

УДК 624.012

DOI 10.22213/2410-9304-2018-1-45-52

Ю. Л. Тонков, старший преподаватель

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ КАТЕГОРИИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

Статья содержит обоснование актуальности и необходимости разработки экспертных систем оценки технического состояния строительных объектов. Представлено описание структуры, методов построения и принципов работы нечеткой экспертной системы определения категории технического состояния строительных конструкций.

Особенность описания состояния строительной конструкции заключается в неопределенности, источниками которой могут быть: невозможность точного измерения контролируемых величин; неточность исполнительских действий; невозможность четкого описания ситуации и т. п. Принятие решения о состоянии связано с решением задачи при весьма нечетких исходных данных, связанных с приблизительными «лингвистическими» характеристиками входных параметров (дефектов и повреждений конструкции, прочности материалов и пр.).

Процесс определения категории технического состояния представляется как совокупность взаимосвязанных этапов (подзадач) решения поставленной задачи. Для оперативного выполнения этих этапов с помощью системного онтологического анализа произведена интеграция соответствующих подзадач в виде многоуровневой иерархической структуры (онтографа). Иерархический принцип позволяет упорядочить декларативные знания по этапам и скоординировать результаты решений соответствующих подзадач, используя разнородные информационные потоки. Построение формальных схем и моделей решения задач, характеризующихся недостаточностью информации, противоречивостью и малой достоверностью при обследовании строительных объектов, позволяет выполнять теория нечетких множеств и ее приложения. Определение четкого значения категории технического состояния предусматривает использование модели нечеткого логического вывода Мамдани. Формирование соответствующих баз знаний по Мамдани, в которой все значения входных и выходной переменных заданы нечеткими множествами, не вызывает трудностей у эксперта.

Результаты исследований использованы при разработке исследовательского варианта экспертной системы для оценки технического состояния железобетонных изгибаемых элементов. Апробации и верификация программы проводилась на реально существующих конструкциях эксплуатируемых зданий и сооружений.

Ключевые слова: модели идентификации, техническое состояние, строительные конструкции.

Безопасность эксплуатации зданий и сооружений является такой же важной составляющей национальной безопасности, как ядерная, военная, энергетическая, экономическая и др. Тяжесть последствий аварий зданий и сооружений может быть соизмерима с последствиями военных действий – это экономические потери, ущербы в окружающей среде и, наиболее страшные, социальные потери и последствия. Для оперативного и своевременного принятия решения о возможности и целесообразности дальнейшей эксплуатации строительного объекта выполняется оценка и назначение категории технического состояния (КТС) конструкций по итогам их периодических осмотров, контрольных проверок, обследо-

ваний и (или), при необходимости, мониторинга состояния. Но решения, принятые на основании недостаточных знаний и опыта обследования, могут быть ошибочны, могут не дать ожидаемого положительного результата, привести к ухудшению состояния строительных конструкций (СК). Несмотря на это, в деятельности организаций, занимающихся инженерным обследованием, эксплуатацией зданий и сооружений, отсутствуют автоматизированные интеллектуальные системы контроля и проверки решений. В результате конкурентной разобщенности специалистов опыт накапливается в отдельно взятых организациях, обмен опытом носит случайный характер и не способствует его поступательному развитию. Как

следствие, основные причины аварий зданий и сооружений кроются по большей части не в ветхости объектов, а в непрофессиональном отношении к ним.

Обширный перечень путей обеспечения комплексной безопасности и предотвращения аварий зданий и сооружений предлагается дополнить применением интеллектуальных технологий для принятия решений о техническом состоянии (ТС) СК. Предусматривается введение дополнительного технологического уровня в процесс оценки ТС СК в виде экспертных систем (ЭС) [1], способных расширить и увеличить профессиональные возможности лиц, принимающих решения.

Сложность определения КТС обусловлена весьма нечеткими исходными данными, связанными с приблизительными «лингвистическими» характеристиками входных параметров (например, дефектов СК), невозможностью точного измерения многих контролируемых параметров, с нечеткостью формулировок и размытостью границ КТС.

Ввиду неклассических ситуаций в постановке задач обследования строительных объектов (плохая формализуемость, нестандартность, противоречивость) внимание привлекают системы, использующие наработки таких направлений искусственного интеллекта [2], как теория вероятностей, нечеткая логика, генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети [3] и др. Применение нейронных сетей в этой сфере сдерживается невозможностью содержательной интерпретации процесса принятия решения, большие трудозатраты и высокая сложность. Вероятностные методы в оценке ТС СК не всегда смогут обеспечить приемлемую достоверность результатов в условиях отсутствия или недостаточного набора статистических данных. Модели и методы, основанные на теории нечетких множеств и нечеткой логике, оказываются проще для формального описания неопределенностей в сравнении с другими альтернативными методами построения механизма рассуждений для ЭС. Гибридные системы (нейронечеткие системы) лишены части недостатков

нейронных сетей, но пока их также не представляется возможным использовать в ЭС оценки КТС СК в силу отсутствия на данный момент исходных данных, необходимых для построения обучающей выборки.

Целью исследования является построение математических моделей, описывающих состояние СК, с учетом обнаруженных отклонений в значениях контролируемых параметров, на основе нечеткой логики.

В разработке информационной модели декларативной составляющей (рис. 1) базы знаний [4] ЭС использовалась методика построения компьютерной онтологии [5], под которой понимаются формальные выражения концептуальных знаний о рассматриваемой предметной области, обеспечивающее их унифицированное и многократное использование на разных компьютерных платформах:

$$O = (K, R, F),$$

где $K = \{k_1, k_2, \dots, k_i, \dots, k_n\}$, $i = \overline{1, n}$, $n = \text{card } K$ – конечное множество концептов (понятий) исследуемой предметной области (ПО); $R = \{r_1, r_2, \dots, r_j, \dots, r_m\}$, $R: k_1 \times k_2 \times \dots \times k_m$, $j = \overline{1, m}$, $m = \text{card } R$ – конечное множество семантически значимых отношений между концептами ПО; $F: K \times R$ – конечное множество функций интерпретации, заданных на концептах и/или отношениях. СК (онтологический системный анализ).

Постановка задачи определения КТС, учитывающая наличие неопределенности в данных и знаниях о ТС СК, выполнена нечеткими уравнениями в отношениях. Информация из области технической диагностики зданий и сооружений формализована в терминах нечетких множеств. Основу задачи составляет иерархический принцип построения модели нечеткого логического вывода, элементами которой являются влияющие на процесс входные лингвистические переменные, лингвистические правила управления, предусматривающие задействие этих переменные и их качественные значения.

понятии), расположенного на l -м уровне онтографа (p -я задача оценки состояния составляющей части СК на l -м уровне онтографа); $X_p^{l+1} = \{x_{p1}^{l+1} \dots x_{pf}^{l+1} \dots x_{ph}^{l+1}\}$, $f = \overline{1, h}$, $h = card X_p^{l+1}$ – конечное множество входных контролируемых параметров, расположенных на $(l+1)$ -м уровне онтографа, влияющих на значение p -го параметра; $Y_p^{l+1} = \{y_{p1}^{l+1} \dots y_{pg}^{l+1} \dots y_{pz}^{l+1}\}$, $g = \overline{1, z}$, $z = card Y_p^{l+1}$ – конечное множество показателей состояний, расположенных на $(l+1)$ -м уровне онтографа, влияющих на значение p -го показателя (выходные переменные смежных задач).

Состояние части (узла, участка, детали и т. п.) СК, характеризуемое параметром y_p^l , определяется декартовым произведением множеств входа и выхода – $PA \times PB$, где PA – множество входных в зависимость значений параметров из множеств X_p^{l+1}, Y_p^{l+1} ; PB – множество выходных значений параметра y_p^l . При нечеткости в значениях параметров X_p^{l+1}, Y_p^{l+1} параметр y_p^l может принимать значения в виде нечеткого подмножества \tilde{B} :

$$\tilde{B} = \tilde{A} \circ \tilde{R},$$

где \tilde{A} – нечеткое подмножество множеств $T_p^{l+1} \subset PA, S_p^{l+1} \subset PA$, $T_p^{l+1} = \{t_{pf}^{(l+1)1} \dots t_{pf}^{(l+1)d} \dots t_{pf}^{(l+1)n}\}$, $d = \overline{1, n}$; $S_p^{l+1} = \{s_{pg}^{(l+1)1} \dots s_{pg}^{(l+1)k} \dots s_{pg}^{(l+1)m}\}$, $k = \overline{1, m}$; T_p^{l+1} и S_p^{l+1} – терм-множества переменных, соответственно, X_p^{l+1} и Y_p^{l+1} ; $t_{pf}^{(l+1)d}$ – d -й лингвистический терм переменной x_{pf}^{l+1} (лингвистические значения вида: «высокий», «выше среднего», «ниже среднего» и др.); $s_{pg}^{(l+1)k}$ – k -й лингвистический терм переменной y_{pg}^{l+1} (значения вида: «высокий», «выше среднего», «ниже среднего» и др.); \tilde{B} – нечеткое подмножество множества $S_p^l \subset PA \times PB$, $S_p^l = \{s_p^{(l)1} \dots s_p^{(l)q} \dots s_p^{(l)u}\}$, $q = \overline{1, u}$; S_p^l – терм-множество выходной переменной y_p^l ; $s_p^{(l)q}$ –

q -й лингвистический терм переменной y_p^l (значения вида: «высокий», «выше среднего», «ниже среднего» и др.); \circ – символ максиминной композиции Л. Заде; \tilde{R} – нечеткое отношение $PA \times PB$, представленное управляющими правилами вида «Если <посылка правила>, то <заключение правила>».

Совокупность управляющих правил, называемая нечеткой базой знаний, является формализацией качественного описания процедурных знаний. В состав посылки может входить несколько предпосылок, объединяемых логической операцией «и». Объединение нескольких правил для решения отдельной задачи осуществляется логическими связками «или». Совокупность правил, устанавливающих причинно-следственные связи между значениями входных в задачу переменных из множеств X_p^{l+1}, Y_p^{l+1} и выходной переменной y_p^l , построенных при помощи логических операций \cap («и») и \cup («или»), имеет вид

$$\bigcup_{r=1}^{v_q} [\bigcap_{f=1}^h (x_{pf}^{l+1} = t_{pf}^{(l+1)d}) \bigcap_{g=1}^z (y_{pg}^{l+1} = s_{pg}^{(l+1)k}), w_{qr}^{<SP>}] \rightarrow y_p^l = s_p^{(l)q}, q = \overline{1, u}, \tag{1}$$

где v_q – количество правил, определяющих значение выходной переменной (терм) $s_p^{(l)q}$; $w_{qr}^{<SP>}$ – весовые коэффициенты r -го правила для значений $s_p^{(l)q}$.

Перевод информации, вновь поступающей в систему (значений контролируемых параметров), к формату нечеткой базы знаний – этапа фаззификации (переход к нечеткости), а также и ее выход в виде конкретного числового значения категории (этап дефаззификации) обеспечивается функциями принадлежности (обозначаемыми μ). На языке функций принадлежности [6, 7] уравнение (1) имеет вид

$$\mu_{sp}^{(l)q}(X^{<P>}) = \bigvee_{r=1}^{v_q} [w_{qr}^{<SP>} \cdot (\mu_{tp}^{(l)f}(x_{pf}^{l+1}), \mu_{sp}^{(l+1)k}(X^{<PY>}))] , q = \overline{1, u}, \tag{2}$$

где $\wedge(\vee)$ – символ логического минимума (максимума); $X^{<P>}$ – множество входных переменных, входящих в структуру нечеткой модели решения подзадачи p ; соответствующие части, обозначенные «<...>», $X^{<PY>}$ – множество входных переменных, необходимых для решения задачи иерархии декларативной базы знаний. Выражение (2) представляет собой нечеткое множество выходной переменной y_p^l , характеризующее результат подзадачи p :

$$\tilde{S}_p^l = \left\{ \frac{\mu_{sp}^{(l)q}(X^{<P>})}{S_p^{(l)1}}, \frac{\mu_{sp}^{(l)q}(X^{<P>})}{S_p^{(l)2}}, \dots, \frac{\mu_{c3}(X^{<P>})}{S_p^{(l)u}} \right\},$$

где $S_p^{(l)q}$, $q = \overline{1, u}$ – носитель, нечеткий терм, составляющий терм-множество S_p^l .

Для контроля результатов решения (пользователем) подзадачи (получение информации о принадлежности промежуточного результата решения к КТС), а также результат решения всей задачи y (КТС СК в целом) следует получить в соответствии с действующими строительными нормами.

Для этого соответствующее «пространство» ТС СК на период ее существования как материального объекта разделено на 4 подобласти (аналогично количеству категорий в соответствии с ГОСТ 31937–2011) с размытыми границами (рис. 2), например:

$$C_p = C = \{c_1, c_2, c_3, c_4\},$$

где c_1, c_2, c_3, c_4 – нечеткие термы, соответствующие категориям технических состояний: нормативное – c_1 , работоспособное – c_2 , ограниченно работоспособное – c_3 , аварийное – c_4 . Тогда нечеткое множество, характеризующее результат решения подзадачи для переменной y_p^l , принимает вид

$$\tilde{C}_p = \left\{ \frac{\mu_{c1}(X^{<P>})}{c_1}, \frac{\mu_{c2}(X^{<P>})}{c_2}, \frac{\mu_{c3}(X^{<P>})}{c_3}, \frac{\mu_{c4}(X^{<P>})}{c_4} \right\},$$

а нечеткое множество переменной y (итог):

$$\tilde{C} = \left\{ \frac{\mu_{c1}(X)}{c_1}, \frac{\mu_{c2}(X)}{c_2}, \frac{\mu_{c3}(X)}{c_3}, \frac{\mu_{c4}(X)}{c_4} \right\}.$$

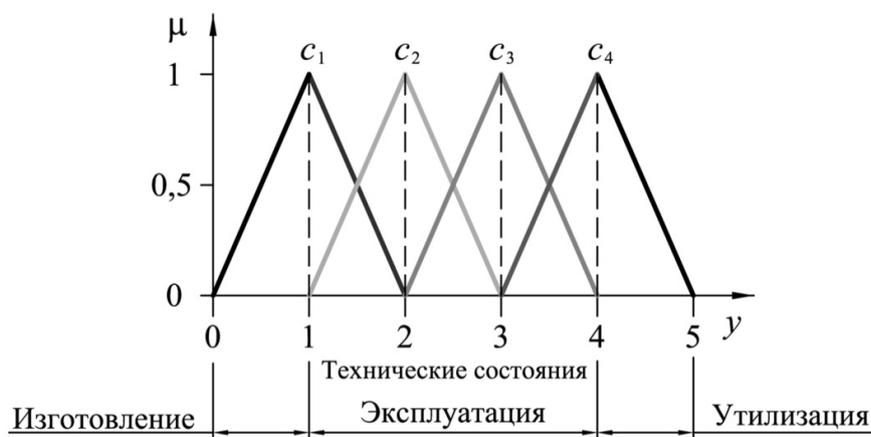


Рис. 2. Графики функций принадлежности к КТС СК

Для перехода к нечеткому множеству на носителе $[y, \bar{y}] = [0; 5]$ выполняются операции импликации и агрегирования. Например, при решении всей задачи в результате логического вывода по j -му правилу базы знаний о техническом состоянии параметра y получается нечеткое значение выходной переменной:

$$\tilde{c}_j^* = \text{imp}(\tilde{c}_j, \mu_{c_j}(X^*)), \quad j = \overline{1, 4},$$

где imp – импликация, реализуемая операцией минимума (срезанием функции принадлежности $\mu_{c_j}(y)$ по уровню $\mu_j(X^*)$).

Результат логического вывода с учетом всех правил определяется агрегированием нечетких множеств:

$$\widetilde{Y}^* = \text{agg}(\widetilde{c}_1^*, \widetilde{c}_2^*, \widetilde{c}_3^*, \widetilde{c}_4^*),$$

где agg – агрегирование нечетких множеств, реализуемое операцией максимума.

Четкое (числовое) значение ТС СК, соответствующее входному вектору, определяется с помощью дефаззификации по методу «центра тяжести» [8] (наиболее подходящему для данного класса задач):

$$y^* = \frac{\int_0^5 y \cdot \mu_C(y) dy}{\int_0^5 \mu_C(y) dy}.$$

Технология создания нечеткой модели оценки ТС реализована в виде исследовательского варианта ЭС «ТС железобетонной изгибаемой конструкции», способного

обработать информацию с 90 контролируемых параметров (большая часть из которых представлена лингвистическими переменными, а нечеткая база знаний содержит более 5000 правил).

Предлагаемый метод идентификации КТС СК позволяет значительно сократить время выбора. Апробации и верификация разработанной ЭС проводилась на реальных железобетонных изгибаемых конструкциях эксплуатируемых зданий и сооружений. Продемонстрировано совпадение выводов ЭС с выводами профессиональных экспертов.

Визуализация результатов работы ЭС (рис. 3) существенно повышает «прозрачность» принимаемых решений о степени аварийности конструкции, формирует понимание у пользователя причин и рисков изменения ТС СК.

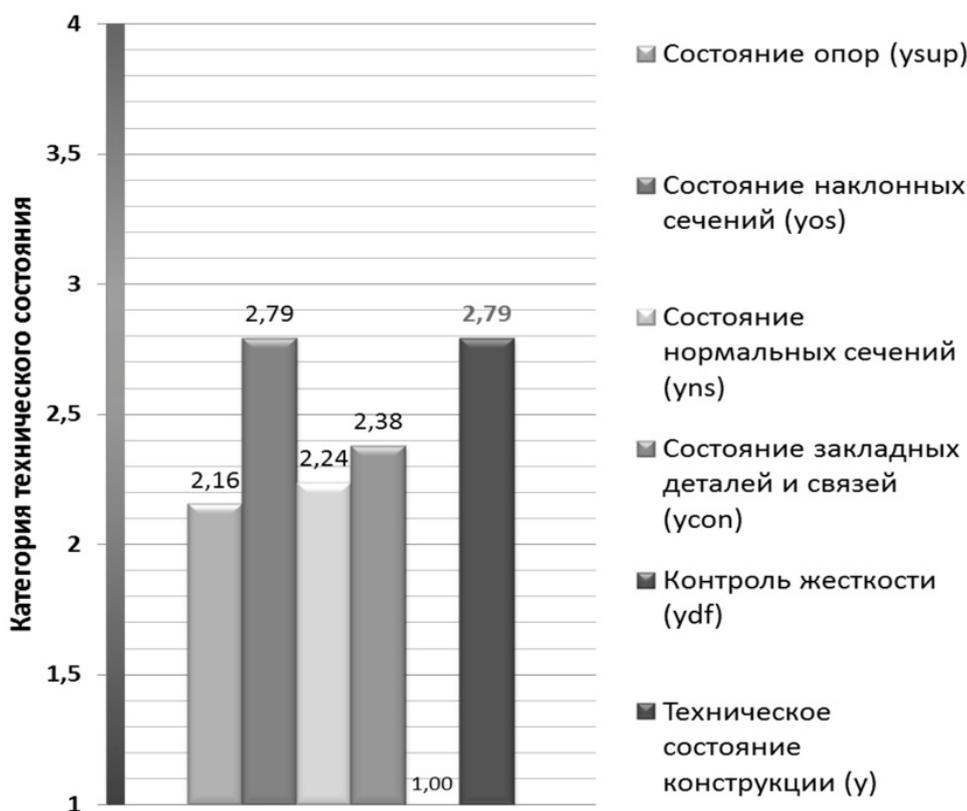


Рис. 3. Пример графического отображения результатов решения задачи «Техническое состояние конструкции»: представлены гистограммы, характеризующие четкие значения принадлежности к категориям на непрерывной шкале ТС СК

Библиографические ссылки

1. Джарратано Д., Райли Г. Экспертные системы: принципы разработки и программирование. М. : Вильямс, 2006. 1152 с.
2. Смолин, Д. В. Введение в искусственный интеллект: конспект лекций. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2004. 208 с.
3. Ротштейн А. П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткая логика, генетические алгоритмы, нейронные сети. Винница : УНИВЕРСУМ – Винница, 1999. 320 с.
4. Гаврилова Т. А., Червинская К. Р. Извлечение и структурирование знаний для экспертных систем. М. : Радио и связь, 1992. 200 с.
5. Палагин А. В., Петренко Н. Г., Малахов К. С. Методика проектирования онтологии ПДО // Комп'ютерні засоби, мережі та системи. 2011. № 10. С. 5–12.
6. Кашеварова Г. Г., Фурсов М. Н., Тонков Ю. Л. О построении функций принадлежности нечеткого множества в контексте задачи диагностики поврежденных железобетонных плит // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2014. Т. 10. № 2. С. 93–101.
7. Тонков Ю. Л. Выбор эффективного метода построения функций принадлежности для оценки качественных признаков технического состояния строительных конструкций // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. 2016. № 3. С. 126–146.
8. Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. М. : Горячая линия – Телеком, 2007. 288 с.

References

1. Dzharratano D. (2006). *Ekspertnyye sistemy: printsipy razrabotki i programmirovaniye* [Expert systems: principles of development and programming]. Moscow: Vil'yams (in Russ.).
2. Smolin D. V. (2004). *Vvedeniye v iskusstvennyy intellekt: konspekt lektsiy* [Introduction to artificial intelligence: a lecture summary]. Moscow: FIZMATLIT (in Russ.).
3. Rotshteyn A. P. (1999). *Intellektual'nyye tekhnologii identifikatsii: nechetkaya logika, geneticheskiye algoritmy, neyronnyye seti* [Intellectual identification technologies: fuzzy logic, genetic algorithms, neural networks]. Vinnitsa: UNIVERSUM (in Ukr.).
4. Gavrilova T. A., Chervinskaya K. R. (1992). *Izvlecheniye i strukturirovaniye znaniy dlya ekspertnykh sistem* [Extraction and structuring of knowledge for expert systems]. Moscow: Radio (in Russ.).
5. Palagin A. V. (2011). *Komp'yuterni zasobi, merezhi ta sistemi* [Computer tools, networks and systems], no. 10, pp. 5-12 (in Ukr.).
6. Kashevarova G. G., Fursov M. N., Tonkov Yu. L. (2014). *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, vol. 10, no. 2, pp. 93-101 (in Russ.).
7. Tonkov Yu. L. (2016). *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Prikladnaya jekologiya. Urbanistika* [Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Applied ecology. Urbanism] no. 3, pp. 126-146 (in Russ.).
8. Shtovba S.D. (2007). *Proektirovanie nechetkih sistem sredstvami MATLAB* [Designing Fuzzy Systems by MATLAB]. Moscow: Gorjachaja linija (in Russ.).

Yu. L. Tonkov, Senior Lecturer, Perm National Research Polytechnic University

Development of Mathematical Models for Identification of the Category of the Technical Condition of Building Constructions on the Basis of Fuzzy Logic

The paper contains justification for the relevance and necessity of developing expert systems for assessing the technical condition of construction projects. The description of the structure, construction methods and principles of operation of the fuzzy expert system for determining the category of technical condition of building structures is presented.

A feature of the description of the state of a construction structure is the uncertainty, the sources of which can be: the inability to accurately measure the controlled quantities; inaccuracy of performing actions; impossibility of a clear description of the situation, etc. The decision about the state is connected with the solution of the problem with very fuzzy initial data, connected with approximate «linguistic» characteristics of the input parameters (defects and structural damages, strength of materials, etc.).

The process of determining the category of technical condition is represented as a set of interrelated stages (subtasks) of the solution of the task. For the rapid implementation of these stages, the system of ontological analysis has integrated the corresponding subtasks in the form of a multilevel hierarchical structure (ontograph). The hierarchical

principle will allow for regulating the declarative knowledge at stages and coordinating the results of the decisions of the corresponding sub-tasks, using heterogeneous information flows. The construction of formal schemes and models for solving problems characterized by insufficient information, inconsistency and low reliability in the survey of building objects allows us to perform the theory of fuzzy sets and its applications. The definition of a clear meaning of the category of technical condition involves the use of the Mamdani fuzzy logic inference model. The formation of the corresponding Mamdani knowledge bases, in which all the values of the input and output variables are given by fuzzy sets, does not cause difficulties for the expert.

The results of the research were used to develop a research version of the expert system for assessing the technical condition of reinforced concrete bending elements. Approbation and verification of the program was carried out on the actually existing structures of the operated buildings and structures.

Keywords: identification models, technical condition, building structures

Получено: 26.02.18