

Информатика, вычислительная техника и управление

УДК 629.7.01

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИММЕРСИВНОГО ТРЕНАЖЕРА ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ ОПЕРАТОРОВ ЭРГАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ*

А.Е. Глазырин, Л.А. Стешина, И.В. Петухов

Поволжский государственный технологический университет
Россия, 424000, Республика Марий Эл, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3

E-mail: railot116@gmail.com, SteshinaLA@volgatech.net, Petuhoviv@volgatech.net

Аннотация. *Представлена методика проектирования иммерсивного тренажера с использованием интеллектуального алгоритма автоматизации сценариев для профессиональной подготовки операторов эргатических систем управления. Методика включает два этапа – низкоуровневое и высокоуровневое проектирование. На низком уровне определяются простейшие акты операторской деятельности, которая может быть оценена с помощью психофизиологических тестов. На высоком уровне подбираются соответствующие метрики производительности, учитывающие соблюдение технологического регламента и временные показатели операторской работы. На каждом уровне проектирования формируются модели нечеткого логического вывода, которые включают унифицированную базу правил на основе параметров производительности оператора и реакции обучающей среды в виде изменения степени сложности текущего сценария. Отличительной особенностью высокоуровневого проектирования является рост базы правила из-за увеличения количества параметров среды, влияющих на степень сложности текущего сценария. Для решения этой проблемы используется генетический алгоритм, который осуществляет эвристический комбинаторный поиск оптимального правила для нечеткого логического вывода. На основе предложенной методики проектирования был разработан тренажер для обучения операторов транспортно-технологических машин. Экспериментальные данные показали прирост производительности в части погрузки сортимента на 11,6 %, уменьшение времени выполнения одного технологического цикла на 10,2 % и уменьшение количества ошибок на 80 %. Таким образом, показана целесообразность использования методики проектирования в промышленности для подготовки операторов эргатических систем управления.*

* Результаты исследования получены при поддержке гранта Министерства образования и науки РФ № 25.1095.2017/4.6.

Глазырин Андрей Евгеньевич, аспирант.

Стешина Людмила Александровна (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Проектирование и производство электронно-вычислительных средств».

Петухов Игорь Валерьевич (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Проектирование и производство электронно-вычислительных средств».

***Ключевые слова:** интеллектуальная система, имитационная среда, нечеткая модель, генетический алгоритм, эргатическая система управления, человеко-машинное взаимодействие, человеко-машинная система.*

Введение

К сожалению, сохраняется положительная динамика числа аварий на сложных технических объектах по вине человеческого фактора [1]. В связи с этим современный подход в обеспечении надежной работы сложных технических объектов неразрывно связан с эргатическими системами управления (ЭСУ), которые учитывают психофизиологические аспекты человека [2].

На сегодняшний день ЭСУ широко распространены и находят свое применение там, где вмешательство человека в контур управления является необходимым условием эксплуатации сложных технических объектов.

Соответственно профилактика техногенной безопасности зависит от своевременного выявления профессиональной компетенции в соответствующей области деятельности в форме профессионально важных качеств (ПВК), а также повышения уровня требуемых навыков при использовании тренажеров и симуляторов для профессиональной подготовки.

Необходимо отметить, что процесс подготовки операторов на специализированных аппаратно-программных комплексах в виде тренажеров или симуляторов существенно повышает качество подготовки персонала, несет экономические выгоды, снимает проблемы безопасности [3], не говоря уже о достоинствах, связанных с заложенной итеративной имитационной моделью [4].

Проектирование и автоматизация тренажеров встречают ряд трудностей. Тренажерные проекты – одни из самых сложных в автоматизации производства, поскольку затрагивают широкий круг разнообразных технологий, реализуются на специализированных инструментальных средствах и объединяют специалистов различного профиля [5].

Как правило, в сценариях имитационной модели заложены различные математические алгоритмы [6], учитывающие сложные технологические режимы, внешние факторы и другие важные детали реальных условий работы оператора. Как правило, за рамки реализации тренажера выносятся другие немаловажные детали. Это относится к выработке индивидуальной программы обучения, автоматизации степени сложности сценариев и другим аспектам, связанным с более тесной интеграцией человека-оператора (ЧО) в симуляционную среду.

Методика проектирования автоматизированной системы управления для профессиональной подготовки человека-оператора

На сегодняшний день современные тренажеры используют иммерсивные технологии [7–14]. Данные технологии повышают реалистичность ситуационного реагирования и улучшают деятельность оператора за счет эффекта погружения [15]. Погружение представляет собой внутреннее субъективное переживание, которое заключается в блокировании восприятия физического мира [16] путем замещения его виртуальной средой (ВС) [17].

Существуют различные подходы в проектировании иммерсивной среды (ИС) для профессиональной подготовки в зависимости от предметной области и специфики взаимодействия со средой [18]. Исходя из особенностей ЭСУ наиболее интересными подходами в проектировании ИС для ЧО можно считать пользовательско-ориентированные подходы, учитывающие психомоторные аспекты взаимодействия человека и ВС [19].

Основные компоненты пользовательско-ориентированных систем таковы: логический интерфейс, физический интерфейс и отображение. Физический интерфейс (совокупность устройств ВР) под воздействием моторной программы человека влияет на логический интерфейс (производит визуализацию среды) через позиционирование, которое исключает противоречие субъективного опыта и реализованного зрительно-моторного сценария в ИС [20].

В то же время показан приоритет выполнения определенных задач в ВС [21], а также модель обработки информации, которая предлагает рассматривать работу оператора через сетевую очередность деятельности на основе группирования задач, выполняемых оператором через перцептивные, когнитивные и моторные функции [22].

Если обратить внимание на сенсомоторную связь пользовательско-ориентированных систем и сетевую модель очередности деятельности, то можно сформировать замкнутый контур человеко-машинной системы (ЧМС), представленный на рис. 1. Ключевой особенностью предложенного контура ЧМС является синхронизация субъективного опыта ЧО через автоматизацию совокупности имитационных сценариев для насыщения базы знаний ЧО.

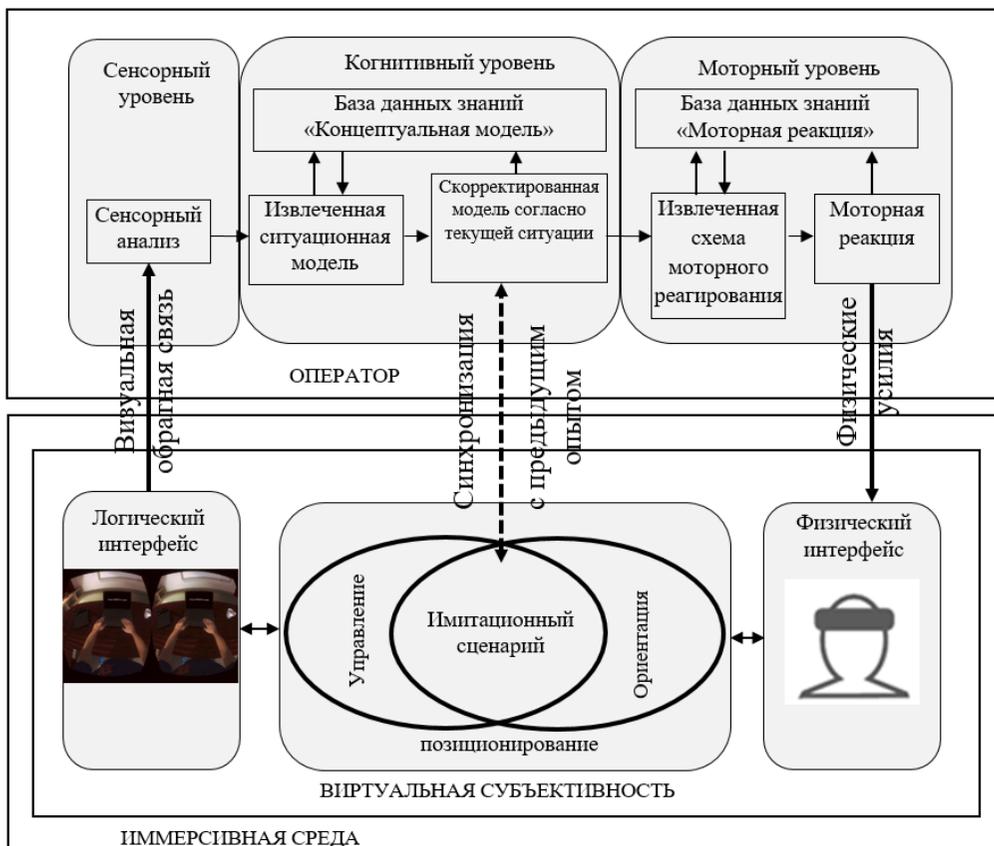


Рис. 1. Модель управления и обработки информации ЧМС в ИС

В свою очередь, когнитивное восприятие имитационного сценария осуществляется через взаимодействие физического и логического интерфейсов, с которыми работает человек. Представить данное взаимодействие можно на основе решаемых задач, которые могут быть обобщены в две группы: управление

(когнитивный уровень) и ориентация (сенсорный уровень), как показано на рис. 2.

Предлагаемая методика проектирования реализуется в два этапа: низкоуровневое и высокоуровневое проектирование. На низком уровне формируется перечень простейших сенсорных, моторных задач, от которых зависит эффективность работы оператора. Для этих задач определяются психофизиологические модели, которые могут быть представлены в виде специальных тестов.

Структурно-функциональное проектирование	Высокое	Предметное и информационно-коммуникативное моделирование			
		Выполнение задачи: Имитация технологических процессов с задействованием различных сценариев и наиболее важных компонентов производительности			
		Определение метрик оператора		Поведение и реакция среды	
		Выбор объектов производительности		Автоматизация подготовки	
		Логический интерфейс (корректный рендеринг как обратная связь от физического интерфейса)			
	Низкое	Пользовательско-ориентированное моделирование			
		Ориентация (сенсорный уровень)		Управление (моторный уровень)	
		Позиционирование (когнитивный уровень)			
		Распознавание	Зрительное распознавание	Контроль состояния	Крупная моторика
		Локализация объектов	Зрительно-моторное слежение	Манипуляция рабочим органом	Мелкая моторика
		Медиа обеспечение			
		Освещение		Светочувствительность	
		Звук		Звуковое восприятие	
		Физический интерфейс (манипуляция шлем ВР, виртуальные перчатки, трекинг, джойстики и т.д.)			

Рис. 2. Схема проектирования ИС в качестве тренажера

Таким образом, полученные результаты тестов можно использовать для количественной оценки реализованной автоматизированной системы управления ЧМС. В то же время контроль насыщения базы знаний оператора происходит с использованием объективных средств контроля когнитивной нагрузки ЧО, например с помощью электроэнцефалографа (ЭЭГ). Подтверждением целесообразности перехода на высокий уровень проектирования будем считать условие, при котором когнитивная нагрузка на этапе обучения будет выше, чем на этапе контроля.

На высоком уровне подбираются метрики производительности и параметры обучающей среды, которые влияют на степень сложности сценария подготовки. В отличие от низкого уровня полностью учитывается предметная область. Реализуется прототип тренажера, учитывающий специфику технологического процесса, и АСУ для подготовки оператора на основе подбора сценариев, учитывающих индивидуальные психофизиологические параметры ЧО.

Алгоритм автоматизации генерации сценариев профессиональной подготовки операторов (на примере транспортно-технологических машин)

Для оценки эффективности деятельности оператора или определения сложности режимов и условий выполнения задачи, которые могут описываться неточными и многозначными понятиями, такими как «сложно», «легко», «медлен-

но», подходят «мягкие вычисления», или нечеткие модели.

На низком уровне в зависимости от выбранных тестов – T_1, T_2, \dots, T_t , где t – количество тестов, определяются входные переменные, для конкретного теста T_l результаты выполнения тестов обозначим r_1, r_2, \dots, r_l , где l – количество результатов тестов, и выходные переменные, которые влияют на уровень сложности прохождения тестов – w_1, w_2, \dots, w_h , где h – количество переменных, влияющих на уровень сложности.

Таким образом, для каждой входной и выходной переменных зададим нечеткое множество:

$$R_l = \{ (\mu_{R_l}(r), r) \}, \forall r \in R,$$

$$W_h = \{ (\mu_{W_h}(w), w) \}, \forall w \in W$$

Пространство входных r и выходных w параметров разделяется на $2N+1$ областей. При этом натуральное целочисленное значение N подбирается для каждой нечеткой модели индивидуально, а полученные области могут иметь разную длину [23]. Отдельные области обозначим: L_N (Левый N), ..., L_1 (Левый 1), S_N (Средний N), R_1 (Правый 1), ..., R_N (Правый N).

Для L_N областей используем μ_L функцию принадлежности (ФП) следующего вида, где $b \neq 0$ и $a \neq b$:

$$\mu_L(x, a, b) = \begin{cases} 0, & x \leq a, \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b, \\ 1, & x \geq b. \end{cases}$$

Для R_N используем μ_R , где $a \neq 0$ и $a \neq b$:

$$\mu_R(x, a, b) = \begin{cases} 1, & x \leq a, \\ \frac{b-x}{b-a}, & a \leq x \leq b, \\ 0, & x \geq b. \end{cases}$$

Для S_N используем μ_S , где $b \neq 0$, $c \neq b$:

$$\mu_S(x, a, b, c) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b, \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c, \\ 0, & x \leq a \cup x \geq c. \end{cases}$$

Выбор указанных ФП в части исследования психофизиологических особенностей оператора предложен и обоснован в работе [24]. Конкретные интервальные значения для построения ФП на примере операторов транспортно-технологических машин представлены в работе [25].

Для обеспечения нечеткого логического вывода формируется база правил следующего вида:

ПРАВИЛО^(с): IF (r_1 это R_1^c **AND** r_2 это R_2^c ... **AND** r_l это R_l^c) **THEN** (w_1 это W_1^c **AND** w_2 это W_2^c ... **AND** w_h это W_h^c), где c – количество нечетких правил и $l \neq h$.

Для реализации алгоритма нечеткого логического вывода использовалась методика Мамдани, которая зарекомендовала себя с положительной стороны для моделирования систем оценивания профессионально важных качеств оператора.

На высокоуровневом проектировании вводятся метрики производительности оператора: временные показатели выполнения операции и нарушение технологического регламента (ТР).

Для реализации метрики нарушения ТР произведем декомпозицию m -задачи из общего количества технологических операций K на e подзадач (этапов реализации) с общим количеством E подзадач. Выполнение каждой подзадачи можно представить в виде вероятности несовместимых событий:

$$P(A_e^{(m)}) = \sum_{m=1}^K \sum_{e=1}^E \frac{n_{A_e}^{(m)}}{N_e^{(m)}}.$$

Здесь n_{A_e} – число успешных исходов выполнения A_e подзадачи;

N_e – число реализаций e -подзадачи.

Типичный транспортно-технологический цикл включает три основные задачи $m = 3$ (наведение рабочего органа, захват и погрузка сортимента) и может быть представлен в следующем виде:

$$P(A_e^{(m)}) = \sum_{m=1}^3 \sum_{e=1}^E \frac{n_{A_e}^{(m)}}{N_e^{(m)}} = \sum_{e=1}^E \frac{n_{A_e}^{(1)}}{N_e^{(1)}} + \sum_{e=1}^E \frac{n_{A_e}^{(2)}}{N_e^{(2)}} + \sum_{e=1}^E \frac{n_{A_e}^{(3)}}{N_e^{(3)}}.$$

В зависимости от специфики выполнения технологической операции на каждый этап могут налагаться соответствующие линейные ограничения. На рис. 3. для наглядности представлен пример изменения допустимых границ для угла поворота ротора α при переходе от одного этапа к другому.

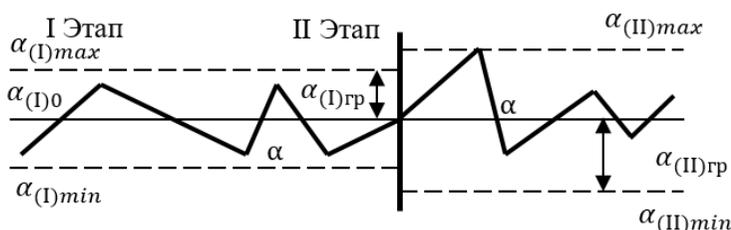


Рис. 3. Пример граничных условий для параметра α при переходе от этапа I к этапу II

На e -этапе для каждого k -кинематического параметра θ_k^e определены граничные условия в виде $\theta_{min}^e, \theta_{max}^e$. Таким образом, число успешных исходов n_{A_e} при выполнении A_e задачи должно удовлетворять следующим условиям: $\theta_{min}^e \leq \theta_{A_e}^e \leq \theta_{max}^e$. Соответственно, используя вышеизложенный подход, можно реализовать оценку количества нарушений ТР в форме соответствующего параметра для нечеткой модели.

На рис. 4 представлен нечеткий логический вывод на основе сформированных правил.

На этапе высокоуровневого проектирования определяются следующие входные нечеткие переменные: x = «количество нарушений ТР», y = «затраченное время» и z = «динамичность среды». Каждая переменная задается кортежем из трех лингвистических переменных – <«низкое», «среднее», «высокое»> с соответствующими ФП μ_L – для «низкое», μ_S – для «среднее», μ_R – для «высокое».

Если входные переменные x и y описывают производительность работы оператора, то z определяет реакцию среды на основе показателей производительности оператора. Будем полагать, что чем выше значение «динамичность среды», тем больше параметров среды будут изменять свои характеристики. В свою очередь, это будет влиять на сложность выполнения соответствующей задачи.

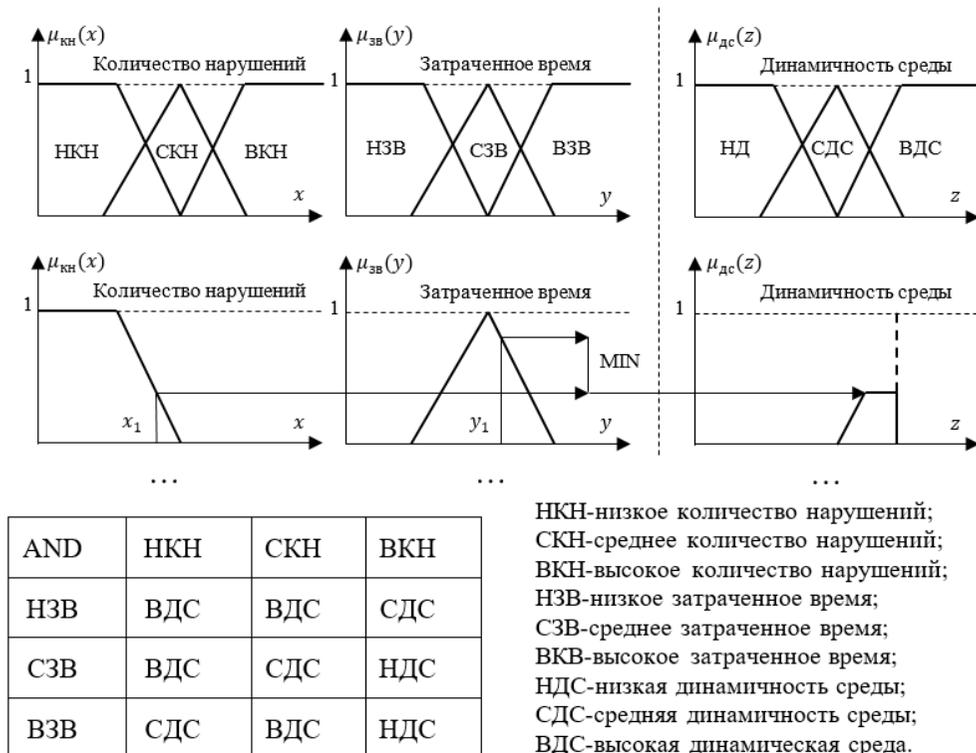


Рис. 4. Реализация нечеткого логического вывода на основе предложенной базы правил

Введем следующие нечеткие переменные: p_n = «параметр_n» для учета параметров среды, которые влияют на степень сложности операторской работы, где n – количество таких параметров. Каждый p_n -параметр представлен кортежем из трех лингвистических переменных – <«L», «S», «R»> по уровню вклада трудоемкости при реализации технологической операции (L – низкий вклад, S – средний вклад, R – высокий вклад).

Соответственно, справедлива нечеткая связь между параметрами z и p , потому что каждый из них задает степень сложности реализации операторской задачи. Зададим связь в виде следующего соответствия: $Q = \{ \langle z, p \rangle, \langle \mu_Q(z, p) \rangle \}$, что может указывать на зависимость лингвистических переменных для «НДС»: «L», «СДС»: «S», «ВДС»: «R».

Таким образом, используя совокупность p_n и выходной параметр z , можно сформировать следующую базу правил:

ПРАВИЛО^(s): **IF** (p_1 это P_1^s **AND** p_2 это P_2^s ... **AND** p_n это P_n^s) **THEN** (z_n^s это $\mu_{ДС}(z_n^s)$), где s – количество нечетких правил для параметров среды.

Существенным недостатком нечеткого моделирования является увеличение базы правил с ростом числа параметров p_n : $\text{Base}=3^n$. Кроме этого, большое количество правил может увеличивать вычислительную нагрузку. Для преодоления этой проблемы используем генетический алгоритм (ГА) с целью подбора оптимального правила на каждой технологической итерации.

При реализации ГА производится кодирование ФП для входных параметров p_n в порядке возрастания вклада трудоемкости от меньшего к большему для формирования j -столбца и i -строки матрицы D . Пример реализации кодирования и операции начальной инициализации ГА приведен на рис. 5.

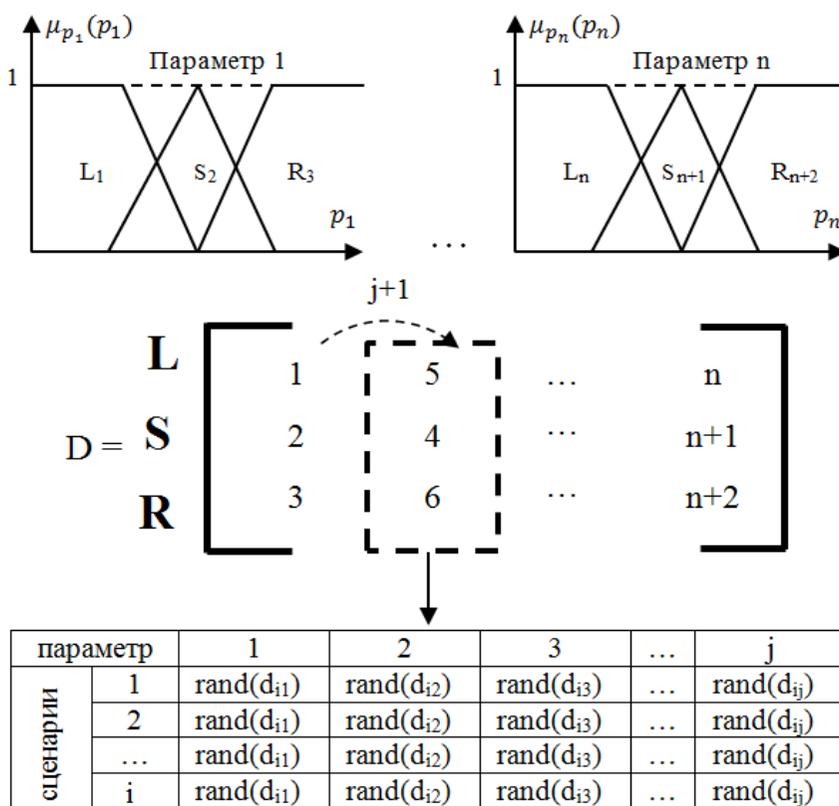


Рис. 5. Реализация кодирования и получение набора потенциальных сценариев с использованием ГА

На этапе инициализации алгоритма сканируются столбцы ($j + 1$) матрицы D с последующим случайным выбором закодированного параметра для получения вектора потенциального сценария i число раз.

В качестве целевой функции (обозначим за $ЦФ$) используется подсчет «попаданий» (обозначим за Re_i для i -строки матрицы D) элементов матрицы d_{ij} в область определения соответствующей ФП для выходной нечеткой переменной z_n («динамичность среды»):

$$Re_i(z_n, d_{ij}) = \begin{cases} 1, & z_n \text{ есть НДС} \wedge d_{ij} \in L, \\ 1, & z_n \text{ есть СДС} \wedge d_{ij} \in S, \\ 1, & z_n \text{ есть ВДС} \wedge d_{ij} \in R, \\ 0, & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

Целевая функция для i -строки матрицы D определяется как сумма «попаданий» Re_i в соответствующую область определения для каждого элемента d_{ij} :

$$ЦФ = \sum_{i=1}^j Re_i.$$

Реализация оператора выбора оптимальных потенциальных сценариев осуществляется с использованием метода «рулетки». Аккумуляция полезных признаков осуществляется с помощью оператора одноточечного кроссинговера. Предотвращение преждевременной сходимости алгоритма осуществляется с использованием оператора мутации с вероятностью 0,3.

В конечном итоге вычисляется сценарий, состоящий из наборов признаков, которые представляются в виде нечеткого правила с последующей дефаззификацией для каждого входного параметра p_n .

Полученные результаты реализации алгоритма автоматизации генерации сценариев в тренажере для подготовки операторов транспортно-технологических машин

Для проверки целесообразности использования предложенного алгоритма для подготовки оператора был разработан тренажер, имитирующий работу трелевочного трактора для лесозаготовительных работ, – форвардер марки John Deere 1910E. Общий вид программного интерфейса представлен на рис. 6.



Рис. 6. Тренажер для подготовки операторов транспортно-технологических машин. Момент захвата сортимента в трехмерном пространстве

В качестве параметров среды, определяющих трудоемкость технологического процесса, были определены: шумоизоляция, видимость, диаметр сортимента, длина сортимента, горизонтальный угол наклона машины, вертикальный угол наклона машины. Допустимые границы кинематических параметров машины при выполнении соответствующей задачи устанавливались в соответствии с требованиями по эксплуатации трелевочного трактора и по минимизации производительных движений.

Для оценки эффективности подготовки курсантов были реализованы три программные модификации тренажера. Первая не включала разработанный алгоритм, тогда как вторая включала. Третья модификация не включала алгоритм, но реализовывала сценарий повышенной сложности с использованием параметров среды, вносящих высокую степень трудоемкости при реализации операторской задачи. На первой программной модификации обучалась контрольная группа, на второй – экспериментальная. После обучения обе группы оценивались на третьей программной модификации тренажера. Полученные результаты сведены в таблицу.

Результаты экспериментальных исследований реализованного алгоритма*

Погружение сортимента			
Обучение (группы)		Оценка (группы)	
Контрольная	Экспериментальная	Контрольная	Экспериментальная
$M_{x(k)} = 6,3428$	$M_{x(э)} = 6,4571$	$M_{x(k)} = 7,62857$	$M_{x(э)} = 8,51428$
$M_{x(k)} - M_{x(э)} = 0,1143(1\% \uparrow)$		$M_{x(k)} - M_{x(э)} = 0,88571(11,6\% \uparrow)$	
Количество нарушений технологического регламента			
Обучение (группы)		Оценка (группы)	
Контрольная	Экспериментальная	Контрольная	Экспериментальная
$M_{x(k)} = 5,11428$	$M_{x(э)} = 9,68571$	$M_{x(k)} = 10,05714$	$M_{x(э)} = 2$
$M_{x(k)} - M_{x(э)} = 4,57143(89\% \uparrow)$		$M_{x(k)} - M_{x(э)} = 8,05714 (80\% \downarrow)$	
Среднее время за единицу операции (в сек.)			
Обучение (группы)		Оценка (группы)	
Контрольная	Экспериментальная	Контрольная	Экспериментальная
$M_{x(k)} = 46,38685$	$M_{x(э)} = 47,181428$	$M_{x(k)} = 52,069857$	$M_{x(э)} = 46,7711428$
$M_{x(k)} - M_{x(э)} = 0,1143(0,2\% \uparrow)$		$M_{x(k)} - M_{x(э)} = 5,298708 (10,2\% \downarrow)$	

* $M_{x(k)}$ – среднее значение для контрольной группы, $M_{x(э)}$ – среднее значение для экспериментальной группы.

Полученные результаты для контрольной и экспериментальной групп различаются на высоком уровне статистической значимости. На этапе обучения показатели производительности снижались у экспериментальной группы в части количества нарушений ТР, а также среднего времени выполнения технологического цикла. На этапе оценки наблюдался прирост производительности в части погрузки сортимента, времени выполнения операции и снижение количества нарушений ТР на 80 % для экспериментальной группы.

Для подтверждения гипотезы о насыщении базы знаний оператора было проведено ЭЭГ-исследование, результаты которого представлены на рис. 7.

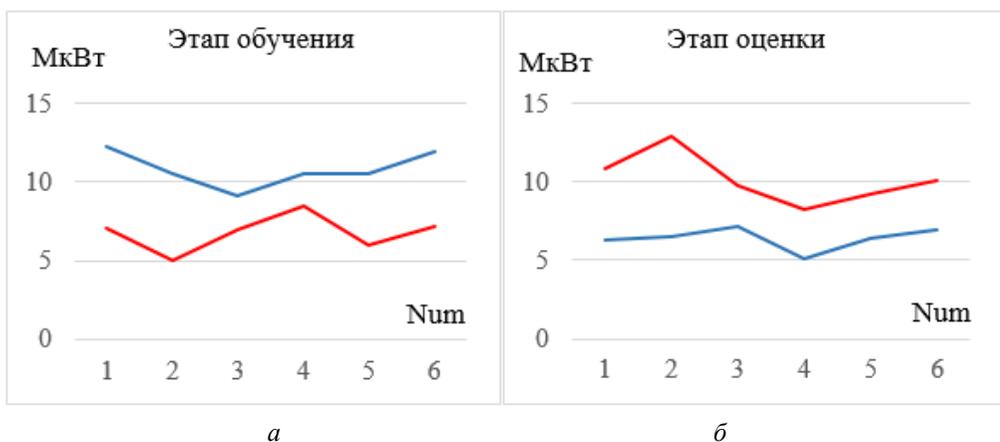


Рис. 7. Результаты ЭЭГ-исследований спектра мощности:
 а – этап обучения, б – этап оценки; Num – номер испытуемого;
 красная линия – контрольная группа;
 синяя линия – экспериментальная группа

Из графиков видно, что на этапе обучения спектр мощности у экспериментальной группы выше, а на этапе оценки – ниже по сравнению с контрольной группой. Это может быть связано с интенсификацией подготовки через автоматизацию генерации сценариев операторского реагирования и принятий решений. После оптимального проигрывания возможных ситуаций с точки зрения адаптации среды к психофизиологическим способностям курсанта снижается когнитивная нагрузка на этапе оценки для экспериментальной группы. Данное предположение, по крайней мере, не отвергает эффективность реализованного алгоритма и может объяснить прирост производительности на этапе оценки производительности обучаемых.

Заключение

Разработана методика проектирования иммерсивного тренажера с использованием интеллектуального алгоритма автоматизации сценариев для профессиональной подготовки операторов транспортно-технологических машин:

- разработанная методика учитывает очередность обработки и восприятия информации оператором на сенсорном, когнитивном и моторном уровнях, позволяет связать операторские задачи в иммерсивной среде с указанными уровнями восприятия информации оператором;

- проектирование обучающей среды осуществляется в два этапа: на низком уровне выбираются простейшие акты операторской деятельности и подбираются психофизиологические модели для оценки производительности работы оператора; на высоком уровне выбираются метрики производительности и параметры имитационной среды, влияющие на сложность выполнения задачи. На основе выбранных параметров реализуется алгоритм автоматической генерации сценариев;

- разработан алгоритм автоматической генерации сценариев, который показал свою целесообразность на основе полученных результатов экспериментальных исследований: прирост производительности в части понижения времени выполнения операции на 10,2 %, снижение количества нарушений ТР на 80 %, увеличение количества погруженного сортамента на 11,6 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ложкин Г.В., Повакель Н.И.* Практическая психология в системах «человек – техника». – 2003.
2. *Петухов И.В., Стешина Л.А.* Эргатические системы: техногенная безопасность. – 2012.
3. *Назин В.А.* Автоматизированные системы обучения персонала технологических установок // Автоматизация в промышленности. – 2006. – № 6.
4. *Соркин Л.Р.* Имитационное моделирование для обучения операторов и оптимизации производства // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2008. – № 8.
5. *Дозорцев В.М.* Разработка тренажера для обучения операторов технологических процессов: основные участники, их роли и взаимодействия // Автоматизация в промышленности. – 2009. – № 5. – С. 10–12.
6. *Симонов С.Н., Частихин А.А.* Особенности образовательного процесса в инженерных вузах ВВС и роль психофизической подготовки курсантов // Образование в регионе. – 2006. – № 18. – С. 34–38.
7. *Gunn T. et al.* The use of virtual reality simulation to improve technical skill in the undergraduate medical imaging student // Interactive Learning Environments. – 2017. – P. 1–8.
8. *Everson T. et al.* Astronaut training using virtual reality in a neutrally buoyant environment // DesTech 2017: Proceedings of the 2017 International Conference on Design and Technology. – Knowledge E., 2017. – P. 319–327.
9. *Greenwald S. et al.* Technology and applications for collaborative learning in virtual reality. – 2017.
10. *Berg L.P., Vance J.M.* Industry use of virtual reality in product design and manufacturing: a survey // Virtual reality. – 2017. – Vol. 21. – № 1. – P. 1–17.
11. *Neumann D.L. et al.* A systematic review of the application of interactive virtual reality to sport // Virtual Reality. – 2017. – P. 1–16.
12. *Prasolova-Førland E. et al.* Preparing for International Operations and Developing Scenarios for Inter-cultural Communication in a Cyberworld: A Norwegian Army Example // Transactions on Computational Science XXIII. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2014. – P. 118–138.
13. *Zyda M.* From visual simulation to virtual reality to games // Computer. – 2005. – Vol. 38. – № 9. – P. 25–32.
14. *Lin C.H., Hsu P.H.* Integrating Procedural Modelling Process and Immersive VR Environment for Architectural Design Education // MATEC Web of Conferences. – EDP Sciences, 2017. – Vol. 104. – P. 03007.
15. *Tichon J., Burgess-Limerick R.* A review of virtual reality as a medium for safety related training in mining // Journal of Health & Safety Research & Practice. – 2011. – Vol. 3. – № 1. – P. 33–40.
16. *Gander P.* Two myths about immersion in new storytelling media. – Lund University, 1999. Immersion and Emotion: Their Impact on the Sense of Presence.
17. *Baños R.M. et al.* Immersion and emotion: their impact on the sense of presence // CyberPsychology & Behavior. – 2004. – Vol. 7. – № 6. – P. 734–741.
18. *Petukhov I., Steshina L., Glazyrin A.* Application of virtual environments in training of ergatic system operators // Journal of Applied Engineering Science. – 2018. – Т. 16. – № 3. – С. 398–403.
19. *Latta J.N., Oberg D.J.* A conceptual virtual reality model // IEEE Computer Graphics and Applications. – 1994. – Т. 14. – № 1. – P. 23–29.
20. *Parés N., Parés R.* Towards a model for a virtual reality experience: the virtual subjectiveness // Presence: Teleoperators and Virtual Environments. – 2006. – Vol. 15. – № 5. – P. 524–538.
21. *Jerald J.* The VR book: Human-centered design for virtual reality. – Morgan & Claypool, 2015.
22. *Liu Y.* Queuing Network-Model Human Processor (QN-MHP): A Computational Architecture for Multitask Performance in Human-Machine Systems / Y. Liu, R. Feyen, O. Tsimhoni // ACM Transactionson Computer-Human Interaction. – 2006. – Vol. 13. – No 1. – P. 37–70.
23. *Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л.* Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. – Горячая линия–Телеком, 2013.
24. *Петухов И.В.* Моделирование успешности профессиональной деятельности оператора эргатических систем // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер. Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2012. – № 1. – С. 51–59.

25. Курасов П.А. Обоснование параметров и режимов работы учебных тренажеров лесозаготовительных машин: дис. ... канд. техн. наук. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2018.

Статья поступила в редакцию 1 апреля 2019 г.

TECHNIQUE OF DESIGNING IMMERSIVE SIMULATOR FOR AUTOMATION OF PROFESSIONAL TRAINING FOR OPERATORS

A.E. Glazyrin, L.A. Steshina, I.V. Petukhov

Volga State University of Technology
3, lenina sq., Yoshkar-Ola, Mari El Republic, 424000, Russian Federation

Abstract. *The technique of immersive simulator designing is presented. It is based on the smart training automation algorithm for operators professional training in ergatic control systems. The technique consists of two levels: low and high level designing. The low-level designing defines the simplest operator's activities which can be evaluated by means of psychophysiological tests. The high-level designing defines the performance selection metrics: time costs and operating procedure. At each design level, models of fuzzy inference are formed. They include a unified set of rules based on the operator's performance parameters and the learning environment feedback as difficulty degree changes of the present scenario. The specific feature of the high-level designing is the growing of the rules set because of the increasing number of the environment parameters influencing the difficulty degree of the present scenario. For solving this problem, a genetic algorithm is used, which is a heuristic combinatorial search for the optimal rule for fuzzy inference. Based on the proposed design methodology, a simulator was developed for training transport-technological machine operators. Experimental data showed an increase in productivity in terms of loading the assortment by 11.6%, a decrease in the time to complete one technological cycle by 10.2% and a decrease in the number of errors by 80%. Thus, the feasibility of using the design methodology in industry for training operators was shown.*

Keywords: *intellectual system, simulation environment, fuzzy model, genetic algorithm, ergatic control systems, human-machine interaction, human-machine system.*

REFERENCES

1. *Lozhkin G.V., Povykel N.I.* Practical psychology in the systems of "man-technician". – 2003.
2. *Petukhov I.V., Steshina L.A.* Ergatic systems: technological safety. – 2012.
3. *Nazin V.A.* Automated systems of personnel training of technological installations // Automation in industry. 2006. № 6.
4. *Sorkin L.R.* Simulation modeling for operator training and production optimization // Industrial control systems and controllers. 2008. № 8.
5. *Dozortsev V. M.* Development of a simulator for training technological process operators: the main participants, their roles and interactions // Automation in industry. – 2009. – no. 5. – p. 10–12.
6. *Simonov S.N.* Features of the educational process in engineering universities of the Air Force and the role of psychophysical training of cadets / Simonov S.N., Chastikhin A.A. // Education

*Andrey E. Glazyrin, Postgraduate Student.
Lyudmila A. Steshina (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Igor V. Petukhov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.*

- in the region. – 2006. – No. 18. – S. 34–38.
7. *Gunn T. et al.* The use of virtual reality simulation to improve technical skill in the undergraduate medical imaging student // *Interactive Learning Environments*. – 2017. – P. 1.
 8. *Everson T. et al.* Astronaut training using virtual reality in a neutrally buoyant environment // *DesTech 2017: Proceedings of the 2017 International Conference on Design and Technology*. – Knowledge E., 2017. – P. 319–327.
 9. *Greenwald S. et al.* Technology and applications for collaborative learning in virtual reality. – 2017.
 10. *Berg L.P., Vance J.M.* Industry use of virtual reality in product design and manufacturing: a survey // *Virtual reality*. – 2017. – Vol. 21. – № 1. – P. 1–17.
 11. *Neumann D.L. et al.* A systematic review of the application of interactive virtual reality to sport // *Virtual Reality*. – 2017. – P. 1–16.
 12. *Prasolova-Førland E. et al.* Preparing for International Operations and Developing Scenarios for Inter-cultural Communication in a Cyberworld: A Norwegian Army Example // *Transactions on Computational Science XXIII*. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2014. – P. 118–138.
 13. *Zyda M.* From visual simulation to virtual reality to games // *Computer*. – 2005. – Vol. 38. – № 9. – P. 25–32.
 14. *Lin C.H., Hsu P.H.* Integrating Procedural Modelling Process and Immersive VR Environment for Architectural Design Education // *MATEC Web of Conferences*. – EDP Sciences, 2017. – Vol. 104. – P. 03007.
 15. *Tichon J., Burgess-Limerick R.* A review of virtual reality as a medium for safety related training in mining // *Journal of Health & Safety Research & Practice*. – 2011. – Vol. 3. – № 1. – P. 33–40.
 16. *Gander P.* Two myths about immersion in new storytelling media. – Lund University, 1999. Immersion and Emotion: Their Impact on the Sense of Presence.
 17. *Baños R.M. et al.* Immersion and emotion: their impact on the sense of presence // *CyberPsychology & Behavior*. – 2004. – Vol. 7. – № 6. – P. 734–741.
 18. *Petukhov I., Steshina L., Glazyrin A.* Application of virtual environments in training of ergonomic system operators // *Journal of Applied Engineering Science*. – 2018. – T. 16. – № 3. – C. 398–403.
 19. *Latta J.N., Oberg D.J.* A conceptual virtual reality model // *IEEE Computer Graphics and Applications*. – 1994. – T. 14. – № 1. – P. 23–29.
 20. *Parés N., Parés R.* Towards a model for a virtual reality experience: the virtual subjectiveness // *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*. – 2006. – Vol. 15. – № 5. – P. 524–538.
 21. *Jerald J.* The VR book: Human-centered design for virtual reality. – Morgan & Claypool, 2015.
 22. *Liu Y.* Queuing Network-Model Human Processor (QN-MHP): A Computational Architecture for Multitask Performance in Human-Machine Systems / Y. Liu, R. Feyen, O. Tsimhoni // *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*. – 2006. – Vol. 13. – No 1. – P. 37–70.
 23. *Rutkovskaya D., Pilinsky M., Rutkovsky L.* Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems. – Hotline–Telecom, 2013.
 24. *Petukhov I.V.* Modeling the success of the professional activity of the operator of ergonomic systems // *Bulletin of the Volga State Technological University. Series: Radio engineering and infocommunication systems*. – 2012. – № 1. – p. 51–59.
 25. *Kurasov P.A.* Justification of the parameters and modes of operation of training simulators for forest machines: dis. ... Candidate / Can. those. sciences. PGTU, Yoshkar-Ola, 2018.