

УДК 658.012.1: 624.01

ДИАГНОСТИКА ПРИЧИН ТРЕЩИН СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ МЯГКИХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Ольга Панкевич¹, Сергей Штовба¹, Дмитрий Штовба²

¹Винницкий национальный технический университет, ²Винницкий проектный институт

Введение

Необходимость создания банка данных поврежденных строительных конструкций неоднократно подчеркивалась в отечественных и зарубежных публикациях [1, 2]. Наличие такого банка данных позволило бы систематизировать и классифицировать повреждения. При этом заработала бы обратная связь от построенных зданий и сооружений к проектировщикам и производителям строительных материалов, без которой система «проектирование-возведение-эксплуатация» является кибернетически неустойчивой.

В работе рассматривается диагностика наиболее частого повреждения строительных конструкций – трещин. Правильное определение причин появления трещин значительно сокращает сроки и стоимость проектно-восстановительных работ. Диагностика причин трещин строительных конструкций является достаточно сложной интеллектуальной задачей; ее правильное решение возможно только при учете разнообразных факторов. На сегодня отсутствуют аналитические зависимости, связывающие внешние проявления трещины с причинами ее возникновения, что затрудняет автоматизацию диагностики. Заметим, что на этапе визуальных обследований опытные эксперты-диагносты достаточно легко, без составления и решения каких-либо уравнений, определяют класс причин возникновения трещины, например, перегрузка статическая, неравномерная осадка здания, влияние температуры. При принятии решений они используют лингвистические правила, в которых сконцентрированы теоретические знания и личный опыт диагностирования.

За последние десять лет разработано и успешно внедрено огромное число интеллектуальных систем на основе мягкие вычисления. Мягкие вычисления (или soft-computing) это симбиоз нечеткой логики, нейронных сетей, генетических алгоритмов, вероятностного вывода и теории хаоса и катастроф [3, 4]. Мягкие вычисления позволяют решать прикладные задачи принятия решений эффективнее, чем традиционные методы жестких вычислений – методы искусственного интеллекта, основанные на символьных вычислениях и аристотелевой логике. Это связано с тем, что мягкие вычисления толерантнее к неточности, нечеткости, неуверенности, которые обычно присутствуют в реальных задачах принятия решений. В настоящей статье анализируется возможность применения мягких вычислений для построения интеллектуальных систем диагностики трещин строительных конструкций. Изложение материала иллюстрируется нечеткой экспертной системой для выявления причин появления трещин кирпичных конструкций зданий по данным визуальных обследований.

Постановка задачи

Задача определения причин появления трещин строительных конструкций сводится к выполнению отображения вида:

$$X = \{x_1, \dots, x_n\} \rightarrow D \in \{d_1, \dots, d_m\}, \quad (1)$$

где X – вектор информативных признаков – параметров состояния диагностируемого объекта; $\{d_1, \dots, d_m\}$ – множество возможных причин появления трещин.

Идентификация зависимости (1) должна опираться на следующую доступную информацию: 1) выборку экспериментальных данных «параметры состояния – причина возникновения трещины»; 2) экспертные знания специалистов – диагностов в форме лингвистических правил «Если – то». Часто выборка экспериментальных данных является неполной; значения некоторых параметров измеряются неточно или оцениваются словами.

Методы мягких вычислений

Рассмотрим основные методы мягких вычислений, применение которых целесообразно в строительной диагностике.

Искусственные нейронные сети

Искусственная нейронная сеть – это универсальный аппроксиматор, состоящий из взаимосвязанной совокупности простых вычислительных элементов – нейронов. Каждый элемент сети функционирует по очень простым правилам. В большинстве сетей выход нейрона зависит от взвешенной суммы входных сигналов. В некоторых нейронных сетях, например, в многослойном персептроне, каждый элемент сети имитирует поведение одной клетки головного мозга. В других типах нейронных сетей, например, в радиально-базисных, функционирование элементов никак не связано с поведением нервных клеток. Фундаментальным свойством нейронных сетей является их способность к обучению. Диагностическая модель на основе нейронных сетей строится путем обучения сети по выборке экспериментальных данных. Количество входов нейронной сети равно числу информативных признаков (n), а количество выходов равняется числу возможных диагнозов (m). При определении причин трещин необходимо учитывать много факторов, поэтому нейронная сеть получается достаточно большой. Для обучения такой сети требуется огромная выборка экспериментальных данных, которая для задач диагностики трещин строительных конструкций еще не сформирована. Другим фактором, сдерживающим применение нейронных сетей в диагностике повреждений, является невозможность содержательной интерпретации процесса принятия решения. Нейронную сеть можно обучить, но нейронная сеть не может обучить пользователя.

Нечеткая логика

История нечетких множеств начинается с 1965 года, когда профессор Лотфи Заде из Калифорнийского университета Беркли опубликовал основополагающую работу «Fuzzy Sets» в журнале «Information and Control». Прилагательное "fuzzy", которое переводится на русский как нечеткий, размытый, ворсистый, введено в название теории с целью дистанцирования от традиционной четкой математики и аристотелевой логики, оперирующих с четкими понятиями: «принадлежит - не принадлежит», «истина - ложь». Понятие нечеткого множества - эта попытка математической формализации нечеткой информации для построения математических моделей. В основе этого понятия лежит представление о том, что составляющие данное множество элементы, обладающие общим свойством, могут обладать им в различной степени и, следовательно, принадлежать к этому множеству с различной степенью. При таком подходе высказывания типа «такой-то элемент принадлежит данному множеству» теряют смысл, поскольку необходимо указать насколько сильно или с какой степенью элемент удовлетворяет свойствам множества.

Попытки применения теории нечетких множеств в строительстве начались в 80-х годах. Это работы по прогнозированию надежности и живучести каменных зданий в сейсмических районах [5, 6], оценке степени повреждений землетрясениями зданий и сооружений [7], оптимизации конструкций, действующих в агрессивных средах [8] и др. Наиболее перспективным применением теории нечетких в диагностике трещин строительных конструкций является использование систем нечеткого логического вывода. Нечеткий логический вывод – это аппроксимация зависимости «входы – выход» на основе нечеткой базы знаний и операций над нечеткими множествами. Нечеткую базу знаний составляют экспертные правила типа: «ЕСЛИ трещина - *вертикальная* И проходит *через всю стену* И раскрыта *вниз* И грунты - *неоднородные*, ТО причина - *неравномерная осадка фундамента*». В соответствии с [4] идентификация зависимостей на основе нечетких баз знаний проходит в два этапа. На первом этапе выполняется структурная идентификация. Она представляет собой формирование нечеткой базы знаний, которая грубо отражает нелинейную взаимосвязь «входы – выход» с помощью лингвистических правил «Если - То». Эти правила генерируются экспертом, либо получаются в результате экстракции нечетких знаний из экспериментальных данных. На втором этапе происходит параметрическая идентификация

исследуемой зависимости путем нахождения таких параметров нечеткой базы знаний, которые минимизируют отклонение результатов нечеткого моделирования от экспериментальных данных. Настраиваемыми параметрами являются веса правил и параметры функций принадлежности нечетких термов. Использование лингвистической информации в виде экспертных правил «Если - то» позволяет значительно снизить необходимый объем обучающей выборки для нечеткой идентификации. Недостатки нечетких систем связаны с трудоемкими процедурами оптимизации при настройке.

Эволюционное программирование и генетические алгоритмы

Эволюционное программирование - это индуктивный метод синтеза программ (моделей), описывающих закономерности, представленные в данных. Модели синтезируются (выращиваются) по принципам эволюции живой природы с применением процедур скрещивания, мутации и селекции. Использование эволюционного программирования не требует наличия априорных знаний о структуре модели – достаточно иметь репрезентативную выборку экспериментальных данных. Заметим, что в отличие от нейронных сетей априорные знания о структуре выращиваемой модели могут значительно ускорить идентификацию. Как и в случае нейронных сетей, для реальных задач определения причин трещин строительных конструкций, обучающая выборка будет достаточно большой. Среди методов эволюционных вычислений чаще всего применяются генетические алгоритмы – стохастический метод глобальной оптимизации, основанный на механизмах природной эволюции.

Гибридные подходы

Для задач диагностики трещин строительных конструкций заслуживают на внимание следующие гибридные подходы: нейро-фаззи сети и фаззи-генетические модели. Нейро-фаззи сеть – это комбинация нечеткой базы знаний и нейронной сети. Архитектура такой сети изоморфна базе знаний. При этом используются дифференцируемые реализации нечетких логических операции И и ИЛИ в виде произведения и вероятностной суммы (в нечетком логическом выводе обычно используются операции минимума и максимума). Основное преимущество нейро-фаззи сети по сравнению с нечеткой моделью заключается в возможности применения быстрых алгоритмов обучения, основанных на методе обратного распространения ошибки. Для нейро-фаззи сетей объем обучающей выборки может быть значительно меньше, чем при обучении нейронных сетей. Второй гибридный подход основан на применении генетических алгоритмов, которые эффективно решают нелинейные задачи оптимизации большой размерности, возникающие при настройке нечетких моделей. Использование нечетких баз знаний и генетических алгоритмов для определения причин возникновения трещин кирпичных конструкций иллюстрируется в следующем разделе.

Нечеткая экспертная система диагностики причин трещин кирпичных зданий

В разделе описывается экспертная система для определения причин возникновения трещин в кирпичных конструкциях при визуальном обследовании зданий [9-12]. Система разработана в Винницком национальном техническом университете с привлечением экспертов ЗАТ «Винницкий проектный институт». Методологически, система базируется на теории идентификации на основе нечетких баз знаний [4].

Возможные причины возникновения трещин классифицируются следующим образом: d_1 - перегрузка статическая; d_2 - перегрузка динамическая; d_3 - особая перегрузка (землетрясения, взрывы); d_4 - дефекты фундаментов или деформация основания; d_5 - температурные деформации; d_6 - свойства материалов или нарушение технологии производства работ. Приведенная классификация соответствует максимальной глубине диагностирования, которая может быть достигнута на этапе визуальных обследований.

Исходной информацией для определения причины возникновения трещины является значения следующих параметров состояния диагностируемого объекта: x_1 - тип конструкции; x_2 - условия работы конструкции; x_3 - толщина горизонтальных швов; x_4 - дефекты заполнения швов; x_5 - состояние системы перевязки; x_6 - наличие

непредусмотренных отверстий; x_7 - дефекты армирования; x_8 - кривизна конструкции; x_9 - превышение допустимого отклонения от вертикали; x_{10} - увлажнение кладки; x_{11} - шелушение кладки; x_{12} - выветривание кладки; x_{13} - выщелачивание кладки; x_{14} - выкрошивание кладки; x_{15} - местонахождение трещины; x_{16} - направление трещины; x_{17} - направления раскрытия трещины; x_{18} - ширина трещины; x_{19} - длина трещины; x_{20} - последствия пожара; x_{21} - информация о землетрясениях, взрывах; x_{22} - наличие динамических нагрузок; x_{23} - скалывания под перемычкой; x_{24} - глубина трещины; x_{25} - смещение подпорной стены или стены подвала; x_{26} - аварии систем водо- и тепло-снабжения; x_{27} - состояние водостоков и отмостки; x_{28} - наличие слабых грунтов; x_{29} - наличие воды в подвале; x_{30} - наличие поблизости емкостных сооружений; x_{31} - проведение строительных работ вблизи объекта; x_{32} - смещение балок, перемычек; x_{33} - необходимость осадочного шва; x_{34} - наличие осадочного шва; x_{35} - наличие ранее неучтенных нагрузок; x_{36} - наличие механических повреждений, уменьшающих расчетное сечение; x_{37} - опирание балок и прогонов перекрытия без соответствующих конструктивных мероприятий; x_{38} - недостаточная величина опирания балок, плит; x_{39} - необходимость температурного шва; x_{40} - наличие температурного шва; x_{41} - выполнение работ зимой; x_{42} - использование разнородных материалов.

Математическая модель определения причины возникновения трещины кирпичной конструкции здания $X = \{x_1, \dots, x_{42}\} \rightarrow D \in \{d_1, \dots, d_6\}$ задана следующей иерархической системой соотношений:

$$\begin{aligned} D &= f_D(x_1, x_2, y_1, x_{15}, x_{16}, x_{17}, x_{18}, x_{19}, y_3); & y_1 &= f_{y_1}(x_3, x_4, x_5, x_6, y_2, x_7, x_8, x_9, x_{10}); \\ y_2 &= f_{y_2}(x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{14}); & y_3 &= f_{y_3}(y_1, y_5, x_{20}, x_{21}, x_{22}, x_{23}, x_{24}, y_6, y_7); \\ y_4 &= f_{y_4}(x_{25}, x_{26}, y_8, x_{27}, x_{28}, x_{29}, x_{30}, x_{31}, x_{32}); & y_5 &= f_{y_5}(x_{35}, x_{36}, x_{37}, x_{38}); \\ y_6 &= f_{y_6}(x_{39}, x_{40}); & y_7 &= f_{y_7}(x_{41}, x_{42}); & y_8 &= f_{y_8}(x_{33}, x_{34}), \end{aligned}$$

где $y_1 - y_8$ - укрупненные параметры состояния;

$f(\cdot)$ - логическим вывод, осуществляемый по нечетким базам знаний.

Укрупненные параметры состояния содержательно интерпретируются следующим образом: y_1 - состояние конструкции; y_2 - повреждения кладки; y_3 - дополнительная информация; y_4 - возможность неравномерной осадки здания; y_5 - возможность статической перегрузки; y_6 - требования к температурному шву; y_7 - возможность нарушения технологии строительного производства; y_8 - требования к осадочному шву.

Иерархическая взаимосвязь между параметрами состояния и причиной возникновения трещины задана девятью нечеткими базами знаний [9]. Общее количество правил в нечетких базах знаний равно 151. Термы «короткая», «длинная», «очень длинная» и другие, используемые для лингвистической оценки параметров состояния, заданы нечеткими множествами с колоколообразными функциями принадлежности. Алгоритм принятия решения по определению причины возникновения трещины кирпичной конструкции представляет собой последовательность нечетких логических выводов по выше приведенной системе соотношений.

Настройка диагностической модели на нечетких базах знаний сводится к нахождению таких параметров функций принадлежностей и весов правил, обеспечивающих минимальную невязку между результатами моделирования и экспериментальными данными из обучающей выборки. Настройка представляет собой задачу нелинейной оптимизации большой размерности – общее количество настраиваемых параметров равно 387. Задача оптимизация была решена с использованием генетических алгоритмов [12].

Исследование адекватности диагностирования проводилось на выборке из 89 объектов, расположенных в Винницкой, Житомирской, Херсонской и Хмельницкой областях. Совпадение компьютерного решения с действительными причинами появления трещин наблюдалось в 85 случаях; в остальных 4 случаях действительности соответствовало второе по рангу компьютерное решение. Экспертная система реализована на базе программной

оболочки FuzzyExpert [4]. Обмен информацией между пользователем и экспертной системой осуществляется через развитый графический интерфейс, что обеспечивает возможность ее использования инженерами-строителями без специальной подготовки в области теории нечетких множеств и компьютерных наук. Безошибочность диагностирования превышает 95%, что позволяет рекомендовать разработанную экспертную систему для практического использования.

Выводы и будущие исследования

Проанализированы возможности применения мягких вычисления для определения причин появления трещин строительных конструкций. Установлено, что в строительной диагностике целесообразно использовать гибридные нечетко-генетические и нейро-нечеткие модели. Перспективными направлениями применения мягких вычислений в строительстве, по мнению авторов, являются: 1) создание нечетких систем с нейро – и генетической настройкой для определения причин появления различных типов повреждений; 2) проектирование систем поддержки принятия решений по усилению поврежденных конструкций; 3) разработка систем для определения степени работоспособности и остаточного ресурса поврежденных сооружений, например, мостов, туннелей, эстакад.

Литература

1. Лужин О.В., Горбунов И.А. Систематизация сбора информации по дефектам эксплуатируемых объектов и создание методов оценки отказов на основе экспертных систем // Изв. вузов. Строительство. — 1996. — №3. — С. 3—6.
2. Molnarka G. Problems in Failure Analysis in Building Pathology // In Bulletin 2000 of Faculty of Architecture. Hungary: Technical University of Budapest.- 2000.- P. 129-142.
3. Aliev A., Aliev R. Soft Computing and its Applications. World Scientific. – 2001.
4. Ротштейн А.П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткая логика, генетические алгоритмы и нейронные сети. Винница: Універсум-Вінниця.- 1999.- 320с.
5. Bernardini A., Gori R, Modena C. Applicattion of Coupled Analytical Models and Experiential Knowledge to Seismic Vulnerability Analyses of Masonry Buildings. In Earthquake Damage Evaluation and Vulnerability Analysis of Building Structures. (Ed. A.Koridze). England: Omega Scientific.- 1990.- P. 161-180.
6. Bernardini A., Modena C. Application of the Fuzzy Sets Theory to the Reliability Evaluation of Structural Systems. In Proc. of Inter. Symposium on Fuzzy Systems and Knowledge Engineering. China, Guangdong.- 1987.- P.541-548.
7. Ягер Р.Р. Нечеткие множества и теория возможностей: последние достижения. - М.: Энергоатомиздат. — 1993. — 236 с.
8. Почтаман Ю.М., Милов В.Ю. Нечеткая постановка задачи оптимального проектирования конструкций, воздействующих с агрессивными средами // Изв. вузов. Строительство и архитектура. — 1990. — №11. — С. 7-11.
9. Панкевич О.Д., Штовба С.Д. Модель на основі нечітких баз знань для діагностування тріщин цегляних конструкцій будівлі // Вісник Вінницького політехнічного інституту. - 2000. -№5.- С. 14-21.
10. Shtovba S., Rotshtein A., Pankevich O. Fuzzy Rule Based System for Diagnosis of Stone Construction Cracks of Buildings. In "Advances in Computational Intelligence and Learning, Methods and Applications" (Eds.: Zimmermann H-J., Tselentis G., van Someren M., Dounias G.). Kluwer Academic Publishers: Dordrecht, 2002, P. 401-412.
11. Панкевич О.Д., Маевская И.В. Определение причин появления трещин кирпичных конструкций на основе нечетких баз знаний // Известия вузов: Строительство.- 2002.- №1-2, С.4-8.
12. Панкевич О.Д. Навчання нечіткої моделі діагностування тріщин цегляних конструкцій за допомогою генетичного алгоритму // Вісник Вінницького політехнічного інституту. - 2001. -№4.- С. 37-41.