

## Принципы диагностики строительных конструкций на базе нечеткой логики

А.П. Ротштейн<sup>а</sup>, О.Д. Панкевич<sup>б</sup>, С.Д. Штовба<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Холонский центр технологического обучения при Тель-Авивском университете, <sup>б</sup>Винницкий государственный технический университет

**Аннотация** — В работе предложены принципы, которые могут быть положены в основу математических моделей, алгоритмов и программного обеспечения для диагностики строительных конструкций. Предложенные принципы позволяют использовать в качестве исходной информации для построения моделей диагностики, как экспериментальные данные, так и лингвистические высказывания-правила, отражающие понимание экспертом причинно-следственных связей.

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из центральных задач диагностики является установления причин возникновения дефектов и повреждений строительных конструкций, инженерного оборудования и зданий в целом [1]. Большое количество разнообразных факторов, влияние которых необходимо учитывать при установлении причин повреждений, сильно усложняют задачу диагностики. Конечно, квалифицированные инженеры-строители могут успешно решать задачи диагностики, однако число таких компетентных экспертов относительно мало, и им трудно передать опыт и интуицию молодым инженерам. В связи с этим возникает необходимость в разработке компьютерных систем, обеспечивающих интеллектуальную поддержку принятия диагностических решений инженерами-строителями средней квалификации.

Задача диагностики строительных конструкций может быть сведена к задаче распознавания образов. Применение традиционных для распознавания образов байесовского подхода, регрессионного анализа, логического программирования для задач диагностики строительных конструкций проблематично, из-за отсутствия точных количественных данных, отражающих связь между внешними проявлениями повреждений (дефектов) и причинами их возникновения. Поэтому возникает интерес к привлечению методов и средств искусственного интеллекта, позволяющих формализовать и использовать доступную лингвистическую информацию, отражающую понимание экспертом причинно-следственных связей. Одним из перспективных путей формализации лингвистической информации является теория нечетких множеств [2].

Не смотря на показанную в [3] возможность использования нечетких множеств в строительной науке, в литературе до сих пор не определены методологические принципы построения систем диагностики строительных конструкций на базе теории нечетких множеств. Целью настоящей работы является восполнение указанного пробела. При формировании принципов диагностики строительных конструкций на базе нечеткой логики авторы использовали идеи лингвистического моделирования, предложенного в [4].

### 1. ПРИНЦИП ЛИНГВИСТИЧНОСТИ ВХОДНЫХ И ВЫХОДНЫХ ПЕРЕМЕННЫХ

В соответствии с этим принципом, входы объекта и его выход рассматриваются как лингвистические переменные, которые оцениваются качественными терминами (терм — от англ. term — называть).

Согласно Л. Заде [2], лингвистической переменной называется такая переменная, значениями которой являются слова или предложения естественного языка, т.е. качественные термы. Совокупность всех возможных значений лингвистической переменной называется терм-множеством. В качестве примера приведем несколько входных лингвистических переменных и соответствующие терм-множества, которые могут использоваться в задаче диагностики железобетонных конструкций:

НАПРАВЛЕНИЕ ТРЕЩИН (вертикальная вверх, наклонная вверх, горизонтальная, наклонная вниз, вертикальная в низ),

КОЛИЧЕСТВО ТРЕЩИН (единичная, небольшое, много),

ШИРИНА РАСКРЫТИЯ ТРЕЩИН (волосяные, мелкие, развитые, большие, крупные).

Выходной переменной в этой задаче может быть:

ПРИЧИНА ВОЗНИКНОВЕНИЯ ДЕФЕКТА (осадка фундамента, перегрузка, изменение температуры, связанная со свойствами материала, из-за взаимосвязи различных материалов).

Используя понятие функции принадлежности, каждый из термов, оценивающих лингвистическую переменную, можно формализовать в виде нечеткого множества, заданного на соответствующем универсальном множестве. Согласно Заде [2], нечетким множеством  $\tilde{A}$  в универсальном множестве  $U$  называется совокупность пар  $(\mu_{\tilde{A}}(u), u)$ , где  $u \in U$  и  $\mu_{\tilde{A}}(u): U \rightarrow [0,1]$  — функция принадлежности, которая представляет собой некоторую субъективную меру соответствия элемента  $u \in U$  свойствам нечеткого множества  $\tilde{A}$ .

Пример функций принадлежности термов волосяные (В), мелкие (М), развитые (Р), большие (Б), крупные (К), используемых для лингвистической оценки переменной «Ширина раскрытия трещин», показан на рис.1.

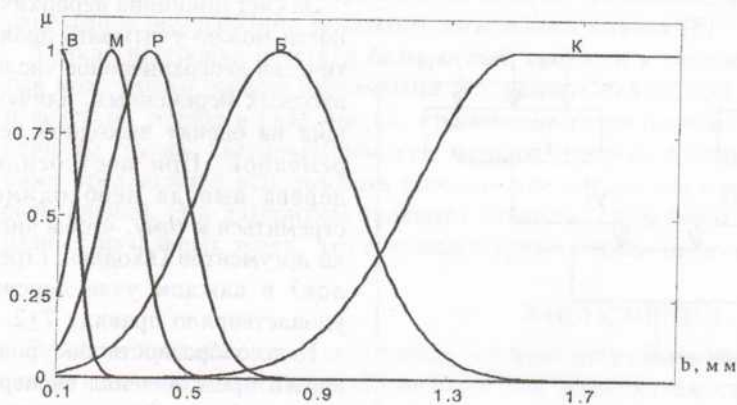


Рис. 1. Функции принадлежности термов

## 2. ПРИНЦИП ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ЗАВИСИМОСТИ «ВХОД-ВЫХОД» В ВИДЕ НЕЧЕТКОЙ БАЗЫ ЗНАНИЙ

Нечеткая база знаний представляет собой совокупность правил ЕСЛИ <входы>, ТО <выход>, которые отражают опыт эксперта и его понимание причинно-следственных связей в рассматриваемой задаче диагностики строительных конструкций. Примером экспертного правила из нечеткой базы знаний может служить следующее высказывание:

ЕСЛИ конструкция — *плита покрытия*  
 И вид трещин — *односторонняя*  
 И расположение трещин — *в средней части пролета*  
 И количество трещин — *небольшое*  
 И ширина раскрытия — *мелкие*  
 ТО причина — *Перегрузка*

Особенность подобных высказываний состоит в том, что их адекватность не изменяется при незначительных колебаниях условий эксперимента. Поэтому формирование нечеткой базы знаний можно трактовать как аналог этапа структурной идентификации [5], на котором строится грубая модель объекта с параметрами, подлежащими настройке. В данном случае настройке подлежат формы функций принадлежности нечетких термов, с помощью которых оцениваются входы и выходы объекта.

Кроме того, совокупность правил ЕСЛИ-ТО можно рассматривать как набор экспертных точек в пространстве «входы-выход». Применение аппарата нечеткого логического вывода [2,4,6] позволяет восстанавливать по этим точкам многомерную поверхность, которая позволяет получать значения выхода при различных комбинациях значений входных переменных.

## 3. ПРИНЦИП ИЕРАРХИЧНОСТИ БАЗ ЗНАНИЙ

Использование этого принципа позволяет преодолеть «проклятие размерности». При большом числе входных переменных построение системы высказываний о неизвестной зависимости «входы-выход» становится затруднительным. Это обусловлено тем, что в оперативной памяти человека одновременно может удерживаться не более  $7 \pm 2$  понятий-признаков [7]. В связи с этим целесообразно провести классификацию входных переменных и по ней построить дерево вывода, определяющее систему вложенных друг в друга высказываний-знаний меньшей размерности. Пример такого дерева для десяти входных переменных показан на рис. 2.

Из этого примера видно, что знания вида

$$d = d(x_1, x_2, \dots, x_{10}),$$

связывающие входы  $x_1 \div x_{10}$  с выходом  $d$ , заменяются последовательностью постановок:

$$d = d(y_1, x_4, z),$$

$$y_1 = y_1(x_1, x_2, x_3), \quad z = z(y_2, y_3), \quad y_2 = y_2(x_5, x_6, x_7), \quad y_3 = y_3(x_8, x_9, x_{10}),$$

где  $y_1, y_2, y_3, z$  — промежуточные выходы, рассматриваемые как лингвистические переменные.

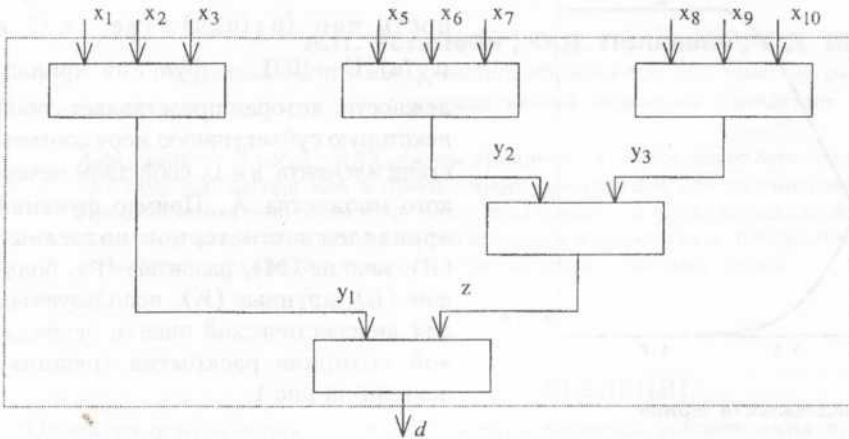


Рис. 2. Пример дерева вывода

За счет принципа иерархичности можно учитывать практически неограниченное число входных переменных, влияющих на оценку выходной переменной. При построении дерева вывода необходимо стремиться к тому, чтобы число аргументов (входных стрелок) в каждом узле дерева удовлетворяло правилу  $7 \pm 2$ .

Целесообразность по уровневому представлению экспертных знаний обусловлена не только естественной иерархичностью объектов диагностирования, но и необходимостью учета новых переменных по мере накопления знаний об объекте.

#### 4. ПРИНЦИП ТЕРМОМЕТРА В ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВЕННЫХ ПЕРЕМЕННЫХ

Суть этого принципа состоит в том, что экспертная оценка некоторой входной переменной осуществляется путем закрашивания части шкалы (рис. 3), левая и правая границы которой соответствуют наименьшему и наибольшему уровням рассматриваемой переменной.

Принцип термометра удобно применять в тех случаях, когда эксперт не в состоянии оценить некоторую переменную ни числом, ни качественным термом, а лишь интуитивно ощущает ее уровень. Удобство такого подхода состоит в том, что он позволяет рассматривать различные по своей природе лингвистические переменные на едином универсальном множестве  $U = [\underline{u}, \bar{u}]$ .

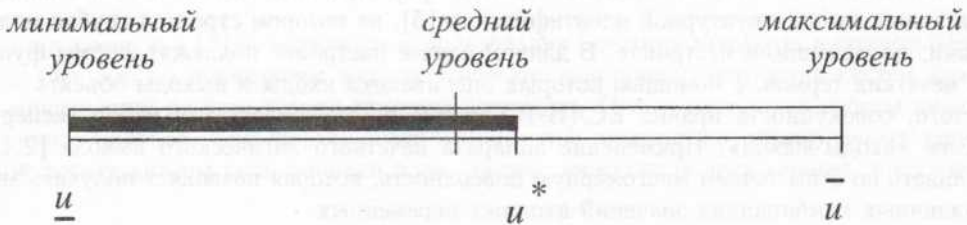


Рис. 3. Оценка переменной  $u$  по принципу термометра

#### 5. ПРИНЦИП ДВУХЭТАПНОЙ НАСТРОЙКИ НЕЧЕТКИХ БАЗ ЗНАНИЙ

В соответствии с этим принципом, построение модели диагностики осуществляется в два этапа, которые по аналогии с классическими методами [5] можно считать этапами структурной и параметрической идентификацией. Настраиваемыми параметрами являются веса нечетких правил ЕСЛИ-ТО и формы функций принадлежности.

Первый этап является традиционным для технологии нечетких экспертных систем. На нем осуществляется формирование и грубая настройка нечеткой базы знаний по доступной экспертной информации. Для грубой настройки весов правил и форм функций принадлежности можно использовать модифицированный метод парных сравнений Саати, описанный в [4].

Чем выше профессиональный уровень эксперта, тем выше адекватность нечеткой модели диагностики строительных конструкций, построенной на этапе грубой настройки. Эта модель называется чистой экспертной системой, поскольку для ее построения используется только экспертная информация. Однако никто не может гарантировать совпадение результатов нечеткого логического вывода (теория) и экспериментальных данных. Поэтому необходим второй этап, на котором осуществляется тонкая настройка нечеткой модели путем ее обучения по экспериментальным данным.

Суть этапа тонкой настройки состоит в подборе таких весов нечетких правил ЕСЛИ-ТО и таких параметров функций принадлежности, которые минимизируют отклонение между экспериментальными данными и результатами нечеткого логического вывода [8].

Тонкая настройка нечеткой базы знаний сводится к решению задачи нелинейной оптимизации, которая может быть решена различными методами. Однако, при большом количестве входных переменных и нечетких термов в базе знаний, применение традиционных технологий оптимизации (метода наискорейшего спуска, квазиньютоновских методов) потребует больших затрат машинного времени. Поэтому нами предлагается использовать генетические алгоритмы оптимизации для тонкой настройки нечеткой базы знаний. Эти алгоритмы являются аналогом случайного поиска, который ведется одновременно из разных начальных точек, что сокращает время поиска оптимальных параметров нечеткой базы знаний.

### ЗАКЛЮЧЕНИЯ

В работе предложен ряд принципов, которые могут быть положены в основу математических моделей, алгоритмов и программного обеспечения для диагностики строительных конструкций. Предложенные принципы позволяют использовать в качестве исходной информации для построения моделей диагностики, как экспериментальные данные, так и лингвистические высказывания-правила, отражающие понимание экспертом причинно-следственных связей.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Бойко М.Д. Диагностика повреждений и методы восстановления эксплуатационных качеств зданий.- Л.: Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1975.- 336 с.
2. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию приближенных решений.- М.: Мир, 1976.- 167с.
3. Фу К.С., Исидзука М., Яо Д.Т. Применение нечетких множеств для оценки устойчивости строительных конструкций при землетрясениях. В кн. Нечеткие множества и теория возможностей. Последние достижения. / Под ред. Ягера Р.Р.- М.: Радио и связь, 1986.- 408 с.
4. Ротштейн А.П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткие множества, генетические алгоритмы, нейронные сети.- Винница: "УНІВЕРСИМ-Вінниця", 1999.- 320с.
5. Цыпкин Я.З. Основы информационной теории идентификации.- М.: Наука.- 1984.- 320с.
6. Ротштейн А.П., Штовба С.Д. Нечеткая надежность алгоритмических процессов. Винница: Континент-ПРИМ, 1997.- 142с.
7. Miller G.A. The magic number seven plus or minus two: some limits on our capacity for processing information // Psychological Review.- 1956.- №63.- p.81-97.
8. Ротштейн А.П., Кательников Д.И. Идентификация нелинейных объектов нечеткими базами знаний // Кибернетика и системный анализ.- 1998.- №5.- С.53-61.