

Интеллектуальные технологии в обследовании строительных конструкций

Г.Г.Кашеварова, ПНИПУ, Пермь

Ю.Л.Тонков, ПНИПУ, Пермь

Категория технического состояния (нормативное, работоспособное, ограниченно работоспособное или аварийное), определяемая при инженерном обследовании зданий и сооружений, является главным критерием в принятии решения о степени аварийности или необходимости проведения мероприятий по приведению их к дальнейшей безопасной эксплуатации. Принимаемые решения зависят от объективности и достоверности информации, предоставляемой экспертами, которую иногда нельзя интерпретировать как полностью истинную или полностью ложную. Усиление и расширение профессиональных возможностей специалистов, занимающихся обследованием строительных объектов, путём применения автоматизированных экспертных систем на базе математического аппарата теории нечётких множеств и нечёткой логики, даёт возможность учитывать разброс индивидуальных мнений. Информация из предметной области технической диагностики зданий и сооружений формализуется в терминах нечётких множеств с помощью функций принадлежности, созданных для входных и выходных контролируемых параметров. Для реализации нечёткого логического вывода предложен адаптированный к данной задаче алгоритм. Эта технология позволяет дать строгое математическое описание расплывчатых утверждений и реализует попытку преодолеть лингвистический барьер между человеком, суждения и оценки которого являются приближёнными и нечёткими, и компьютером, который может выполнять только чёткие инструкции. Разработана компьютерная программа, которая реализует метод идентификации категории технического состояния строительных конструкций на основе нечётких баз знаний.

Ключевые слова: категория технического состояния, строительные конструкции, нечёткая логика, нечёткая экспертная система, функции принадлежности, интеллектуальная автоматизация, онтологический анализ.

Intelligent Technologies in the Examination of Construction Structures

G.G.Kashevarova, PNRPU, Perm

Y.L.Tonkov, PNRPU, Perm

Category of technical condition (normative, workable, limited operational or emergency), which is determined by engineering inspection of buildings and structures, is the main criterion in making decisions about the degree of accident or the need to take measures to bring it to further use. The decisions taken depend on the objectivity and reliability of the information provided by experts, which sometimes cannot be interpreted as completely true

or completely false. It seems advisable to strengthen and expand the professional capabilities of specialists who are engaged in the survey of construction sites, through the use of expert systems on the basis of the mathematical apparatus of the theory of fuzzy sets and fuzzy logic. This makes it possible to take into account the scatter of individual opinions. Information from the subject area of technical diagnostics of buildings is formalized in terms of fuzzy sets with the use of membership functions created for both input and output control parameters. To implement the fuzzy logical inference, Mamdani's algorithm, modified and adapted to the given problem, was proposed. This technology allows to give a strict mathematical description of vague statements, realizing an attempt to overcome a linguistic barrier between a person whose judgments and assessments are approximate and indistinct, and a computer that can only perform clear instructions. A computer program has been developed that implements the method of identification of the category of technical condition of building structures on the basis of fuzzy knowledge bases.

Keywords: category of technical condition, building structures, fuzzy logic, fuzzy expert system, membership functions, intellectual automation, ontological analysis.

Актуальность темы

Повышение конструкционной безопасности – одно из приоритетных направлений комплексной безопасности зданий и сооружений в РФ. Важной предпосылкой к этому является обследование и техническая диагностика строительных объектов. Категория технического состояния (КТС) – главный критерий в принятии решения о необходимости мероприятий по приведению обследуемого строительного объекта к дальнейшей безопасной эксплуатации, который зависит от большого числа взаимосвязанных параметров и причин повреждённости конструкций. Оценки этих факторов, выдаваемые экспертом, обладают той или иной степенью погрешности, противоречивости и неопределённости. Например, в процессе измерения количественных параметров почти всегда присутствует погрешность, зависящая от применяемой приборной базы и квалификации специалиста. Неопределённость вносит как недостаточность сформулированных критериев оценки в нормативных документах для отнесения конструкции, здания или сооружения к той или иной категории технического состояния, так и короткая шкала ГОСТ, включающая всего четыре категории – нормативное, работоспособное, ограниченно работоспособное или аварийное. «Переход» строительной

конструкции из одного технического состояния в другое фактически происходит не «скачкообразно», а через множество промежуточных состояний, границы между которыми размыты. Всё это требует от эксперта при назначении КТС конструкций принятия волевых решений, которые увеличивают нежелательную долю субъективности в техническом заключении [1].

Эксперт, проводящий обследование, должен установить наиболее значимые признаки из выделенного набора параметров, характеризующего состояние конструкции, а для этого необходим опыт, развивающий у специалиста личные знания. Эти знания, называемые эвристическими, позволяют экспертам выдвигать разумные предположения, находить подходы к задачам и эффективно принимать решения при нечётких или неполных данных. Представляется целесообразным усиление и расширение профессиональных возможностей специалистов, занимающихся обследованием строительных объектов, путём применения интеллектуальных технологий. Под термином «интеллектуальные» подразумевается способность системы найти явные следствия из неявно представленных знаний, имитируя рассуждения человека.

Актуальность автоматизации процесса экспертной деятельности специалиста, проводящего обследование, имеет несколько причин. Прежде всего, это свойства человеческой памяти. Готовность каждого конкретного человека к воспроизведению информации может быть разной. Воспроизведение может быть точным, неполным либо переработанным. Мозг человека устроен как компьютер. Или, наоборот, компьютер создан по образу и подобию мозга человека. В памяти человека выделяют три составляющие: оперативная память (5–20 с.), кратковременная память (от 1 мин. – 5 суток), долговременная память (от 5 суток – до бесконечности). У человека тоже есть «оперативная память» и «жёсткий диск», – последний на языке психологов означает глубокие уровни памяти. В оперативной памяти человек может недолго хранить огромное количество сведений, которые быстро «улетучатся», если не будут использованы. Надолго откладываются знания только в глубоких уровнях памяти. Существует предположение, что долговременная память служит основой интуиции. Обычные люди не всегда в нужной ситуации способны использовать свой «жёсткий диск».

Автоматизированный поиск экспертного решения может оказать помощь в работе не только начинающему, но и опытному эксперту.

«Искусственный интеллект» и экспертные системы

Возможность автоматизации решения задач экспертной деятельности по диагностике строительных конструкций в условиях неопределённости целесообразно искать в области систем искусственного интеллекта. Термин «artificial-intelligence» (в переводе с английского на русский язык означает «искусственный интеллект» или «разумные решения и логические рассуждения») введён американским ученым Джоном Маккарти в 1956 году.

В начале восьмидесятых годов XX века в исследованиях по искусственному интеллекту сформировалось самостоятельное

направление, получившее название «экспертные системы» (ЭС), которые при решении сложных задач по принятию решений в условиях многофакторности и неоднозначности получают результаты, не уступающие по качеству и эффективности решениям, получаемым опытным человеком-экспертом. Эти решения обладают «прозрачностью», то есть могут быть объяснены пользователю на качественном уровне. ЭС способны пополнять свои знания в ходе взаимодействия с экспертом. Они не призваны заменить эксперта в его непосредственной предметной деятельности, а расширяя и усиливая профессиональные возможности пользователей [2], способны повысить мыслительную деятельность человека, взять на себя некоторые функции человека-эксперта или «работать» в качестве ассистента лица, принимающего решение в проблемной ситуации.

Анализ мирового опыта показывает, что технология экспертных систем используется для решения различных типов задач (управления, интерпретации, диагностики, планирования, конструирования, контроля и др.) в самых разнообразных проблемных областях. Среди них – нефтяная и газовая промышленность, энергетика, транспорт, медицина, космос, металлургия, горное дело, химия, телекоммуникации и связь, экология и др. В строительной отрасли технология экспертных систем также вызывает определённый интерес, о чём свидетельствуют как зарубежные, так и отечественные публикации [3–7]. В России исследования и разработки в области экспертных систем включены в ряд государственных и отраслевых научно-технических программ.

Архитектура экспертных систем (рис. 1) с точки зрения входящих в неё программных модулей является типовой для большинства проектов.

Модули экспертных систем могут быть по-разному реализованы, но их состав и взаимодействие имеют чёткое назначение. При создании экспертной системы основные усилия разработчиков концентрируются на создании базы знаний, а именно на выборе моделей представления знаний, и решателя – методов принятия решений. Под экспертными знаниями понимается сочетание теоретического понимания проблемы и эмпирических правил (эвристик) для её решения. В ЭС реализуется мышление человека, а точнее, элементы его мыслительной деятельности в процессе принятия решения,

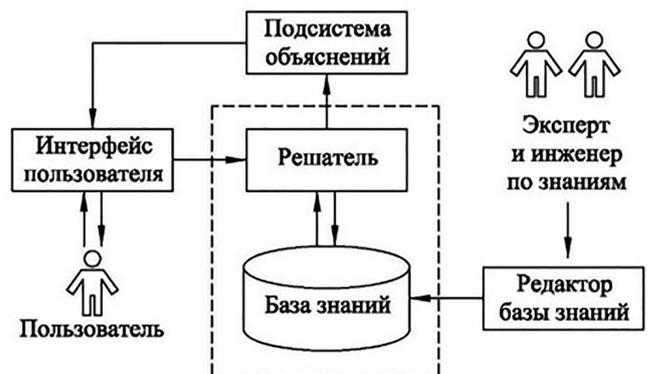


Рис. 1. Архитектура экспертной системы

плюс знания, накопленные специалистами и описанные в научной литературе, в методических и нормативных документах. Природа знаний имеет «две стороны». Это описание фактов, признаков, состояний, явлений (декларативные знания) и описание манипуляций с ними (процедурные знания) [8].

Формализация знаний экспертной информации. Онтологический анализ

Для автоматизированного поиска экспертного заключения о КТС строительного объекта при формализации декларативных знаний целесообразно использовать онтологический анализ [9–11], который направлен на исследование и интерпретацию системных связей в сложных объектах с применением методов и средств компьютерного моделирования. Термин «онтология» в теории искусственного интеллекта – это знания, формально представленные в виде описания множества объектов, понятий и связей между ними.

Применение онтологического анализа начинается с аналитической работы по выделению и объединению предметных знаний, то есть сначала выполняется построение неформальной концептуальной модели знаний путём определения набора основных понятий и отношений между ними. Для оценки КТС конструкций при обследовании реальных строительных объектов необходимо предусмотреть все возможные причины, приводящие к изменению категории технического состояния. Собрать неформальную информацию в базу знаний – стратегически важная и наиболее сложная задача в разработке ЭС. Источники знаний – обширная база практических и теоретических исследований по технической диагностике конструкций зданий и сооружений [12–18], нормативная документация, эвристические знания и рассуждения специалистов. В результате исследований по формированию онтологий различных типов строительных конструкций (балок, колонн, плит) из разных видов материалов (древесины, железобетона, металла) предложен шаблон [19] для разработки основной части онтологий (категориального уровня) как принцип декомпозиции множества контролируемых параметров технического состояния конструкций и связей между ними в виде иерархической четырёхуровневой структуры взаимосвязанных этапов решения (рис. 2).

Цель – по результатам визуально-инструментальной оценки повреждённости (наличия и параметров дефектов, трещин), оценки состояния материалов, проведения необходимых поверочных расчётов напряжённо-деформированного состояния элементов конструкций с учётом имеющихся повреждений, проверки соответствия характеристик обследуемой конструкции действующим нормативным требованиям по механической безопасности определить категорию технического состояния конструкции (нормативное, работоспособное, ограниченно работоспособное, аварийное) как сложной системы в целом.

Далее на примере оценки технического состояния железобетонных изгибаемых конструкций представлена методика разработки исследовательского модуля ЭС по определению чёткого значения КТС. В результате анализа предметной области

построена неформальная концептуальная модель декларативных знаний. К первому (категориальному) уровню отнесены пять групп показателей: состояние опор, нормальных сечений, наклонных сечений, закладных и связей, оценка жёсткости (рис. 3).

Формальное представление онтологии используемых понятий (концептов) и схемы их отношений представляется в виде графического онтографа, на котором предусмотрена система обозначений и индексации, позволяющая сжать его визуальное представление. На рисунке 4 показан фрагмент этого онтографа, включающий часть подсистемы «Состояние нормальных сечений» с пояснениями понятий категориального уровня ЭС.

Обозначения и индексация отражают то, что каждое понятие (или концепт) характеризует: класс, группу признаков или параметр, а также уровни, подуровни и связи. Буквой «х» обозначены понятия, характеризующие входные контролируемые параметры, «у» – выходные промежуточные и итоговая оценки категории технического состояния.

Формальные онтологические модели позволяют обеспечить, с одной стороны, описание понятий предметной области, а с другой стороны, обладают хорошими вычислительными свойствами. Они позволяют создавать сложные понятия и отношения из простых и дают возможность автоматического логического вывода для решения конкретных задач, делая упор на формальный вывод, который позволяет извлекать новые знания из тех, которые были явно заданы в базе знаний.

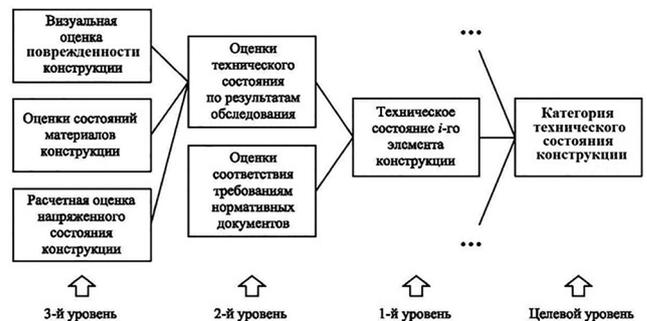


Рис. 2. Онтологическая модель концептуального уровня базы знаний «Определение категории технического состояния строительных конструкций»

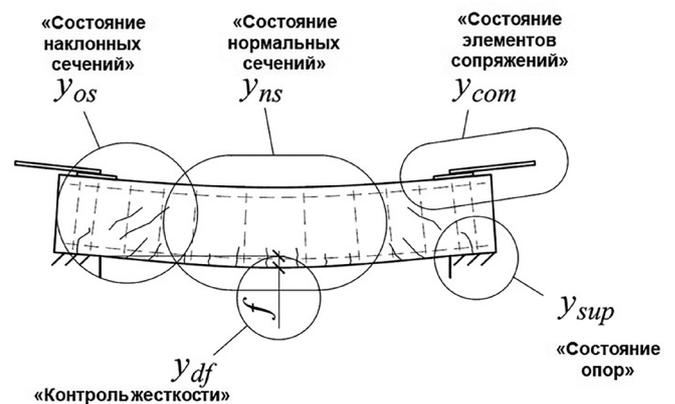


Рис. 3. Показатели первого уровня онтологии «Техническое состояние железобетонной изгибаемой конструкции»

Математические модели формализации знаний на основе нечёткой логики

При диагностике состояния строительного объекта эксперты часто пользуются приблизительными оценками параметров, которые нельзя интерпретировать как полностью истинные или полностью ложные. Ответы эксперта на вопросы о предпочтении факторов, влияющих на оценку технического состояния конструкции, их количестве и взаимосвязи, в значительной степени являются субъективными. Поэтому наиболее эффективные решения задач, содержащих размытость и неточность, можно получить с применением математического аппарата теории нечётких множеств и нечёткой логики, предложенного Л. Заде в 1965 году, который даёт возможность учитывать разброс индивидуальных мнений. С практической точки зрения, с каждым нечётким множеством ассоциируется некоторое свойство, признак или атрибут, которые характеризуют рассматриваемые объекты.

Теория нечётких множеств позволяет формализовать и обрабатывать самую разнородную информацию, содержащуюся в описании признаков технического состояния конструкций, моделировать слабо формализуемые рассуждения, такие как: «много», «мало», «часто», «редко», «около...», «приблизительно...», «не менее...», «не более...», «в диапазоне от... до...» и др. Существуют знания, достоверность которых выражается некоторым коэффициентом, например, 0,8 или 0,5. Ключевой особенностью теории нечёткой логики, отличающей её от вероятностных методов, фреймов и нейронных сетей, является то, что это именно логика с хорошо определённой семантикой.

Применение этой теории и её приложений позволяет строить формальные схемы решения задач с приблизительными количественными или качественными оценками параметров, используя

при этом лингвистические переменные [20; 21]. Понятие «лингвистическая переменная» является основой приближенных рассуждений. Её значениями могут быть слова или словосочетания (термы) на естественном или формальном языке.

Информацию из предметной области технической диагностики зданий и сооружений необходимо формализовать в терминах нечётких множеств. Человек, проектирующий ЭС, создаёт из правил в словесном представлении так называемые функции принадлежности [22; 23] как для входных, так и для выходных параметров.

Функция принадлежности $\mu_A\{x\}$ (рис. 5) количественно указывает степень принадлежности элемента x нечёткому множеству A пространства рассуждения X . Значение 0 означает, что элемент не включён в нечёткое множество, 1 – описывает полностью включённый элемент. Значения между 0 и 1 характеризуют нечётко включённые элементы. Конечные нечёткие множества обычно записывают в виде:

$$\bar{A} = \{ \langle x, \mu_A(x) \rangle \} \text{ или } = \{ \langle x / \mu_A(x) \rangle \}, x \in X.$$

Функции принадлежности, в некотором смысле, – это база данных, которая необходима для преобразования входной разнородной информации в формат последующего диалога с базой знаний. Качество решений, выдаваемых нечёткой системой, более всего зависит от профессиональных знаний экспертов и адекватности отражения их функциями принадлежности.

Человек, разрабатывающий базу функций принадлежности входных и выходных параметров, определяет их значения применяя метод «вопрос–ответ» для опытных экспертов, либо поручает экспертам выполнение операций и воссоздает ситуацию из хронометрированных данных. Он может корректировать значения функций принадлежности, получая наилучшие результаты из экспериментов, имитирующих данную ситуацию, и предыдущего опыта.

Входные данные могут быть количественными (фактические и расчётные величины прогибов, ширина раскрытия трещин, прочность бетона и др.) и качественными (условия эксплуатации, видимые повреждения и др.). Для описания понятий, характеризуемых измеряемыми свойствами, оптимальными, с точки зрения трудозатрат, являются прямые методы построения функций принадлежности [22]. Для описания понятий и признаков, неизмеряемых (качественных) свойств, таких, например, как цвет бетона, описание результатов визуального осмотра арматуры, повреждённой коррозией, применяются, как правило, косвенные методы [23; 24]. Проведённые исследования показали, что совместное использование косвенных методов Саати [25] в сочетании с методом Laarhoven P.J.M и Pedrycz W.A. [26] для построения функций принадлежности даёт возможность контролировать искажения информации, несоответствия в высказываниях для получения более адекватных результатов в сравнении с другими известными способами.

Каждый контролируемый качественный и количественный параметр технического состояния ($x_i, i=1:n$) конструкций (входы), а также результат оценки состояния или категории y (выход) представляются лингвистическими пере-

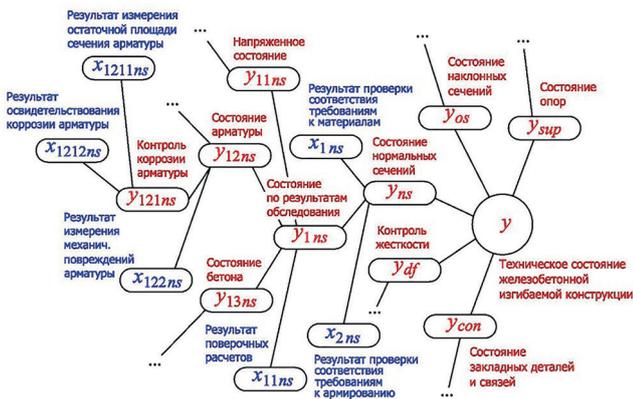


Рис. 4. Фрагмент онтографа «Техническое состояние железобетонной изгибаемой конструкции»

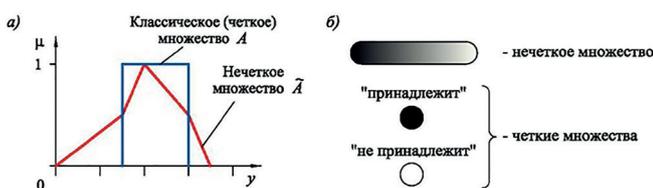


Рис. 5. Графики функций принадлежности классического (чёткого) и нечёткого множества (а) и их смысловое различие (б)

менными на соответствующих универсальных множествах $X_i = [\underline{x}_i, \overline{x}_i]$, $Y = [\underline{y}, \overline{y}]$, где \underline{x}_i и \overline{x}_i – минимальное и максимальное значения входной переменной, а \underline{y} и \overline{y} – выходной переменной, соответственно. Для качественных переменных используются ранговые измерения, отражающие предпочтения экспертов.

В рассматриваемый исследовательский модуль ЭС «Техническое состояние железобетонной изгибаемой конструкции» включено более 90 возможных контролируемых параметров, для каждого из которых построены функции принадлежности. Разрабатываемая ЭС должна содержать знания, позволяющие осуществлять поиск ведущих признаков повреждений строительных конструкций среди любого количества дефектов (состояний) с учётом степени их выраженности, соподчинённости и взаимовлияния. Одновременно система должна предоставлять Лицу, принимающему решение (ЛПР) о КТС конструкций, пояснения по поводу своей «логики» в процессе формулировки заключения.

Поясним технологию построения функций принадлежности на примере контроля показателя коррозии арматуры железобетонной конструкции, входящего в состав онтологии «Состояние нормальных сечений».

Лингвистические переменные: качественная (x_{1211ns}) – «Результат освидетельствования коррозии арматуры», и количественная (x_{1212ns}) – «Результат измерения остаточной площади сечения арматуры» – задаются экспертами по результатам осмотра поверхности арматуры и измерения остаточной площади сечения арматуры железобетонных конструкций.

Универсальное множество рассматриваемой лингвистической переменной x_{1211ns} задаётся конечным числом качественных признаков [1 – поверхность арматуры чистая (при вскрытии); 2 – локальные участки повреждения арматуры поверхностной коррозией (точки и пятна коррозии); 3 – сплошная поверхностная коррозия арматуры; 4 – локальные участки язвенной, пластинчатой коррозии арматуры, растрескивания защитного слоя бетона; 5 – пластинчатая коррозия арматуры, растрескивание и выдавливание защитного слоя бетона продуктами коррозии]. Множество $X_{1211ns} = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ является дискретным и точным.

Лингвистическая переменная x_{1212ns} «Результат измерения остаточной площади сечения арматуры», очевидно, должна принимать количественные значения из универсального непрерывного множества X_{1212ns} значений уменьшения площади сечения арматуры в процентах.

При построении функций принадлежности контролируемых параметров удобно (но не обязательно) задействовать четыре лингвистические оценки: «высокий», «выше среднего», «ниже среднего», «низкий», которые называются «термами» и составляют терм-множество T_{1211ns} для переменной x_{1211ns} и T_{1212ns} для переменной x_{1212ns} . Эти терм-множества входов могут описываться аналитическими функциями [20] или отображаться графически в виде треугольной, трапециевидной, колоколообразной, синглтонной и других форм.

Как показали проведённые нами исследования, для описания участков функций принадлежности между характерными

точками лучше всего подходят «классическая» треугольная функция и её модифицированный вариант – треугольная «ломаная». На рисунке 6 для иллюстрации показаны примеры графиков функций принадлежности переменных «Результат освидетельствования коррозии арматуры» (а) и «Результат измерения остаточной площади сечения арматуры» (б) с отображением степеней принадлежности к термам (при обследовании выявлены локальные участки повреждения арматуры и уменьшение площади сечения арматуры на 2%).

Таким образом, используя лингвистические переменные и нечёткие величины, можно описывать простые отношения между переменными с помощью нечётких высказываний, а сложные отношения – нечёткими алгоритмами. Каждая функция принадлежности при этом говорит о степени уверенности в значении выходных переменных при заданных значениях входных параметров и использовании правил, определяющих соотношение входных и выходных переменных.

Методы нечёткого логического вывода принятия решений

Системы нечёткого логического вывода выполняют преобразование значений входных переменных в выходные переменные. Для этого они должны содержать базу процедурных знаний нечёткого логического вывода, основанную на правилах, составленных на естественном языке (заложенных в ЭС при её создании), вида: «Если <предпосылка>, то <заключение>». Значения контролируемых параметров при этом должны быть приведены к нечёткости с помощью функций принадлежности. Нечёткая логика позволяет технически реализовать лингвистические связи правил «если – то», «и», «или» при помощи математических операций. Разработка и применение систем нечёткого вывода включают в себя ряд этапов (рис. 7). Оператор нечётких логических выводов включает процедуры агрегирования и аккумуляции – определение степени истинности условий по каждому из правил нечёткого вывода для каждой входной и выходной лингвистических переменных.

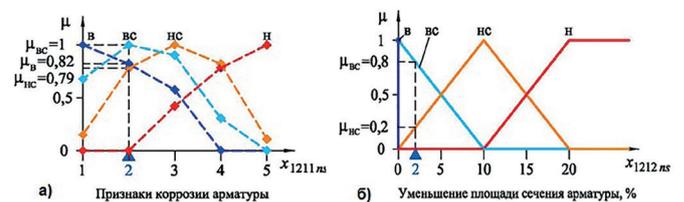


Рис. 6. Примеры графиков функций принадлежности термов переменных X_{1211ns} (а) и X_{1212ns} (б) с отображением степеней принадлежности к термам



Рис. 7. Схема нечёткого логического вывода

Нечёткая база знаний по определению КТС железобетонных изгибаемых элементов разработана на основании опыта (эвристических знаний) специалистов по инженерному обследованию конструкций зданий и сооружений. Правила связываются между собой логическими операциями «или», а предпосылка правила может состоять из фрагментов, которые связываются операциями «и» или/и «или». Фрагмент базы знаний для контролируемой выходной переменной y_{121ns} – «Контроль коррозии арматуры», включающей первые четыре (из 16) правила, имеет следующий вид:

Если $x_{1211ns} = \text{«высокий»}$ и $x_{1212ns} = \text{«высокий»}$,
 то $y_{121ns} = \text{«высокий»}$, или;
 если $x_{1211ns} = \text{«высокий»}$ и $x_{1212ns} = \text{«выше среднего»}$,
 то $y_{121ns} = \text{«выше среднего»}$, или;
 если $x_{1211ns} = \text{«высокий»}$ и $x_{1212ns} = \text{«ниже среднего»}$,
 то $y_{121ns} = \text{«ниже среднего»}$, или;
 если $x_{1211ns} = \text{«высокий»}$ и $x_{1212ns} = \text{«низкий»}$,
 то $y_{121ns} = \text{«ниже среднего»}$, или...

Всего база знаний рассматриваемого исследовательского модуля ЭС содержит более 5000 правил. Математическую модель нечёткого логического вывода можно представить в виде:

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \rightarrow y$$

где $X = \{x_i\}$ – множество контролируемых параметров технического состояния обследуемой конструкции, « \rightarrow » – обозначение процедуры логического вывода (импликация); y – выходной параметр (значение категории технического состояния конструкции).

Совокупности лингвистических значений (оценок) – терм-множества, представляются в виде: $T = \{t_1^d, \dots, t_i^d\}$ – для входной переменной x_i ; $C = \{c_1, c_2, c_3, c_4\}$ – для выходной переменной y . Здесь: t_i^d – d -й лингвистический терм переменной x_i ; c_1, c_2, c_3, c_4 – термы, соответствующие категориям технических состояний: нормативное – c_1 , работоспособное – c_2 , ограниченно работоспособное – c_3 , аварийное – c_4 техническое состояние (ГОСТ 31937-2011).

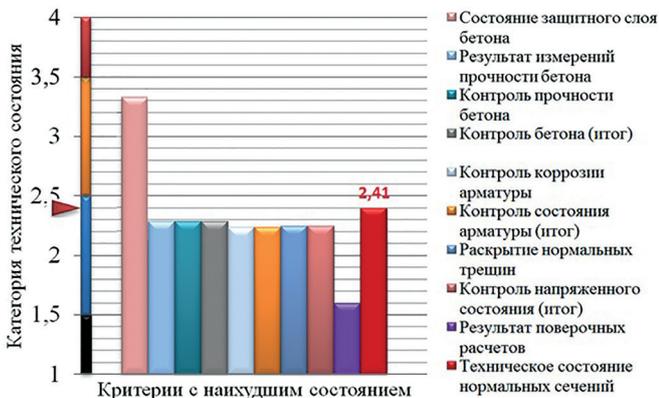


Рис. 8. Пример отображения чётких значений категории технического состояния железобетонной балки на этапе контроля состояния подсистемы «техническое состояние нормальных сечений»

Рассмотрены возможности применения известных алгоритмов нечёткого логического вывода (Сугено, Мамдани, Сингтон [20] и др.). Выбор сделан в пользу алгоритма Мамдани, который модифицирован и адаптирован к решению данной задачи. Предпочтение обусловлено пригодностью этого алгоритма для случаев сложного формирования выборки экспериментальных данных (при отсутствии эффективной системы сбора информации), а также присущей этому алгоритму возможности графической интерпретации формируемого заключения о техническом состоянии конструкции. В результате логического вывода получается нечёткое значение выходной переменной – результат оценки категории технического состояния конструкции как класс с максимальной степенью принадлежности.

Чёткое (числовое) значение категории Y (как целое, так и дробное) может быть определено с помощью так называемой операции дефаззификации (переход к чёткой информации), например, по методу «центра тяжести».

Результат оценки КТС конструкции как на промежуточных этапах, так и итоговый, выдаётся пользователю в виде гистограмм с группировкой признаков по категориям и значениями степени принадлежности к категориям и дублируется в виде гистограммы с чёткими значениями категории (от 1 до 4) – для конкретно интересующих пользователя параметров и их групп (рис. 8).

Визуализация результатов существенно повышает «прозрачность» принимаемых решений о степени аварийности, формирует понимание причин и рисков возможного изменения технического состояния конструкций, зданий или сооружений.

Оценка адекватности и достоверности решений, выдаваемых ЭС, проводилась на основе моделирования сценариев различных повреждений железобетонных изгибаемых конструкций, данных ряда технических отчётов по результатам инженерного обследования реальных конструкций и собственного опыта. В ходе работ по созданию экспертной системы использовался табличный процессор Microsoft Excel, который является одним из самых доступных программных средств, обеспечивающим пользователю возможность самостоятельно реализовывать механизмы решений математических задач. В формализованном виде описание навигационной структуры приложения представляет собой файл в формате XML, что позволяет обрабатывать, изменять данные в любых других системах вне зависимости от клиентской платформы или операционной системы.

Результаты исследования внедрены ОАО «Пашийский металлургическо-цементный завод» (г. Пашия, Пермский край) для проведения инженерного обследования конструкций зданий [23].

Литература

1. Тонков, И.Л. Актуальные проблемы оценки технического состояния строительных конструкций / И.Л. Тонков, Ю.Л. Тонков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2017. – № 3. – С. 94–104.

2. Муромцев, Д.И. Введение в технологию экспертных систем / Д.И. Муромцев. – СПб: СПб ГУ ИТМО, 2005. – 93 с.
3. Lu, X. KBES for evaluating R.C. framed buildings using fuzzy sets / X. Lu, H. Simmonds // Automation in Construction. Vol. 6, iss. 2, 1997. – P. 121–137.
4. Kim, Y.M. Fuzzy based state assessment for reinforced concrete building structures / Y.M. Kim, C.M. Kim, S.G. Hong // Engineering Structures. – 2006. – Vol. 28, iss. 9. – P. 1286–1297.
5. Sasmal, S. Condition evaluation of existing reinforced concrete bridges using fuzzy based analytic hierarchy approach / S. Sasmal, K. Ramanjaneyulu // Expert Systems with Applications. – . – Vol. 35. – P. 1430–1443.
6. Панкевич, О.Д. Застоування нечітких моделей для діагностики будівельних конструкцій / О.Д. Панкевич, С.Д. Штовба // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 4. – С. 32–36.
7. Соколов, В.А. Определение категорий технического состояния строительных конструкций зданий и сооружений с использованием вероятностных методов распознавания / В.А. Соколов // Предотвращение аварий зданий и сооружений: сб. науч. тр. Выпуск 9. – М., 2010. – С. 375–387.
8. Построение экспертных систем / Пер. с англ. Под ред. Ф. Хейеса-Рота, Д. Уотермана, Д. Лената. – М.: Мир, 1987. – 441 с.
9. Смирнов, С.В. Онтологический анализ: определения и алгоритмы / С.В. Смирнов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах // Сборник докладов III междунар. конф. Самара, 4–9 сентября 2001г. – Самара: СНЦ РАН, 2001. – С. 206–212.
10. Смирнов, С.В. Онтологический анализ в системах компьютерного моделирования: дис. ... докт. техн. наук / С.В. Смирнов; Рос. акад. наук, Ин-т пробл. упр. слож. системами. – Самара, 2002. – 348 с.
11. Палагин, А.В. Методика проектирования онтологии ПдО / А.В. Палагин, Н.Г. Петренко, К.С. Малахов. – Комп'ютерні засоби, мережі та системи. – 2011. – № 10. – С. 5–12.
12. Классификатор основных видов дефектов в строительстве и промышленности строительных материалов / Утверждён Главгосархстройнадзором России 17 ноября 1993 года. – 95 с.
13. Пособие по практическому выявлению пригодности к восстановлению повреждённых строительных конструкций зданий и сооружений и способам их оперативного усиления. – Москва: ЦНИИпромзданий, 1996. – 99 с.
14. Гроздов, В.Т. Признаки аварийного состояния несущих конструкций зданий и сооружений / В.Т. Гроздов. – СПб: Издательский Дом KN+, 2000. – 39 с.
15. Гучкин, И.С. Диагностика повреждений и восстановление эксплуатационных качеств конструкций / И.С. Гучкин. – М.: АСВ, 2001. – 171 с.
16. Дементьева, М.Е. Техническая эксплуатация зданий: оценка и обеспечение эксплуатационных свойств конструкций зданий: учебное пособие / М.Е. Дементьева – М.: МГСУ, 2008. – 227 с.
17. Добромислов, А.Н. Диагностика повреждений зданий и инженерных сооружений / А.Н. Добромислов. – М.: МГСУ, 2006. – 256 с.
18. Мальганов, А.И. Восстановление и усиление ограждающих строительных конструкций зданий и сооружений: учебное пособие / А.И. Мальганов, В.С. Плевков. – Томск: Печатная мануфактура, 2002. – 391 с.
19. Кашеварова, Г.Г. Интеллектуальная автоматизация инженерного обследования строительных объектов / Г.Г. Кашеварова, Ю.Л. Тонков, И.Л. Тонков // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2017. – Т. 13. – № 3 – С. 42–57.
20. Штовба, С.Д. Проектирование нечётких систем средствами MATLAB / С.Д. Штовба. – М.: Горячая линия-Телеком, 2007. – 288 с.
21. Ротштейн, А.П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечёткая логика, генетические алгоритмы и нейронные сети / А.П. Ротштейн. – Винница: Універсум-Вінниця, 1999. – 320 с.
22. Кашеварова, Г.Г. О построении функций принадлежности нечёткого множества в контексте задачи диагностики повреждений железобетонных плит / Г.Г. Кашеварова, М.Н. Фурсов, Ю.Л. Тонков // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2014. – Т. 10. – № 2. – С. 93–101.
23. Тонков, Ю.Л. Выбор эффективного метода построения функций принадлежности для оценки качественных признаков технического состояния строительных конструкций / Ю.Л. Тонков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2016. – № 3. – С. 126–146.
24. Нечёткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / А.Н. Аверкин, И.З. Батыршин, А.Ф. Блишун, и др.; под ред. Д.А. Поспелова. – М.: Наука, 1986. – 312 с.
25. Саати, Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / М. Саати. – М.: Радио и связь, 1993. – 278 с.
26. Laarhoven, P.J.M., A fuzzy extension of Saaty's priority theory /, P.J.M. Laarhoven, Pedrycz, W.A. // Fuzzy Sets and Systems/ – 1983. – Vol. 11. – P. 229–241.

Literatura

1. Tonkov I.L. Aktual'nye problemy otsenki tehničeskogo sostoyaniya stroitel'nyh konstruksij / I.L. Tonkov, Yu.L. Tonkov // Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Prikladnaya ekologiya. Urbanistika. – 2017. – № 3. – S. 94–104.
2. Muromtsev D.I. Vvedenie v tehnologiyu ekspertnyh sistem / D.I. Muromtsev. – SPb: SPb GU ITMO, 2005. – 93 s.
6. Pankevich O.D. Zastouvannya nechitkih modelej dlya diagnostiki budivel'nih konstruksij / O.D. Pankevich, S.D. SHtovba // Visnik Vinnits'kogo politehnichnogo institutu. – 2011. – № 4. – S. 32–36.
7. Sokolov V.A. Opredelenie kategorij tehničeskogo sostoyaniya stroitel'nyh konstruksij zdaniy i sooruzhenij s

ispol'zovaniem veroyatnostnykh metodov raspoznavaniya / V.A. Sokolov // Predotvrashhenie avariij zdaniy i sooruzhenij: sb. nauch. tr. Vypusk 9.– M., 2010. – S. 375–387.

8. Postroenie ekspertnykh sistem / Per. s angl. Pod red. F. Hejesa-Rota, D. Uotermana, D. Lenata. – M.: Mir, 1987. – 441 s.

9. Smirnov S.V. Ontologicheskij analiz: opredeleniya i algoritmy / S.V. Smirnov // Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemah // Sbornik dokladov III mezhdunar. konf. Samara, 4–9 sentyabrya 2001g. – Samara: SNTS RAN, 2001. – S. 206–212.

10. Smirnov S.V. Ontologicheskij analiz v sistemah komp'yuternogo modelirovaniya: dis. ... dokt. tehn. nauk / S.V. Smirnov; Ros. akad. nauk, In-t probl. upr. slozh. sistemami. – Samara, 2002. – 348 s.

11. Palagin A.V. Metodika proektirovaniya ontologii PdO / A.V. Palagin, N.G. Petrenko, K.S. Malahov. – Komp'yuterni zasobi, merezhi ta sistemi. – 2011. – № 10. – S. 5–12.

12. Klassifikator osnovnykh vidov defektov v stroitel'stve i promyshlennosti stroitel'nykh materialov / Utverzhden Glavgosarhstrojnadzorom Rossii 17 noyabrya 1993 goda. – 95 s.

13. Posobie po prakticheskomu vyavleniyu prigodnosti k vosstanovleniyu povrezhdennykh stroitel'nykh konstruksij zdaniy i sooruzhenij i sposobam ih operativnogo usileniya. – Moskva: TSNIIPromzdaniy, 1996. – 99 s.

14. Grozdov V.T. Priznaki avariynogo sostoyaniya nesushhih konstruksij zdaniy i sooruzhenij / V.T. Grozdov. – SPb: Izdatel'skij Dom KN+, 2000. – 39 s.

15. Guchkin I.S. Diagnostika povrezhdenij i vosstanovlenie ekspluatatsionnykh kachestv konstruksij / I.S. Guchkin. – M.: ASV, 2001. – 171 s.

16. Dement'eva M.E. Tehnicheskaya ekspluatatsiya zdaniy: otsenka i obespechenie ekspluatatsionnykh svoystv konstruksij zdaniy: uchebnoe posobie / M.E. Dement'eva – M.: MGSU, 2008. – 227 s.

17. Dobromyslov A.N. Diagnostika povrezhdenij zdaniy i inzhenernykh sooruzhenij / A.N. Dobromyslov. – M.: MGSU, 2006. – 256 s.

18. Mal'ganov A.I. Vosstanovlenie i usilenie ograzhdayushhih stroitel'nykh konstruksij zdaniy i sooruzhenij: uchebnoe posobie / A.I. Mal'ganov, V.S. Plevkov. – Tomsk: Pechatnaya manufaktura, 2002. – 391 s.

19. Kashevarova G.G. Intel'ktual'naya avtomatizatsiya inzhenernogo obsledovaniya stroitel'nykh ob'ektov / G.G. Kashevarova, Yu.L. Tonkov, I.L. Tonkov // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2017. – T. 13. – № 3 – S. 42–57.

20. Shtovba S.D. Proektirovanie nechetkiykh sistem sredstvami MATLAB / S.D. Shtovba. – M.: Goryachaya liniya-Telekom, 2007. – 288 s.

21. Rotshtejn A.P. Intel'ktual'nye tehnologii identifikatsii: nechetskaya logika, geneticheskie algoritmy i nejronnye seti / A.P. Rotshtejn. – Vinnitsa: Universum-Vinnitsya, 1999. – 320 s.

22. Kashevarova G.G. O postroenii funktsij prinadlezhnosti nechetkogo mnozhestva v kontekste zadachi diagnostiki povrezhdenij zhelezobetonnykh plit / G.G. Kashevarova, M.N. Fursov, Yu.L. Tonkov // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2014. – T. 10. – № 2. – S. 93–101.

23. Tonkov Yu.L. Vybor effektivnogo metoda postroeniya funktsij prinadlezhnosti dlya otsenki kachestvennykh priznakov tehničeskogo sostoyaniya stroitel'nykh konstruksij / Yu.L. Tonkov // Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Prikladnaya ekologiya. Urbanistika. – 2016. – № 3. – S. 126–146.

24. Nechetkie mnozhestva v modelyah upravleniya i iskusstvennogo intellekta / A.N. Averkin, I.Z. Batyrshin, A.F. Blishun, i dr.; pod red. D.A. Pospelova. – M.: Nauka, 1986. – 312 s.

25. Saati T. Prinyatie reshenij. Metod analiza ierarhij / M. Saati. – M.: Radio i svyaz', 1993. – 278 c.

Кашеварова Галина Геннадьевна (Пермь). Доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РААСН. Заведующая кафедрой «Строительные конструкции и вычислительная механика» ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (Пермь, Комсомольский просп., 29). Сфера научных интересов: строительные конструкции, строительная механика, математическое моделирование процессов деформирования и разрушения строительных конструкций. Автор 255 научных публикаций. Тел.: +7 (342) 219-83-61. E-mail: ggkash@mail.ru.

Тонков Юрий Леонидович (Пермь). Старший преподаватель кафедры «Строительные конструкции и вычислительная механика» ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (Пермь, Комсомольский просп., 29), главный специалист технического отдела АО «ВНИИ Галургии» (Пермь, ул. Сибирская, 94). Сфера научных интересов: проектирование и обследование строительных конструкций. Автор 25 научных публикаций. Тел.: +7 (342) 219-83-61. E-mail: 95081@mail.ru.

Kashevarova Galina Gennadievna (Perm). Doctor of technical sciences, professor, corresponding member of the RAACS. Head of the Department of building constructions and computational mechanics at the Perm National Research Polytechnic University (Perm, Komsomolsky av., 29). Sphere of scientific interests: building structures, construction mechanics, mathematical modeling of processes of deformation and destruction of building structures. The author of 255 publications. Tel.: +7 (342) 219-83-61. E-mail: ggkash@mail.ru.

Tonkov Yuri Leonidovich (Perm). Senior lecturer of the Department of building structures and computational mechanics at the Perm National Research Polytechnic University (Perm, Komsomolsky av., 29), the main specialist of the Technical department of the JSC VNII of Halurgy (Perm, Sibirskaya, 94). Sphere of scientific interests: design and inspection of building structures. The author of 25 publications. Tel.: +7 (342) 219-83-61. E-mail: 95081@mail.ru.