – 174 с.
6. Quillian, M.R. Semantic memory // Semantic information processing, 1968 – p. 227-270.
7. Minsky M. A Framework for Representing Knowledge // The Psychology of Computer Vision. – New York: McGraw-Hil, 1975 г. – p. 132-143.
8. Roussopoulos N. A semantic network model of data bases // TR No 104. – [б.м.]: Department of Computer Science, University of Toronto, 1976 г. – p. 105-140.
9. Hayes-Roth F., Jacobstein. N. The State of Knowledge-Based Systems // Communications of the ACM. – March 1994 г. – 6: Т. 37. – p. 27-39.
10. Rosenblatt F. Principles of neurodynamics: Perceptrons and the Theory of Brain Mechanisms. – New York : Spartan Books, 1962. – 176 p.
11. Codd. E.F. A Relational Model of Data for Large Shared Data Banks // Communications of the ACM, Vol. 13, No. 6, 1970.
12. Себеста У.Р. Основные концепции языков программирования. – 5-е изд. – М.: Вильямс, 2001. – 672 с.
13. Барский, А.Б. Нейронные сети: распознавание, управление, принятие решений / А.Б. Барский. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 176 с.
14. Антипов О.И., Неганов В.А. Анализ и прогнозирование поведения временных рядов: бифуркации, катастрофы, синергетика, фракталы и нейронные сети. – М.: Радиотехника, 2011. – 350 с.
15. Еременко, Ю.И., Полещенко, Д.А., Глущенко, А.И. Анализ методов реализации схемы нейросетевого управления с самонастройкой // Приборы и системы. Управление. Контроль. Диагностика. – 2012. – №6. – С. 50-55.

16. Post E.L. Formal Reductions of the General Combinatorial Decision Problem // American Journal of Mathematics, No. 65, pp. 197-215, 1943.
17. Mamdani E.H., Assilian S.: An Experiment In Linguistic Synthesis With Fuzzy Logic Controller. International Journal Of Man-Machine Studies, vol. 7, No. 1, pp. 1-13 (1975).
18. Tsukamoto Y.: An Approach To Fuzzy Reasoning Method. In: Gupta M.M., Ragade R.K. and Yager R.R. (eds.) Advances In Fuzzy Set Theory And Applications, pp. 137-149 (1979).
19. Takagi T.: Sugeno M., Fuzzy Identification Of Systems And Its Applications To Modeling And Control. IEEE Transactions On Systems, Man, And Cybernetics, vol. 15, No. 1, pp. 116-132 (1985).
20. Larsen P.M.: Industrial Applications Of Fuzzy Logic Control. International Journal Of Man-Machine Studies, vol. 12, pp. 3-10 (1980).
21. Seki H., Mizumoto M.: On the Equivalence Conditions of Fuzzy Inference Methods – Part 1: Basic Concept and Definition. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 9, No. 6, pp. 1097-1106 (2011).
22. Mizumoto M.: Fuzzy controls under various fuzzy reasoning methods. Information Science, vol. 45, pp. 129-151 (1988).
23. Sugeno M.: On stability of fuzzy systems expressed by fuzzy rules with singleton consequents. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 7, No. 2, pp. 201-224 (1999).
24. Yubazaki N., Yi J., Hirota K.: SIRM (Single Input Rule Modules) connected fuzzy inference model. Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, vol. 1, No. 1, pp. 23-30 (1997).
25. Полковникова Н.А., Курейчик В.М. Разработка модели экспертной системы на основе нечёткой логики // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 1 (150). – С. 83-92.
26. Демидова Л.А., Кираковский В.В., Пылькин А.Н. Алгоритмы и системы нечёткого вывода при решении задач диагностики городских инженерных коммуникаций в среде MATLAB. Москва.: Радио и связь, Горячая линия – Телеком, 2005. – 365 с.
27. Демидова Л.А., Кираковский В.В., Пылькин А.Н. Принятие решений в условиях неопределенности. – М.: Горячая линия-Телеком, 2012.
28. Сакулин С.А. Анализ состояния технологических процессов на основе нечётких экспертных знаний: дисс. ... канд. техн. наук. – Москва, 2009.
29. M.S. Islam, M.S. Bhuyan, M.A. Azim, L.K. Teng and M. Othman, "Hardware Implementation of Traffic Controller using Fuzzy Expert System" // Evolving Fuzzy Systems, 2006 International Symposium on, Ambleside, 2006, pp. 325-330.
30. Xiaocheng Shi, Yunlong Wang, J. Li and Ying Qu, "A fuzzy expert system for submarine damage control" // Mechatronics and Automation, 2009. ICMA 2009. International Conference on, Changchun, 2009, pp. 638-643.
31. A. Khodayari, R. Kazemi, A. Ghaffari and R. Braunstingl, "Design of an improved fuzzy logic based model for prediction of car following behavior" // Mechatronics (ICM), 2011 IEEE International Conference on, Istanbul, 2011, pp. 200-205.
32. P. Zhou, T. Chai and J. Sun, "Intelligence-Based Supervisory Control for Optimal Operation of a DCS-Controlled Grinding System" // IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 21, no. 1, pp. 162-175, Jan. 2013.

33. J. Pokhrel, B. Wehbi, A. Morais, A. Cavalli and E. Allilaire, "Estimation of QoE of video traffic using a fuzzy expert system" // Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), 2013 IEEE, Las Vegas, NV, 2013, pp. 224-229.
34. M. Xu, H. Yu, L. Huang and G. Meng, "The research of parallel structure and composite fuzzy control for linear machine based on Mamdani method" // Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2014 17th International Conference on, Hangzhou, 2014, pp. 1749-1752.
35. J. Talla, L. Streit, Z. Peroutka and P. Drabek, "Position-Based T-S Fuzzy Power Management for Tram with Energy Storage System" // IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 62, no. 5, pp. 3061-3071, May 2015.
36. H. Malekly, S. Meysam Mousavi, H. Hashemi. (2010) A fuzzy integrated methodology for evaluating conceptual bridge design. Expert Systems with Applications 37:7, pages 4910-4920.
37. Zadeh, L.A.: Fuzzy Sets. Information and Control, vol. 8, pp. 338-353 (1965).
38. Приходько Т.А. Модель автоматизации прогноза остаточного ресурса элементов металлических мостов на основе нечеткой логики // Международный научный журнал Металлические конструкции, том 6, №1, Макеевка, 2003. С. 43-47.
39. Приходько Т.А. Применение методов искусственного интеллекта для экспертной оценки технического состояния мостов // Вісник Донбаської державної академії будівництва та архітектури. Збірник наукових праць. Вип. 2005-1(49), Макіївка, 2005, С. 96-100.
40. Овчинников И.Г., Овчинников И.И. Применение теории нечетких множеств к оценке состояния мостовых сооружений // Дороги России 21 века, 2009. – №5. – С. 92-96.
41. Нигаматова О.И., Овчинников И.Г. Методика оценки технического состояния мостовых конструкций в условиях неопределенности // Строительство и экология: теория, практика, инновации: материалы I Международной научно-практической конференции. – Челябинск: Издательство «ПИРС», 2015. – 308 с. С. 250-251.
42. ОДМ 218.4.001-2008 Методические рекомендации по организации обследования и испытания мостовых сооружений на автомобильных дорогах [Электронный ресурс] // Консорциум «Кодекс». Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации [сайт]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200065669>.
43. ОДМ 218.3.014-2011 Методика оценки технического состояния мостовых сооружений на автомобильных дорогах [Электронный ресурс] // Консорциум «Кодекс». Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации [сайт]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200088790>.
44. The Java® Virtual Machine Specification [Электронный ресурс] // Java SE | Oracle Technology Network | Oracle [сайт]. URL: <https://docs.oracle.com/javase/specs/jvms/se7/html/>.
45. JavaFX: Getting Started with JavaFX [Электронный ресурс] // Java SE | Oracle Technology Network | Oracle [сайт]. URL: <http://docs.oracle.com/javase/8/javafx/get-started-tutorial/jfx-overview.htm>.
46. Шварц А.Ю. Разработка моделей и алгоритмов повышения эффективности нечеткого вывода в продукционных интеллектуальных системах. Диссертация к.т.н. Саратов. СГТУ имени Гагарина Ю.А. 2017. 187 с.

Shvarts Aleksandr Yurievich

Yuri Gagarin state technical university of Saratov, Saratov, Russia
E-mail: shvartsaleksandr@gmail.com

Ovchinnikov Ilya Igorevich

Yuri Gagarin state technical university of Saratov, Saratov, Russia
Russian university of transport (MIIT)
Sochi institute of transport, Russia
E-mail: bridgear@mail.ru

Ovchinnikov Igor Georgievich

Perm national research polytechnic university, Perm, Russia
Yuri Gagarin state technical university of Saratov, Saratov, Russia
Russian university of transport (MIIT)
Sochi institute of transport, Russia
E-mail: bridgesar@mail.ru

Dolinina Olga Nikolaevna

Yuri Gagarin state technical university of Saratov, Saratov, Russia
E-mail: olga@sstu.ru

Nigamatova Olga Ivanovna

Ural state university of railway transport, Yekaterinburg, Russia
E-mail: olganigamatova@ya.ru

About development of intellectual systems of design and assessment of technical condition of bridge constructions. Part 2

Abstract. In work features of creation of intellectual systems are briefly considered, at the same time life cycle of these systems is divided into stages: identification, conceptualization, formalization, performance, debugging, trial operation. It is noted that real process of creation of intellectual (expert) system not always strictly follows the given order: returns on one or several stages are possible back, repetitions of stages, existence of the mistakes or defects allowed at the previous stages and revealed only on the subsequent is the reason of what. Therefore creation of intellectual system it long and labor-intensive process which date of completion it isn't always possible to predict at the beginning of development.

For the description of uncertainty or incompleteness of knowledge of experts in this work the theory of indistinct sets is used.

The description of the intellectual BridgeTCA system for the solution of a problem of assessment of technical condition of bridge constructions is provided. The developed intellectual system including the cascade knowledge base, the user's interface solving and training components allows to accumulate and process expert knowledge, to make the decision on technical condition of a bridge construction and necessary measures for restoration of durability, safety and loading capacity.

This intellectual BridgeTCA system has undergone approbation on the example of a problem of assessment of technical condition of 5 bridge constructions. Experts recognized the estimates received by means of system and the recommendation as reliable. In the developed intellectual system the algorithm of increase in efficiency of an indistinct conclusion has been applied. Depending on quantity of parallel streams of performance reduction of time spent for an indistinct conclusion for 79-83 % has been reached.

Keywords: intellectual systems; expert systems; design of bridges; inspection of bridges; assessment of a condition of bridges; durability of bridges; safety of bridges

REFERENCES

1. Nigamatova O.I., Ovchinnikov I.G., Shvarts A.Y., Ovchinnikov I.I. (2018). About development of intellectual systems of design and assessment of technical condition of bridge constructions. Part 1. *Russian journal of transport engineering*, [online] 1(5). Available at: <https://t-s.today/PDF/10SATS118.pdf> (in Russian) DOI: 10.15862/10SATS118.
2. Pospelov G.S. (1980). *Sistemnyj analiz i iskusstvennyj intellekt. [System Analysis and Artificial Intelligence.]* Moscow: Preprint of the Computing Center of the USSR Academy of Sciences, p. 370.
3. Averkin A.N., Gaaze-Rapoport M.G., Pospelov D.A. (1992). *Tolkovyj slovar' po iskusstvennomu intellektu. [Explanatory Dictionary of Artificial Intelligence.]* Moscow: Radio and Communication, p. 256.
4. (1990). *Iskusstvennyj intellekt. Spravochnik v tryoh tomah. [Artificial Intelligence. Directory in three volumes.* Ed. by Zaharov V.N., Popova E.H.V., Pospelova D.A., Horoshevskogo V.F.] Moscow: Radio and communication.
5. Dolinina O.N. (1997). *Razrabotka metoda testirovaniya produkcionnyh baz znanij ehkspertnyh sistem s uchytom oshibok tipa "zabyvanie ob isklyuchenii". [Development of a method for testing the product knowledge bases of expert systems, taking into account errors such as "forgetting the exception".]* Saratov, p. 174.
6. Quillian M.R. (1968). Semantic memory. *Semantic information processing*, pp. 227-270.
7. Minsky M. (1975). *A Framework for Representing Knowledge*. New York: McGraw-Hill, pp. 132-143.
8. Roussopoulos N. (1976). A semantic network model of data bases. *Department of Computer Science, University of Toronto*, 104, pp. 105-140.
9. Hayes-Roth F., Jacobstein. N. (1994). The State of Knowledge-Based Systems. *Communications of the ACM*, 6(37), pp. 27-39.
10. Rosenblatt F. (1962). *Principles of neurodynamics: Perceptrons and the Theory of Brain Mechanisms*. New York: Spartan Books, p. 176.
11. Codd E.F. (1970). A Relational Model of Data for Large Shared Data Banks. *Communications of the ACM*, 6(13), p. 176.
12. Sebesta U.R. (2001). *Osnovnye koncepcii yazykov programmirovaniya. [Basic concepts of programming languages.]* Moscow: Williams, p. 672.
13. Barskij A.B. (2004). *Nejronnye seti: raspoznavanie, upravlenie, prinyatie reshenij. [Neural networks: recognition, management, decision making.]* Moscow: Finance and Statistics, p. 176.
14. Antipov O.I., Neganov V.A. (2011). *Analiz i prognozirovaniye povedeniya vremennyh ryadov: bifurkacii, katastrofy, sinergetika, fraktaly i nejronnye seti. [Analysis and prediction of the behavior of time series: bifurcations, catastrophes, synergetics, fractals and neural networks.]* Moscow: Radio engineering, p. 350.
15. Eremenko Yu.I., Poleshenko D.A., Glushchenko A.I. (2012). Analysis of methods for implementing a neural network control scheme with self-tuning. *Devices and systems. Control. Control. Diagnostics*, 6, pp. 50-55. (in Russian).

16. Post E.L. (1943). Formal Reductions of the General Combinatorial Decision Problem. *American Journal of Mathematics*, 65, pp. 197-215.
17. Mamdani E.H., Assilian S. (1975). An Experiment In Linguistic Synthesis With Fuzzy Logic Controller. *International Journal Of Man-Machine Studies*, 1(7), pp. 1-13.
18. Tsukamoto Y. (1979). An Approach To Fuzzy Reasoning Method. Ed. by M.M. Gupta, R.K. Ragade, R.R. Yager. *Advances In Fuzzy Set Theory And Applications*, pp. 137-149.
19. Takagi T., Sugeno M. (1985). Fuzzy Identification Of Systems And Its Applications To Modeling And Control. *IEEE Transactions On Systems, Man, And Cybernetics*, 1(15), pp. 116-132.
20. Larsen P.M. (1980). Industrial Applications Of Fuzzy Logic Control. *International Journal Of Man-Machine Studies*, 12, pp. 3-10.
21. Seki H., Mizumoto M. (2011). On the Equivalence Conditions of Fuzzy Inference Methods – Part 1: Basic Concept and Definition. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 6(9), pp. 1097-1106.
22. Mizumoto M. (1988). Fuzzy controls under various fuzzy reasoning methods. *Information Science*, 45, pp. 129-151.
23. Sugeno M. (1999). On stability of fuzzy systems expressed by fuzzy rules with singleton consequents. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2(7), pp. 201-224.
24. Yubazaki N., Yi J., Hirota K. (1997). SIRMs (Single Input Rule Modules) connected fuzzy inference model. *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, 1(1), pp. 23-30.
25. Polkovnikova N.A., Kurejchik V.M. (2014). Development of a model of the expert system based on fuzzy logic. *News of SFedU. Technical science*, 1(150), pp. 83-92. (in Russian).
26. Demidova L.A., Kirakovskij V.V., Pyl'kin A.N. (2005). Algoritmy i sistemy nechyotkogo vyvoda pri reshenii zadach diagnostiki gorodskih inzhenernykh kommunikacij v srede MATLAB. [Algorithms and systems of fuzzy inference when solving problems of diagnostics of urban engineering communications in MATLAB environment.] Moscow: Radio and Communication, Hot line - Telecom, p. 365.
27. Demidova L.A., Kirakovskij V.V., Pyl'kin A.N. (2012). Prinyatie reshenij v usloviyah neopredelennosti. [Decision making in conditions of uncertainty.] Moscow: Hot line – Telecom.
28. Sakulin S.A. (2009). Analiz sostoyaniya tekhnologicheskikh processov na osnove nechyotkih ehkspertnykh znaniy. [Analysis of the state of technological processes on the basis of fuzzy expertise.] Moscow.
29. Islam M.S., Bhuyan M.S., Azim M.A., Teng L.K., Othman M. (2006). Hardware Implementation of Traffic Controller using Fuzzy Expert System. *Evolving Fuzzy Systems*, pp. 325-330.
30. Xiaocheng Shi, Yunlong Wang, J. Li, Ying Qu. (2009). A fuzzy expert system for submarine damage control. *Mechatronics and Automation*, pp. 638-643.
31. Khodayari A., Kazemi R., Ghaffari A., Braunstingl R. (2011). Design of an improved fuzzy logic based model for prediction of car following behavior. *Mechatronics (ICM)*, pp. 200-205.

32. Zhou P., Chai T., Sun J. (2013). Intelligence-Based Supervisory Control for Optimal Operation of a DCS-Controlled Grinding System. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 1(21), pp. 162-175.
33. Pokhrel J., Wehbi B., Morais A., Cavalli A., Allilaire E. (2013). Estimation of QoE of video traffic using a fuzzy expert system. *Consumer Communications and Networking Conference*, pp. 224-229.
34. Xu M., Yu H., Huang L., Meng G. (2014). The research of parallel structure and composite fuzzy control for linear machine based on Mamdani method. *Electrical Machines and Systems*, pp. 1749-1752.
35. Talla J., Streit L., Peroutka Z., Drabek P. (2015). Position-Based T-S Fuzzy Power Management for Tram with Energy Storage System. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 5(62), pp. 3061-3071.
36. Malekly H., Meysam Mousavi S., Hashemi H. (2010) A fuzzy integrated methodology for evaluating conceptual bridge design. *Expert Systems with Applications*, 37(7), pp. 4910-4920.
37. Zadeh L.A. (1965). Fuzzy Sets. *Information and Control*, 8, pp. 338-353.
38. Prihodko T.A. (2003). Model of automating the forecast of residual life of elements of metal bridges on the basis of fuzzy logic. *International Scientific Journal of Metal Constructions*, 1(6), pp. 43-47. (in Russian).
39. Prihodko T.A. (2005). Application of artificial intelligence methods for the expert assessment of the technical state of bridges. *Visnik Donbaskoyi derzhavnoyi akademiyi budivnictva ta arhitekturi*, 1(49), pp. 96-100. (in Russian).
40. Ovchinnikov I.G., Ovchinnikov I.I. (2009). Application of the theory of fuzzy sets to the assessment of the state of bridge structures. *Roads of Russia of 21 centuries*, 5, pp. 92-96. (in Russian).
41. Nigmatova O.I., Ovchinnikov I.G. (2015). Metodika ocenki tekhnicheskogo sostoyaniya mostovykh konstrukcij v usloviyah neopredelennosti. [Technique for assessing the technical condition of bridge structures under conditions of uncertainty.] Chelyabinsk: Publishing house "PEARS", p. 308.
42. The Kodeks Consortium. (n.d.). ОДМ 218.4.001-2008 *Methodical recommendations on the organization of inspection and testing of bridge structures on highways*. [online] Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200065669> (in Russian).
43. The Kodeks Consortium. (n.d.). ОДМ 218.3.014-2011 *Methodology for assessing the technical condition of bridge structures on highways*. [online] Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200088790> (in Russian).
44. Java SE | Oracle Technology Network. (n.d.). *The Java® Virtual Machine Specification*. [online] Available at: <https://docs.oracle.com/javase/specs/jvms/se7/html/>.
45. Java SE | Oracle Technology Network. (n.d.). *JavaFX: Getting Started with JavaFX*. [online] Available at: <http://docs.oracle.com/javase/8/javafx/get-started-tutorial/jfx-overview.htm>.
46. Shvarts A.Yu. (2015). Razrabotka modelej i algoritmov povysheniya effektivnosti nechetkogo vyvoda v produkcionnyh intellektualnyh sistemah. [Development of models and algorithms for increasing the efficiency of fuzzy inference in production intelligent systems.] Saratov: SSTU named after Gagarin Yu.A., p. 187.