

# ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА КРАНА

Андрієнко Н. Н., к.т.н., профессор, председатель правления,  
Корень В. Л., главный специалист, НТА «Подъемные сооружения», г. Одесса  
Резниченко О. А. начальник отдела по надзору за ГПТ, КП «Будова»

Тому, что мы должны научиться делать, мы учимся делая.  
Аристотель

Прежде чем представить теорию экспертной системы крана следуем высказыванию П. Дирака, что новая теория должна основываться на красивой и разумной математике. Такой красивой и разумной математикой является теория нечетких множеств и лингвистической переменной.

Один из фундаментальных принципов современной науки состоит в том, что явление нельзя считать хорошо понятым до тех пор, пока оно не описано посредством количественных характеристик (Лорд Кельвин), [1].

С этой точки зрения многое из того, что составляет сущность научного знания о подъемных сооружениях, в частности, о кранах, сейчас рассматривается как совокупность принципов и методов, необходимых для конструирования математических моделей, например, расчетов по допускаемым напряжениям или по предельным состояниям. Расчеты позволяют получить количественную информацию о поведении составных частей подъемного сооружения (ПС). При существующем уважении ко всему точно, строгому и количественному и пренебрежении ко всему неточному, нестроганому и некачественному неудивительно, что появление компьютеров вызвало широкое распространение количественных методов, ранее недоступных для практики (расчеты методом конечных элементов). Несомненно, компьютеры оказались высокоэффективными при работе с механическими системами, какими мы сейчас представляем подъемные сооружения.

К сожалению, то же самое нельзя сказать о работе подъемных сооружений, которая оказывает весьма стойкое сопротивление математическому анализу и моделированию с применением компьютеров. Работу подъемного сооружения, в частности крана, рассмотрим не только как механическую систему, но и как, в некоторой степени, гуманистическую систему. Работа подъемного сооружения описывается естественным языком, используются сведения из «механической» системы.

Неэффективность компьютеров в изучении гуманистических систем подтверждает то, что называется принципом несовместимости – принципом, утверждающим, что высокая точность несовместима с большой сложностью проблем, возникающих при описании ра-

боты подъемного сооружения. Таким образом обычные методы анализа систем и моделирование на компьютере, основанные на точной обработке численных данных, по существу не способны охватить огромную сложность процессов мышления инженера-крановщика и принятия им решений. Отсюда напрашивается вывод о том, что для получения существенных выводов о поведении подъемного сооружения придется, по-видимому, отказаться от высоких стандартов точности и строгости, которые мы ожидаем при математическом анализе четко определенных механических систем, и относиться более терпимо к подходам, которые являются приближенными по своей природе. Вполне возможно, что при использовании таких подходов моделирование на компьютере станет действительно эффективным методом для экспертной системы крана, проблемы которой настолько сложны или некорректно определены, что не поддаются обычному количественному анализу.

Математическим аппаратом описания безопасной работы подъемного сооружения используется теория нечетких множеств и лингвистической переменной.

Для этого все сведения о ПС должны быть представлены в электронном, а не в бумажном виде.

Если мы расположим на столе журнал осмотра ПС, вахтенный журнал машиниста крана в бумажном виде и наши смартфоны, ноутбуки станет немного грустно.

## Некоторые определения

Множество  $S$  есть любое собрание определенных и различных между собой объектов нашей интуиции или интеллекта, мыслимое как единое целое. Эти объекты называются элементами, или членами, множества  $S$ . Эта формулировка не накладывает никаких ограничений на природу предметов, входящих в множество даже если некоторые элементы по той или иной причине нельзя точно указать.

Если  $A$  и  $B$  суть множества, то говорят, что  $A$  включено в  $B$  (символическая запись  $A \subset B$ ), если каждый элемент множества  $A$  является элементом множества  $B$ . В этом случае говорят также, что  $A$  есть подмножество множества  $B$ . Это формулировки создателя теории множеств Г. Кантора (1845–1918).

**Примеры.** Множество грузоподъемных сооружений состоит из подмножеств кранов, манипуляторов, подъемников, лифтов, погрузчиков, подъемников и машин будущего, тип которых мы не можем указать.

**Обычные, нечеткие и лингвистические переменные [1] в нашей интерпретации по отношению к ПС.**

Обычная (не нечеткая) переменная характеризуется тройкой  $(X, U, R(X; u))$ , где  $X$  – название переменной. Например, остаточный ресурс металлоконструкций.

$U$  – универсальное множество. У нас это группы классификации (режима работы) кранов в целом.  $u$  – характеристическое число, т.е. произведение коэффициента нагрузки  $K_p$  на максимальное число рабочих циклов.  $R(X, u)$  – заключение, представляющее название  $X$  для ограничения  $u$ . Например, группа классификации крана в целом А5, режим нагружения Q2, коэффициент нагрузки  $K_p = 0,25$ ; максимальное количество рабочих циклов  $N = 5 \cdot 10^5$ ;  $u = K_p \cdot N = 1,25 \cdot 10^5$ . По данным владельца кран отработал на момент экспертизы  $N_1 = 6 \cdot 10^5$  циклов в режиме Q1, т.е.  $K_{p1} = 0,125$ . Остаточный ресурс  $R(X, u) = (K_p \cdot N - K_{p1} \cdot N_1) / K_{p1} = 4 \cdot 10^5$  циклов при продолжении работы в таком же режиме с  $K_{p1} = 0,125$ .

Ресурс ПС определяется на основе традиционных (предписывающих) норм – расчета по допускаемым напряжениям или по предельным состояниям. Грузоподъемное устройство работает как механические часы, завод которых определяет ресурс.

Нечеткая переменная характеризуется тройкой  $(X, U, R(X; u))$ , где  $X$  – название переменной. Это величина опасности, риска возникновения негативного инцидента.  $U \rightarrow [0; 1]$  – характеризуется функцией принадлежности  $\mu$ , которая ставит в соответствие каждому элементу  $u \in U$  число  $\mu(u)$  из интервала  $[0; 1]$ , характеризующему степень принадлежности к опасности, риску.

$R(X, u)$  – заключение по результатам экспертизы.

**Примеры.** Строп с диаметром каната 20 мм на участке каната  $30d = 600$  мм имеет 14 видимых обрывов проволок при норме браковки 16 обрывов. Степень принадлежности к норме браковки  $\mu(u) = 0,9$ . Заключение – строп заменить, возможно произвести два-три подъема.

#### Лингвистическая переменная

Лингвистическая переменная отличается от числовой переменной тем, что её значениями являются не числа, а слова или предложения в естественном или формальном языке. Поскольку слова менее точны, чем числа, понятие лингвистической переменной дает воз-

можность приближенно описывать явления, которые настолько сложны, что не поддаются описанию в количественных терминах.

Например, ущерб при аварии отражает характеристики тяжести последствий. Это предположение можно рассматривать как название нечеткого множества, элементами которого являются уровни тяжести последствий: высокий, средний, низкий, незначительный.

Важным аспектом понятия лингвистической переменной является то, что эта переменная более высокого порядка, чем нечеткая переменная, в том смысле, что значениями лингвистической переменной являются нечеткие переменные. Определив сразу после аварии ущерб как низкий, может оказаться, что он высокий. Синонимами нечеткости являются неопределенность, неточность, недостоверность, неясность.

**Определение.** Лингвистическая переменная характеризуется набором  $(X, T(X), U, G, M)$ , в котором  $X$  – название переменной;  $T(X)$  (или просто  $T$ ) означает терм-множество переменной  $X$ , т.е. множество названий лингвистических значений переменной  $X$ , причем каждое из таких значений является нечеткой переменной  $X$  со значениями из универсального множества  $U(0; 1)$  с базовой переменной  $U$ ;

$G$  – синтаксическое правило, порождающее название  $T$  значений переменной  $X$ ;  $M$  – семантическое правило, которое ставит в соответствие каждой нечеткой переменной  $T$  её смысл, т.е. порождающее название  $T$ .

Конкретное название  $T$ , порожденное синтаксическим правилом  $G$ , называется термом. Если  $X_1, X_2$  – термы в  $T$ , то  $T$  можно представить в виде объединения

$$T = X_1 + X_2 + \dots$$

Знак (+) обозначает здесь объединение, а не арифметическое суммирование.

В связи с тем, что нечеткие множества не имеют четких границ, степени принадлежности размыты, а теория нечетких множеств и лингвистических переменных в области подъемных сооружений еще не применялись на практике, вычисляется усредненное значение функции принадлежности  $\mu_i: U \rightarrow [0; 1]$ , которое ставит в соответствие каждому элементу  $U \in U$  число  $\mu_i(u)$  из интервала  $[0; 1]$ , характеризующее степень принадлежности элемента  $T$  к  $\mu_i(u)$ .

Синтаксическое правило  $G$  вычисления  $\mu_i$  для анализа состояния подъемного сооружения. Прежде всего определяется  $\mu_i$  на основании экспертной оценки состояния элементов ПС, влияния человеческого фактора, возможность и сроки реализации проекта и т.д. Экспертное значение  $\mu_i$  обрабатывается операторами концентрирования и растяжения.

Таблица 1. Оценка функции принадлежности  $\mu_i$

Состояние элементов ПС	Словесная оценка		Значение $\mu_i$
	Выполнение правил, квалификации персонала	Лингвистическое значение	
Хорошее	Всегда выполняется, высокая квалификация	Очень малая, невозможно	< 0,1
Достаточно хорошее	Всегда выполняется, достаточно высокая квалификация	Маловероятно, вероятность < 20%	0,1...0,2
Выше среднего	Почти всегда выполняется, квалификация выше среднего	Вполне возможно, вероятно на 40%	0,2...0,3
Удовлетворительное	Далеко не всегда выполняется, квалификация средняя	Высокая степень вероятности до 60%	0,3...0,4
Неудовлетворительное	Иногда выполняется, квалификация ниже среднего	Небольшие сомнения в реализации, не более 80%	0,5...0,6
Плохое	Очень редко выполняется, квалификация низкая	Не вызывает сомнений, почти 90%	0,7...0,8

Действие оператора концентрирования описывается формулой

$$\text{CON } \mu_i = \mu_i^2$$

В результате этой операции уменьшается степень принадлежности к рассматриваемой проблеме, причем для элементов с высокой степенью принадлежности это уменьшение относительно мало, а для элементов с малой степенью принадлежности – относительно велико.

Действие оператора растяжения выражается формулой  $\text{DIL } \mu_i = \mu_i^{0,5}$  и соответствует лингвистическому значению «слегка», «более или менее». Действие оператора растяжения противоположно действию оператора концентрирования.

Среднее значение  $\mu_i$  для каждой рассматриваемой позиции определяется по формуле

$$\mu_c = 1/3 \cdot (\mu_c + \mu_s^2 + \mu_s^{0,5}),$$

где  $\mu_s$  – мнение эксперта.

Семантическое правило М - это объяснение смыслового значения  $\mu_i$  на основе риск-ориентированного мышления, здравого смысла, осмысления опыта, обоснование сущности, на основе которой принимается решение.

#### Условный пример

Оценивание возможности разработки регламента риск-анализа крана в 2020 г. Кстати, комитет за контролем за экспортом США внес нечеткую логику в список критически важных оборонных технологий, не подлежащих экспорту потенциальному противнику.

Перечень возможных участников разработки.

1. Государственная служба по вопросам труда.
2. Ученые ВУЗов.
3. Владельцы кранов.

4. Фонд социального страхования.

5. Разработчики нормативных документов по охране труда.

Оценивание выполняется на основании опыта, уровня знаний, публикаций, заинтересованности участников, присвоением величинам  $\mu_i$  значений лингвистических вероятностей.

$\mu_1 = 0,15$ , маловероятно, такая проблема не ставилась.

$\mu_2 = 0,3$ , вполне возможно, научное сообщество заинтересовано в новых разработках, но этой проблемой не занимались.

$\mu_3 = 0,5$ , владельцы кранов заинтересованы, однако не имея нормативных предписаний сомневаются в жизненности документа.

$\mu_4 = 0,6$ , очень заинтересованы, но есть небольшие сомнения.

$\mu_5 = 0,7$ , не вызывает сомнений. Высокая заинтересованность.

Средняя величина  $\mu_i = 0,45$ . Но минимальное значение вероятности реализации проекта приходится на главного заказчика, поэтому крайне малая вероятность, что в 2020 г будет разработан регламент риск-анализа крана.

Закончив представление нечетких и лингвистических переменных Лотфи Заде [1] перешел к изложению идей книги Джозефа Джарротано и Гари Райли [2].

Прямо как в побасёнке: «Сидит мужик на рельсах, подходит другой: – Подвинься.»

По нашему мнению, разработка экспертных систем станет инновационной моделью обеспечения безопасности подъемных сооружений на основе риск-ориентированного мышления и здравого смысла [3]. Такая модель должна применяться для риск-анализа жилого фонда, водопровода и канализации, тепло-

вых и атомных электростанций, работы шахт и предприятий, всех видов транспорта и т.д.

Большинство задач, которые должен решать инженер-крановщик, не имеют удовлетворительного алгоритмического решения. Алгоритм – это, конечно, идеальное решение конкретной задачи, но это решение по шаблонам. К сожалению, жизнь крана от проектирования, изготовления, эксплуатации и до списания не подчиняется строгим правилам, очень хорошие инструкции и правила не всегда выполняются. С этим связана необходимость инженеру-крановщику применить в своей деятельности искусственный интеллект, как основу экспертной системы. В основе экспертной системы лежит логический вывод и система должна объяснять свои рассуждения, чтобы можно было их проверить.

**Предлагаемые для разработки экспертных системы инженера-крановщика.**

1. Диагностирование и рекомендации по продлению срока службы кранов. Экспертное обследование.
2. Регламент эксплуатации кранов.
3. Прогнозы развития ПС.
4. Инструктивные указания машинного проектирования кранов.
5. Риск-анализ крана.
6. Указания по реконструкции и модернизации кранов.
7. Регламент расследования аварий.
8. Указания по устранению неисправностей и поломок кранов.

## Схема экспертной системы, основанной на знаниях

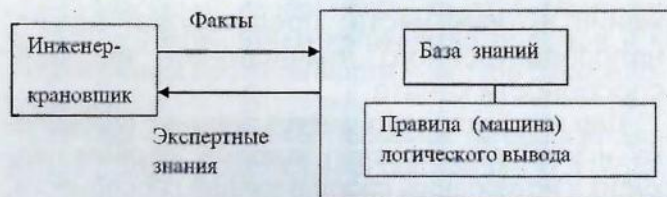


Рис.1. Схема экспертной системы

Инженер-крановщик передает в экспертную систему факты или другую информацию и получает экспертный совет или экспертные знания.

По своей структуре экспертная система подразделяется на два основных компонента – базу знаний и правила логического вывода. База знаний содержит знания, на основании которых по правилам логического вывода формируются ответы на запросы инженера-крановщика.

Экспертная система должна стать помощником для инженера-крановщика.

Окончание в следующем номере

### Литература

1. Л. Заде. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М., «Мир». 1976.
2. Д. Джарротано, Г. Райли. Экспертные системы: принципы разработки и программирование. 4-е издание. Пер. с англ., М., 2007. – 1152 с.
3. Н.Н. Андриенко, В.Л. Корень. Риск-анализ крана. Проблемы анализа риска, том 11, №2, 2014 г.

# НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ КАНАТОВ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ С УЧЕТОМ ОБРЫВОВ ПРОВОЛОК

Чаюн И. М., д.т.н., Вовк П. Е. аспирант,  
Одесский национальный политехнический университет

Под статической несущей способностью понимается предельное растягивающее усилие, которое способен выдержать канат при однократном нагружении [1]. Вне зависимости от схемы нагружения каната расчет базируется на исследовании упруго-пластического деформирования при использовании схематизированных диаграмм  $\sigma - \epsilon$  растяжения проволоки (рис. 1) и включает две части.

Первая – это задача определения несущей способности (предельного состояния) проволоки в условиях такого расчетного нагружения, которое возможно полнее соответствовало бы данной схеме нагружения каната. При этом предельным состоянием

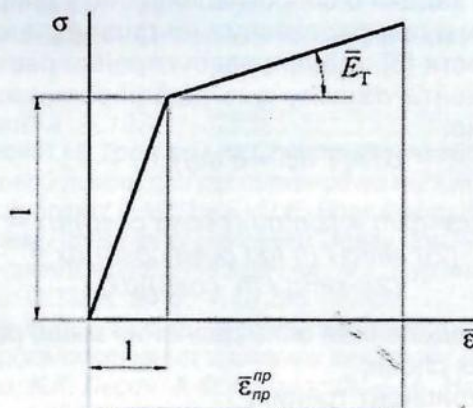


Рисунок 1. Диаграмма