

Моделирование процесса управления формированием сенсомоторных навыков у операторов технологических установок на основе мягких измерений

Р. А. Файзрахманов¹, И. С. Полевщиков²

ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (ПНИПУ)

¹fayzrakhmanov@gmail.com, ²i.s.polevshchikov@mail.ru

Аннотация. Рассмотрена проблема моделирования процесса управления формированием сенсомоторных навыков у операторов технологических установок (на примере порталных кранов) с целью использования при создании компьютерных тренажеров с подсистемой автоматизированного обучения. Качественное управление технологическими установками, способность предотвращать ситуации, связанные с аварийностью и травматизмом на производстве, зависят от уровня сформированности у операторов соответствующих сенсомоторных навыков. Однако, используемые при подготовке операторов средства обучения (в том числе компьютерные тренажеры), как правило, ориентированы на контроль уровня приобретенных профессиональных знаний, в том числе знаний об отдельных действиях обучаемого, но не на контроль сформированности сенсомоторных навыков. В работе предлагаются модели и алгоритмы для автоматизированного управления формированием сенсомоторных навыков у операторов с использованием нечетких множеств и нечетких отношений. Применение нечетких множеств обусловлено неполнотой исходной информации о нормативах выполнения технологических операций, сложностью оценки качества выполнения сенсомоторных действий и степени достижения цели обучения.

Ключевые слова: мягкие измерения; нечеткие множества; компьютерные тренажеры; автоматизированные обучающие системы

I. ВВЕДЕНИЕ

Эффективность и безопасность функционирования современных технологических установок в значительной степени определяются качеством подготовки операторов. Оператор должен владеть навыками своевременного, точного выполнения требуемых технологических операций, выбирая из возможных наиболее эффективные действия [1].

В процессе профессиональной подготовки операторов применяются компьютерные тренажеры и

автоматизированные обучающие системы (АОС), получившие широкое освещение в научной и методической литературе.

Однако, используемые средства обучения, как правило, ориентированы на контроль уровня приобретенных профессиональных знаний, в том числе знаний об отдельных действиях обучаемого. Не обеспечивается контроль сформированности сенсомоторных навыков. При этом требуются объективная оценка сформированности навыка и целенаправленное формирование управляющих воздействий (в том числе в условиях неопределенности).

Поэтому снижение времени и повышение качества обучения операторов с целью формирования у них необходимого уровня сенсомоторных навыков является актуальной задачей. Требуется развитие моделей и методов в области автоматизации управления формированием данного вида навыков.

II. СТЕПЕНЬ РАЗРАБОТАННОСТИ ТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрению и решению проблемы автоматизированного управления формированием профессиональных навыков посвящены научные труды по ряду направлений.

Исследования ведутся по проблемам: математического моделирования процесса формирования навыков [2, 3], создания и использования тренажерных комплексов для профессионального обучения операторов [4, 5], разработки моделей и методов построения АОС [6, 7].

Однако, недостаточно раскрыта проблема профессиональной подготовки операторов технологических установок в части формирования сенсомоторных навыков.

Многие компьютерные тренажеры реализуют только имитацию объектов реального мира (процесс формирования навыков возложен на инструктора). Контроль процесса формирования навыков зачастую заменяется проверкой знаний о технологическом процессе. Не производится управление формированием сенсомоторных навыков с учетом специфики деятельности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 18-38-00835

оператора, требующей их применения, итеративного характера формирования навыков данного вида.

При этом оценка уровня сформированности сенсомоторных навыков должна проверять достижение автоматизма выполнения обучаемым действий на заданном уровне качества. В частности, с учетом неполноты исходных данных о нормативах выполнения технологической операции.

III. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ФОРМИРОВАНИЕМ НАВЫКОВ

С целью решения обозначенной проблемы, разработана архитектура компьютерных тренажерных комплексов (КТК) [1] для обучения операторов технологических установок. Такие КТК включают две взаимосвязанные составляющие:

1) компьютерный тренажер (имитатор технологического процесса), обеспечивающий физико-математическое моделирование технологической установки (перемещение исполнительного органа машины, колебания исполнительного органа и т.д.) и визуализацию технологического процесса;

2) АОС, обеспечивающую сбор и обработку данных о приобретении обучаемым профессиональных знаний и формировании профессиональных сенсомоторных навыков.

Предложена математическая модель процесса функционирования КТК, обеспечивающая автоматизированное управление формированием профессиональных сенсомоторных навыков у операторов.

В процессе обучения оператора на КТК, заключающемся в прохождении комплекса упражнений, каждое из которых предназначено для формирования сенсомоторного навыка выполнения технологической операции, решается задача оптимизации. За минимальное время обучения необходимо, чтобы выполнение операции было доведено до автоматизма на заданном уровне

качества: $T_{\text{обуч.}} = \sum_{g=1}^{N_{\text{упр.}}} T_g \rightarrow \min$, при этом:

$\forall g = 1, N_{\text{упр.}}, T_g = f_{\text{вып.}}(U_g^{\text{реш.}}, U_g^{\text{рек.}})$ – время T_g многократного выполнения g -го упражнения зависит от множества принятых решений $U_g^{\text{реш.}}$ по завершении каждого V -го выполнения и множества советующих воздействий (рекомендаций) $U_g^{\text{рек.}}$ обучаемому в процессе каждого V -го выполнения;

$\forall g = 1, N_{\text{упр.}}, K_{gh} \geq K_{gh}^{\text{пор.}}$ – качество выполнения технологической операции, моделируемой в g -м

упражнении, определяемое параметрами K_{gh} , должно соответствовать нормативам, т.е. пороговым значениям $K_{gh}^{\text{пор.}}$;

$\forall g = 1, N_{\text{упр.}}, N_g \geq N_g^{\text{нав.}}$ – упражнение выполнено заданное число раз $N_g^{\text{нав.}}$ подряд на требуемом уровне качества (т.е. действие закреплено до автоматизма).

Совокупность зависимостей между параметрами модели представлена схематично на рис. 1.

На основе теории множеств и математической логики представлено описание процесса функционирования каждого из блоков (рис. 1).

На первом этапе оценки уровня сформированности навыка (блок 3.2) на основе обработки первичных данных о действиях обучаемого вычисляется множество $X_{\text{кач.}}^{\text{исп.}}$ значений показателей качества (в ходе упражнения).

Показатели качества характеризуют результаты и правильность выполнения моторных действий. Примеры показателей: время выполнения операции; точность результата выполнения; число аварийных ситуаций и т.д.

Значения терминальных показателей вычисляются однократно по завершении упражнения или его части. Значения динамических показателей измеряются многократно в ходе упражнения в требуемые моменты времени.

В блоке 3.2 формируются: $P_{\text{трм.}} = \{P_r^{\text{трм.}} | r = 1, N'_{\text{трм.}}\}$ – множество значений терминальных показателей; $P_{\text{дин.}} = \{P_s^{\text{дин.}}(t_j) | s = 1, N'_{\text{дин.}}, j = 1, N_s^{\text{дин.}}\}$ – множество значений динамических показателей в моменты времени t_j ($N_s^{\text{дин.}}$ – число измерений по s -му показателю).

В блоке 3.3 оценивается каждый этап формирования сенсомоторного навыка, успешность завершения которого определяется тем, выполнил ли оператор упражнение заданное число раз на требуемом уровне качества. Каждый новый этап отличается от предыдущего добавлением новых оцениваемых первичных показателей качества.

С учетом неполноты исходной информации о нормативах выполнения технологических операций, выявляемой с привлечением экспертов, принято решение разработать методику оценки качества выполнения упражнения, основанную на применении нечетких измерений. Нечеткие множества и нечеткие отношения широко применяются в научных исследованиях [8–10].



Рис. 1. Схема подсистемы управления формированием сенсомоторных навыков

IV. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ВЫПОЛНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ

Параметры модели (коэффициенты овладения), определяющие качество выполнения технологической операции как степень соответствия нормативам, представляют безразмерные величины на отрезке $[0;1]$, получаемые обработкой данных о вычисленных в блоке 3.2 показателях качества: $M_{трм.} = \{K_r^{трм.} | r = 1, N'_{трм.}\}$ и $M_{дин.} = \{K_s^{дин.}(t_j) | s = 1, N'_{дин.}, j = 1, N_s^{дин.}\}$ – множества коэффициентов овладения по терминальным и динамическим показателям соответственно.

Процесс вычисления $\forall K_r^{трм.} \in M_{трм.}$ и $\forall K_s^{дин.}(t_j) \in M_{дин.}$ представлен рядом шагов. Шаги 1–3 выполняются в блоке 4 (рис. 1) с участие экспертов, а шаг 4 в блоке 3.3 программой автоматически.

На *шаге 1* для сопоставления каждому показателю качества коэффициента овладения строится множество нечетких правил продукций.

Рассмотрим пример вычисления коэффициента овладения для показателя качества «угол отклонения груза от вертикальной оси стрелы» (в градусах). Входная лингвистическая переменная (β_1) соответствует показателю качества, а выходная (β_2) – коэффициенту овладения. Множество правил продукций:

ПРАВИЛО_1: ЕСЛИ “ β_1 есть очень маленький”, ТО “ β_2 есть отличный”

ПРАВИЛО_2: ЕСЛИ “ β_1 есть маленький”, ТО “ β_2 есть хороший”

ПРАВИЛО_3: ЕСЛИ “ β_1 есть средний”, ТО “ β_2 есть удовлетворительный”

ПРАВИЛО_4: ЕСЛИ “ β_1 есть большой”, ТО “ β_2 есть неудовлетворительный”

На *шаге 2* устанавливаются значения для построения входных лингвистических переменных, используемых в правилах: $M_{наб.} = \{P_i^{тр.} | i = 1, N_{кач.}\}$ – множество исходных данных о значениях показателей качества.

Здесь кортеж $P_i^{наб.} = \langle P_{отл.}^{min}, P_{отл.}^{max}, P_{хор.}^{min}, P_{хор.}^{max}, P_{уд.}^{min}, P_{уд.}^{max}, P_{неуд.}^{min}, P_{неуд.}^{max}, \Delta P \rangle$ представляет данные о границах отрезков $[P_{отл.}^{min}, P_{отл.}^{max}]$, $[P_{хор.}^{min}, P_{хор.}^{max}]$, $[P_{уд.}^{min}, P_{уд.}^{max}]$, $[P_{неуд.}^{min}, P_{неуд.}^{max}]$, сопоставленных с отличным, хорошим, удовлетворительным и неудовлетворительным значениями i -го показателя качества соответственно, а также о допустимом отклонении ΔP от правой и левой границ отрезков.

Параметры кортежей $P_i^{тр.}$ являются основой для функций принадлежности термов входных лингвистических переменных вида [8]:

$$f_T = \begin{cases} 0, x \leq P_{отл.}^{min} - \Delta P \\ \frac{x - P_{отл.}^{min} + \Delta P}{\Delta P}, x \in [P_{отл.}^{min} - \Delta P, P_{отл.}^{min}] \\ 1, x \in [P_{отл.}^{min}, P_{отл.}^{max}] \\ \frac{P_{отл.}^{max} + \Delta P - x}{\Delta P}, x \in [P_{отл.}^{max}, P_{отл.}^{max} + \Delta P] \\ 0, x \geq P_{отл.}^{max} + \Delta P \end{cases}$$

Для рассматриваемого примера зададим следующие исходные данные: $P_{отл.}^{min} = 0^\circ$, $P_{отл.}^{max} = 15^\circ$, $P_{хор.}^{min} = 20^\circ$, $P_{хор.}^{max} = 25^\circ$, $P_{уд.}^{min} = 30^\circ$, $P_{уд.}^{max} = 35^\circ$, $P_{неуд.}^{min} = 40^\circ$, $\Delta P = 5^\circ$. Функциями принадлежности термов лингвистической переменной β_1 будут:

$$f_{отл.}^{вх.}(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1, & x \in [0,15] \\ 4 - 0,2x, & x \in [15,20] \\ 0, & x \geq 20 \end{cases}, \quad f_{хор.}^{вх.}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 15 \\ 0,2x - 3, & x \in [15,20] \\ 1, & x \in [20,25] \\ 6 - 0,2x, & x \in [25,30] \\ 0, & x \geq 30 \end{cases}$$

$$f_{плох.}^{вх.}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 25 \\ 0,2x - 5, & x \in [25,30] \\ 1, & x \in [30,35] \\ 8 - 0,2x, & x \in [35,40] \\ 0, & x \geq 40 \end{cases}, \quad f_{худш.}^{вх.}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 35 \\ 0,2x - 7, & x \in [35,40] \\ 1, & x \geq 40 \end{cases}$$

На шаге 3 устанавливается кортеж $K_{наб.} = \langle K_{отл.}, K_{хор.}, K_{уд.}, K_{неуд.} \rangle$, содержащий отличное $K_{отл.}$, хорошее $K_{хор.}$, удовлетворительное $K_{уд.}$ и неудовлетворительное $K_{неуд.}$ значения коэффициента овладения. Параметры из $K_{наб.}$ являются основой для выходных лингвистических переменных и соответствуют термам в виде одноточечных множеств: $\{ \langle K_{отл.}, 1 \rangle \}$, $\{ \langle K_{хор.}, 1 \rangle \}$, $\{ \langle K_{уд.}, 1 \rangle \}$, $\{ \langle K_{неуд.}, 1 \rangle \}$.

Для рассматриваемой в примере лингвистической переменной β_2 установим значения: $K_{отл.} = 1$, $K_{хор.} = 0,9$, $K_{уд.} = 0,8$, $K_{неуд.} = 0$.

На шаге 4 с использованием алгоритма Мамдани осуществляется нечеткий вывод [8], в результате чего вычисляются коэффициенты овладения по каждому показателю: $K_r^{трм.} = f_{овл.}^{трм.}(P_r^{трм.}, P_r^{тр.}, K_{наб.})$, $K_s^{дин.}(t_j) = f_{овл.}^{дин.}(P_s^{дин.}(t_j), P_s^{тр.}, K_{наб.})$, где $P_r^{тр.} \in M_{наб.}$ и $P_s^{тр.} \in M_{наб.}$.

Например, если угол отклонения груза в ходе выполнения упражнения обучаемым составил $x = 18^\circ$, то после расчетов по алгоритму Мамдани будет получен коэффициент овладения $K_{откл.} = 0,94$.

Далее в блоке 3.3 (рис. 1) вычисляется интегральный показатель качества выполнения технологической операции (комплексный коэффициент овладения): $K_{овл.} = f_{овл.}(M_{вс.}, M_{трм.}, M_{дин.})$.

На основе значений коэффициентов овладения определяется уровень сформированности навыка, выполняется принятие решений и генерация советующих воздействий обучаемому [1] (блоки 3.3–3.6 на рис. 1).

Исходные данные для построения функций принадлежности могут пересчитываться автоматически в блоке 3.4 на основе данных о результатах обучения операторов за определенное время (с применением методов интеллектуального анализа данных).

Математическая модель функционирования КТК и методика послужили основой для программного и информационного обеспечения КТК операторов портального крана [1].

Проведенный эксперимент [1] показал преимущество подготовки операторов на КТК с реализованными программными модулями подсистемы управления формированием навыков.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований разработана математическая модель процесса функционирования КТК, обеспечивающая автоматизированное управление формированием профессиональных сенсомоторных навыков у операторов технологических установок.

Контроль уровня сформированности навыка осуществляется на основе разработанной методики оценки качества технологических операций с применением нечетких множеств.

Полученные научные результаты могут применяться при создании КТК, предназначенных для профессионального обучения операторов различных технологических установок. В частности, создан КТК для обучения операторов портального крана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Fayzrakhmanov R., Polevshchikov I., Polyakov A. Computer-aided Control of Sensorimotor Skills Development in Operators of Manufacturing Installations // Proc. of the 6th International Conference on Applied Innovations in IT (ICAИТ), Koethen (Germany), 13 March 2018. Vol. 6. pp. 59-65.
- [2] Novikov D.A. Collective learning-by-doing // 9th IFAC Symposium on Advances in Control Education (ACE 2012). 2012. pp. 408-412.
- [3] Орлов П.А. Анализ математической модели процесса обучения // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2009. № 2. С. 115-118.
- [4] Дозорцев В.М. Мировой рынок компьютерных тренажеров для обучения операторов: тенденции, вызовы, прогнозы // Автоматизация в промышленности. 2016. №2. С. 47-50.
- [5] Ершова О.В., Полякова А.М., Чистякова Т.Б. Компьютерные тренажерные комплексы для обучения персонала управлению процессами электрохимических производств // Автоматизация в промышленности. 2013. № 12. С. 40-46.
- [6] Bounnik D., Carmi G. E-learning Environments in Academy: Technology, Pedagogy and Thinking Dispositions // Journal of Information Technology Education: Research. 2012. Vol. 11. pp. 201-219.
- [7] Журавлев А.Г., Шиков А.Н. Современные автоматизированные обучающие системы с применением игровых форм обучения // Инновации в образовании. 2015. № 4. С. 111-119.
- [8] Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 736 с.
- [9] Fayzrakhmanov R.A., Smagin S.V., Baikov V.S. A fuzzy inference system for determination of the optimum regime for desiccation of wood in a liquid hydrophobic medium with the application of ultrasound // Russian Electrical Engineering. 2014. Vol. 85, № 4. pp. 222-227.
- [10] Azarkasb S.O. An Efficient Intrusion Detection System Based on Fuzzy Genetic approaches // Life Science Journal. 2013. №10(8s). pp. 6-21.