

СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СИСТЕМ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДЛЯ ТРЕНАЖЕРНЫХ КОМПЛЕКСОВ

А. Е. Архипов, С. В. Карпушкин

*Кафедра «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»,
alexearh@gmail.com; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

Ключевые слова: корреляционные матрицы; система визуализации; структурно-параметрический синтез; тренажерный комплекс.

Аннотация: Предложена методика синтеза систем визуализации (СВ) тренажерных комплексов (ТК) для отраслей промышленности, где невозможно обучение на реально действующих объектах. Методика включает модели описания и оценки эффективности СВ, постановку задачи структурно-параметрического синтеза СВ ТК, алгоритм оценки компонентов визуализации, основанный на ранжировании компонентов СВ с применением корреляционных матриц. Приведен пример практического применения разработанной методики для проектирования СВ ТК профессиональной подготовки шахтеров к деятельности в штатных и аварийных ситуациях.

Введение

Тренажерная подготовка наиболее востребована и получила ускоренное развитие при подготовке к деятельности в отраслях с высокими рисками, где особенно велика значимость человеческого фактора и невозможно обучение на реально действующих объектах: в оборонном комплексе, при работе по ликвидации чрезвычайных ситуаций, в медицине и энергетике.

Требования к параметрам систем визуализации (СВ) в каждой из этих областей применения тренажеров могут значительно отличаться. В ряде отраслей точность воспроизведения реальных процессов должна быть максимальной, что предъявляет высокие требования к аппаратному и программному обеспечению, и, как следствие, повышает стоимость СВ. В иных отраслях, напротив, даже низкокачественная и упрощенная имитация процессов, происходящих в технической системе, позволит обеспечить требуемый уровень подготовки специалистов с минимальными издержками.

Вопросы выбора технологий и средств визуализации рассматривались в работах [1, 2], однако единая универсальная классификация средств и технологий визуализации для тренажерных комплексов (ТК) не сформулирована, отсутствует теоретическое обоснование выбора компонентов СВ, учитывающее критерии качества освоения профессионально важных компетенций и стоимости системы.

Специфике разработки СВ ТК посвящены публикации [3, 4]. В результате их анализа установлено, что каждая предметная область обладает своей спецификой, оказывающей непосредственное влияние на структуру ТК и его функционирование. Задачи синтеза структуры СВ решаются с применением экспертных оценок,

что приводит к высокой субъективности получаемых результатов и, следовательно, не обеспечивают оптимальности итогового решения с учетом качественно-стоимостных характеристик.

Целью настоящей работы является повышение экономической эффективности и качества подготовки специалистов эргатических систем к выполнению профессиональных задач с применением ТК за счет выбора оптимальной структуры и параметров СВ. Для этого необходимо формализовать процесс профессиональной подготовки на ТК, разработать модель описания и оценки эффективности, алгоритм структурно-параметрического синтеза СВ ТК, то есть выбора ее оптимальной конфигурации.

Модель описания и оценки эффективности системы визуализации тренажерного комплекса

Предлагаемая модель описания и оценки эффективности СВ ТК представляет собой кортеж

$$M_{VS}(TS, P) = \langle HW_{VS}, SW_{VS}, R \rangle, \quad (1)$$

где TS – техническая система, процессы которой реализуются в ТК; P – модель деятельности специалистов при использовании тренажерного комплекса; $HW_{VS} = \{hm_{VSi}\} \subset HW$ – множество аппаратных компонентов, используемых в системе визуализации ТК из множества аппаратных компонентов HW ; $SW_{VS} = \{sm_{VSi}\} \subset SW$ – множество программных компонентов, используемых в системе визуализации ТК из множества программных компонентов SW ; $\{hm_{VSi}\}$, $\{sm_{VSi}\}$ – аппаратная часть и программное обеспечение i -го компонента СВ; $R = \langle R_S, R_T, R_C, R_{TT}, R_{QT} \rangle$ – совокупность критериев оценки эффективности СВ ТК; $R_S = \{R_{Si}\}$, $R_T = \{R_{Ti}\}$; $R_C = \{R_{Ci}\}$; $R_{TT} = \{R_{TTi}\}$, $R_{QT} = \{R_{QTi}\}$ – оценки компонентов СВ: соответственно стоимость и продолжительность разработки; стоимость эксплуатации; продолжительность и качество подготовки.

Структура системы визуализации S_{VS} определяет набор программных и аппаратных компонентов (модулей m_k), используемых при ее реализации:

$$S_{VS} \subseteq HW_{VS} \times SW_{VS}, S_{VS} = \{m_k\} \subseteq \{hm_{VSi}\} \cup \{sm_{VSi}\}. \quad (2)$$

При этом структура S_{VS} определяет лишь категории используемых компонентов, например, шлем VR (виртуальной реальности), монитор, контроллеры, виртуальная сцена с набором трехмерных объектов.

Значения параметров системы визуализации $P_{VS} = \{p_{VSi}\}$ определяют выбор конкретных моделей аппаратных компонентов $MHW_{VS} = \{mhm_{VSi}\}$ и настройки программных модулей $MSW_{VS} = \{msm_{VSi}\}$:

$$\begin{aligned} HW_{VS} &\xrightarrow{P_{VS}} MHW_{VS}; \\ SW_{VS} &\xrightarrow{P_{VS}} MSW_{VS}. \end{aligned} \quad (3)$$

Каждому конечному программному компоненту msm_{VSi} или аппаратному компоненту mhm_{VSi} СВ соответствует оценка, определяющая его качественные и количественные характеристики:

$$rhm_{VSi} = \langle R_{HWi}, R_{Si}, R_{Ti}, R_{Ci}, R_{TTi}, R_{QTi} \rangle, rsm_{VSi} = \langle R_{SWi}, R_{Si}, R_{Ti}, R_{Ci}, R_{TTi}, R_{QTi} \rangle, \quad (4)$$

где R_{HWi} – множество характеристик аппаратного компонента mhm_{VSi} , включающее его потребительские свойства (разрешение экрана, вес, стоимость, размеры);

R_{SWi} – множество характеристик программного компонента msm_{VS_i} , включающее его потребительские свойства (объем занимаемой памяти, требования к вычислительной мощности, используемые библиотеки программного кода, язык программирования).

Стоимость разработки программного обеспечения i -го компонента СВ рассчитывается по формуле

$$R_{Si} = (sd_i + sa_i), \quad (5)$$

где sd_i , sa_i – стоимости разработки соответственно программного обеспечения компонента и дополнительного программного обеспечения для обеспечения взаимосвязанной работоспособности других элементов системы визуализации (для расчета применяется методика СОСОМО II [5, 6]).

Продолжительность разработки программного обеспечения i -го компонента СВ рассчитывается по формуле

$$R_{Ti} = (td_i + ta_i), \quad (6)$$

где td_i , ta_i – продолжительности разработки соответственно системы и дополнительного программного обеспечения для обеспечения взаимосвязанной работоспособности других элементов системы визуализации (по методике СОСОМО II).

Стоимость эксплуатации i -го компонента СВ можно найти по формуле

$$R_{Ci} = S_f + S_p + S_a + S_e + S_r + S_{em} + S_{oh}, \quad (7)$$

где S_f – затраты на покупку и доставку компонента; S_p – зарплата обслуживающего персонала ТК; S_a – амортизационные отчисления; S_e – затраты на потребляемые энергоресурсы; S_r – затраты на ремонт или восстановление; S_{em} – затраты на приобретение расходных материалов; S_{oh} – накладные расходы.

Продолжительность R_{TTi} освоения i -го компонента СВ определяется в результате экстраполяции эмпирических оценок предыдущих испытаний на аналогичных ТК

$$R_{TTi} = \frac{1}{nP} \sum_{j=1}^{nP} tt_j(v_i), \quad (8)$$

где $tt_j(v_i)$ – общее время освоения v_i -компонента j -м специалистом, $v_i = mhm_{VS_i} \vee msm_{VS_i}$; nP – общее количество специалистов.

Качество R_{QTi} освоения i -го компонента СВ зависит от успешности выполнения тренировочных заданий на некотором множестве аналогичных ТК с типовым набором компонентов СВ

$$R_{QTi} = \frac{1}{nPnK} \sum_{j=1}^{nP} \sum_{k=1}^{nK} \frac{vp_{jk}(v_i)}{v_{jk}}, \quad (9)$$

где $vp_{jk}(v_i)$ – количество выполненных заданий с использованием компонента v_i в рамках проверки освоения k -й компетенции; v_{jk} – полный объем заданий в рамках проверки освоения k -й компетенции; nK – количество анализируемых компетенций.

Задача структурно-параметрического синтеза СВ ТК формулируется следующим образом: определить такое множество элементов структуры $S^*_{VS} \subseteq S_{VS}$ и параметров $P^*_{VS} \subseteq P_{VS}$ аппаратных и программных модулей СВ ТК, при которых оценки системы визуализации достигают экстремальных значений, а именно:

стоимость и продолжительность разработки, а также стоимость эксплуатации и продолжительность подготовки стремятся к минимуму, а качество подготовки – к максимуму:

$$\{S_{VS}^*, P_{VS}^*\} = \begin{cases} \arg \min(R_S) \\ S_{VS}, P_{VS} \\ \arg \min(R_T) \\ S_{VS}, P_{VS} \\ \arg \min(R_C) \\ S_{VS}, P_{VS} \\ \arg \min(R_{TT}) \\ S_{VS}, P_{VS} \\ \arg \max(R_{QT}) \\ S_{VS}, P_{VS} \end{cases} \quad (10)$$

при выполнении соотношений (2) – (9) модели описания и оценки эффективности СВ и следующих ограничений:

– на соответствие осваиваемых компетенций PK требуемым PK^*

$$PK \subset PK^*; \quad (11)$$

– экономические ресурсы:

$$R_S + R_C \leq E^*; \quad (12)$$

– продолжительность освоения:

$$R_{TT} \leq t_{TR}; \quad (13)$$

– совместимость выбранных программных и аппаратных модулей, где PK^* – набор необходимых компетенций; E^* – максимально допустимые затраты на реализацию и обслуживание системы визуализации; t_{TR} – максимально возможная продолжительность их освоения.

Методика синтеза системы визуализации тренажерного комплекса

Предлагаемая методика синтеза СВ ТК, представленная на рис. 1 в виде функциональной диаграммы в нотации IDEF0, включает следующие этапы:

A1. Анализ процессов технической системы. В ходе данного этапа формируется формализованное представление объектов, субъектов и процессов, протекающих в целевой предметной области в виде модели описания технической системы.

A2. Формирование модели деятельности специалистов в результате формализации правил, алгоритмов действия специалистов, для которых разрабатывается ТК.

A3. Постановка задачи структурно-параметрического синтеза системы визуализации. На основе технического задания и формализованных моделей ставится задача (10), (2) – (9), (10) – (13) для определенной технической системы с указанием набора входных переменных и интервалов их допустимых значений.

A4. Определение набора компонентов системы визуализации.

A5. Определение оптимальных параметров компонентов системы визуализации: параметрический синтез, в ходе которого для каждого выбранного компонента проводится его уточнение по двум направлениям: определению конкретной модели аппаратного компонента; выбору конкретных параметров программного компонента, которые осуществляются в результате полного перебора допустимых вариантов.

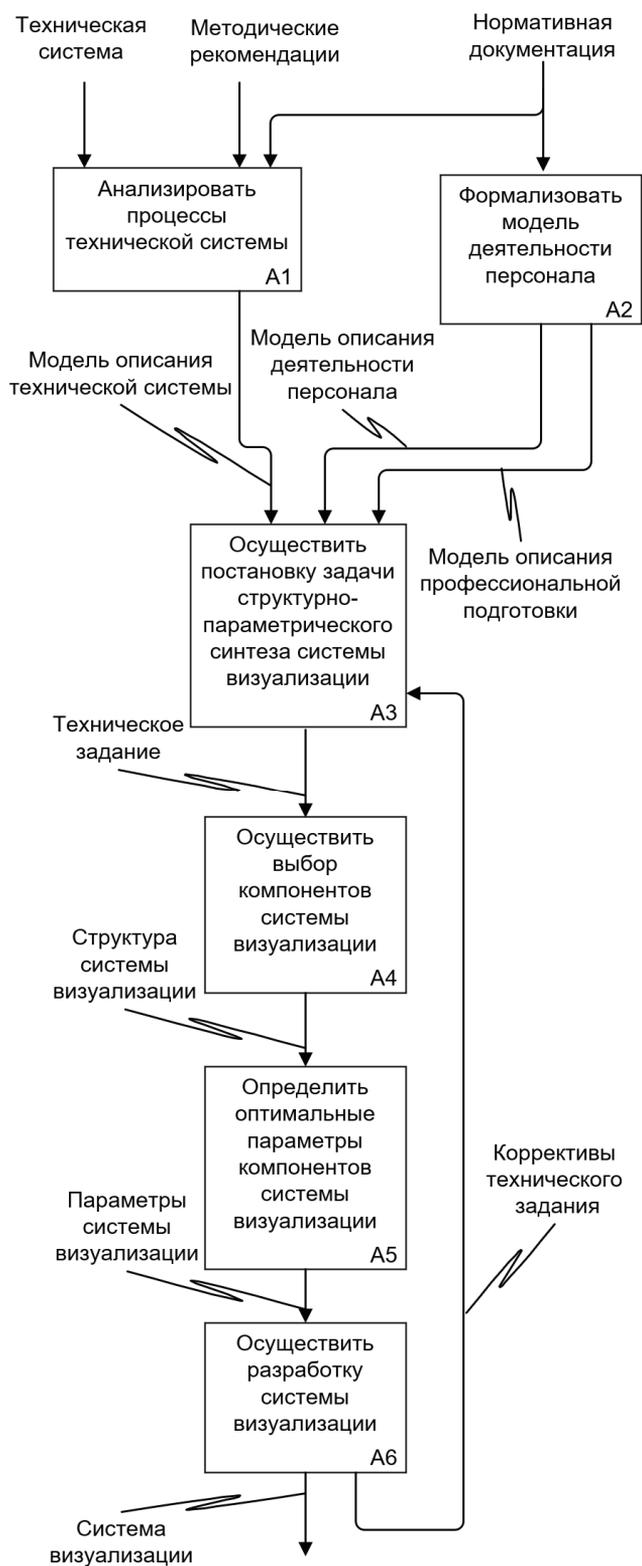


Рис. 1. Методика структурно-параметрического синтеза СВ ТК

А6. Разработка системы визуализации. На основе сформированных моделей деятельности специалистов, процесса профессиональной подготовки, выбранной структуры и параметров системы визуализации осуществляется программно-аппаратная реализация системы визуализации.

Ключевым этапом представленной методики является определение набора компонентов визуализации согласно алгоритму, основанному на использовании корреляционных матриц оценки качества компонентов по различным метрикам.

Выделяется 14 метрик оценки качества компонентов визуализации, полученных на основе анализа классификации средств и технологий визуализации: 1) точность восприятия размеров 3D-объектов; 2) точность восприятия расстояний; 3) уровень погружения, объемность визуализации; 4) работа с высокополигональными сценами; 5) возможность высокочастотной отрисовки отображения; 6) точность взаимодействия с «крупными» объектами; 7) точность взаимодействия с «мелкими» объектами; 8) реалистичность взаимодействия; 9) точность перемещения; 10) реалистичность перемещения; 11) точность позиционирования; 12) свойства звукоизоляции; 13) объемность звучания; 14) реалистичность звучания.

Метрики распределены по четырем категориям:

1. Отображение (метрики 1 – 5) – технические возможности отображения различной графической информации.

2. Взаимодействие (метрики 6 – 8) – оценка возможности и достоверности взаимодействий с объектами в виртуальном пространстве.

3. Перемещение (метрики 9 – 11) – уровень возможности перемещения графического представления специалиста (виртуального аватара) в виртуальном пространстве.

4. Звук (метрики 12 – 14) – качество звукового сопровождения.

Формируются основные категории компонентов СВ, соответствующие категориям метрик:

1. Отображение – проектор, смартфон, шлем VR, очки AR (дополненной реальности), очки MR (смешанной реальности).

2. Взаимодействие – клавиатура и мышь, «игровые» контроллеры, контроллеры VR/AR/MR, система отслеживания движений, имитатор специализированного инструмента.

3. Перемещение – клавиатура и мышь, «игровые» контроллеры, контроллеры VR/AR/MR, система отслеживания движений, VR-платформы, уникальная система создания физических нагрузок.

4. Звук – одноканальная система, системы объемного звучания, наушники, системы специализированных сигналов (сирены).

Выявляются различия между компонентами каждой из категорий путем разработки тренажеров с набором типовых компонентов и их применения для сравнения эффективности реализации различных метрик конкретной категории по результатам тестирования фокус-группой пользователей. На основе собранных оценок компонентов фокус-группой осуществляется построение корреляционных матриц где строки соответствуют компонентам СВ, а столбцы – метрикам оценки их качества. Так как компоненты распределены по четырем категориям в соответствии с группами метрик, то формируются четыре матрицы, каждая из которых иллюстрирует степень применимости компонента (от 0 до 10) по каждой метрике. Очевидно, что для формирования оптимальной структуры СВ, с учетом требований технического задания к компонентам, необходимо выбирать те, которым соответствуют максимальные оценки. Полученные корреляционные матрицы представлены в табл. 1 – 4.

Как видно, метрики отражения наилучшим образом реализует шлем VR, метрики взаимодействия – имитатор специального инструмента, метрики перемещения – система создания физических нагрузок, метрики звукового сопровождения – системы специальных сигналов.

Таблица 1

Оценки метрик отображения

Метрика	1	2	3	4	5	Итог
Монитор	5	2	8	10	9	6,8
Проектор	6	3	7	10	5	6,2
Смартфон	3	1	5	3	7	3,8
Шлем VR	8	9	10	8	10	9
Очки AR	1	0	2	2	7	2,4
Очки MR	10	10	8	3	6	7,4

Таблица 2

Оценки метрик взаимодействия

Метрика	6	7	8	Итог
Клавиатура и мышь	4	2	2	2,67
«Игровые» контроллеры	5	3	5	4,33
Контроллеры VR, AR, MR	6	4	6	5,33
Система отслеживания движений	9	8	8	8,33
Имитатор специального инструмента	8	10	10	9,33

Таблица 3

Оценки метрик перемещения

Метрика	9	10	11	Итог
Клавиатура и мышь	2	1	3	2
«Игровые» контроллеры	3	2	5	3,3
Контроллеры VR, AR, MR	4	3	8	5
Система отслеживания движений	9	10	10	9,67
VR-платформы	8	8	9	8,34
Система создания физических нагрузок	10	10	10	10

Таблица 4

Оценки метрик звукового сопровождения

Метрика	12	13	14	Итог
Одноканальная система	2	1	3	2
Системы объемного звучания	9	10	9	9,3
Наушники	10	10	8	9,3
Системы специальных сигналов	10	10	10	10

Практическое применение методики

Рассмотрим применение разработанной методики структурно-параметрического синтеза СВ ТК профессиональной подготовки шахтеров к деятельности в штатных и аварийных ситуациях. Спроектированная СВ должна быть адаптирована ко всем аспектам деятельности обучающихся в различных режимах работы, а также в чрезвычайных ситуациях.

На этапе А1 формируется модель описания шахты, в которую входит формализованное представление основных объектов шахты и процессов их взаимодействия. К числу основных объектов отнесены: огнетушитель, шкаф, вагонетка, телефон, дверь, распределительный щит. Возможные действия оператора над ними: взятие предмета, его перемещение, взаимодействие с ним и т.д.

На этапе А2 формализована модель деятельности персонала, включающая следующие операции: обнаружение источника пожара, перемещение к телефону, взятие трубки, оповещение о чрезвычайной ситуации, перемещение к шкафам с огнетушителями, открытие шкафа, взятие огнетушителя в руки, перемещение к источнику пожара на безопасное расстояние, тушение пожара до его полной ликвидации, утилизация огнетушителя, оповещение об успешном устранении пожара по телефону.

На этом же этапе формируется набор компетенций, которые необходимо сформировать у обучающихся:

$$PK^* = (pk_1, pk_2, pk_3), \quad (14)$$

где pk_1 – умение проводить комплексный анализ внутренней и внешней среды деятельности, адекватно оценивать свои возможности и планировать оптимальное использование имеющихся ресурсов в сложившейся ситуации; pk_2 – психологическая устойчивость к стрессу, способность преодолевать психологическую инерцию при деятельности в чрезвычайных ситуациях; pk_3 – знание производственного регламента, ПЛАС, нормативной документации о правилах деятельности в штатных и аварийных ситуациях.

Задан набор задач подготовки

$$Z = (z_1, z_2, z_3), \quad (15)$$

включающий следующие действия пользователя в виртуальной реальности:

z_1 – оповещение о чрезвычайной ситуации, направлена на формирование компетенции pk_1 , уровень сложности $DIFF(z_1)$ – высокий;

z_2 – тушение возгорания, направлена на формирование компетенции pk_2 , уровень сложности $DIFF(z_2)$ – высокий;

z_3 – эвакуация в безопасное место, направлена на формирование компетенции pk_3 , уровень сложности $DIFF(z_3)$ – средний.

В ходе анализа технического задания на этапе А3 сформулированы граничные условия, сведенные в табл. 5.

В качестве целевой функции решено использовать общую стоимость затрат на реализацию системы визуализации, то есть сумму затрат на разработку СВ R_S и стоимость ее эксплуатации R_C . Остальные критерии из (10) используются как ограничения, то есть задача структурно-параметрического синтеза СВ ТК для подготовки шахтеров сформулирована следующим образом:

Необходимо определить такое множество элементов структуры S_{VS} системы визуализации АТК и соответствующее ему множество параметров P_{VS} аппаратных и программных модулей системы визуализации, при которых целевая функция

$$R_S + R_C \rightarrow \min \quad (20)$$

Граничные условия синтеза СВ ТК подготовки шахтеров

Наименование ограничения	Значение
Максимальное время R_T разработки программного обеспечения СВ	8 человеко-месяцев
Максимальные затраты на разработку R_S СВ и стоимость ее эксплуатации R_C	1 500 000 р.
Минимальное качество обучения R_{QT}	0,8
Максимальное время обучения R_{TT}	30 часов
Необходимость обучения во внештатных/аварийных ситуациях	Требуется
Необходимость перемещения оператора	С помощью контроллеров или иных средств имитации перемещения
Необходимость обеспечения совместной работы	Требуется
Требования к функциональным особенностям	Реализация шахты и пользователей; звуковое сопровождение событий; имитация физических процессов окружающего мира горения, тушения, задымления, затопления; взаимодействие пользователя с оборудованием и огнетушителем
Область применения	Горнодобывающая промышленность
Возможность замены реальных объектов виртуальными	Требуется

при выполнении ограничений:

$$R_T \leq 8; \quad (21)$$

$$R_{TN} \leq 30; \quad (22)$$

$$R_{QT} \geq 0,8; \quad (23)$$

$$R_S + R_C \leq 1\,500\,000; \quad (24)$$

$$PK = (pk_1, pk_2, pk_3), \quad (25)$$

а также соответствие между выбранными программными и аппаратными модулями.

Далее в соответствии с этапом А4 осуществлен структурный синтез СВ с применением корреляционных матриц (см. табл. 1 – 4).

Методом перебора получены результаты, представленные в табл. 6. Выбрано три варианта компоновки тренажера. Первый вариант – максимальный, основанный на максимальных оценках по отображению, взаимодействию и перемещению, включая беговую платформу для имитации физических нагрузок; второй (оптимальный) – является сбалансированным, так как ориентирован на использование максимальных по качеству средств отображения и взаимодействия, но не использует дорогостоящий компонент перемещения; третий (минимальный) – основан на использовании монитора, клавиатуры и мыши, что значительно снижает стоимость решения.

Оценка компонентов СВ ТК подготовки шахтеров

Вариант системы визуализации	Отображение	Взаимодействие	Перемещение	Звуковое сопровождение	Итого
Максимальный (шлем и контроллеры VR; система создания физических нагрузок; наушники)	9,00	5,33	10,00	9,50	33,83
Оптимальный (шлем и контроллеры VR; наушники)	9,00	5,33	5,00	9,50	28,83
Минимальный (монитор; клавиатура и мышь; одноканальная система)	6,80	2,67	2,00	3,00	14,47

Для окончательного выбора структуры СВ на этапе А5 реализован параметрический синтез для трех выбранных вариантов структуры СВ. Размерность задачи параметрического синтеза определяется количеством входных переменных (параметров компонентов СВ) и областью их изменения:

- отображения: 5 моделей шлемов VR, 5 моделей мониторов;
- взаимодействия: 2 модели контроллеров, 2 модели комплектов клавиатура + мышь;
- перемещения: 2 модели контроллеров, 2 модели комплектов клавиатура + мышь, 1 модель системы создания физических нагрузок;
- звукового сопровождения: 5 моделей наушников, 5 моделей одноканальных систем;
- детализации сцены: 10 вариантов с различными уровнем детализации, количеством полигонов, качеством текстур.

В качестве программной платформы для разработки СВ из двух возможных вариантов (Unity [7] и Unreal Engine [8]) в результате сравнения по методу СОСОМО II выбрана платформа Unity, как обеспечивающая меньшую стоимость разработки (600 тыс. р. против 870 тыс. р.).

Исходя из требований технического задания к высокой степени детализации сцен виртуальной реальности, в качестве приоритетных выбраны варианты детализации от 7-го (216 тыс. р.) до 10-го (277 тыс. р.).

Таким образом, в ходе параметрического синтеза с учетом ограничений на совместимость компонентов необходимо осуществить расчет метрик для 400 вариантов СВ: рассчитать общую стоимость и продолжительность разработки с использованием выбранных программных средств и аппаратного обеспечения. Минимальные затраты на аппаратное обеспечение трех выбранных вариантов структуры СВ представлены в табл. 7. Максимальная конфигурация из-за высокой стоимости оборудования, особенно системы создания физических нагрузок, не позволяет выполнить ограничения на стоимость разработки СВ. Итоговые затраты для оптимальной и минимальной конфигураций представлены в табл. 8.

Таблица 7

**Минимальные затраты на аппаратное обеспечение
трех выбранных конфигураций СВ**

Компонент визуализации	Стоимость, р.
<i>Максимальная</i>	
Шлем VR HTC Vive Pro Eye	140 000
Перчатки VR Manus Prime One	381 000
Система создания физических нагрузок	3 000 000
Наушники (встроены в систему HTC Vive Pro Eye)	0
Высокопроизводительный компьютер ПК (Intel i9 12900, Nvidia RTX 3070, 1024 Гб ССД, 32 Гб ОЗУ)	300 000
Итого	3 820 000
<i>Оптимальная</i>	
Шлем VRoculus quest 2	50 000
Контроллеры (Встроены в систему oculusquest 2)	0
Наушники (Встроены в систему oculusquest 2)	0
Компьютер с поддержкой VR (AMD Ryzen 5600x, Nvidia RTX 3050 ti, 512 Гб ССД, 16 Гб ОЗУ)	170 000
Итого	220 000
<i>Минимальная</i>	
Монитор	20 000
Клавиатура и мышь	3000
Одноканальная звуковая система	1000
Персональный компьютер с видеокартой (AMD Ryzen 3500, Nvidia RTX 3050, 256 Гб ССД, 8 Гб ОЗУ)	100 000
Итого	124 000

Таблица 8

Сравнение оптимальной и минимальной конфигурации СВ

Показатель	Конфигурация СВ	
	оптимальная	минимальная
Затраты, р.:	598 157,00	
на разработку (основные)	598 157,00	
детализацию сцен VR	277 000,00	216 000,00
эксплуатацию	220 000,00	124 000,00
итоговые	1 095 157,00	838 157,00
Оценка качества компонентов	28,83	14,47
Срок разработки, человеко-месяцев	7,3	6,7

Так как оба варианта удовлетворяют требованиям технического задания, в качестве результата структурно-параметрического синтеза выбирается оптимальная конфигурация. Она позволяет снизить затраты относительно требований технического задания на 404,84 тыс. р. или на 27 %, а общая продолжительность разработки оценена в 7,3 человека-месяца, что на 8,8 % ниже заданного граничными условиями.

Для оценки качества разработанной СВ ТК по метрикам качества подготовки и продолжительности обучения проведены исследования на фокус-группе из 10 человек, 50 % которой обучалось на ТК с оптимальной конфигурацией СВ, а оставшаяся половина – на ТК с СВ минимальной конфигурации.

Качество обучения оценивалось по формуле (9): анализировалось количество успешно выполненных заданий. В качестве продолжительности обучения использовалось пороговое значение, когда вся подгруппа выполняла не менее 80 % заданий (что соответствует качеству 0,8).

Этап обучения группы занимал 1 час, включая инструктаж, подготовку, работу с тренажером, этап рефлексии и оценки. Значения среднего и минимального качества обучения для каждой подгруппы в течение 35 занятий представлены на рис. 2.

Таким образом, при использовании оптимальной конфигурации в среднем группа обучена уже после 11 занятия, полностью – после 27, что удовлетворяет условию задачи. Для минимальной конфигурации получаем: средняя обученность после 26 занятия, полная – после 35.

Среднее качество обучения при ограничении времени обучения (30 занятий) для оптимальной конфигурации составило 0,92, что удовлетворяет условиям. Получено повышение качества обучения относительно граничного условия на 12 %.

Таким образом, задача структурно-параметрического синтеза СВ ТК профессиональной подготовки шахтеров к деятельности в штатных и аварийных ситуациях успешно решена.

Оценивая предлагаемый подход, необходимо отметить, что он имеет высокую практическую и научную ценность по сравнению с классическим экспертным подходом к выбору компонентов: существенно снижено влияние человеческого фактора, повышена объективность оценки. Продолжительность поиска оптимального

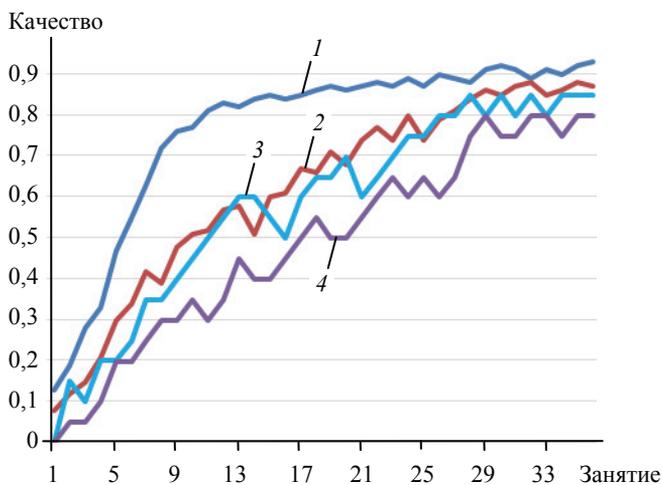


Рис. 2. Динамика изменения качества подготовки двух подгрупп:

1 – 1 подгруппа (оптимальный вариант) – среднее; 2 – 2 подгруппа (минимальный вариант) – среднее; 3 – 1 подгруппа (оптимальный вариант) – минимальное; 4 – 2 подгруппа (минимальный вариант) – минимальное

решения при наличии необходимой базы характеристик компонентов и результатов тестирования на фокус-группах также сокращается в несколько раз за счет сокращения области допустимых решений задачи и упрощения процедуры синтеза СВ. Сравнительный анализ предлагаемой методики и классической экспертной оценки компонентов дан в табл. 9.

Перечисленные достоинства предложенной методики и успешно проведенные с ее помощью экспериментальные исследования позволяют сделать вывод о ее значительном преимуществе по сравнению существующими методами экспертного выбора компонентов визуализации для ТК.

Таким образом, предложена методика синтеза системы визуализации тренажерных комплексов, включающая:

- модель описания и оценки эффективности СВ, основанную на формализации физических процессов в виртуальной среде, учитывающую особенности деятельности персонала при организации процесса освоения на тренажерных комплексах и позволяющую формализовать структуру системы визуализации, определить временные и стоимостные затраты и спрогнозировать возможности системы на этапе проектирования;

- постановку задачи структурно-параметрического синтеза СВ ТК с применением критериев качества и скорости освоения, стоимости и продолжительности разработки программного обеспечения, качества визуализации, стоимости и затрат на обслуживание системы визуализации, учитывающей ограничения на совместимость компонентов;

Таблица 9

Сравнение предлагаемой методики и экспертного подхода

Параметр	Предлагаемая методика	Экспертный подход
Продолжительность поиска решения	Несколько минут (после сбора необходимых исходных данных)	От нескольких часов до нескольких дней
Объективность	Часть критериев основана на оценке экспертов и показателей фокус-групп, остальные рассчитываются по объективным параметрам компонентов	Только субъективная экспертная оценка
Вероятность ошибочного выбора	Минимальна, так как полученное решение удовлетворяет условиям технического задания	Неизвестна заранее
Возможность автоматизации	Методика формализована и подготовлена для программной реализации	Отсутствие формализации и субъективность методики затрудняет ее автоматизацию
Универсальность	Может быть адаптирована для решения задач синтеза различных сложных систем, позволяет решать смежные задачи классификации и оценки компонентов	Методика общеизвестна и применяется при решении многих задач

– алгоритм оценки компонентов визуализации, позволяющий определять эффективность реализации различных метрик конкретной категории по результатам тестирования фокус-группой пользователей и ранжирования компонентов СВ в виде корреляционных матриц.

Полученные результаты структурно-параметрического синтеза СВ для ТК подготовки шахтеров позволило выполнить требования технического задания и существенно повысить ее эффективность по сравнению с требованиями технического задания: снизить затраты на разработку на 27 %, срок разработки – 8,8 %, повысить качество подготовки на 12 %, сократить продолжительность освоения на 10 %.

Разработанный тренажерный комплекс прошел успешную апробацию и внедрен в АО «Корпорация «Росхимзащита» и АО «СУЭК».

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта: договор № 20-37-90123\20 от 25.08.2020.

Список литературы

1. Косцова, М. В. Методы формирования визуального мышления у студентов с нарушениями зрения / М. В. Косцова, И. Л. Пономаренко, А. В. Гришина // Ученые записки. Электронный науч. журнал Курского гос. ун-та. – 2020. – № 2 (54). – С. 260 – 265.

2. Трашкова, А. В. Выбор способа реализации тренажера-симулятора для системы трехмерного моделирования открытых горных работ / А. В. Трашкова, А. В. Вицентий // Труды Кольского науч. центра РАН. – 2020. – Т. 11, № 8-11. – С. 83 – 90. doi: 10.37614/2307-5252.2020.8.11.007

3. Гиацинтов, А. М. Высокоуровневая архитектура тренажерно-обучающих систем сложных технических комплексов / А. М. Гиацинтов, А. В. Родителей // Программные продукты и системы. – 2018. – Т. 31, № 3. – С. 439 – 443.

4. Медицинские тренажеры как базис для отработки хирургических навыков / Н. А. Мартынова, А. Г. Кузьмин, М. Н. Аликберова, Д. В. Лозовицкий // Медико-фармацевтический журнал «Пульс». – 2018. – Т. 20, № 1. – С. 108 – 114.

5. Калашников, А. С. Общий обзор модели стоимости ИТ-проектов СОСОМО II / А. С. Калашников // Вестн. науки и образования. – 2019. – № 10-1 (64). – С. 42–43.

6. Ставенко, С. С. Метрики программной продукции: трудоемкость разработки программного обеспечения и модель СОСОМО II / С. С. Ставенко, А. И. Раткевич, А. Ю. Харитонов // Экономика и бизнес: теория и практика. – 2018. – № 5-2. – С. 91 – 94.

7. Копелиович, Д. И. Применение методов искусственного интеллекта в 3d-тренажерах на основе функционально-логических моделей / Д. И. Копелиович, А. Л. Сафонов, Р. В. Кондратенко // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. – 2020. – № 4 (10). – С. 33 – 39. doi: 10.30987/2658-6436-2020-4-33-39

8. Решетникова, Е. С. Разработка метода визуализации производственных объектов с применением технологий дополненной реальности / Е. С. Решетникова, Т. В. Усаева, Л. В. Курзаева // Программные системы и вычислительные методы. – 2021. – № 1. – С. 10 – 21. doi: 10.7256/2454-0714.2021.1.32708

Structural-Parametric Synthesis of Visualization Systems for Simulators

A. E. Arkhipov, S. V. Karpushkin

*Department of Computer-Integrated Systems in Mechanical Engineering,
alexeiarh@gmail.com; TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: correlation matrices; visualization system; structural-parametric synthesis; training complex.

Abstract: A technique for the synthesis of visualization systems for simulators for industries where training on real operating facilities is impossible is proposed. The technique includes models for describing and evaluating the effectiveness of the visualization systems, setting the problem of structural-parametric synthesis of visualization systems of simulators, an algorithm for evaluating the visualization components based on the ranking of the visualization system components using correlation matrices. An example of the practical application of the developed methodology for designing the visualization systems of simulators for professional training of miners for activities in normal and emergency situations is given.

References

1. Kostsova M.V., Ponomarenko I.L., Grishina A.V. [Methods of formation of visual thinking in students with visual impairments], *Uchenyye zapiski. Elektronnyy nauchnyy zhurnal Kurskogo gosudarstvennogo universiteta* [Scientific notes. Electronic scientific journal of Kursk State University], 2020, no. 2 (54), pp. 260-265. (In Russ.)
2. Trashkova A.V., Vitsentiy A.V. [The choice of a method for implementing a simulator for a system of three-dimensional modeling of open-pit mining], *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN* [Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2020, vol. 11, no. 8-11, pp. 83-90, doi: 10.37614/2307-5252.2020.8.11.007 (In Russ., abstract in Eng.)
3. Giatsintov A.M., Roditelev A.V. [High-level architecture of training systems for complex technical complexes], *Programmnyye produkty i sistemy* [Software products and systems], 2018, vol. 31, no. 3, pp. 439-443. (In Russ.)
4. Martynova N.A., Kuz'min A.G., Alikberova M.N., Lozovitskiy D.V. [Medical simulators as a basis for developing surgical skills], *Mediko-farmatsevticheskiy zhurnal «Pul's»* [Medico-pharmaceutical journal "Pulse"], 2018, vol. 20, no. 1, pp. 108-114. (In Russ.)
5. Kalashnikov A.S. [General overview of the COCOMO II IT project cost model], *Vestnik nauki i obrazovaniya* [Bulletin of Science and Education], 2019, no. 10-1 (64), pp. 42-43. (In Russ., abstract in Eng.)
6. Stavenko S.S., Ratkevich A.I., Kharitonov A.Yu. [Software metrics: the complexity of software development and the COCOMO II model], *Ekonomika i biznes: teoriya i praktika* [Economics and business: theory and practice], 2018, no. 5-2, pp. 91-94. (In Russ., abstract in Eng.)
7. Kopeliovich D.I., Safonov A.L., Kondratenko R.V. [Application of artificial intelligence methods in 3d simulators based on functional logic models], *Avtomatizatsiya i modelirovaniye v proyektirovanii i upravlenii* [Automation and modeling in design and management], 2020, no. 4 (10), pp. 33-39, doi: 10.30987/2658-6436-2020-4-33-39 (In Russ., abstract in Eng.)
8. Reshetnikova Ye.S., Usataya T.V., Kurzayeva L.V. [Development of a visualization method for production facilities using augmented reality technologies], *Programmnyye sistemy i vychislitel'nyye metody* [Program systems and computational methods], 2021, no. 1, pp. 10-21, doi: 10.7256/2454-0714.2021.1.32708 (In Russ., abstract in Eng.)

Strukturparametrische Synthese der Visualisierungssysteme für Trainingskomplexe

Zusammenfassung: Es ist eine Methode zur Synthese von Visualisierungssystemen (VS) für Trainingskomplexe (TK) für Industriebranchen vorgeschlagen, in denen ein Training an realen Betriebsobjekten unmöglich ist. Die Technik umfasst Beschreibungsmodelle und Bewertung der Wirksamkeit von VS, Problemstellung der struktur-parametrischen Synthese der VS TK, den Algorithmus zur Bewertung von bildgebenden Komponenten, basierend auf der Rangordnung von VS-Komponenten unter Verwendung von Korrelationsmatrizen. Es ist ein Beispiel für die praktische Anwendung der entwickelten Methodik für die Gestaltung der VS TK für die Berufsausbildung von Bergarbeitern für die Tätigkeit in normalen und Notfallsituationen gegeben.

Synthèse structurellement paramétrique des systèmes d'imagerie pour les complexes de simulation

Résumé: Est proposée une méthode de la synthèse des systèmes d'imagerie (SI) des complexes de simulation (CS) pour les industries où il est impossible d'apprendre à partir des objets réels. La technique comprend des modèles de la description et de l'évaluation de l'efficacité de SI, l'énoncé du problème de la synthèse structurelle et paramétrique des CS SI, l'algorithme de l'évaluation des composants de la visualisation basé sur le classement des composants de SI en utilisant des matrices de corrélation. Est cité un exemple de l'application pratique de la méthodologie élaborée pour la conception de la formation professionnelle des mineurs à l'emploi dans les situations ordinaires et celles d'urgence.

Авторы: *Архинов Алексей Евгеньевич* – аспирант кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»; *Карпушкин Сергей Викторович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.