УДК 004.946:004.42:615.8
DOI: 10.17277/vestnik.2026.03.pp.408-423

ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ АДАПТАЦИИ ВИРТУАЛЬНОЙ СРЕДЫ С БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ДЛЯ СТИМУЛЯЦИИ ДВИГАТЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ

© А. Е. Архипов[1] ✉, А. А. Божий[1], В. С. Круглов[2]

[1] *Кафедра «Системы автоматизированной поддержки принятия решений» , alexeiarh@gmail.com, ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Российская Федерация;*
[2] *Управление фундаментальных и прикладных исследований, ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Российская Федерация*

Ключевые слова: адаптивный тренажер; биологическая обратная связь; виртуальная реальность; двигательная активность; динамическая адаптация; программный модуль; управление сложностью.

Аннотация: Представлен программный модуль адаптации виртуальной среды с биологической обратной связью для стимуляции двигательной активности пользователя. Метод адаптации предусматривает повышение, сохранение или снижение сложности, сглаживание управляющего воздействия и ограничение изменения параметров сцены. Определен состав входных и выходных данных модуля. Разработана архитектура программного обеспечения. Программная реализация представлена VR-сценарием с последовательным наступанием на целевые платформы. Реализованы правила снижения скорости при повторяющихся ошибках, повышения скорости при устойчивом выполнении и недостаточной нагрузке, ограничения максимального значения и экстренной остановки при превышении верхней границы пульса. Отмечено, что модуль может использоваться как программная основа исследовательских и тренировочных VR-систем, в которых параметры упражнения изменяются по физиологическим и двигательным данным пользователя.

Введение

Виртуальная реальность является одним из направлений цифровизации тренажерных и реабилитационных технологий, поскольку позволяет организовать двигательное действие в наглядной, управляемой и эмоционально привлекательной среде. В отличие от традиционного упражнения, выполняемого по словесной инструкции или по заранее заданной траектории, VR-сценарий может включать изменяемые объекты, динамическую обратную связь, визуальное подкрепление результата и элементы соревнования с самим собой [1]. За счет этого пользователь получает не только внешнюю инструкцию, но и непрерывный поток информации о результате собственных действий [2].

В исследованиях по виртуальной реабилитации подчеркивается, что важным преимуществом виртуальной среды является возможность создавать интерактивные и мотивирующие условия выполнения двигательных заданий, а также регистрировать параметры выполнения упражнения. В работах, посвященных биологической обратной связи, отмечается, что в реабилитационных системах могут использоваться как биомеханические измерения, так и показатели физиологических

систем организма, включая сердечно-сосудистые, дыхательные и нервно-мышечные параметры [1]. Это делает возможным переход от простой визуализации упражнения к построению замкнутого контура адаптации, в котором виртуальная среда реагирует на текущее состояние пользователя [3 – 6].

Однако наличие VR-сцены и биологической обратной связи сами по себе не обеспечивают индивидуализацию упражнения. Во многих программных решениях параметры задания задаются заранее и остаются неизменными в течение всего занятия: скорость движения объектов, расстояние между целями, размер интерактивной зоны, частота появления стимулов и правила начисления баллов фиксируются разработчиком или инструктором [2]. В результате один и тот же сценарий может быть слишком простым для подготовленного пользователя и слишком сложным для пользователя с ограниченными двигательными возможностями. В первом случае быстро снижается интерес к занятию, во втором – возрастает риск утомления, ошибок и отказа от выполнения задания [7, 8].

Особую значимость эта проблема приобретает при разработке виртуальных двигательных тренажеров, ориентированных на стимуляцию двигательной активности. Для такого класса систем требуется программный модуль, который не только отображает данные о пульсе, скорости или успешности выполнения, но и преобразует эти данные в управляющее воздействие на виртуальную сцену. В этом случае параметры сцены становятся адаптивными: они изменяются в зависимости от состояния пользователя, качества выполнения движения и целевого режима нагрузки [9, 10].

Современные исследования подтверждают, что динамическое изменение сложности виртуальных упражнений может выполняться по физиологическим показателям пользователя. В частности, регулирование сложности VR-exergame по частоте сердечных сокращений применялось для поддержания целевого диапазона нагрузки. В других системах параметры движения регистрируются сенсорами, а точность выполнения используется для формирования обратной связи и персонализации тренировочного задания. Развиваются также универсальные контроллеры динамической сложности, способные обрабатывать поток пользовательских данных и изменять параметры серьезной игры в реальном времени [10, 11].

Сопоставление известных подходов показывает, что отдельные элементы предлагаемого решения – адаптация по частоте сердечных сокращений, регистрация качества движения, игровая обратная связь и динамическое изменение сложности – уже применялись в VR-системах. Отличительной особенностью разрабатываемого модуля является их объединение в едином контроллере, который принимает решение о повышении, сохранении или снижении сложности на основе совместного анализа физиологической нагрузки, результативности упражнения и устойчивости серии успешных действий. Дополнительно предусматриваются сглаживание управляющего воздействия, ограничение скорости изменения параметров сцены и журналирование причин адаптации [5, 11, 12].

Таким образом, нерешенной остается задача построения воспроизводимого программного контура адаптации двигательного VR-задания, который не повышает сложность только на основании недостаточной физиологической нагрузки, если одновременно снижается качество движения. Предполагается, что совместный учет физиологического и двигательного каналов позволит исключить необоснованное усложнение сценария и обеспечить более предсказуемое управление виртуальной средой.

Цель работы – разработка программного модуля адаптации виртуальной среды с интеграцией биологической обратной связи, обеспечивающего управление параметрами VR-сцены, формирование мотивационной обратной связи и стимуляцию двигательной активности пользователя.

Для достижения указанной цели необходимо определить состав входных и выходных данных модуля; формализовать задачу управления параметрами сцены; разработать архитектуру программного обеспечения; предложить метод изменения сложности с совместным учетом физиологической нагрузки и качества движения; реализовать демонстрационный VR-сценарий; подготовить методику технической и сравнительной проверки разработанного решения.

Материалы и методы

Объект исследования и постановка задачи

Объект исследования – программный модуль адаптивного управления параметрами двигательного VR-задания. *Предмет исследования* – правила преобразования физиологических и двигательных данных пользователя в управляющие воздействия на виртуальную сцену.

Программный модуль реализован в среде Unity с использованием языка C#. Регистрация двигательной активности осуществляется инерциальной измерительной системой, включающей три датчика, размещенные в области поясницы и на нижних конечностях пользователя. Измерения поступают с частотой 100 Гц и проходят на персональном компьютере последовательные этапы приема, буферизации, фильтрации и преобразования. Сформированные параметры движения передаются в виртуальную среду и используются для управления объектами сцены. Частота сердечных сокращений (**ЧСС**) регистрируется внешним медицинским устройством и применяется в качестве основного физиологического показателя при адаптации сложности двигательного задания [13, 14].

Рассматриваемый программный модуль предназначен для включения в состав виртуального двигательного тренажера с биологической обратной связью. Пользователь выполняет двигательное задание в виртуальной среде, а система получает данные о его физиологическом состоянии, скорости выполнения движения и результативности взаимодействия с объектами сцены. На основе этих данных модуль должен определить, необходимо ли изменить сложность задания, сохранить текущий режим или перейти к более щадящим параметрам.

Состояние пользователя в момент времени t представим вектором

$$x(t) = \{ h(t), v(t), q(t), r(t), c(t) \}, \quad (1)$$

где $h(t)$ – частота сердечных сокращений; $v(t)$ – скорость движения или темп выполнения упражнения; $q(t)$ – показатель качества выполнения двигательного действия, определяемый по точности наступания на целевую платформу; $r(t)$ – результативность упражнения за текущий интервал; $c(t)$ – длина серии успешных действий. В демонстрационном сценарии точность наступания оценивается по расстоянию от положения стопы до центра платформы и углу ее поворота. Состав вектора может расширяться при подключении дополнительных физиологических и кинематических каналов.

Параметры виртуальной сцены, изменяемые программным модулем, зададим вектором управления:

$$u(t) = \{ v_s(t), d_p(t), s_p(t), n_0(t), b(t), f(t) \}, \quad (2)$$

где $v_s(t)$ – скорость движения объектов сцены или платформ; $d_p(t)$ – расстояние между целевыми объектами; $s_p(t)$ – размер целевой области; $n_0(t)$ – число усложняющих элементов; $b(t)$ – параметры начисления баллов, бонусов и серии успешных действий; $f(t)$ – интенсивность визуальной обратной связи. В демон-

страционной реализации основными управляемыми параметрами являются скорость движения целевых платформ, правила начисления счета и визуальная индикация текущих показателей.

Целевое состояние пользователя определяется вектором

$$x^* = \left\{ h^*, v^*, q^*, r^*, c^* \right\}, \tag{3}$$

где h^* соответствует индивидуально заданному диапазону физиологической нагрузки; v^* – требуемому темпу движения; q^* – минимально допустимому качеству выполнения; r^* и c^* – целевым значениям результативности и устойчивости выполнения упражнения. Перед тренировкой специалист через web-интерфейс задает желаемый диапазон частоты сердечных сокращений, верхнюю границу пульса, начальную скорость и максимальную допустимую скорость виртуального задания.

Общая задача адаптации заключается в выборе такого управляющего воздействия, при котором параметры сцены изменяются в соответствии с текущим состоянием пользователя и не выходят за пределы безопасного диапазона:

$$u(t) = A\left(x(t), x^*, u(t-1)\right), \quad u(t) \in U_{\text{safe}}, \tag{4}$$

где A – алгоритм адаптации; U_{safe} – множество допустимых значений параметров сцены, заранее задаваемых специалистом или разработчиком сценария. Ограничения U_{safe} не являются самостоятельной медицинской оценкой безопасности, а предотвращают выход программных параметров за установленные пределы и резкое повышение сложности задания.

Таким образом, программный модуль адаптации выполняет функцию посредника между пользовательским состоянием и виртуальной сценой. Он преобразует физиологические и двигательные данные в управляемые изменения сценария, сохраняя баланс между стимулированием активности, безопасностью и понятностью обратной связи для пользователя.

Архитектура программного модуля адаптации виртуальной среды с биологической обратной связью

Архитектура модуля строится по принципу разделения функций сбора данных, оценки состояния, принятия решения и управления виртуальной сценой. Такое построение позволяет изменять аппаратные средства регистрации без полной переработки программного ядра. Например, данные о движении могут поступать от VR-трекера, камеры, инерциальных датчиков или программного детектора взаимодействия с объектами сцены, однако для адаптационного алгоритма они должны быть приведены к унифицированным параметрам скорости, темпа и успешности выполнения [9, 13, 15].

Первый уровень архитектуры образует подсистема получения данных. Она принимает частоту сердечных сокращений, данные инерциальных датчиков и события взаимодействия пользователя с объектами сцены. К двигательным событиям относятся успешное наступание, пропуск платформы, изменение скорости, положение стопы и завершение серии. IMU-датчики опрашиваются с интервалом около 10 мс, а измерения объединяются общей временной меткой. Для совместимости источников входные значения приводятся к единому внутреннему формату.

Второй уровень отвечает за предварительную обработку. На этом этапе выполняются проверка допустимых диапазонов, удаление некорректных значений,

цифровая фильтрация и сглаживание кратковременных выбросов. Данные IMU используются для оценки ориентации корпуса и скорости движения. В Unity дополнительно применяются интерполяция и экспоненциальное сглаживание, что уменьшает рывки при задержках передачи или единичных потерях данных. Для физиологического канала анализируются текущее значение пульса, его среднее значение за интервал и факт выхода за установленный специалистом диапазон [14, 16].

Третий уровень представляет собой блок оценки состояния пользователя. Его задача состоит в переводе числовых данных в состояние, понятное алгоритму адаптации. Например, пользователь может находиться в одном из режимов: недостаточная нагрузка при высокой точности; оптимальная нагрузка и стабильное выполнение; избыточная нагрузка; снижение качества выполнения; аварийный режим или режим временной приостановки выполнения упражнения. Такая дискретизация упрощает принятие решений и делает поведение системы более предсказуемым для специалиста.

Четвертый уровень – контроллер адаптации. Он определяет, какие параметры сцены должны быть изменены. При недостаточной нагрузке и устойчивом выполнении контроллер может немного увеличить скорость движения платформ или уменьшить интервал между ними. При выходе пульса за верхнюю границу или при резком увеличении числа ошибок сложность должна снижаться. Важное требование к этому уровню – отсутствие резких скачков. Пользователь должен воспринимать изменение среды как естественное усложнение или упрощение задания, а не как внезапное нарушение сценария.

Пятый уровень связан с непосредственным управлением объектами виртуальной сцены. Он изменяет скорость платформ, параметры генерации целевых объектов, условия начисления очков, отображение интерфейсных индикаторов, интенсивность визуальной обратной связи и сигналы успешного выполнения. Этот уровень зависит от игрового движка и конкретной реализации сцены, но его связь с контроллером адаптации должна осуществляться через набор четко определенных параметров.

Отдельный компонент архитектуры – подсистема журналирования. Она фиксирует временные ряды физиологических показателей, события взаимодействия пользователя со сценой, изменения уровня сложности, итоговый счет и служебные сообщения. Журналирование необходимо не только для отладки программного обеспечения, но и для последующего анализа динамики занятий, сравнения режимов адаптации и подготовки материалов для экспериментальной проверки.

Методические принципы управления сложностью двигательного VR-задания

Методическая основа предлагаемого модуля состоит в том, что виртуальная среда должна не просто предъявлять пользователю задание, а поддерживать такое состояние упражнения, при котором двигательная активность сохраняется, но сложность не становится чрезмерной. В этом смысле VR-сценарий выполняет две функции: тренировочную и мотивационную. Тренировочная функция связана с требованием выполнять движение в заданном темпе и с заданной точностью. Мотивационная функция обеспечивается видимым результатом, начислением баллов, серией успешных действий и эмоционально привлекательной визуальной средой [5, 12].

Первый методический принцип заключается в поддержании индивидуально заданного диапазона физиологической нагрузки. Если ЧСС остается ниже целевого диапазона, а пользователь устойчиво выполняет упражнение, система может повысить скорость движения платформ. Если пульс превышает верхнюю границу,

повышение сложности блокируется и запускается снижение нагрузки либо экстренная остановка. Допустимый уровень нагрузки определяется специалистом, тогда как программный модуль выполняет адаптацию только в пределах заданных значений.

Второй принцип связан с учетом качества движения. Повышение сложности не выполняется только на основании низкого пульса. В демонстрационном сценарии учитываются точность наступания, число пропусков и длина серии успешных действий. Если пользователь не успевает выполнять задание или многократно теряет серию, скорость уменьшается. Благодаря этому физиологическая реакция и фактическая результативность рассматриваются совместно.

Третий принцип состоит в использовании мотивационной обратной связи. Игровые элементы не должны подменять двигательную задачу, но могут усиливать вовлеченность пользователя. Серия успешных действий позволяет показать стабильность выполнения; счет дает простой интегральный показатель результата; визуальная индикация пульса и скорости помогает пользователю понимать собственное состояние. Такой подход согласуется с представлением о геймификации как использовании элементов игрового дизайна в неигровом контексте, а также с положениями теории самодетерминации, согласно которой устойчивую вовлеченность поддерживают переживание компетентности, автономии и понятной обратной связи [12].

Четвертый принцип – сохранение прозрачности адаптации для специалиста. Управление параметрами виртуальной сцены не должно быть скрытым и непредсказуемым. Врач, инструктор или исследователь должен понимать, почему система изменила скорость платформ или уменьшила сложность. Поэтому в программной реализации целесообразно хранить не только итоговое значение сложности, но и причину изменения: выход пульса за пределы диапазона, снижение качества выполнения, успешная серия или достижение порогового значения счета.

Пятый принцип связан с постепенным усложнением двигательного задания. В начальных режимах пользователь должен освоить связь между собственным движением и объектами виртуальной сцены. После стабилизации выполнения можно повышать темп, уменьшать размер целевой зоны или вводить более сложные последовательности платформ. Такой подход позволяет избежать ситуации, когда эмоциональная привлекательность сцены сохраняется, но двигательная задача становится хаотичной и теряет методическую направленность [12].

Алгоритм адаптации параметров виртуальной сцены

Для формального описания адаптации введем интегральный показатель сложности $D(t)$, зависящий от управляемых параметров сцены [17]. В простейшем варианте он может быть представлен следующим образом:

$$D(t) = \gamma_1 v_s(t) + \gamma_2 d_p(t) - \gamma_3 s_p(t) + \gamma_4 n_0(t), \tag{5}$$

где $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$ – весовые коэффициенты. Поскольку управляемые параметры имеют разные единицы измерения и диапазоны, перед вычислением интегрального показателя они должны быть приведены к безразмерной нормированной шкале. Увеличение скорости движения объектов и расстояния между целями повышает сложность, а увеличение размера целевой области снижает ее. Значения коэффициентов и способ нормирования должны быть приведены в окончательной реализации метода.

Изменение сложности на следующем шаге определяется состоянием пользователя:

$$D(t+1) = D(t) + \Delta D(t); \tag{6}$$

$$\Delta D(t)=\begin{cases}+\delta, & h(t)<h_{\min}\wedge q(t)\geq q_{\min};\\ 0, & h_{\min}\leq h(t)\leq h_{\max}\wedge q(t)\geq q_{\min};\\ -\delta, & h(t)>h_{\max}\vee q(t)<q_{\min},\end{cases} \quad (7)$$

где $h_{\min}$ и $h_{\max}$ задают границы целевого диапазона ЧСС, $q_{\min}$ – минимально допустимый уровень качества выполнения; δ – шаг изменения сложности. В программной реализации значение δ может зависеть от длительности нахождения в соответствующем состоянии: чем дольше частота сердечных сокращений остается ниже целевого диапазона при высокой точности, тем более обоснованным становится постепенное повышение сложности.

Для исключения резких изменений применяется сглаживание управляющего воздействия. Пусть $u(t+1)$ – предварительно рассчитанный вектор параметров сцены. Тогда фактический вектор управления определяется выражением

$$u(t+1)=\alpha\,u(t)+(1-\alpha)\hat{u}(t+1), \quad \alpha\in[0,1]. \quad (8)$$

При значениях α, близких к единице, изменения сцены становятся более плавными, но реакция системы замедляется. При малых значениях α адаптация происходит быстрее, однако возрастает риск некомфортных скачков сложности. Поэтому параметр α выбирается с учетом частоты обновления сцены и характера двигательного задания.

Дополнительно вводится ограничение на скорость изменения каждого управляемого параметра

$$|\,u_i(t+1)-u_i(t)\,|\leq\Delta u_i^{\max}. \quad (9)$$

Это ограничение особенно важно для VR-среды, где резкое изменение скорости объектов может вызвать дискомфорт и ухудшить точность движения. В программной реализации ограничиваются не только физически значимые параметры, но и визуальные эффекты, поскольку чрезмерно резкая индикация также может отвлекать пользователя от двигательной задачи.

Алгоритм работы модуля включает последовательное выполнение следующих действий. Сначала система получает новые значения физиологических и двигательных параметров. Затем выполняются сглаживание и проверка допустимости данных. После этого блок оценки состояния определяет, находится ли пользователь в целевом режиме. Контроллер адаптации рассчитывает изменение уровня сложности и преобразует его в конкретные параметры сцены. На последнем этапе обновленные параметры передаются в VR-сцену, а все события записываются в журнал сеанса.

Важной особенностью алгоритма является совместный учет физиологической нагрузки и результативности. Если пользователь находится ниже целевой зоны пульса, но часто допускает ошибки, система не повышает сложность. Если пользователь находится в целевой зоне, но серия успешных действий резко прерывается, модуль может временно зафиксировать текущий уровень или уменьшить сложность. Если пользователь стабильно выполняет задание и не выходит за пределы допустимой нагрузки, система допускает постепенное усложнение сценария.

В реализованном сценарии общая формальная схема конкретизирована правилами дискретного изменения скорости:

– если счетчик серии успешных действий сбрасывается до единицы пять раз в течение одной минуты, скорость движения платформ уменьшается на 20 %;

– если длина серии достигает 20 действий, а ЧСС остается ниже заданного диапазона, скорость увеличивается на 20 %, но не превышает установленную специалистом верхнюю границу;

– при превышении верхней границы ЧСС запускается процедура экстренной остановки.

Такие правила обеспечивают понятную и проверяемую связь между состоянием пользователя и управляющим воздействием.

Программная реализация модуля

Программный модуль построен по компонентному принципу и включает средства приема физиологических и двигательных данных, оценки состояния пользователя, адаптации параметров сцены, визуальной обратной связи и журналирования. Такое построение позволяет изменять отдельные компоненты без переработки общей логики системы [18].

Блок приема данных биологической обратной связи получает значения ЧСС, проверяет их допустимость и передает в контроллер адаптации. Параметры тренировки задаются специалистом через web-интерфейс. В нем указываются целевой диапазон пульса, верхняя граница ЧСС, скорость на этапе калибровки и максимально допустимая скорость. После завершения настройки запускается тренировочный сеанс.

Блок двигательных событий получает данные о положении и ориентации стоп, скорости движения и взаимодействии с целевыми платформами. Для оценки качества выполнения используются расстояние до центра платформы и угол поворота стопы. При корректном наступании увеличиваются счет и серия успешных действий, а при промахе или недостаточной точности серия сбрасывается. Эти показатели передаются в контроллер адаптации.

Контроллер адаптации реализован независимо от конкретных объектов сцены. Он получает текущее состояние пользователя, целевые значения и параметры предыдущего шага, после чего формирует управляющую команду. Блок управления сценой преобразует ее в изменения скорости платформ, частоты появления целей, допустимой области попадания и параметров визуальной индикации. Обновленные значения применяются в Unity через программные компоненты сцены.

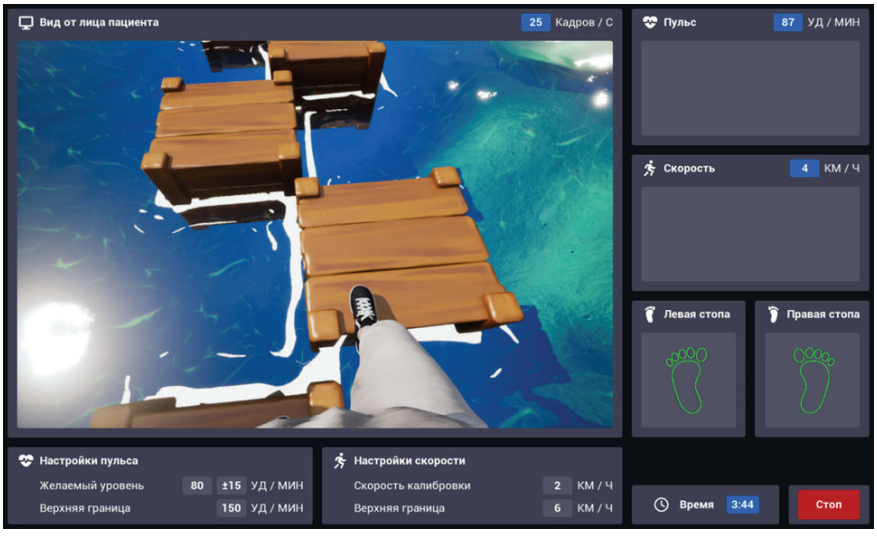

Рис. 1. WEB-интерфейс настройки и контроля тренировочного сеанса

Интерфейс пользователя содержит индикаторы ЧСС, скорости движения, счета и серии успешных действий. Отдельный web-интерфейс предназначен для специалиста и используется для настройки сеанса и текущего контроля показателей. Внешний вид интерфейса специалиста представлен на рис. 1.

После завершения тренировки события, параметры и результаты сохраняются в базе данных.

Индивидуальная калибровка и порядок проведения тренировки

Перед основным сеансом выполняется индивидуальная калибровка. Она необходима, поскольку зависимость между скоростью двигательного задания и ЧСС различается у разных пользователей и не является строго линейной. На этапе калибровки регистрируются фактические значения физиологического показателя при нескольких заданных режимах скорости [19].

В результате программной реализации создан интерактивный VR-сценарий в Unity, в котором пользователь от первого лица выполняет последовательные наступания на движущиеся целевые платформы. Виртуальная среда выполнена в виде природной локации с водной поверхностью, водопадами и каменными объектами. Сценарий объединяет двигательную задачу, регистрацию биологического сигнала и игровую обратную связь.

Целевые платформы формируют последовательность двигательных действий. Для каждого наступания оцениваются положение стопы относительно центра платформы и угол ее поворота. При корректном выполнении увеличиваются общий счет и серия успешных действий. При пропуске или недостаточной точности серия прерывается, а событие используется контроллером при выборе следующего уровня сложности.

Интерфейс пользователя содержит индикаторы ЧСС, скорости движения, счета и серии успешных действий. Эти элементы предназначены для оперативного информирования и формирования понятной мотивационной обратной связи. Поскольку влияние интерфейса на внимание и мотивацию в настоящей версии работы отдельно не измерялось, соответствующие эффекты рассматриваются как проектное назначение, а не как экспериментально подтвержденный результат.

Результаты

Реализованный демонстрационный VR-сценарий

В результате программной реализации создан интерактивный VR-сценарий, в котором пользователь последовательно наступает на движущиеся целевые платформы. В виртуальной среде отображаются ЧСС, скорость движения, общий счет и текущая серия успешных действий. Общий вид разработанного сценария представлен на рис. 2.

В представленном сценарии автоматически изменяется скорость движения платформ; дополнительно архитектура допускает изменение частоты их появления, размера целевой зоны и правил начисления результата. Управление ограничено заданными специалистом минимальными и максимальными значениями. При ухудшении выполнения скорость уменьшается, при устойчивой серии и недостаточной физиологической нагрузке – увеличивается, а при превышении верхней границы пульса выполняется экстренная остановка.

Выполнение двигательного задания от первого лица показано на рис. 3.

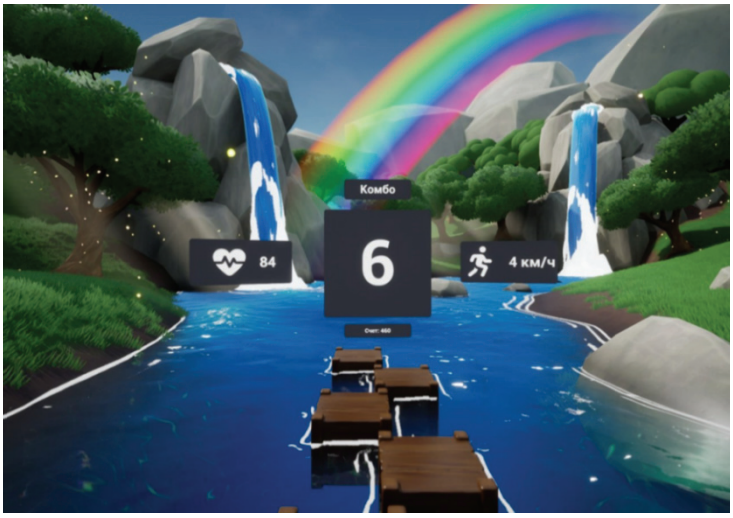

Рис. 2. Общий вид виртуальной сцены

Рис. 3. Выполнение двигательного задание от первого лица

Техническая проверка входного двигательного канала

Для проверки пригодности двигательных данных выполнено сопоставление скорости, восстановленной по измерениям IMU, с данными эталонного VR-трекера. Пользователь выполнял имитацию ходьбы и линейные перемещения на всенаправленной платформе. Одновременно регистрировались линейные ускорения датчиков и координаты трекера. После фильтрации ускорения интегрировались методом трапеций, а скорость трекера вычислялась как разностная производная координат. Качество совпадения оценивалось по средней абсолютной ошибке, среднеквадратичной ошибке и коэффициенту корреляции Пирсона [16]. Результаты сопоставления скорости, рассчитанной по данным IMU, с показаниями эталонного VR-трекера представлены в табл. 1.

Полученные значения показывают согласованность профилей скорости, рассчитанных по данным инерциальной системы и эталонного трекера. Оба источника данных корректно отражали участки ускорения, замедления и изменения темпа движения.

Таблица 1

Сравнение скорости IMU и эталонного трекера

Направление движения	MAE, м/с	RMSE, м/с	Коэффициент корреляции
Поперечное	0,11	0,15	0,81
Продольное	0,26	0,32	0,79

Отдельная проверка пространственной ориентации при контролируемых поворотах показала, что в статических положениях значения крена и тангажа отклонялись от нулевого положения не более чем на один-два градуса, а изменение курса происходило плавно и соответствовало поворотам пользователя. Обработанные данные передавались в Unity и использовались для обновления положения и ориентации виртуального аватара.

Обсуждение

Сравнение предлагаемого подхода с современными решениями показывает, что адаптация VR-упражнений по ЧСС уже применялась для регулирования физической нагрузки. Поэтому использование пульса как управляющего сигнала само по себе не является новым. Отличие предлагаемого модуля состоит в том, что недостаточная физиологическая нагрузка не приводит к автоматическому повышению сложности, если одновременно ухудшается качество выполнения двигательного действия [11].

Регистрация точности движений и предоставление обратной связи в реальном времени также реализованы в современных VR-системах реабилитации. В рассматриваемом модуле данные о попаданиях, пропусках и серии успешных действий используются не только для информирования пользователя, но и включаются в контур автоматического управления параметрами сцены. Универсальные системы динамической сложности подтверждают целесообразность отделения контроллера от конкретного игрового сценария; предложенная компонентная архитектура следует этому принципу [4, 6, 10].

Таким образом, научно-техническое отличие работы заключается не в применении отдельного биосигнала, игровой обратной связи или динамической сложности, а в их совместном использовании в формализованном контроллере двигательного VR-задания. Потенциальными преимуществами являются предотвращение необоснованного усложнения при низком качестве движения, плавность управляющих воздействий и возможность объяснить причину каждого изменения параметров. Однако эти преимущества пока следуют из структуры метода и должны быть подтверждены количественным сравнением с фиксированным режимом и адаптацией только по ЧСС.

Заключение

Разработан программный модуль адаптации виртуальной среды с биологической обратной связью. Модуль получает частоту сердечных сокращений и двигательные данные, оценивает качество выполнения упражнения и изменяет скорость целевых платформ. В состав решения входят подсистемы приема и обработки данных, контроллер адаптации, VR-сцена в Unity, web-интерфейс специалиста и журналирование тренировочного сеанса.

Техническая проверка показала, что двигательные данные инерциальных датчиков согласуются с данными эталонного VR-трекера и могут использоваться

для управления сценой. Реализованы правила снижения скорости при повторяющихся ошибках, повышения скорости при устойчивом выполнении и недостаточной нагрузке, ограничения максимального значения и экстренной остановки при превышении верхней границы пульса.

Дальнейшая работа должна включать настройку и обоснование порогов адаптации, количественное сравнение фиксированного режима, адаптации только по частоте сердечных сокращений и предлагаемого совместного управления, а также оценку пользовательского комфорта. Перспективным является расширение набора входных сигналов за счет электромиографических и кинематических данных и разработка профилей адаптации для различных групп пользователей.

Разработанный модуль может использоваться как программная основа исследовательских и тренировочных VR-систем, в которых параметры упражнения изменяются по физиологическим и двигательным данным пользователя. До проведения экспериментальной и клинической проверки его применение следует ограничивать контролируемыми условиями, а допустимые диапазоны нагрузки и параметров сцены должны задаваться специалистом.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта «Разработка медицинских VR тренажерных систем для опорно-двигательной реабилитации с биологической обратной связью» (№ *124032800018-5*).

Список литературы

1. Попов, А. И. Концептуальные подходы к формированию и оцениванию компетенций будущих специалистов в экстремальной деятельности / А. И. Попов, С. В. Карпушкин, А. Д. Обухов // Профессиональное образование в России и за рубежом. – 2020. – № 1(37). – С. 51–59.

2. Visualization technology and tool selection methods for solving adaptive training complex structural-parametric synthesis problems / M. N. Krasnyanskiy, D. L. Dedov, A. D. Obukhov, S. Y. Alekseev // Journal of Computing and Information Science in Engineering. – 2020. – Vol. 20, No. 4. Art. 041001. doi: 10.1115/1.4045289

3. The Potential Effects of Sensor-Based Virtual Reality Telerehabilitation on Lower Limb Function in Patients with Chronic Stroke Facing the COVID-19 Pandemic: A Retrospective Case-Control Study / M. Bonanno, M. G. Maggio, P. De Pasquale [et al.] // Medical Sciences. – 2025. – Vol. 13, No. 2. – Art. 65. doi: 10.3390/medsci13020065

4. Technical Aspects of Virtual Augmented Reality-Based Rehabilitation Systems for Musculoskeletal Disorders of the Lower Limbs: A Systematic Review / S. Kiani, I. Rezaei, S. Abasi [et al.] // BMC Musculoskeletal Disorders. – 2023. – Vol. 24. – Art. 4. doi: 10.1186/s12891-022-06062-6

5. Extended Reality Biofeedback for Functional Upper Limb Weakness: Mixed Methods Usability Evaluation / A. Dutta, K. Hatjipanagioti, M. A. Newsham [et al.] // JMIR XR and Spatial Computing. – 2025. – Vol. 2. – Art. e68580. doi: 10.2196/68580

6. Effectiveness of Treadmill-Based Virtual-Reality Biofeedback Training to Improve Gait Function in Children and Adolescents with Congenital and Acquired Brain Injury / S. H. Schless, G. Sorek, I. Schurr [et al.] // Scientific Reports. – 2026. – Vol. 16. – Art. 2133. doi: 10.1038/s41598-025-31852-y

7. Design of Simulators for Automated Information Systems of Engineers' Training / M. N. Krasnyanskiy, A. V. Ostroukh, S. V. Karpushkin, D. L. Dedov, A. D. Obukhov // Journal of Applied Sciences. – 2014. – Vol. 14, No. 21. – P. 2674–2684. doi: 10.3923/jas.2014.2674.2684

8. Попов, А. И. Концептуальные подходы к автоматизированному управлению эффективностью профессионального образования / А. И. Попов, А. Д. Обухов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2018. – Т. 24, № 2. – С. 246–257. doi: 10.17277/vestnik.2018.02.pp.246-257

9. Организация взаимодействия с виртуальной реальностью на основе беговой платформы для комплексного обучения специалистов / А. Д. Обухов, Д. Л. Дедов, В. В. Вострикова [и др.] // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2021. – Т. 17, № 4. – С. 14–20. doi: 10.36622/VSTU. 2021.17.4.002

10. Upper and Lower Limb Training Evaluation System Based on Virtual Reality Technology / J. Zhao, H. Gao, C. Yang [et al.] // Sensors. – 2024. – Vol. 24, No. 21. – Art. 6909. doi: 10.3390/s24216909

11. Dynamic Difficulty Adjustment in Virtual Reality Exergaming to Regulate Exertion Levels via Heart Rate Monitoring / L. Küntzer, M. Scherer, T. Mentler, G. Rock // Proceedings of the 30th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology. – 2024. – P. 82:1–82:2. doi: 10.1145/3641825.3689504

12. Optimising Engagement for Stroke Rehabilitation Using Serious Games / J. W. Burke, M. D. J. McNeill, D. K. Charles [et al.] // The Visual Computer. – 2009. – Vol. 25, No. 12. – P. 1085–1099. doi: 10.1007/s00371-009-0387-4

13. Human motion capture algorithm for creating digital shadows of the movement process / A. D. Obukhov, A. A. Volkov, N. A. Vekhteva [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2022. – Vol. 2388, No. 1. – Art. 012033. doi: 10.1088/1742-6596/2388/1/012033

14. Machine Learning Based Abnormal Gait Classification with IMU Considering Joint Impairment / S. Hwang, J. Kim, S. Yang [et al.] //Sensors (Basel). – 2024. – Vol. 24, No. 17. – P. 5571. doi: 10.3390/s24175571

15. Yee David Vun Sing. Vision-Based Motion Capture for the Gait Analysis of Neurodegenerative Diseases: A Review / D. V. S. Yee, R. Bowers, A. McGarry // Gait & Posture. – 2024. – Vol. 112. – P. 95–107. doi: 10.1016/j.gaitpost.2024.04.029

16. Examination of the Accuracy of Movement Tracking Systems for Monitoring Exercise for Musculoskeletal Rehabilitation / A. Obukhov, A. Volkov, A. Pchelintsev [et al.] // Sensors. – 2023. – Vol. 23, No. 19. – Art. 8058. doi: 10.3390/s23198058

17. Modeling of the Learning Process in Adaptive Training Complexes / M. N. Krasnyanskiy, A. Obukhov, D. Dedov, A. Siukhin// Istrazivanja i Projektovanja za Privredu (Journal of Applied Engineering Science). – 2018. – Vol. 16, No. 4. – P. 487–493. doi: 10.5937/jaes16-17627

18. Разработка адаптивных тренажерных систем профессионального назначения для моделирования процесса распространения пожаров / М. Н. Краснянский, Д. Л. Дедов, А. Д. Обухов, А. Е. Архипов // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2017. – № 3(65). – С. 149–155. doi: 10.17277/vestnik.2017.03.pp.149-155

19. Modelling Individual Variation in Human Walking Gait Across Populations and Walking Conditions Via Gait Recognition / K. A. Duncanson F. Horst, E. Abbasnejad [et al.] // Journal of the Royal Society Interface. – 2024. – Vol. 21, No. 221. – Art. 20240565. doi: 10.1098/rsif.2024.0565

Software Module for Adapting a Virtual Environment with Biofeedback to Stimulate User Motor Activity

© **A. E. Arkhipov[1] ✉, A. A. Bozhiy[1], V. S. Kruglov[2]**

[1] *Department of Automated Decision Support Systems, alexeiarh@gmail.com; TSTU, Tambov, Russian Federation;*
[2] *Department of Fundamental and Applied Research, TSTU, Tambov, Russian Federation*

Keywords: adaptive training system; biofeedback; virtual reality; motor activity; dynamic adaptation; software module; complexity management.

Abstract: A software module for adapting a virtual environment with biofeedback to stimulate user motor activity is presented. The adaptation method involves increasing, maintaining, or decreasing complexity, smoothing control inputs, and limiting changes to scene parameters. The module's input and output data are defined, and the software architecture is developed. The software implementation features a VR scenario involving sequential stepping onto target platforms. Rules were implemented to reduce speed upon repeated errors, increase speed during consistent performance with insufficient workload, limit maximum values, and trigger an emergency stop if the upper heart rate limit is exceeded. The module can serve as the software foundation for research and training VR systems where exercise parameters are adjusted based on the user's physiological and motor data.

References

1. Popov A.I., Karpushkin S.V., Obukhov A.D. [Conceptual approaches to the formation and assessment of competencies of future specialists in extreme activities], *Professional'noye obrazovaniye v Rossii i za rubezhom* [Professional Education in Russia and Abroad], 2020, no. 1(37), pp. 51-59. (In Russ., abstract in Eng.).

2. Krasnyanskiy M.N., Dedov D.L., Obukhov A.D., Alekseev S.Y. Visualization technology and tool selection methods for solving adaptive training complex structural-parametric synthesis problems, *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 2020, vol. 20, no. 4, article 041001. doi: 10.1115/1.4045289

3. Bonanno M., Maggio M.G., De Pasquale P. [et al.] The Potential Effects of Sensor-Based Virtual Reality Telerehabilitation on Lower Limb Function in Patients with Chronic Stroke Facing the COVID-19 Pandemic: A Retrospective Case-Control Study, *Medical Sciences*, 2025, vol. 13, no. 2, art. 65. doi: 10.3390/medsci13020065

4. Kiani S., Rezaei I., Abasi S. [et al.] Technical Aspects of Virtual Augmented Reality-Based Rehabilitation Systems for Musculoskeletal Disorders of the Lower Limbs: A Systematic Review, *BMC Musculoskeletal Disorders*, 2023, vol. 24, article 4. doi: 10.1186/s12891-022-06062-6

5. Dutta A., Hatjipanagioti K., Newsham M.A. [et al.] Extended Reality Biofeedback for Functional Upper Limb Weakness: Mixed Methods Usability Evaluation, *JMIR XR and Spatial Computing*, 2025, vol. 2, article e68580. doi: 10.2196/68580

6. Schless S.H., Sorek G., Schurr I. [et al.] Effectiveness of treadmill-based virtual-reality biofeedback training to improve gait function in children and adolescents with congenital and acquired brain injury, *Scientific Reports*, 2026, vol. 16, article 2133. doi: 10.1038/s41598-025-31852-y

7. Krasnyanskiy M.N., Ostroukh A.V., Karpushkin S.V., Dedov D.L., Obukhov A.D. Design of Simulators for Automated Information Systems of Engineers' Training,

Journal of Applied Sciences, 2014, vol. 14, no. 21, pp. 2674-2684. doi: 10.3923/jas.2014.2674.2684

8. Popov A. I., Obukhov A. D. Conceptual approaches to automated management of professional education efficiency, *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2018, vol. 24, no. 2, pp. 246-257. doi: 10.17277/vestnik.2018.02.pp.246-257. (In Russ., abstract in Eng.).

9. Obukhov A.D., Dedov D.L., Vostrikova V.V. [et al.] Organization of interaction with virtual reality based on a treadmill platform for integrated specialist training, *Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2021, vol. 17, no. 4, pp. 14-20. doi: 10.36622/VSTU.2021.17.4.002. (In Russ., abstract in Eng.).

10. Zhao J., Gao H., Yang C. [et al.] Upper and Lower Limb Training Evaluation System Based on Virtual Reality Technology, *Sensors*, 2024, vol. 24, no. 21, article 6909. doi: 10.3390/s24216909

11. Küntzer L., Scherer M., Mentler T., Rock G. Dynamic Difficulty Adjustment in Virtual Reality Exergaming to Regulate Exertion Levels via Heart Rate Monitoring, *Proceedings of the 30th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, 2024, pp. 82:1-82:2. doi: 10.1145/3641825.3689504

12. Burke J.W., McNeill M.D.J., Charles D.K. [et al.] Optimising Engagement for Stroke Rehabilitation Using Serious Games, *The Visual Computer*, 2009, vol. 25, no. 12, pp. 1085-1099. doi: 10.1007/s00371-009-0387-4

13. Obukhov A.D., Volkov A.A., Vekhteva N.A. [et al.] Human motion capture algorithm for creating digital shadows of the movement process, *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, vol. 2388, no. 1, art. 012033. doi: 10.1088/1742-6596/2388/1/012033

14. Hwang S.,Kim J., Yang S. [et al.] Machine Learning Based Abnormal Gait Classification with IMU Considering Joint Impairment, *Sensors*, 2024, vol. 24, no. 17, article 5571. doi: 10.3390/s24175571

15. Yee D.V.S., Bowers R., McGarry A. Vision-Based Motion Capture for the Gait Analysis of Neurodegenerative Diseases: A Review, *Gait & Posture*, 2024, vol. 112, pp. 95-107. doi: 10.1016/j.gaitpost.2024.04.029

16. Obukhov A., VolkovA., Pchelintsev A. [et al.] Examination of the Accuracy of Movement Tracking Systems for Monitoring Exercise for Musculoskeletal Rehabilitation, *Sensors*, 2023, vol. 23, no. 19, article 8058. doi: 10.3390/s23198058

17. Krasnyanskiy M., Obukhov A., Dedov D.,Siukhinet A. Modeling of the Learning Process in Adaptive Training Complexes, *Journal of Applied Engineering Science*, 2018, vol. 16, no. 4, pp. 487-493. doi: 10.5937/jaes16-17627

18. Krasnyanskiy M.N., Dedov D.L., Obukhov A.D., Arkhipov A.E. [Development of adaptive professional training systems for modeling fire propagation], *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2017, no. 3(65), pp. 149-155. doi: 10.17277/vestnik.2017.03.pp.149-155 (In Russ., abstract in Eng.).

19. Duncanson K.A., Horst F., Abbasnejad E. [et al.] Modelling Individual Variation in Human Walking Gait Across Populations and Walking Conditions Via Gait Recognition, *Journal of The Royal Society Interface*, 2024, vol. 21, no. 221, article 20240565. doi: 10.1098/rsif.2024.0565

Softwaremodul zur Anpassung einer virtuellen Umgebung mit Biofeedback zur Stimulierung der motorischen Aktivität des Benutzers

Zusammenfassung: Es ist ein Softwaremodul zur Anpassung einer virtuellen Umgebung mit Biofeedback zur Stimulierung der motorischen Aktivität des Nutzers vorgestellt. Die Anpassungsmethode umfasst die Erhöhung, Beibehaltung oder

Verringerung der Komplexität, die Glättung der Steuerungsaktion und die Begrenzung von Änderungen der Szenenparameter. Die Eingangs- und Ausgangsdaten des Moduls sind definiert und die Softwarearchitektur entwickelt. Die Softwareimplementierung ist durch ein VR-Szenario mit sequenziellen Schritten auf Zielplattformen dargestellt. Es sind Regeln implementiert, um die Geschwindigkeit bei wiederholten Fehlern zu reduzieren, sie bei stabiler Leistung und unzureichender Belastung zu erhöhen, den Maximalwert zu begrenzen und einen Notstopp auszulösen, wenn die obere Herzfrequenzgrenze überschritten wird. Das Modul kann als Softwaregrundlage für Forschungs- und Trainings-VR-Systeme verwendet werden, in denen die Übungsparameter basierend auf den physiologischen und motorischen Daten des Nutzers verändert werden.

Module programmatique d'adaptation d'un environement virtuel affectionné à la feedback biologique pour stimuler l'activité motrise de l'usageur

Résumé: Est présenté un module programmatique de l'adaptation d'un environnement virtuel afféquent à la feedback biologique pour stimuler l'activité motrice de l'utilisateur. La méthode d'adaptation prévoit l'augmentation, le maintien ou la réduction de la complexité, l'assouplissement de l'effet de la commande et la limitation des changements des paramètres de scène. Est définie la composition des données entrées et sorties du module. Est développée l'architecture du logiciel. Est présentée la mise en œuvre programmatique sous forme d'un scénario VR avec un passage séquentiel sur les plateformes cibles. Sont réalisées des règles pour réduire la vitesse en cas d'erreurs répétées, pour augmenter la vitesse lors d'une exécution stable et d'une charge insuffisante, pour limiter la valeur maximale et arrêter d'urgence en cas de dépassement de la limite supérieure du rythme. Il est noté que le module peut servir de base logicielle aux systèmes VR de recherche et d'entraînement, dans lesquels les paramètres de l'exercice sont ajustés en fonction des données physiologiques et motrices de l'utilisateur.

Авторы: ***Архипов Алексей Евгеньевич*** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений»; ***Божий Алина Адриановна*** – студент, ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Российская Федерация; ***Круглов Владислав Сергеевич*** – аспирант кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений», программист, Управление фундаментальных и прикладных исследований, ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Российская Федерация.