

## Методика автоматической оценки качества выполнения упражнений на компьютерном тренажере оператора производственно-технологической системы с использованием нечетких множеств

Р.А. Файзрахманов<sup>1</sup>, И.С. Полевщиков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет

**Аннотация:** В статье предложена модель, позволяющая автоматически получить комплексную оценку уровня сформированности профессиональных умений операторами производственно-технологической системы, научная новизна которой, по сравнению с существующими, заключается в возможности связать показатели качества выполнения некоторого упражнения на компьютерном тренажере, имеющие разную физическую природу (время, расстояние и т.п.) с коэффициентами освоения, представляющими собой безразмерные величины и как следствие удобными для дальнейшей обработки. На основе предложенной модели в ближайшей перспективе планируется реализация алгоритмического, программного и информационного обеспечения автоматизированной обучающей системы операторов производственно-технологических процессов.

**Ключевые слова:** автоматизированная обучающая система, компьютерный тренажер, профессиональные умения, нечеткий вывод, алгоритм Мамдани, фазсификация, дефазсификация.

Для эффективного и безопасного выполнения работ с использованием сложного технологического оборудования эксплуатационному персоналу предприятий необходимо на высоком качественном уровне освоить соответствующие профессиональные умения и навыки.

В настоящее время разработаны различные модели и методы, позволяющие повысить эффективность освоения профессиональных умений и навыков операторами сложных производственно-технологических процессов за счет использования разнообразных компьютерных средств учебного назначения, главным образом компьютерных тренажеров и создаваемых на их основе автоматизированных обучающих систем (АОС) [1-5].

Однако, нерешенным является вопрос разработки моделей, методов и средств, позволяющих автоматически получить комплексную оценку уровня сформированности профессиональных умений операторами (в процессе

---

выполнения упражнений с использованием АОС) на основе ряда показателей качества, имеющих различную физическую природу. Предлагаемая методика решения данной проблемы описана далее.

Разработана модель, позволяющая автоматически получить комплексную оценку уровня сформированности профессиональных умений операторами (рис. 1), научная новизна которой, по сравнению с существующими, заключается в возможности связать показатели качества выполнения некоторого упражнения, имеющие разную физическую природу (время, расстояние и т.п.) с коэффициентами освоения, представляющими собой безразмерные величины в диапазоне от 0 до 1 и как следствие удобными для дальнейшей обработки. Каждому показателю качества, вне зависимости от физической природы, будет сопоставлен коэффициент освоения. Процедура сопоставления основана на использовании нечетких множеств [6-10] и детально описана ниже.

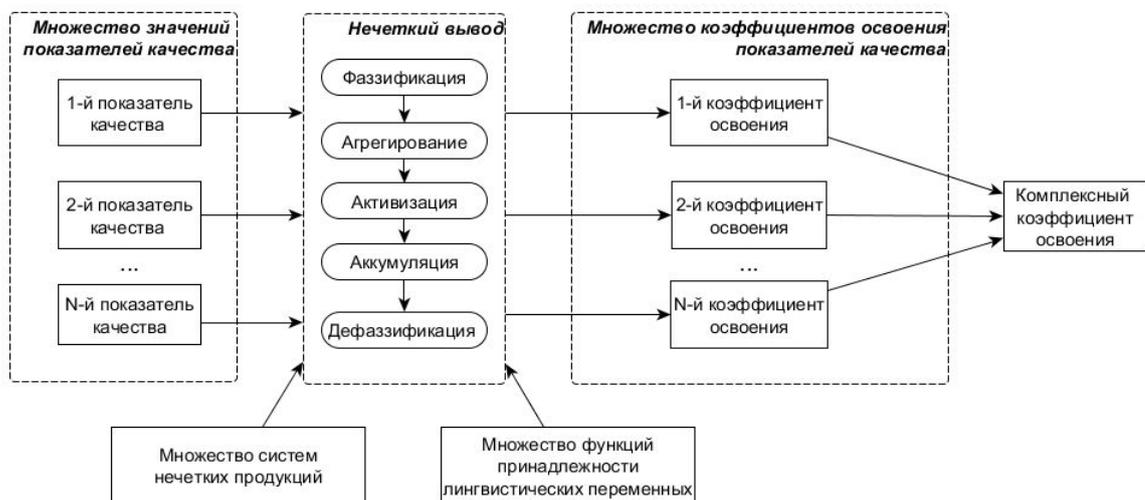


Рис. 1. – Процесс вычисления комплексной оценки уровня сформированности профессиональных умений операторами

Процедура нечеткого вывода используется по той причине, что имеет место неопределенность, связанная с тем, каким образом связать вычисленные значения показателей качества с показателями успешности

овладения учебным материалом, т.е. коэффициентами освоения, измеряемыми от 0 до 1.

Комплексный коэффициент освоения (рис. 1) вычисляется автоматически как среднее арифметическое взвешенное отдельных коэффициентов освоения, каждый из которых соответствует определенному показателю качества. Веса отдельных показателей качества определяются с использованием метода анализа иерархий [4].

Рассмотрим процесс нечеткого вывода на примере такого показателя качества, как плавность поворота стрелы крана, представляющего собой угол отклонения груза от вертикальной оси стрелы (единицей измерения являются градусы) и вычисляемого автоматически при выполнении обучаемым упражнения на тренажере крановщика.

В настойках АОС необходимо сформировать множество баз правил (систем) нечетких продукций, на котором будет основан процесс нечеткого вывода. Каждая из этих баз правил используется для формального представления знаний экспертов (например, инструкторов производственного обучения) о переходе от значений показателей качества к соответствующему коэффициенту освоения.

Для каждого показателя качества можно сформировать свою базу правил нечетких продукций для сопоставления значения показателя качества, достигнутого обучаемым, с коэффициентом освоения. Следовательно, входные лингвистические переменные в этих базах правил будут соответствовать показателю качества, выходные лингвистические переменные – коэффициенту освоения, соответствующему данному показателю качества.

Например, для показателя качества «плавность поворота стрелы крана» базу правил можно сформировать следующим образом:

---

ПРАВИЛО\_1: ЕСЛИ «плавность поворота стрелы крана отличная», ТО «коэффициент освоения отличный»

ПРАВИЛО\_2: ЕСЛИ «плавность поворота стрелы крана хорошая», ТО «коэффициент освоения хороший»

ПРАВИЛО\_3: ЕСЛИ «плавность поворота стрелы крана плохая», ТО «коэффициент освоения удовлетворительный»

ПРАВИЛО\_4: ЕСЛИ «плавность поворота стрелы крана наихудшая», ТО «коэффициент освоения неудовлетворительный»

Для построения функций принадлежности входных и выходных лингвистических переменных, используемых в базах правил, были выбраны трапециевидные функции принадлежности, широко используемые в различных исследованиях [6]. Трапециевидная функция принадлежности в общем случае аналитически задается с помощью следующего выражения:

$$f_T(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & d \leq x \end{cases}, \quad (1)$$

где  $a$  и  $d$  – параметры, характеризующие нижнее основание трапеции;  
 $b$  и  $c$  – параметры, характеризующие верхнее основание трапеции.

С целью формирования функций принадлежности входных и выходных лингвистических переменных в настройках АОС необходимо установить только значения  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и  $d$  из формулы (1). Следует отметить, что это соответствует принципу открытости АОС, подразумевающему возможность алгоритмической настройки системы без использования программирования [1].

---

Пример заданных аналитически функций принадлежности для некоторых термов входной лингвистической переменной «плавность поворота стрелы крана»:

1) для терма «отличная» ( $a = 0, b = 0, c = 15, d = 20$ ):

$$f_{\text{вх.отл.}}(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1, & 0 \leq x \leq 15 \\ \frac{20-x}{5}, & 15 \leq x \leq 20 \\ 0, & x \geq 20 \end{cases}; \quad (2)$$

2) для терма «хорошая» ( $a = 15, b = 20, c = 25, d = 30$ ):

$$f_{\text{вх.хор.}}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 15 \\ \frac{x-15}{5}, & 15 \leq x \leq 20 \\ 1, & 20 \leq x \leq 25 \\ \frac{30-x}{5}, & 25 \leq x \leq 30 \\ 0, & x \geq 30 \end{cases}. \quad (3)$$

Пример заданных аналитически функций принадлежности для термов выходной лингвистической переменной «коэффициент освоения», соответствующей показателю качества «плавность поворота стрелы крана»:

1) для терма «хороший» ( $a = 0.8, b = 0.85, c = 0.9, d = 0.95$ ):

$$f_{\text{вых.хор.}} = \begin{cases} 0, & x \leq 0.8 \\ \frac{x-0.8}{0.05}, & 0.8 \leq x \leq 0.85 \\ 1, & 0.85 \leq x \leq 0.9 \\ \frac{0.95-x}{0.05}, & 0.9 \leq x \leq 0.95 \\ 0, & 0.95 \leq x \leq 1 \end{cases}; \quad (4)$$

2) для терма «отличный» ( $a = 0.9, b = 0.95$ ):

$$f_{\text{вых.отл.}} = \begin{cases} 0, & x \leq 0.9 \\ \frac{x-0.9}{0.05}, & 0.9 \leq x \leq 0.95 \\ 1, & 0.95 \leq x \leq 1 \end{cases}. \quad (5)$$

Коэффициент освоения, соответствующий каждому показателю качества, вычисляется обучающей системой автоматически в процессе выполнения упражнения обучаемым на основе сформированной базы правил нечетких продукций.

Для вычисления системой коэффициента освоения принято решение использовать алгоритм Мамдани, получивший наибольшее применение в системах нечеткого вывода [6, 9]. Рассмотрим особенности этапов данного алгоритма в применении к обучению крановщиков с использованием АОС.

Целью первого этапа алгоритма – *фаззификации* - является установление соответствия между конкретным (в большинстве случаев численным) значением отдельной входной переменной системы нечеткого вывода и значением функции принадлежности соответствующего ей термина входной лингвистической переменной.

Предположим, что плавность поворота стрелы крана по результатам выполнения учебной задачи обучаемым составила  $x = 18^\circ$ . Тогда в результате этапа фаззификации получаем следующие значения степеней истинности в соответствии с формулами (2) и (3):

$$f_{\text{вх.отл.}}(x) = \frac{20-x}{5} = \frac{20-18}{5} = 0.4;$$

$$f_{\text{вх.хор.}}(x) = \frac{x-15}{5} = \frac{18-15}{5} = 0.6.$$

Далее следует этап *агрегирования* подусловий в нечетких правилах продукций. Этот этап представляет собой процедуру определения степени истинности условий по каждому из правил системы нечеткого вывода. Для нахождения степени истинности условий каждого из правил нечетких продукций используются парные нечеткие логические операции. Те правила, степень истинности условий которых отлична от нуля, считаются активными и используются для дальнейших расчетов.

---

Выполним данный этап для рассматриваемого примера. Термы «отличная» и «хорошая» входной лингвистической переменной «плавность поворота стрелы крана» используются в правилах ПРАВИЛО\_1 и ПРАВИЛО\_2. В рассматриваемом примере этап агрегирования тривиален (поскольку каждое условие этих правил состоит только из одного подусловия) и оставляет без изменений степени истинности, равные 0.4 для термина «отличная» и 0.6 для термина «хорошая» соответственно. Активными являются ПРАВИЛО\_1 и ПРАВИЛО\_2, поскольку степень истинности условий каждого из этих правил отлична от нуля.

Следующий этап - *активизация* подзаклучений в нечетких правилах продукций - представляет собой процесс нахождения степени истинности каждого из подзаклучений правил нечетких продукций.

В рассматриваемом примере все весовые коэффициенты правил равны 1 (по умолчанию), поэтому процесс активизации приводит к двум нечетким множествам, функции принадлежности которых, с учетом значений степеней истинности, полученным на предыдущем этапе, а также формул (4) и (5), равны соответственно:

$$f_1(x) = \min\{f_{\text{вых.отл.}}; 0.4\}; \quad (6)$$

$$f_2(x) = \min\{f_{\text{вых.хор.}}; 0.6\}. \quad (7)$$

Предпоследний этап - *аккумуляция* заключений нечетких правил продукций - представляет собой процесс нахождения функции принадлежности для каждой из выходных лингвистических переменных. Осуществляется по формуле для объединения нечетких множеств, соответствующих термам подзаклучений, относящихся к одним и тем же выходным лингвистическим переменным.

Следовательно, в рассматриваемом примере в результате аккумуляции для выходной лингвистической переменной «коэффициент освоения» получаем объединение нечетких множеств (6) и (7):

---

$$\mu(x) = \max\{f_1(x); f_2(x)\}. \quad (8)$$

И, наконец, последний из этапов нечеткого вывода, называемый *дефаззификацией* выходных переменных, представляет собой процедуру нахождения обычного (не нечеткого) значения для каждой из выходных лингвистических переменных.

Традиционно используемым методом дефаззификации является метод центра тяжести [6, 9]. Вычислим результат дефаззификации, т.е. коэффициент освоения, соответствующий плавности поворота стрелы крана, для рассматриваемого примера по формуле:

$$K_{\text{плав.пов.}} = \frac{\int_{\min}^{\max} x \cdot \mu(x) dx}{\int_{\min}^{\max} \mu(x) dx} = \frac{\int_{0,8}^{0,83} \frac{x-0,8}{0,05} \cdot x \cdot dx + \int_{0,83}^{0,92} 0,6x \cdot dx + \int_{0,92}^{0,93} \frac{0,95-x}{0,05} \cdot x \cdot dx + \int_{0,93}^1 0,4x \cdot dx}{\int_{0,8}^{0,83} \frac{x-0,8}{0,05} \cdot dx + \int_{0,83}^{0,92} 0,6 dx + \int_{0,92}^{0,93} \frac{0,95-x}{0,05} \cdot dx + \int_{0,93}^1 0,4 dx} \approx 0,899,$$

где  $x$  – переменная, соответствующая выходной лингвистической переменной;

$\mu(x)$  – функция принадлежности нечеткого множества, соответствующего выходной переменной после этапа аккумуляции в соответствии с формулой (8);

$\min$  и  $\max$  – левая и правая точки интервала носителя нечеткого множества рассматриваемой выходной переменной.

Таким образом, отличительной чертой разработанной модели, позволяющей автоматически получить комплексную оценку уровня сформированности профессиональных умений операторами (рис. 1), является возможность связать показатели качества выполнения некоторого упражнения, имеющие разную физическую природу, с коэффициентами освоения, представляющими собой безразмерные величины, удобные для дальнейшей обработки.

В ближайшей перспективе планируется реализация алгоритмического, программного и информационного обеспечения АОС в соответствии с предложенной моделью.

### Литература

1. Файзрахманов Р.А., Полевщиков И.С. Анализ методов и средств автоматизации процесса обучения операторов производственно-технологических систем (на примере операторов перегрузочных машин) // Современные проблемы науки и образования. 2013. №5. URL: science-education.ru/111-10494.
2. Щемелева Т.К. Система подготовки крановщиков с применением тренажеров: 30 лет спустя // Вестник ПГТУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2009. №3. С. 106-109.
3. Долгова Е.В., Файзрахманов Р.А., Курушин Д.С., Федоров А.Б., Хабибулин А.Ф., Шаронов А.А. Архитектура мобильного тренажера погрузочно-разгрузочного устройства // Инженерный вестник Дона. 2012. №4-1. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4t1y2012/1327.
4. Файзрахманов Р.А., Мехоношин А.С., Бакунов Р.Р., Федоров А.Б., Бикметов Р.Р. Особенности разработки и реализации мобильных пультов тренажерного комплекса оператора порталного крана // Инженерный вестник Дона. 2012. №4-1. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4t1y2012/1267.
5. Файзрахманов Р.А., Бакунов Р.Р., Мехоношин А.С. Создание трехмерных моделей для системы визуализации тренажерного комплекса // Вестник ПГТУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2011. №5. С. 62-69.
6. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 736 с.

7. Azarkasb S.O. An Efficient Intrusion Detection System Based on Fuzzy Genetic approaches // Life Science Journal. 2013. №10(8s). pp. 6-21. URL: [lifesciencesite.com/ljsj/life1008s/002\\_19226life1008s\\_6\\_21.pdf](http://lifesciencesite.com/ljsj/life1008s/002_19226life1008s_6_21.pdf).

8. Beiranvand A., Khodabakhshi M., Yarahmadi M., Jalili M. Making a Mathematical Programming in Fuzzy Systems with Genetic Algorithm // Life Science Journal. 2013. №10(8s). pp. 50-57. URL: [lifesciencesite.com/ljsj/life1008s/008\\_19232life1008s\\_50\\_57.pdf](http://lifesciencesite.com/ljsj/life1008s/008_19232life1008s_50_57.pdf).

9. Файзрахманов Р.А., Полевщиков И.С. Оценка качества выполнения упражнений на компьютерном тренажере перегрузочной машины с использованием нечетких множеств // Инженерный вестник Дона. 2012. №4-1. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n4t1y2012/1265](http://ivdon.ru/magazine/archive/n4t1y2012/1265).

10. Скирюк О.С., Файзрахманов Р.А. Разработка комплексных моделей формирования оптимальной производственной программы в условиях полной неопределенности спроса // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2012. №6. С. 25-30.

### References

1. Fayzrakhmanov R.A., Polevshchikov I.S. Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. 2013. №5. URL: [science-education.ru/111-10494](http://science-education.ru/111-10494).

2. Shchemeleva T.K. Vestnik PGTU. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya. 2009. №3. pp. 106-109.

3. Dolgova E.V., Fayzrakhmanov R.A., Kurushin D.S., Fedorov A.B., Khabibulin A.F., Sharonov A.A. Inženernyj vestnik Dona (Rus). 2012. №4-1. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n4t1y2012/1327](http://ivdon.ru/magazine/archive/n4t1y2012/1327).

4. Fayzrakhmanov R.A., Mekhonoshin A.S., Bakunov R.R., Fedorov A.B., Bikmetov R.R. Inženernyj vestnik Dona (Rus). 2012. №4-1. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n4t1y2012/1267](http://ivdon.ru/magazine/archive/n4t1y2012/1267).



5. Fayzrakhmanov R.A., Bakunov R.R., Mekhonoshin A.S. Vestnik PGTU. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya. 2011. №5. pp. 62-69.
6. Leonenkov A.V. Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i fuzzyTECH [Fuzzy modeling in MATLAB and fuzzyTECH]. Saint Petersburg: BKhV-Peterburg, 2005. 736 p.
7. Azarkasb S.O. Life Science Journal. 2013. №10(8s). pp. 6-21. URL: [lifesciencesite.com/lcj/life1008s/002\\_19226life1008s\\_6\\_21.pdf](http://lifesciencesite.com/lcj/life1008s/002_19226life1008s_6_21.pdf).
8. Beiranvand A., Khodabakhshi M., Yarahmadi M., Jalili M. Life Science Journal. 2013. №10 (8s). pp. 50-57. URL: [lifesciencesite.com/lcj/life1008s/008\\_19232life1008s\\_50\\_57.pdf](http://lifesciencesite.com/lcj/life1008s/008_19232life1008s_50_57.pdf).
9. Fayzrakhmanov R.A., Polevshchikov I.S. Inženernyj vestnik Dona (Rus). 2012. №4-1. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n4t1y2012/1265](http://ivdon.ru/magazine/archive/n4t1y2012/1265).
10. Skiryuk O.S., Fayzrakhmanov R.A. Vestnik PNIPU. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya. 2012. №6. pp. 25-30.