

УДК 004.588

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ФОРМИРОВАНИЕМ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ НАВЫКОВ ОПЕРАТОРА ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ

Р.А. Файзрахманов^а, И.С. Полевщиков^а

^а Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, 614990, Российская Федерация
Адрес для переписки: i.s.polevshchikov@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию 04.03.15, принята к печати 03.11.15
doi:10.17586/2226-1494-2016-16-1-181-190

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Файзрахманов Р.А., Полевщиков И.С. Моделирование процесса автоматизированного управления формированием профессиональных навыков оператора производственной системы // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 1. С. 181–190.

Аннотация

Предмет статьи. Предложена математическая модель автоматизированного управления формированием профессиональных навыков у обучаемого посредством выполнения упражнений с использованием компьютерного тренажерного комплекса со следующими отличительными чертами: автоматическое получение интегрального показателя качества выполнения упражнения на основе отдельных показателей качества в условиях нечеткости оценки обучаемого при выполнении упражнения по каждому такому показателю в различные моменты времени; автоматическое постепенное введение каждого отдельного показателя качества, подсказок и предупреждений в процесс многократного выполнения упражнения, с целью быстрее приобретения обучаемым способности самоконтроля качества своей работы; автоматический контроль динамики постепенного формирования умений и навыков при многократном выполнении упражнения. **Метод.** В процессе исследования использованы основы теории управления, теория нечетких множеств, метод анализа иерархий, математическое моделирование итеративного научения, моделирование с применением сетей Петри. **Основные результаты.** Разработана оригинальная математическая модель автоматизированного управления процессом формирования профессиональных навыков у будущих операторов производственных процессов при выполнении практических упражнений на компьютерном тренажерном комплексе. **Практическая значимость.** Предложенная математическая модель и соответствующие методики могут найти применение при создании систем автоматизированного обучения операторов различных процессов.

Ключевые слова

автоматизированное управление, автоматический контроль, моделирование, процесс обучения, профессиональные навыки, компьютерный тренажерный комплекс, модели итеративного научения.

Благодарности

Авторы выражают благодарность участникам IV Всероссийского конгресса молодых ученых, проходившего с 7 по 10 апреля 2015 года в Университете ИТМО (г. Санкт-Петербург), секции «Интеллектуальные системы в гуманитарной сфере» за предметное обсуждение и ценные замечания по теме исследований.

AUTOMATED CONTROL SIMULATION OF PROFESSIONAL SKILLS FORMATION FOR PRODUCTION SYSTEM OPERATOR

R.A. Fayzrakhmanov^а, I.S. Polevshchikov^а

^а Perm National Research Polytechnic University, Perm, 614990, Russian Federation
Corresponding author: i.s.polevshchikov@gmail.com

Article info

Received 04.03.15, accepted 03.11.15
doi:10.17586/2226-1494-2016-16-1-181-190

Article in Russian

For citation: Fayzrakhmanov R.A., Polevshchikov I.S. Automated control simulation of professional skills formation for production system operator. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, vol. 16, no. 1, pp. 181–190.

Abstract

Subject matter. We propose a mathematical model of the automated control of the professional skills formation for the trainee through exercises using computer training complex. Its distinctive features are: automatic receipt of the integral quality index of exercising on the basis of certain indicators of quality assessment in terms of trainee's estimation fuzziness in the performance of exercises for each such indicator at different points in time; automatic gradual introduction of each quality indicator, tips and warnings in the process of repeated exercise performing in order to acquire quickly the ability of self-

trained quality of their work; automatic control of the dynamics of the gradual forming of skills during repeated exercising. **Method.** The study used the basics of control theory, the fuzzy-set theory, analytic hierarchy process, mathematical modeling of iterative learning, modeling using Petri nets. **Main Results.** We have developed an original mathematical model of the automated control of the process of formation of professional skills for the future operators of industrial processes in the performance of practical exercises with the use of the computer training complex. **Practical Significance.** The proposed mathematical model and appropriate methodology can be applied to create computer-aided training of operators of different processes.

Keywords

computer-aided control, automatic control, modeling, process of learning, professional skills, computer training complex, iterative learning models.

Acknowledgements

The authors are grateful to participants of the IV All-Russian Congress of Young Scientists, held from the 7th to 10th of April, 2015 in ITMO University (Saint Petersburg), section "Intelligent Systems in the Humanitarian Field" for substantive discussion and valuable comments on the subject of research.

Введение

Во многих областях профессиональной деятельности эффективность и безопасность производственных процессов зависят от такого важного фактора, как уровень владения операторами производственного оборудования необходимым набором профессиональных навыков.

С одной стороны, это сенсомоторные навыки, каждый из которых представляет собой как определенные двигательные действия, формируемые при реализации определенных двигательных упражнений с помощью инструментов, близких к реальным, так и навык восприятия информации о состоянии используемого оборудования и технологической среды.

С другой стороны, это навыки ситуационной осведомленности операторов [1], представляющие собой правильную и быструю реакцию на ситуацию, сложившуюся в реальном времени в процессе функционирования сложной производственной системы и требующие от оператора знаний и умений, необходимых для принятия решения.

Таким образом, в процессе профессионального обучения будущий оператор должен научиться своевременно, точно, в соответствии с ситуацией выполнять требуемые технологические операции, опираясь на знания о желаемой траектории процесса, оценивая фактическое протекание процесса, выбирая из возможных наиболее эффективные действия, направленные на выполнение поставленной задачи.

Однако в существующих моделях, методах и программно-аппаратных средствах профессионального обучения [2–9] не учтены некоторые важные специфические особенности работы операторов производственных процессов. Во-первых, необходимо разработать динамические модели, позволяющие автоматически формировать интегральные показатели качества выполнения каждого упражнения в процессе профессионального обучения на основе некоторого набора отдельных показателей качества (например, время выполнения, точность, количество ошибок в процессе выполнения упражнения и т.д.) в условиях нечеткости оценки обучаемого при выполнении упражнения по каждому такому показателю в различные моменты времени. Во-вторых, требуются модели, позволяющие осуществлять постепенный ввод отдельных показателей качества в процессе выполнения упражнения, а также подсказок и предупреждений, с целью уменьшения времени, необходимого для приобретения обучаемым способности к самоконтролю качества выполнения упражнений [10]. В-третьих, отсутствуют модели, позволяющие автоматически контролировать динамику постепенного формирования навыков у обучаемого при многократном выполнении упражнения в повторяющихся условиях и на основе этого повысить эффективность восприятия обучаемым (оператором) информации о состоянии среды, об особенностях ситуации благодаря информационной поддержке обучаемого.

Далее изложена методика решения описанной выше проблемы, а именно, модель автоматизированного управления формированием профессиональных навыков у обучаемого посредством выполнения упражнений с использованием компьютерного тренажерного комплекса (КТК) оператора производственного процесса. В качестве примера рассмотрен КТК оператора перегрузочной машины специального назначения, включающий в себя имитатор реального производственного оборудования (например, кресло-пулт крана), имитацию окружающей среды и средства визуализации технологического процесса и информационного сопровождения.

Задача планирования как составляющая процесса управления

В виде кортежа $U_{pl}^/$ представим показатели, устанавливаемые преподавателем в настройках КТК с использованием удобного пользовательского интерфейса до начала обучения и характеризующие планируемые результаты обучения:

$$U_{pl}^/ = \langle M_{nab}, K_{nab}, M_{osv}^{dop}, M_{mai}, K_{osv}^{itog}, \varepsilon_{osv}^{itog}, N_{umen}^{rek}, N_{nav}^{treb} \rangle, \tag{1}$$

Рассмотрим использованные в кортеже (1) обозначения.

1. $M_{nab} = \{P_{nab,i} \mid i = \overline{1, N_{kach}}\}$ – множество наборов параметров $P_{nab,i}$, соответствующих каждому показателю качества выполнения упражнения (N_{kach} – общее количество показателей качества, программно реализованных в упражнении). Каждый набор параметров $P_{nab,i}$ представляет собой исходные данные (с использованием характерной для этого показателя качества единицы измерения) для последующей оценки обучаемого по i -ому показателю качества при выполнении упражнения с применением алгоритма нечеткого вывода:

$$P_{nab,i} = \langle P_{\min otl}, P_{\max otl}, P_{\min hor}, P_{\max hor}, P_{\min ud}, P_{\max ud}, P_{\min neud}, P_{\max neud}, \Delta P \rangle, \quad (2)$$

где $P_{\min otl}$, $P_{\min hor}$, $P_{\min ud}$, $P_{\min neud}$ – левые границы, а $P_{\max otl}$, $P_{\max hor}$, $P_{\max ud}$, $P_{\max neud}$ – правые границы отрезков, сопоставленных с отличным, хорошим, удовлетворительным и неудовлетворительным значениями i -го показателя качества соответственно; ΔP – допустимое отклонение от правой и левой границ отрезков.

Например, в настройках КТК оператора перегрузочной машины для показателя качества «плавность поворота стрелы крана», представляющего собой угол отклонения груза от вертикальной оси стрелы (в градусах), можно установить следующие исходные значения параметров из кортежа (2): отличные значения данного показателя качества точно (согласно опыту преподавателя) лежат на отрезке от $P_{\min otl} = 0^\circ$ до $P_{\max otl} = 15^\circ$; хорошие – от $P_{\min hor} = 20^\circ$ до $P_{\max hor} = 25^\circ$; удовлетворительные – от $P_{\min ud} = 30^\circ$ до $P_{\max ud} = 35^\circ$; неудовлетворительные – на интервале от $P_{\min neud} = 40^\circ$ и более. Отклонение от границ данных интервалов можно принять равным $\Delta P = 5^\circ$ (т.е., например, значения одновременно более 15° и менее 20° соответствуют промежуточному состоянию между отличной и хорошей оценкой).

2. $K_{nab} = \langle K_{otl}, K_{hor}, K_{ud}, K_{neud} \rangle$ – набор параметров, представляющий собой исходные данные для последующего вычисления коэффициента освоения любого из показателей качества (т.е. безразмерной оценки степени освоения умения в разрезе данного показателя качества в ходе выполнения упражнения, лежащей на отрезке $[0;1]$) с использованием алгоритма нечеткого вывода.

Например, в настройках КТК для отличного значения показателя качества «плавность поворота стрелы крана» можно установить коэффициент освоения $K_{otl} = 1$, для хорошего – $K_{hor} = 0,75$, для удовлетворительного – $K_{ud} = 0,5$, для неудовлетворительного – $K_{neud} = 0$.

3. $M_{osv}^{dop} = \{K_{osv,i}^{dop} \in [0;1] \mid i = \overline{1, N_{kach}}\}$ – множество пороговых (допустимых) значений $K_{osv,i}^{dop}$ коэффициентов освоения показателей качества. Далее на этапе контроля и регулирования в зависимости от соотношения значения $K_{osv,i}^{dop}$ и фактически достигнутого обучаемым значения коэффициента освоения i -го показателя качества, будет производиться формирование управленческих воздействий.
4. $M_{mai} = \langle M_{mpk}^{ves}, M_{kr}^{ves}, M_{mpk}^{pr}, M_{kr}^{pr} \rangle$ – набор матриц, необходимых далее для вычисления весов и приоритетов показателей качества на основе метода анализа иерархий (МАИ) [11], где $M_{mpk}^{ves} = \{M_{pk,i}^{ves} \mid i = \overline{1, N_{kr}^{ves}}\}$ ($M_{kr}^{pr} = \{M_{pk,i}^{pr} \mid i = \overline{1, N_{kr}^{pr}}\}$) – множество матриц $M_{pk,i}^{ves}$ ($M_{pk,i}^{pr}$) попарного сравнения показателей качества по отношению к каждому из N_{kr}^{ves} (N_{kr}^{pr}) критериев; M_{kr}^{ves} (M_{kr}^{pr}) – матрица попарного сравнения критериев по отношению к общей цели.

M_{mpk}^{ves} и M_{kr}^{ves} используются в дальнейшем для вычисления весов, а M_{mpk}^{pr} и M_{kr}^{pr} – приоритетов показателей качества. Матрицы необходимы для определения относительной сложности, важности и других подобных характеристик показателей качества. Веса используются далее при вычислении интегрального показателя качества выполнения упражнения, а от приоритета показателя качества зависит порядок ввода данного показателя в процесс многократного выполнения упражнения обучаемым.

5. $K_{osv}^{itog} \in [0;1]$ – итоговое пороговое значение комплексного коэффициента освоения (т.е. интегрального показателя качества выполнения упражнения). Далее на этапе контроля и регулирования в зависимости от соотношения значения K_{osv}^{itog} и фактически достигнутого обучаемым значения интегрального показателя качества выполнения упражнения будут сформированы управленческие воздействия.
6. $\varepsilon_{osv}^{itog} \in [0;1]$ – допустимое отклонение от K_{osv}^{itog} при расчете скорости научения.
7. N_{umen}^{rek} – рекомендуемое количество попыток выполнения упражнения с фиксированным набором показателей качества (т.е. без ввода в процесс многократного выполнения упражнения других показателей качества), необходимое для освоения соответствующего упражнению умения.

Впоследствии значения ε_{osv}^{itog} и N_{umen}^{rek} будут использованы для вычисления показателей, связанных с динамикой освоения умений и навыков в ходе многократного выполнения упражнения обучаемым.

8. N_{nav}^{treb} – минимальное количество успешных выполнений упражнения подряд (с фиксированным набором показателей качества), при котором навык, соответствующий упражнению, считается освоенным. Под навыком понимается доведенное до автоматизма умение выполнять упражнение с приемлемым уровнем качества. Далее на этапе контроля и регулирования значение N_{nav}^{treb} будет использовано для оценки уровня освоения навыка по выполнению данного упражнения.

После установки преподавателем в настройках КТК описанных выше значений до начала обучения автоматически вычисляется ряд показателей, что можно представить следующей функциональной зависимостью:

$$Y_{pl} = f_{pl}(X_1, X_2, \dots, X_{N_{pl}}),$$

где Y_{pl} – некоторый вычисляемый автоматически показатель; $X_1, X_2, \dots, X_{N_{pl}}$ – отдельные значения, установленные ранее в настройках.

Данные показатели представим с помощью кортежа $U_{pl}^{//}$:

$$U_{pl}^{//} = \langle M_{kach}^{ves}, M_{kach}^{pr}, \gamma_{rek} \rangle, \quad (3)$$

где $M_{kach}^{ves} = \{ \langle P_{kach.i}, W_{kach.i}^{ves} \rangle \mid i = \overline{1, N_{kach}} \}$ – множество весов показателей качества ($W_{kach.i}^{ves}$ – вес показателя качества $P_{kach.i}$); $M_{kach}^{pr} = \{ \langle P_{kach.i}, W_{kach.i}^{pr} \rangle \mid i = \overline{1, N_{kach}} \}$ – множество приоритетов показателей качества ($W_{kach.i}^{pr}$ – приоритет показателя качества $P_{kach.i}$); γ_{rek} – рекомендуемая скорость научения.

С использованием МАИ [11] вычисляются множества M_{kach}^{ves} и M_{kach}^{pr} на основе матриц набора M_{mai} , что можно представить следующими зависимостями:

$$\begin{cases} M_{kach}^{ves} = f_{ves}(M_{mpk}^{ves}, M_{kr}^{ves}); \\ M_{kach}^{pr} = f_{pr}(M_{mpk}^{pr}, M_{kr}^{pr}). \end{cases}$$

На основе математических моделей итеративного научения [4, 12] вычисляется рекомендуемая скорость научения γ_{rek} , используемая далее для вычисления показателя динамики освоения умений и навыков в ходе многократного выполнения упражнения:

$$\gamma_{rek} = f_{pl.it}(K_{osv}^{itog}, N_{umen}^{rek}, \varepsilon_{osv}^{itog}) = \begin{cases} -\frac{\ln(1 - K_{osv}^{itog})}{N_{umen}^{rek}}, & \text{при } K_{osv}^{itog} < 1; \\ -\frac{\ln(1 - K_{osv}^{itog} + \varepsilon_{osv}^{itog})}{N_{umen}^{rek}}, & \text{при } K_{osv}^{itog} = 1. \end{cases}$$

Задача автоматического учета параметров о ходе процесса обучения

Задача учета заключается в обеспечении процесса сбора первичных данных о фактическом протекании процесса обучения. На стадии учета, в ходе текущей попытки выполнения обучаемым упражнения и при ее завершении, автоматически вычисляются некоторые показатели, что можно представить в форме

$$U_{uch} = \langle P_{tek}, I_{pk}, N_{usp}, N_{upr} \rangle, \quad (4)$$

где $P_{tek} = \{ P_{tek.i} \mid i = \overline{1, N_{kach}} \}$ – множество текущих значений (либо множеств значений) $P_{tek.i}$ показателей качества, фактически используемых при данной попытке выполнения упражнения, в количестве N_{kach} ; $I_{pk} \in \{0; 1\}$ – индикатор наличия ($I_{pk} = 1$) или отсутствия ($I_{pk} = 0$) еще не введенных показателей качества в рамках многократного выполнения упражнения; N_{usp} – число успешных попыток выполнения упражнения подряд с фиксированным набором показателей качества; N_{upr} – общее число попыток выполнения упражнения с фиксированным набором показателей качества.

Все показатели качества выполнения упражнения делятся на терминальные, значения которых вычисляются один раз при завершении попытки выполнения упражнения, и динамические, значения которых измеряются многократного в ходе выполнения упражнения в определенные моменты времени. В связи с этим множество P_{tek} из (4) можно представить также в виде

$$P_{tek} = \{P_{tek.r} \mid r = \overline{1, N_{trm}}\} \cup \{P_{tek.s} \mid s = \overline{1, N_{din}}\},$$

где $P_{tek.r}$ – значение r -го терминального показателя качества (N_{trm} – количество терминальных показателей качества); $P_{tek.s} = \{P_{tek.sj}(t_j) \mid j = \overline{1, N_t}\}$ – множество значений s -го динамического показателя качества (N_{din} – количество динамических показателей качества), причем $P_{tek.sj}(t_j)$ – значение показателя качества в момент времени t_j (N_t – количество моментов времени).

Динамические показатели качества вычисляются для того, чтобы понять соответствие фактической траектории выполнения упражнения обучаемым требуемой траектории в соответствии с математической моделью физического процесса, реализованного в упражнении. Одновременный учет как терминальных, так и динамических показателей качества позволит далее всесторонне оценить качество выполнения упражнения и тем самым повысить эффективность процессов контроля и регулирования.

Значения I_{pk} , N_{usp} , N_{upr} из (4) вычисляются при завершении попытки выполнения упражнения.

Задача анализа в процессе управления

Целью этапа анализа является определение степени качества выполнения упражнения обучаемым, причем как по отдельным показателям качества, так и с использованием интегрального показателя качества, а также вычисление того уровня качества выполнения упражнения, который обучаемый должен был теоретически достичь [4, 12] после данной попытки выполнения упражнения. Вычисление каждого показателя на этапе анализа можно представить зависимостью

$$Y_{an} = f_{an}(X_1, X_2, \dots, X_{N_{an}}),$$

где Y_{an} – некоторый вычисляемый автоматически показатель; $X_1, X_2, \dots, X_{N_{an}}$ – отдельные показатели, полученные ранее на этапах планирования или учета.

Показатели, вычисляемые автоматически на этапе анализа (в ходе текущей попытки выполнения упражнения и в ее завершении), можно представить в форме кортежа:

$$U_{an} = \langle M_{osv}, M_{vrem}, K_{osv}, K_{osv}^{prom} \rangle, \quad (5)$$

где $M_{osv} = \{K_{osv.i} \in [0;1] \mid i = \overline{1, N'_{kach}}\}$ – множество значений $K_{osv.i}$ коэффициентов освоения, соответствующих каждому показателю качества, в количестве N'_{kach} ; $M_{vrem} = \{K_{osv.sj} \in [0;1] \mid s = \overline{1, N_{din}}\}$ – множество значений $K_{osv.sj}$ каждого s -го коэффициента освоения динамического показателя качества в момент времени t_j ; $K_{osv} \in [0;1]$ – значение комплексного коэффициента освоения; $K_{osv}^{prom} \in [0;1]$ – промежуточное пороговое значение комплексного коэффициента освоения.

С использованием процедуры нечеткого вывода [13, 14], при завершении текущей попытки выполнения упражнения вычисляются коэффициенты освоения каждого терминального показателя качества, что можно представить зависимостью

$$K_{osv.r} = f_{osv}(P_{tek.r}, P_{nab.r}, K_{nab}).$$

Аналогично для каждого динамического показателя качества вычисляются как коэффициенты освоения в ходе текущей попытки выполнения упражнения в необходимые моменты времени, так и результирующее значение коэффициента освоения при завершении попытки, что можно представить следующим образом:

$$K_{osv.s} = N_t \sqrt[N_t]{\prod_{j=1}^{N_t} K_{osv.sj}(t_j)} = N_t \sqrt[N_t]{\prod_{j=1}^{N_t} f_{osv}(P_{tek.sj}, P_{nab.s}, K_{nab})}.$$

Параметры из наборов $P_{nab.i}$ и K_{nab} , описанных в (1) и (2), являются основой для входных и выходных лингвистических переменных, используемых в алгоритме нечеткого вывода [13, 14]. Например, функцию принадлежности термина входной лингвистической переменной, соответствующего отличному значению показателя качества «плавность поворота стрелы крана», рассмотренного выше, можно представить как трапецию $f_T(x, P_{min_{otl}}, P_{max_{otl}}, \Delta P)$ [13]. А функцию принадлежности термина выходной лингвистической переменной, соответствующего отличному значению коэффициента освоения этого же показателя качества, можно представить как одноточечное множество $\{< K_{otl}, 1 >\}$ [15].

Значение комплексного коэффициента освоения (т.е. интегрального показателя качества выполнения упражнения), вычисляется автоматически при завершении попытки выполнения упражнения по формуле

$$K_{osv} = f_{kko}(M_{kach}^{ves}, M_{osv}) = \frac{\sum_{i=1}^{N'_{kach}} W_{kach.i}^{ves} \cdot K_{osv.i}}{\sum_{i=1}^{N'_{kach}} W_{kach.i}^{ves}} .$$

K_{osv}^{prom} из (5) – это значение комплексного коэффициента освоения, которое должно быть теоретически достигнуто [4, 12] после выполнения упражнения N_{upr} раз, вычисляемое при завершении попытки выполнения упражнения на основе значения γ_{rek} из кортежа (3) по формуле:

$$K_{osv}^{prom} = f_{prom}(\gamma_{rek}, N_{upr}) = 1 - e^{-\gamma_{rek} N_{upr}} .$$

Задачи контроля и регулирования в процессе управления

В результате выполнения этапов контроля и регулирования происходит автоматическое принятие решений и формирование управленческих воздействий:

1. в ходе попытки выполнения упражнения происходит формирование управленческих воздействий в форме программно реализованных подсказок или предупреждений обучаемому в определенные моменты времени (например, звуковые или визуальные сигналы об аварийных ситуациях или неправомерных действиях обучаемого), причем для каждого упражнения преподаватель может установить в настройках КТК наборы подсказок (предупреждений), предоставляемые обучаемому как по умолчанию при выполнении упражнения, так и в зависимости от результатов предыдущей попытки выполнения упражнения;
2. по окончании попытки выполнения упражнения принимаются следующие решения: успешно ли обучаемый выполнил упражнение; необходимо ли повторное выполнение упражнения; требуется ли расширение набора показателей качества в случае повторного выполнения упражнения; нужны ли подсказки (предупреждения) при повторном выполнении упражнения.

Формирование управляющих воздействий из множества U можно обобщенно представить в форме отображения:

$$F : \{X_{reg,h} = \langle \Delta_{sost}, M_{pkzt}, M_{dop} \mid h = \overline{1, N_{reg}} \rangle \rightarrow U ,$$

где Δ_{sost} – разница между текущим состоянием моделируемой производственной среды и некоторым программно реализованным в КТК состоянием; $M_{pkzt} = \{\Delta_{pkzt,k} \mid k = \overline{1, N_{\Delta}}\}$ – множество, в котором каждый элемент $\Delta_{pkzt,k}$ представляет собой разницу между некоторыми показателями, полученными ранее на этапах планирования, учета, анализа (как правило, разница между фактическими и требуемыми результатами обучения); M_{dop} – множество некоторых дополнительных параметров.

В ходе попытки выполнения упражнения возможно принятие решений и формирование соответствующих управленческих воздействий о выдаче подсказки (предупреждения) обучаемому в соответствии с продукционными правилами вида

ЕСЛИ $(S_{tek} = S_{prom}) \wedge (I_{pods} = 1)$, ТО «сформировать соответствующую подсказку или предупреждение»,

где S_{tek} – текущее состояние моделируемой производственной среды; S_{prom} – некоторое промежуточное состояние моделируемой производственной среды, означающее наступление события, соответствующего формированию подсказки (предупреждения); I_{pods} – индикатор наличия ($I_{pods} = 1$) или отсутствия ($I_{pods} = 0$) подсказки (предупреждения) в соответствии с тем набором подсказок, который предусмотрен при данной попытке выполнения упражнения обучаемым.

Состоянию S_{prom} может соответствовать, например, следующее условие: $K_{osv.sj}(t_j) < K_{osv.s}^{dop}$, т.е. в j -й момент времени достигнутое значение $K_{osv.sj}(t_j)$ коэффициента освоения динамического показателя качества хуже допустимого значения $K_{osv.s}^{dop}$. В таком случае в качестве управляющего воздействия (подсказки) система может сообщить обучаемому рекомендуемые состояния, в которые обучаемый должен перевести имитаторы рычагов управления краном, что можно представить в форме множества $M_R = \{R_l \mid l = \overline{1, N_R}\}$, где R_l – рекомендуемое состояние l -го рычага.

По окончании попытки выполнения упражнения происходит принятие решения о том, успешно ли выполнено упражнение. Индикатор успешного ($I_{osv} = 1$) либо неуспешного ($I_{osv} = 0$) выполнения упражнения вычисляется по следующей формуле:

$$I_{osv} = \begin{cases} 0, & \text{если } (S_{tek} = S_{kon}) \wedge (\exists i = 1, N'_{kach} (K_{osv.i} < K_{osv.i}^{dop}) \vee (K_{osv} < K_{osv}^{itog})) \\ 1, & \text{если } (S_{tek} = S_{kon}) \wedge \forall i = 1, N'_{kach} (K_{osv.i} \geq K_{osv.i}^{dop}) \wedge (K_{osv} \geq K_{osv}^{itog}) \end{cases}$$

где S_{kon} – состояние моделируемой производственной среды, реализованное программно в упражнении и соответствующее окончанию выполнения упражнения (например, таким состоянием может быть поднятие груза на требуемую высоту при обучении крановщиков), причем условие $S_{tek} = S_{kon}$ означает принятие решения об окончании попытки выполнения упражнения.

На рис. 1 в форме сети Петри [16, 17] показан процесс автоматического контроля и регулирования в ходе многократного выполнения упражнения обучаемым, переходы которой соответствуют принятию решений и формированию управленческих воздействий до начала первой попытки выполнения упражнения и при завершении очередной попытки выполнения упражнения.

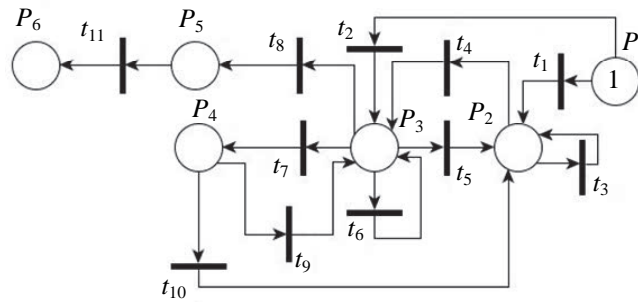


Рис. 1. Процесс автоматического контроля и регулирования при многократном выполнении упражнения в форме сети Петри

Рассмотрим условия, соответствующие позициям сети Петри на рис. 1. Позиции p_1 соответствует состояние до начала многократного выполнения упражнения обучаемым, позиции p_2 – условие $I_{osv} = 0$, позиции p_3 – условие $(I_{osv} = 1) \wedge (N_{usp} < N_{nav}^{treb})$, позиции p_4 – условие $(I_{osv} = 1) \wedge (N_{usp} = N_{nav}^{treb}) \wedge (I_{pk} = 1)$, позиции p_5 – условие $(I_{osv} = 1) \wedge (N_{usp} = N_{nav}^{treb}) \wedge (I_{pk} = 0)$, а позиция p_6 означает, что требуемый навык полностью освоен.

Переходы t_1, t_2 из рис. 1 соответствуют принятию решения и формированию соответствующего управленческого воздействия о введении в процесс выполнения упражнения новых показателей качества согласно формуле

$$M'_{vved} = M_{vved} \cup M_{nov}, \tag{6}$$

где M'_{vved} – текущее множество введенных показателей качества ($M'_{vved} = \emptyset$ при условии, соответствующем позиции p_0); M_{vved} – обновленное множество введенных показателей качества; M_{nov} – множество вводимых показателей качества, т.е. показателей с наибольшим приоритетом среди еще не введенных.

Переходы t_3, t_4 соответствуют необходимости повторного выполнения текущего упражнения с прежним набором показателей качества, обнулению N_{usp} из (4), а также необходимости подсказок и предупреждений при последующей попытке выполнения упражнения согласно правилам продукций, записанным обобщенно в виде

$$\text{ЕСЛИ } \alpha_1 K_{osv}^{itog} \leq K_{osv} \leq \alpha_2 K_{osv}^{itog}, \text{ ТО «вводится набор подсказок } M_{nab.v} \in M_{nab} \text{»,} \tag{7}$$

$$\text{ЕСЛИ } \beta_1 K_{osv}^{prom} \leq K_{osv} \leq \beta_2 K_{osv}^{prom}, \text{ ТО «вводится набор подсказок } M_{nab.w} \in M_{nab} \text{»,} \tag{8}$$

$$\text{ЕСЛИ } \chi_1 K_{osv.i}^{dop} \leq K_{osv.i} \leq \chi_2 K_{osv.i}^{dop}, \text{ ТО «вводится набор подсказок } M_{nab.z} \in M_{nab} \text{»,} \tag{9}$$

где $\alpha_1 \in [0;1]$, $\alpha_2 \in [0;1]$, $\beta_1 \in [0;1]$, $\beta_2 \in [0;1]$, $\chi_1 \in [0;1]$, $\chi_2 \in [0;1]$ – некоторые коэффициенты; M_{nab} – множество допустимых наборов, в которые преподаватель объединил в настройках КТК возможные подсказки и предупреждения.

Результирующий набор подсказок (предупреждений) M_{rez} , предоставляемых обучаемому при последующем выполнении упражнения, находится согласно выражению $M_{rez} = \bigcup_k M_{nab,k}$, где $M_{nab,k} \in M_{nab}$ – отдельный набор подсказок (предупреждений), выбранный в соответствии с правилами продукций (7)–(9) или установленный по умолчанию преподавателем в настройках КТК.

Переходы t_5, t_6, t_7, t_8 соответствуют необходимости повторного выполнения упражнения с прежним набором показателей качества без необходимости подсказок и предупреждений согласно правилам продукций (7)–(9) при последующей попытке выполнения упражнения. Переходы t_9, t_{10} соответствуют необходимости повторного выполнения упражнения с расширением набора показателей качества, используемых при выполнении упражнения, согласно формуле (6), а также обнулению значений N_{usp} и N_{upr} из (4). Переход t_{11} соответствует необходимости выполнения последующего упражнения, так как навык выполнения текущего упражнения с полным набором показателей качества освоен.

Алгоритм управления, соответствующий описанной математической модели и выполненный в форме диаграммы деятельности языка UML [18], показан на рис. 2.

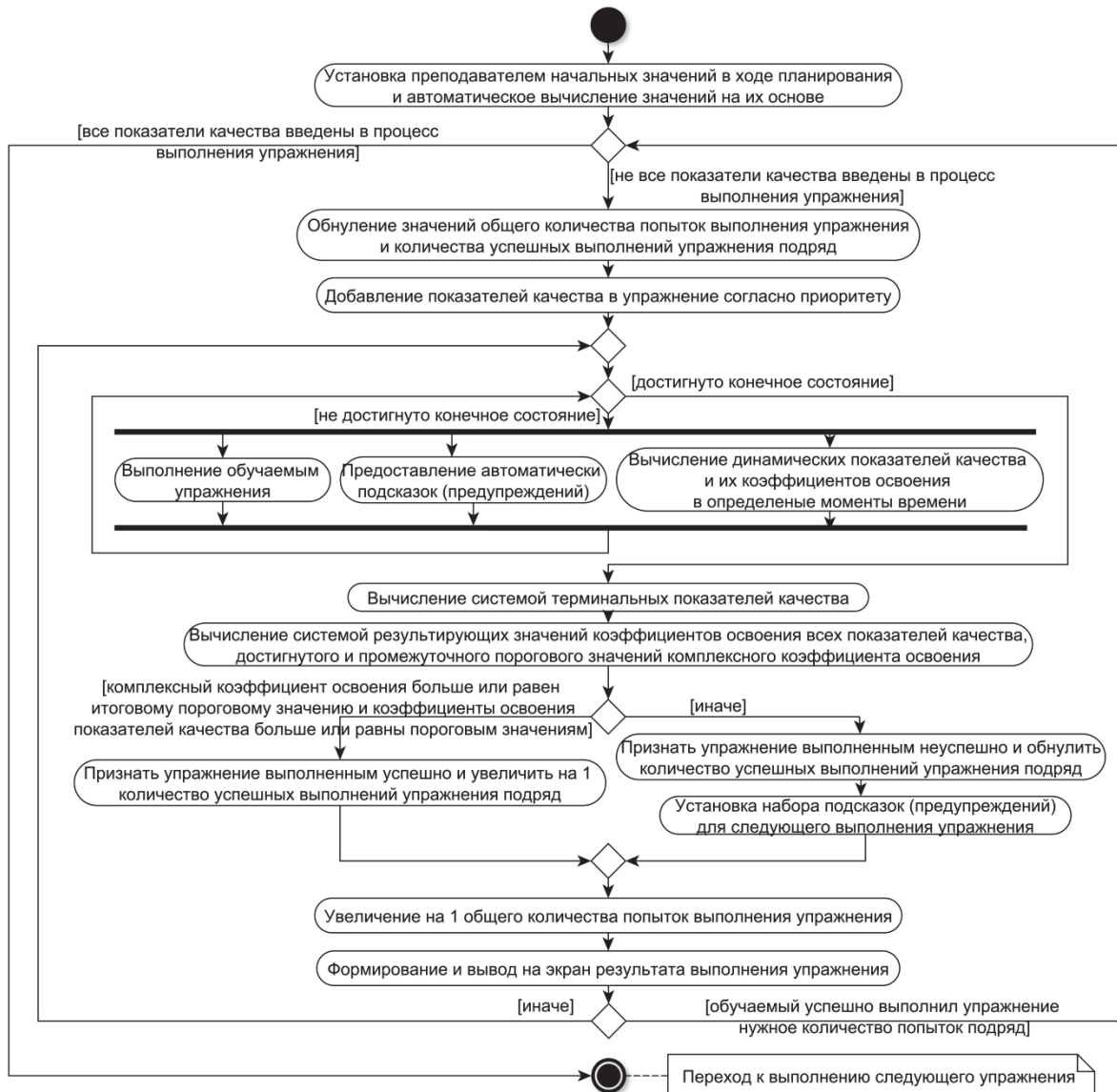


Рис. 2. UML-диаграмма алгоритма управления процессом выполнения упражнения на компьютерном тренажерном комплексе

Заключение

Таким образом, разработана оригинальная математическая модель автоматизированного управления выполнением упражнения на компьютерном тренажерном комплексе, описывающая все этапы процесса управления (планирование, учет, анализ, контроль, регулирование), и, в отличие от существующих, включающая в себя такие составляющие, как:

1. модель автоматического получения интегрального показателя качества выполнения упражнения на основе отдельных показателей качества в условиях нечеткости оценки обучаемого при выполнении упражнения по каждому такому показателю в различные моменты времени;
2. модель автоматического постепенного введения каждого отдельного показателя качества, подсказок и предупреждений в процесс выполнения упражнения, с целью ускорения процесса приобретения обучаемым способности самоконтроля качества выполнения работы;
3. модель автоматического контроля динамики постепенного формирования умений и навыков при многократном выполнении упражнения.

Разработанная модель была использована при реализации программного и информационного обеспечения компьютерного тренажерного комплекса, предназначенного для обучения операторов перегрузочной машины специального назначения профессиональным навыкам, в рамках НИОКР № 2010/293 по разделу «Исследование форм и методов организации обучения с использованием высокоинтеллектуальных технических средств. Разработка высокоинтеллектуальных технических средств обучения, создание тренажерных комплексов, интерактивных электронных технических руководств».

References

1. Lisitsyna L.S., Lyamin A.V., Bystritsky A.S., Martynikhin I.A. Support problem for cognitive functions in the e-learning. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2014, no. 6 (94), pp. 177–184. (In Russian)
2. Fayzrakhmanov R.A., Polevshchikov I.S. Analysis methods and tools automate the process of training of operators of industrial and technological systems (for example, operators handling machines). *Modern Problems of Science and Education*, 2013, no. 5, p. 120. (In Russian)
3. Yagovkin V.O., Stafeev S.K. Interactive training complex for the state educational institutions. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2010, no. 5 (69), pp. 122–125. (In Russian)
4. Fayzrakhmanov R.A., Polevshchikov I.S. Increased of efficiency in the automated training of fuelling machine operators using iterative simulation learning. *World Applied Sciences Journal*, 2013, vol. 22, no. 2, pp. 70–75. doi: 10.5829/idosi.wasj.2013.22.tt.22142
5. Lisitsyna L., Lyamin A. Approach to development of effective e-learning courses. *Frontiers in Artificial Intelligence and Application*, 2014, vol. 262, pp. 732–738. doi: 10.3233/978-1-61499-405-3-732
6. Bouhnik D., Carmi G. E-learning environments in academy: technology, pedagogy and thinking dispositions. *Journal of Information Technology Education: Research*, 2012, vol. 11, no. 1, pp. 201–219.
7. Jafarabadi Ashtiani M., Nomanof M., Sadeghi Bigham B., Madadi A. Computer assisted assessment (CAA) and electronic problem based learning. *Life Science Journal*, 2013, vol. 10, no. 1, pp. 726–730.
8. Park C.J., Hyun J.S. A peer-assessment system connecting on-line and a face-to-face smart classroom. *Life Science Journal*, 2014, vol. 11, no. 7, pp. 700–705.
9. Karpova I.P. *Issledovanie i Razrabotka Podsystemy Kontrolya Znaniy v Raspredeleennykh Avtomatizirovannykh Obuchayushchikh Sistemakh: Dis. Kand. Tekh. Nauk* [Research and Development of Knowledge-Based Control in Distributed Automated Training Systems. Dis. PhD Eng. Sci.]. Moscow, 2002, 204 p.
10. Shchemeleva T.K. Training system for crane operators using simulators: 30 years later. *Vestnik PNIPU. Elektrotehnika, Informatsionnye Tekhnologii, Sistemy Upravleniya*, 2009, no. 3, pp. 106–109. (In Russian)
11. Fayzrakhmanov R.A., Polevshchikov I.S., Modysheva A.S. Features integrated automatic quality assessment exercises on a computer simulator operator of industrial-technological system. *Inzhernyy vestnik Dona*, 2014, no. 4–1, p. 119. (In Russian)
12. Fayzrakhmanov R.A., Polevshchikov I.S., Ibraev I.I. Automation of the control of the dynamics of development of skills in the exercises on a computer simulator operator of industrial-technological system. *Inzhernyy vestnik Dona*, 2014, no. 4–1, p. 126. (In Russian)
13. Fayzrakhmanov R.A., Polevshchikov I.S. The technique of automatic quality assessment exercises on a computer simulator operator of the process system using fuzzy sets. *Inzhernyy vestnik Dona*, 2014, no. 4–1, p. 111. (In Russian)
14. Beiranvand A., Khodabakhshi M., Yarahmadi M., Jalili M. Making a mathematical programming in fuzzy systems with genetic algorithm. *Life Science Journal*, 2013, vol. 10, no. suppl 8, pp. 50–57. (In Russian)
15. Fayzrakhmanov R.A., Polevshchikov I.S. Automated control of the formation of the professional skills of the operator robotic system using fuzzy logic. *Inzhernyy vestnik Dona*, 2015, no. 4. (In Russian)

16. Mokhtari Nazarlou M. Research on application of hierarchy Petri-net in dynamic workflow modeling. *Life Science Journal*, 2013, vol. 10, no. 1, pp. 821–825.
17. Taha Mohamed S., Gawad Mostafa M.A., Fathi Mohamed A. A comparative study on Petri Nets in manufacturing applications. *Life Science Journal*, 2013, vol. 10, no. 1, pp. 1496–1502.
18. Alelaiwi A. UML-based life cycle for the King Saud University scientific excellence prize system. *Life Science Journal*, 2014, vol. 11, no. 6 spec, pp. 569–574.

***Файзрахманов Рустам
Абубакирович***

– доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, 614990, Российская Федерация, fayzrakhmanov@gmail.com

Полевщиков Иван Сергеевич

– аспирант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, 614990, Российская Федерация, i.s.polevshchikov@gmail.com

Rustam A. Fayzrakhmanov

– D.Sc., Professor, Head of Chair, Perm National Research Polytechnic University, Perm, 614990, Russian Federation, fayzrakhmanov@gmail.com

Ivan S. Polevshchikov

– postgraduate, Perm National Research Polytechnic University, Perm, 614990, Russian Federation, i.s.polevshchikov@gmail.com