

## Управление в технических системах

© 2022 г. М.Н. КРАСНЯНСКИЙ, д-р техн. наук (kras@tambov.ru),  
А.Д. ОБУХОВ, канд. техн. наук (obuhov.art@gmail.com),  
Д.Л. ДЕДОВ, канд. техн. наук (hammer68@mail.ru)  
(Тамбовский государственный технический университет)

### СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ АДАПТИВНОЙ БЕГОВОЙ ПЛАТФОРМОЙ ДЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ В ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ<sup>1</sup>

Рассматривается проблема реализации системы управления беговой платформой для организации комфортного перемещения человека в виртуальной реальности с возможностью адаптации скорости платформы в зависимости от характера перемещения пользователя, что позволит повысить комфортность и степень погружения в виртуальное окружение. В статье используются управляемая беговая платформа (реализуемая на базе однонаправленной беговой дорожки) и система позиционирования человека на основе датчиков (трекеров) виртуальной реальности, что обеспечивает достаточную частоту и точность позиционирования человека. Для платформы разработано программное обеспечение, способное осуществить сбор данных о перемещении пользователя и сравнение различных алгоритмов управления. Осуществлена формализация набора функций для управления платформой, в том числе разработанных в рамках данного исследования, проведены их сравнение и оценка. В ходе экспериментальных исследований определены оптимальные функции управления для рассматриваемой беговой платформы. Выявлены преимущества и недостатки каждой функции. Научная новизна исследования заключается в реализации новых функций управления беговой платформой для повышения ее адаптивности к действиям пользователя за счет снижения среднего отклонения человека от начальной позиции и, следовательно, негативных эффектов колебания и инерции. Практическая значимость состоит в совершенствовании процесса сопряжения виртуальной реальности с устройствами, имитирующими передвижение человека (в рамках данного исследования — однонаправленной беговой дорожки), и разработке соответствующего программного обеспечения. Полученные результаты могут быть адаптированы под всенаправленные беговые платформы.

*Ключевые слова:* адаптивная беговая платформа, система управления, анализ движений человека, перемещение в виртуальной реальности.

**DOI:** 10.31857/S0005231022030060

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке лаборатории медицинских VR тренажерных систем для обучения, диагностики и реабилитации.

## 1. Введение

Технологии виртуальной реальности активно применяются в различных сферах деятельности общества: при профессиональной подготовке специалистов, для проведения реабилитационных мероприятий, в развлекательных и образовательных системах [1, 2]. Несмотря на значительное повышение качества изображения, транслируемого в шлем виртуальной реальности, добавление новых датчиков и сенсоров, позволяющих улучшить степень погружения в виртуальное пространство, ряд вопросов остается нерешенным. Ключевым моментом при взаимодействии человека с виртуальной реальностью является задача комфортного и естественного перемещения в ней. Использование различного рода контроллеров или манипуляторов по-прежнему не может в полной мере заменить классическое перемещение при помощи ног, так как вызывает различные негативные реакции со стороны вестибулярного аппарата (укачивание, тошнота, головокружение и т.д. [3, 4]). Использование механизма управления камерой, при котором пользователь переносится (телепортируется) в выбранное место по визуальным и физическим ощущениям, не соответствует привычному процессу перемещения [5]. При использовании контроллеров возникает проблема взаимодействия с виртуальной средой, так как при таком подходе нельзя одновременно перемещаться и взаимодействовать с предметами.

Перспективным направлением в решении данной проблемы является использование беговых платформ, адаптирующихся под скорость перемещения пользователя и передающих эту информацию в системы виртуальной реальности. Это позволит обособить процесс перемещения, высвободить руки для взаимодействия с виртуальными объектами. Такой подход уже успешно апробирован во многих исследованиях [6, 7], подтверждено увеличение эффекта погружения в виртуальную реальность, удобства передвижения и взаимодействия с предметами, а также обеспечение необходимой физической нагрузки, что особенно актуально для профессиональной подготовки, фитнес-индустрии и реабилитации опорно-двигательной системы [8, 9]. Схема взаимодействия таких платформ и технологий виртуальной реальности представлена на рис. 1.

Однако несмотря на очевидный положительный эффект от использования беговых платформ, существует ряд проблем, требующих решения: несовершенство алгоритмов управления, наличие программного и аппаратного запаздывания [6]. Конструкция таких платформ не всегда позволяет выработать необходимый уровень физических нагрузок (решения, основанные на принципе скольжения, не дают подобного эффекта [7]), а система управления платформой может быть недостаточно эффективной и точной (из-за особенностей используемых методов позиционирования или алгоритмического обеспечения [10]).

Таким образом, проведенный анализ показал перспективность использования беговых платформ, адаптирующихся к темпу передвижения человека, при реализации систем виртуальной реальности. Поэтому актуальной задачей является организация взаимодействия с виртуальной реальностью на

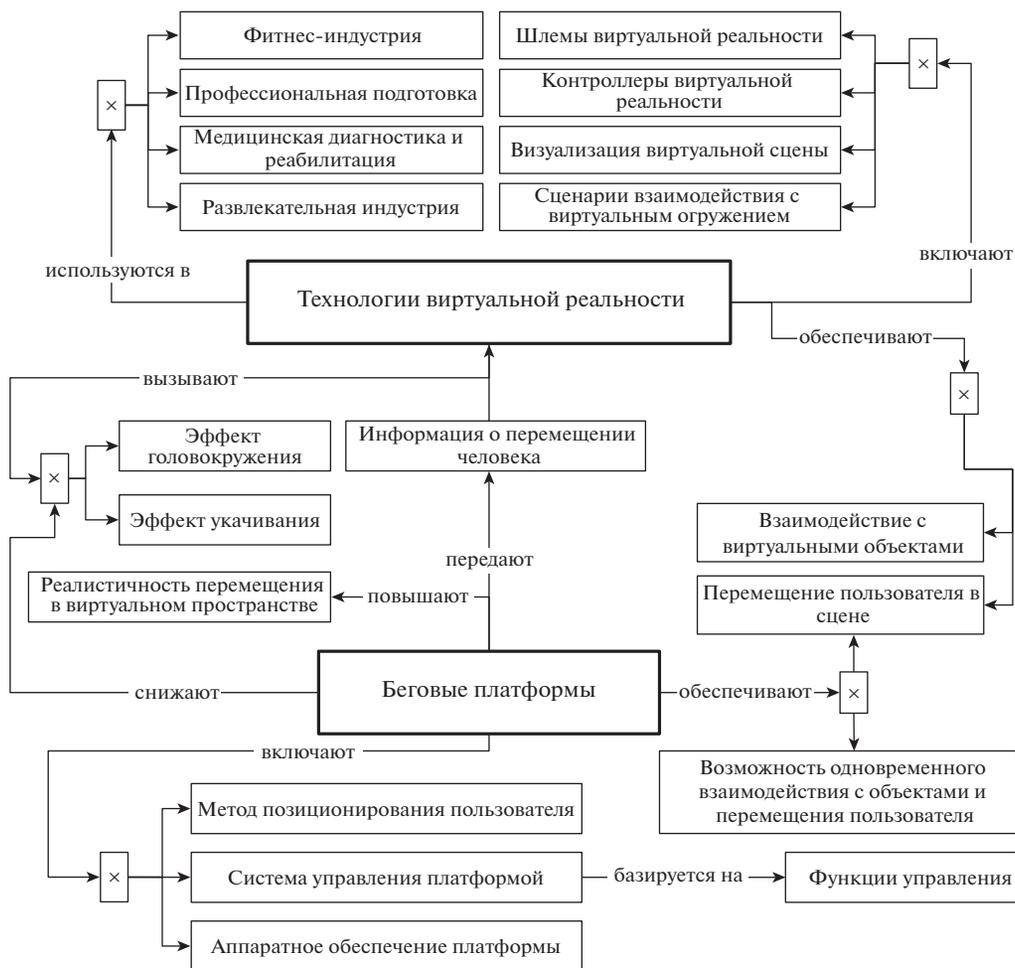


Рис. 1. Схема взаимодействия технологий виртуальной реальности и беговых платформ.

основе управляемой беговой платформы с разработкой новых алгоритмов управления, позволяющих повысить комфортность перемещения и степень погружения в виртуальное окружение за счет минимизации величины колебаний человека на платформе. Для ее решения необходимо осуществить сравнительный анализ существующих подходов к управлению платформой, выявить их преимущества и недостатки, реализовать новые, более эффективные функции управления и интегрировать их в программное обеспечение платформы.

## 2. Анализ процесса перемещения человека по беговой платформе

Реализация функций управления беговой платформой невозможна без точного позиционирования объекта (человека) на ее рабочем пространстве.

Данная задача может решаться различными способами: с помощью датчиков [11], обратной связи [12], оптических сенсоров [10], камер [13].

В данном исследовании для решения задачи позиционирования используются датчики на основе трекеров компании High Tech Computer (HTC) Corporation, позволяющие с помощью открытой библиотеки OpenVR получать информацию о координатах трекера по трем осям, а также углах его наклона с высокой частотой (не менее 50 раз в секунду) и точностью (погрешность около 0,7 мм) [14]. Недостатком данного подхода является необходимость использования базовых станций для формирования зоны отслеживания трекеров.

Далее необходимо проанализировать и формализовать процесс перемещения человека на беговой дорожке. Для этого возможно использование классической теории кинематики [15, 16], однако возросшие вычислительные затраты увеличат время обработки информации, что недопустимо в системах реального времени подобного рода, где беговая платформа должна реагировать на действия человека с минимальным запаздыванием.

Формализуем процессы перемещения человека в виде упрощенного математического обеспечения, которое будет достаточным для использования в системах виртуальной реальности, не потребует больших вычислительных затрат для работы с минимальной задержкой. Последнее условие является определяющим, так как система управления дорожкой должна реагировать на действия человека в реальном времени. Такое допущение возможно, так как в рамках решаемой задачи не требуется исследование кинематической модели движения человека, а необходимо формализовать лишь процесс его позиционирования в рамках беговой платформы.

Обозначим через  $P_M$  процесс перемещения человека по адаптивной беговой платформе в виртуальной реальности, который будет включать следующие составляющие:

$$(1) \quad P_M = (P_H, P_T, P_V),$$

где  $P_H$ ,  $P_T$ ,  $P_V$  – процессы перемещения человека, полотна платформы и камеры в виртуальной реальности соответственно.

Рассмотрим каждую составляющую процесса перемещения.

Процесс перемещения пользователя  $P_H$  будет включать координаты, описывающие положение человека в пространстве, и скорость в определенные моменты времени:

$$(2) \quad P_H = \{C_i, V_i\}, \quad i = \overline{1, N},$$

где  $N$  – количество отслеживаемых точек (трекеров),

$C_i = (X_i, Y_i, Z_i)$  – кортеж множеств координат  $i$ -й точки по трем осям, каждое множество включает значения координаты точки по соответствующей оси, полученные через некоторый интервал времени  $\Delta t$ , например,  $Z_i = z_{i,j}$ ;

$V_i = \{v_{i,j}\}$  – множество скоростей  $i$ -й точки, м/с.

В качестве аппаратной основы беговой платформы используется управляемая однонаправленная беговая дорожка с регулируемой скоростью и углом наклона. При такой аппаратной реализации в качестве основной оси координат используется ось  $Z$ , направленная вдоль дорожки, что обусловлено спецификой работы шлема виртуальной реальности и заданной в нем системы координат. Так как однозначно положение человека на дорожке и его удаление от некоторой начальной или оптимальной позиции ( $z_0$ ) задает только одна координата по оси  $Z$ , то для расчета скорости человека в некоторый момент времени  $j$  можно использовать формулу

$$(3) \quad v_{i,j} = \frac{\Delta z_{i,j}}{\Delta t},$$

где  $\Delta z_{i,j} = (z_{i,j} - z_{i,j-1})$  – изменение координаты по оси  $Z$ ;

$z_{i,j} \in Z_i$  – текущее положение человека;

$z_{i,j-1} \in Z_i$  – предыдущее положение (отстающее по времени на  $\Delta t$ ).

При анализе перемещения человека возможны два варианта: отслеживание по трекеру на спине или по двум точкам, расположенным на ногах [17, 18]. Во втором случае возможно использование в качестве координаты пользователя среднего значения между двумя трекерами или другие вариации.

Процесс перемещения полотна беговой платформы включает следующие компоненты:

$$(4) \quad P_T = (V_T, z_0, z_{\max}, L_T, L_S),$$

где  $V_T$  – функция выбора скорости платформы, значения которой зависят от положения или скорости человека, направление перемещения полотна платформы противоположно направлению движения человека, скорость в метрах в секунду, м/с;

$z_0$  – начальная точка, которая задается для калибровки пользователя в рабочем пространстве платформы;

$z_{\max}$  – максимальное значение координаты (соответствует общей длине платформы);

$L_T = |z - z_0|$  – рабочая зона в метрах;

$L_S = |z_0|$  – безопасная зона (в ней система управления не реагирует на движения пользователя, следовательно,  $V_T = 0$ ) в метрах.

Так как в процессе сбора данных о перемещении человека дорожка также движется, оказывая влияние на текущие координаты трекеров, то необходимо осуществить преобразование координат всех точек путем добавления сдвига полотна за время  $\Delta t$  при скорости платформы  $V_T(z_{i,j})$ :

$$(5) \quad z_{i,j}^{abs} = z_{i,j-1}^{abs} + \Delta z_{i,j} + V_T(z_{i,j})\Delta t,$$

где  $z_{i,j}^{abs}$  – координаты человека без учета влияния скорости дорожки.

Используя формулу (5), можно полностью восстановить траекторию движения человека и использовать ее для дальнейшего тестирования различных алгоритмов управления, учитывая только специфику их функций.

Процесс перемещения в виртуальном пространстве определяется следующим образом:

$$(6) \quad P_V = (C_V, V_V),$$

где  $C_V$  – положение камеры в виртуальном пространстве;

$V_V$  – скорость аватара пользователя в виртуальном пространстве (в м/с, заданных для трехмерной сцены), которая соответствует скорости полотна платформы  $V_T$  (возможно, с умножением на некоторый поправочный коэффициент [19]).

После получения значения скорости  $V_V$  осуществляется сдвиг аватара в виртуальном пространстве:

$$(7) \quad C_V(t + \Delta t) = C_V(t) + V_V \Delta t.$$

Задача поиска оптимальной функции управления  $V_T$  может быть сформулирована различными способами [20]: на основе анализа отклонения траектории движения человека от некоторого эталона, разницы между скоростью платформы и человека или на основе других критериев. В простейшей форме за критерий оптимальности функции управления можно принять минимальное выборочное среднее траектории человека  $\bar{Z}$ , которое отражает величину колебаний человека на пространстве платформы в процессе перемещения относительно некоторой нулевой позиции:

$$(8) \quad R(V_T) = \bar{Z} \rightarrow \min.$$

Таким образом, для успешного решения поставленной задачи организации перемещения человека в виртуальном пространстве с применением беговой платформы необходимо выбрать функцию  $V_T$  из некоторого множества вариантов, при которой критерий  $R(V_T)$  достигает экстремума.

### 3. Анализ и формализация функций управления беговой платформой

В данном исследовании рассматриваются следующие функции управления: линейная, нелинейная (параболическая), нелинейная модифицированная, зональная, детализированная зональная и пропорционально-дифференциальная.

На рис. 2 представлены графики первых пяти функций, так как они находятся в прямой зависимости от положения пользователя ( $z$ ) в отличие от пропорционально-дифференциальной функции, которая будет зависеть еще и от скорости движения пользователя. Рассмотрим формализованное представление каждой из функций.

Для упрощения записи формул функций управления платформой примем следующие общие обозначения:  $z$  (или  $z_{i,j}$ ) – текущее положение человека,  $z_{i,j-1}$  – предыдущее положение в момент, отстающий по времени на  $\Delta t$ .

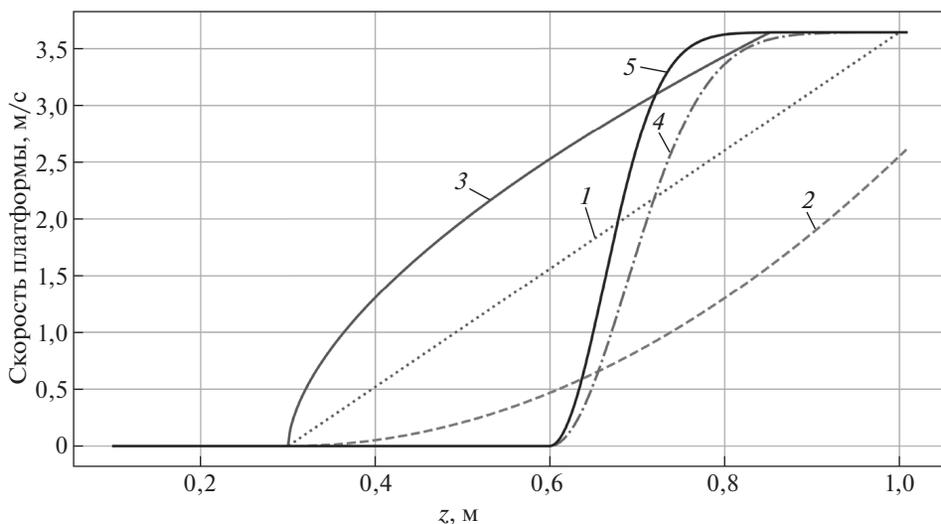


Рис. 2. Сравнение динамики изменения функций управления в зависимости от положения человека на платформе: 1 – линейная, 2 – нелинейная (параболическая), 3 – нелинейная модифицированная, 4 – зональная с накоплением, 5 – детализированная зональная с накоплением.

Линейная функция (график 1), увеличивая или уменьшая скорость полотна пропорционально положению человека, равномерно регулирует скорость на всей длине рабочей области платформы:

$$(9) \quad V_{T,lin}(z) = \frac{(z - z_0) V_T^{\max}}{L_T},$$

где  $V_{T,lin}(z)$  – линейная функция расчета скорости, зависящая от текущего положения человека  $z$  и удаленности от стартовой точки  $z_0$ ;

$V_T^{\max}$  – максимально возможная скорость платформы, м/с.

Нелинейная (параболическая) функция  $V_{T,par}$  (график 2) изменяет скорость беговой платформы более плавно и имеет вид:

$$(10) \quad V_{T,par}(z) = \frac{(z - z_0)^2 V_T^{\max}}{L_T}.$$

Так как процесс изменения скорости на первой половине рабочей зоны при функции  $V_{T,par}$  оказался слишком медленным (рис. 2), то при использовании параболической функции платформа не смогла выйти на максимальную скорость при  $z = 1$ . Поэтому была произведена модификация (график 3), которая позволила увеличить скорость реакции на изменение положения человека и сократить эффект запаздывания в начале разгона платформы:

$$(11) \quad V_{T,mod}(z) = \frac{(z - z_0)^{0,6} V_T^{\max}}{L_T},$$

где  $V_{T,mod}(z)$  – модифицированная нелинейная функция расчета скорости.

Зональная функция управления  $V_{T,m1}$  (график 4) основана на разделении рабочей зоны на две зоны: торможения и ускорения. При нахождении человека в одной из них скорость дорожки плавно нарастает или убывает с заданным шагом:

$$(12) \quad V_{T,m1}(z) = \begin{cases} V_{T,m1} - \frac{k_1(z_c - z)}{z_c - z_0}, & z_0 < z \leq z_c, \\ V_{T,m1} + \frac{k_2(V_T^{\max} - V_{T,m1})(z - z_c)}{z^{\max} - z_c}, & z > z_c, \end{cases}$$

где  $k_1, k_2$  – коэффициенты, определяющие скорость торможения или ускорения соответственно;

$z_c$  – центральная точка рабочей зоны, заданная эмпирически,  $z_0 < z_c < z^{\max}$ .

Детализированная зональная функция управления  $V_{T,m2}$  (график 5) отличается от зональной добавлением большего количества зон: торможения, удержания и ускорения. При таком подходе алгоритм стремится разместить человека в центральной зоне удержания с постоянной скоростью (скоростью удержания  $V_{def}$ ), соответствующей текущей скорости человека. Скорость удержания  $V_{def}$  используется в качестве основной в первых двух зонах, а в третьей зоне  $V_{def}$  обновляется:

$$(13) \quad V_{T,m2}(z) = \begin{cases} V_{def} \frac{z - z_0}{z_{t1} - z_0}, & z_0 < z \leq z_{t1}, \\ V_{def}, & z_{t1} < z \leq z_{t2}, \\ V_{T,m2} + \frac{(V_T^{\max} - V_{T,m2})(z - z_{t2})}{z^{\max} - z_{t2}}, & V_{def} = V_{T,m2}, \quad z > z_{t2}, \end{cases}$$

где  $z_{t1}, z_{t2}$  – вспомогательные точки, разделяющие рабочую зону на зоны торможения, удержания и ускорения.

На рис. 2 имеется некоторое допущение для зональных функций – присутствует лишь отражение процесса равномерного ускорения платформы (начиная с положения 0,6 м) без демонстрации процесса торможения, так как этот процесс напрямую зависит от той скорости, с которой пользователь попадает в зону торможения.

Пропорционально-дифференциальная (ПД) функция  $V_{T,PD}$  основана на соответствующем законе регулирования и использует информацию о смещении объекта наблюдения (человеке), а также о его скорости (производной от этого смещения) [21]:

$$(14) \quad V_{T,PD}(z_{i,j}, t) = V_{T,PD}(z_{i,j-1}, t - \Delta t) + k_1(z_{i,j} - z_{i,j-1}) + k_2 \frac{\Delta z_{i,j}}{\Delta t},$$

где  $V_{T,PD}(z_{i,j}, t)$  – скорость в текущий момент времени  $t$  при текущем положении  $z_{i,j}$  человека;

$V_{T,PD}(z_{i,j-1}, t - \Delta t)$  – скорость платформы в предыдущую итерацию при положении  $z_{i,j-1}$  человека;

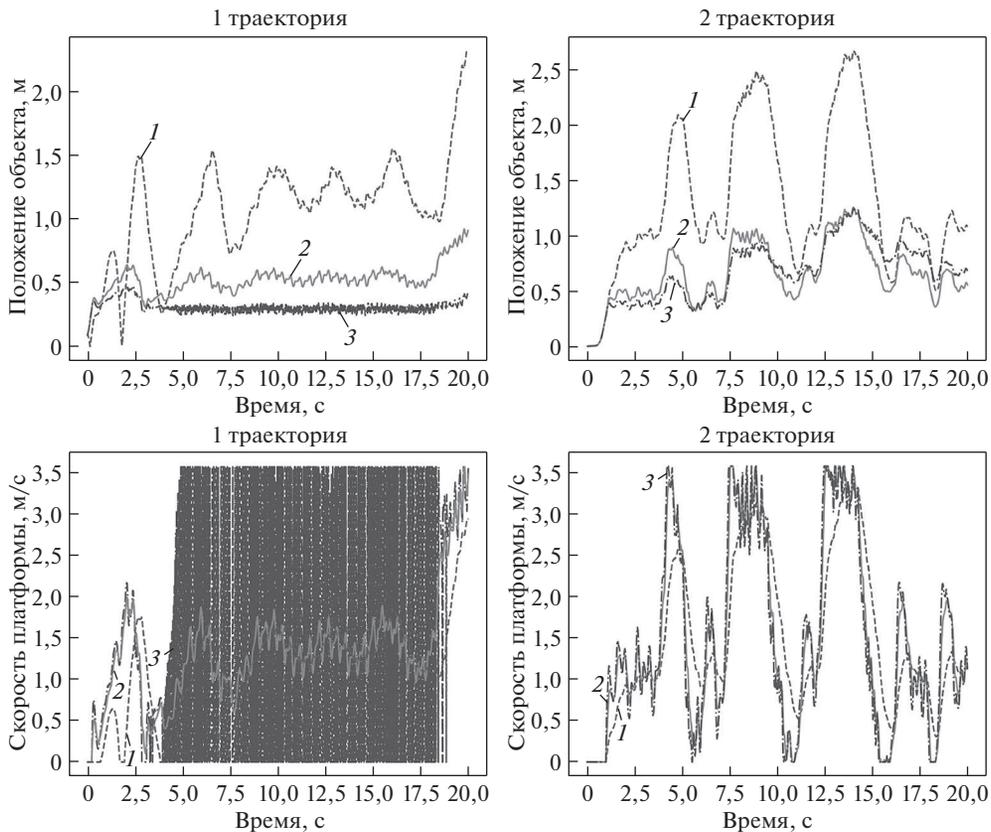


Рис. 3. Поведение пропорционально-дифференциальной функции управления при различных коэффициентах: 1 –  $k_1 = 2$ ,  $k_2 = 5$ , 2 –  $k_1 = 10$ ,  $k_2 = 20$ , 3 –  $k_1 = 20$ ,  $k_2 = 40$ .

$k_1$ ,  $k_2$  – поправочные коэффициенты, определяющие влияние пропорциональной и дифференциальной составляющих функции  $V_{T,PD}$ .

Так как ПД функция управления зависит не только от положения пользователя, но и от его скорости, отдельно рассмотрим характер изменения данной функции. Выбор коэффициентов  $k_1$  и  $k_2$  определяет эффективность работы функции управления. Данный эффект проиллюстрирован на рис. 3, где для двух траекторий использовались три различных варианта коэффициентов ПД функций управления. Два верхних графика отражают положение человека при различных значениях коэффициентов, нижние графики – рассчитанную по ПД функции скорость.

Неправильно подобранные коэффициенты не позволяют платформе своевременно и в нужном размере увеличивать или уменьшать скорость платформы, что приводит к значительному запаздыванию (графики положения человека при  $k_1 = 2$ ,  $k_2 = 5$ ).

Из рис. 3 можно сделать вывод, что увеличение коэффициентов повышает скорость реакции системы управления, однако на первой траектории избы-

точные значения коэффициентов ( $k_1 = 20$ ,  $k_2 = 40$ ) привели к хаотичному регулированию скорости от минимального до максимального значения, что обеспечило колебание человека в одной точке с высокой частотой. Такие колебания могут вызвать негативное влияние на вестибулярный аппарат пользователя.

Средние значения коэффициентов ( $k_1 = 10$ ,  $k_2 = 20$ ) показали достаточно хорошие результаты в обоих случаях. Таким образом, подбор оптимальных значений коэффициентов может быть темой отдельных исследований, так как может присутствовать зависимость от характера движения пользователя, свойств аппаратного обеспечения (длины и скорости платформы). В рамках данного исследования будут использоваться значения  $k_1 = 10$ ,  $k_2 = 20$ . Из-за специфики работы беговой дорожки подбор коэффициентов осуществлялся аналитически, в дальнейшем планируется более точная настройка ПДФункции известными методами (например, Циглера–Никольса). Далее необходимо осуществить экспериментальное сравнение алгоритмов при различных траекториях движения человека.

#### 4. Экспериментальное сравнение функций управления

При проведении экспериментов использовались следующие пять функций: линейная, нелинейная модифицированная, зональная, детализированная зональная, ПД. Эксперименты проводились на беговой платформе в виде однонаправленной беговой дорожки с рабочей зоной в 1 м, способной развивать скорость от 0 до 3,5 м/с (с возможностью выбора 250 промежуточных значений) [22]. Программное обеспечение системы управления беговой платформой реализовано на основе языка программирования Python с применением следующих библиотек: pySerial (для подключения к аппаратному обеспечению платформы и плате Arduino [23]), OpenVR (для получения данных о положении трекеров и, следовательно, человека [24]), Matplotlib (для построения графиков траекторий движения человека и скорости платформы [25]). Специфика системы управления и наличие определенной инерции у серводвигателей позволяют судить об отсутствии существенной разницы при колебаниях скорости в 5–10 единиц, что позволяет игнорировать малые отклонения датчика вплоть до 4 см.

Для определения оптимальной функции управления используем записанные траектории перемещения человека без учета влияния скорости дорожки в качестве входных данных для каждой функции (по формуле (5)). Таким образом, условия для всех экспериментов будут идентичными, а результаты будут соответствовать перемещению человека при различных функциях управления. В качестве основной оценки функций управления будем использовать выборочное среднее траектории человека  $\bar{Z}$ , а также вспомогательные метрики: максимальное отклонение от начальной позиции  $\max(|z|)$ , дисперсию  $D(Z)$ , среднеквадратическое отклонение  $\sigma_Z$  (квадратный корень из дисперсии) траектории человека, дисперсию  $D(V_T)$  и среднеквадратическое отклонение  $\sigma_{V_T}$  скорости беговой платформы.

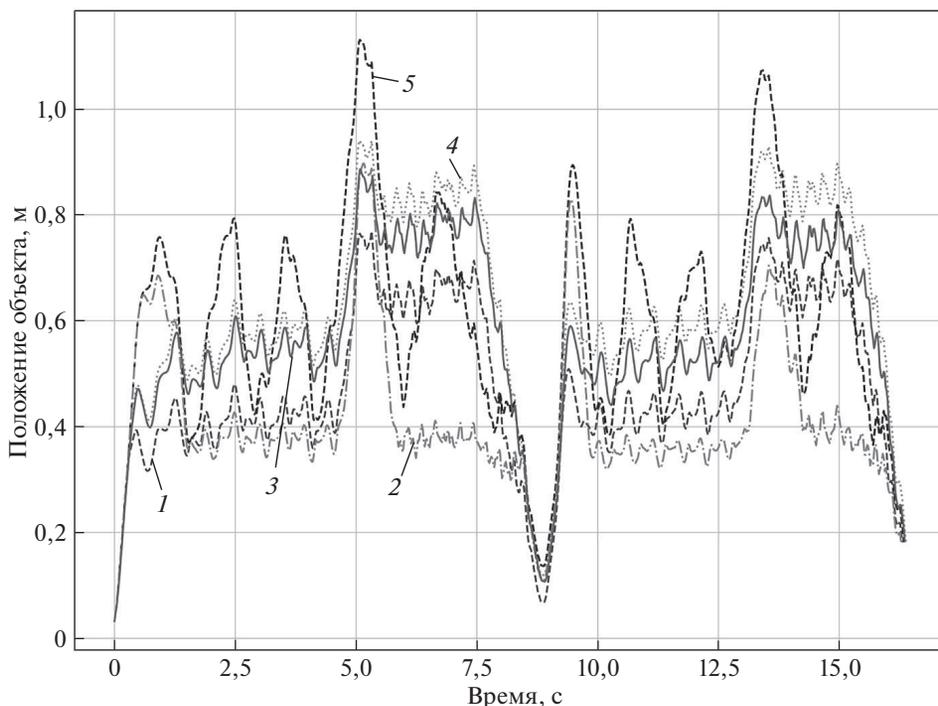


Рис. 4. Сравнение функций управления на первой траектории движения человека: 1 — линейная, 2 — нелинейная модифицированная, 3 — зональная, 4 — детализированная зональная, 5 — пропорционально-дифференциальная.

В первом эксперименте сравним все пять функций управления. Полученные в результате траектории движения пользователя для каждой функции представлены на рис. 4, а значения основных метрик — в табл. 1. Лучшие результаты по каждой метрике выделены.

Среди анализируемых функций наихудшие результаты по основному критерию  $\bar{Z}$  и дополнительным метрикам ( $\max(|z|)$ ,  $D(Z)$  и  $\sigma_Z$ ) показали линейная и зональная функции. Причиной такого результата для обеих функций является недостаточно высокая динамика изменения скорости: это хорошо отражают графики на рис. 2, где линейная функция значительно отстает по этому показателю от нелинейной модифицированной, а зональная — от дета-

Таблица 1. Результаты первого эксперимента

| Функция                          | $\bar{Z}$    | $\max( z )$  | $D(Z)$       | $\sigma_Z$   | $D(V_T)$     | $\sigma_{V_T}$ |
|----------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|
| Линейная                         | 0,624        | 0,940        | 0,035        | 0,187        | <b>0,754</b> | <b>0,868</b>   |
| Нелинейная модифицированная      | 0,473        | <b>0,768</b> | 0,023        | 0,154        | 0,777        | 0,881          |
| Зональная                        | 0,600        | 1,131        | 0,042        | 0,205        | 1,164        | 1,079          |
| Детализированная зональная       | <b>0,411</b> | 0,897        | <b>0,020</b> | <b>0,143</b> | 1,006        | 1,003          |
| Пропорционально-дифференциальная | 0,574        | 0,886        | 0,028        | 0,170        | 0,762        | 0,873          |

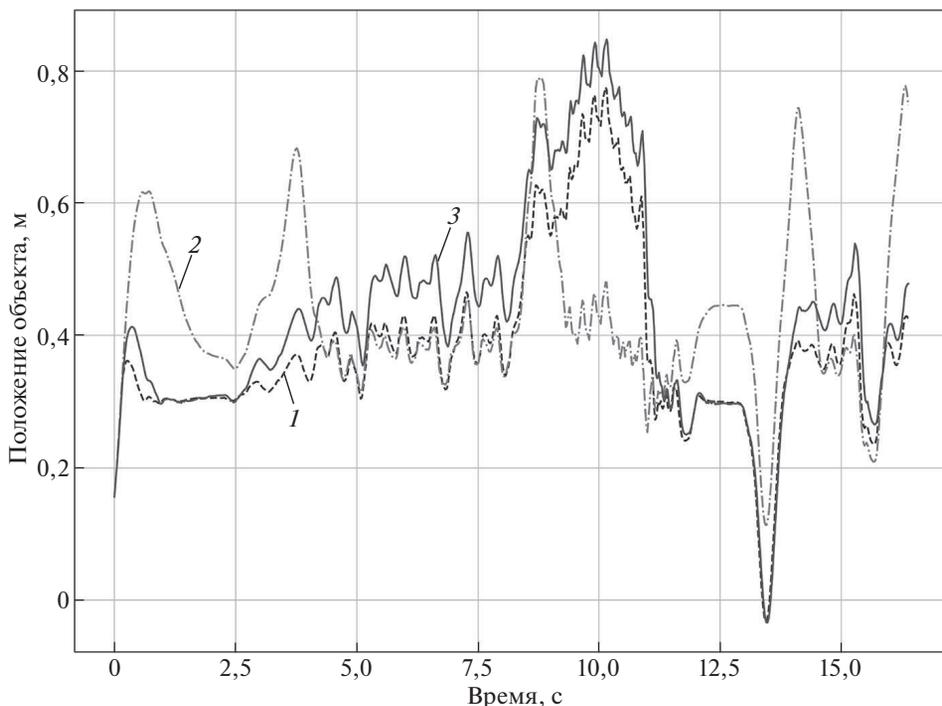


Рис. 5. Сравнение функций управления на второй траектории движения человека: 1 – линейная, 2 – нелинейная модифицированная, 3 – зональная.

лизированной зональной. По причине своей недостаточной эффективности в следующем эксперименте данные функции не будут принимать участия. Однако по показателям  $D(V_T)$  и  $\sigma_{V_T}$  наибольшее колебание значений скорости оказалось у зональных функций.

Для второй траектории движения пользователя получены результаты, представленные на рис. 5 и в табл. 2. Поведение выбранных функций управления на новой траектории соответствует первому эксперименту, они также остаются работоспособными.

Во втором эксперименте наилучшие результаты показала нелинейная модифицированная функция. Детализированная зональная и ПД функции выглядят перспективно за счет возможности варьирования значениями коэффициентов, что может повлиять на динамику изменения скорости, однако в рамках проведенных экспериментов они не показали лучших результатов,

**Таблица 2.** Результаты второго эксперимента

| Функция                          | $\bar{Z}$    | $\max( z )$  | $D(Z)$       | $\sigma_Z$   | $D(V_T)$     | $\sigma_{V_T}$ |
|----------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|
| Нелинейная модифицированная      | <b>0,380</b> | <b>0,775</b> | 0,017        | 0,131        | 0,757        | 0,870          |
| Детализированная зональная       | 0,427        | 0,789        | <b>0,014</b> | <b>0,120</b> | 0,935        | 0,967          |
| Пропорционально-дифференциальная | 0,429        | 0,847        | 0,025        | 0,159        | <b>0,732</b> | <b>0,855</b>   |

хотя и могут использоваться в качестве алгоритма управления. Колебание значений скорости (метрики  $D(V_T)$  и  $\sigma_{V_T}$ ) у нелинейной модифицированной и ПД функции показывает лучшие результаты с незначительным превосходством ПД функции.

Таким образом, в качестве функций для реализации системы управления адаптивной беговой платформой рекомендуется использование нелинейной модифицированной функции. Использование детализированной зональной и ПД функций также допустимо.

## 5. Заключение

В статье рассмотрена задача реализации системы управления адаптивной беговой платформой для организации перемещения в виртуальной реальности. Для ее решения проведено сравнение существующих и новых функций управления. На основе анализа предметной области формализованы процессы перемещения человека, платформы, а также аватара в виртуальной реальности в упрощенной форме. Поставлена задача исследования — минимизация среднего значения траектории человека, а также определены дополнительные метрики для оценки функций управления.

Проведен анализ функций управления, в том числе нескольких новых подходов к управлению беговой платформой. Каждая функция управления формализована, исследована динамика ее изменения в зависимости от положения человека на платформе, а также его скорости (для пропорционально-дифференциальной функции).

В ходе экспериментальных исследований определено, что наилучшие показатели по совокупности метрик показывает нелинейная модифицированная функция, далее следуют детализированная зональная и пропорционально-дифференциальная функции. Худшие результаты получены на линейной и зональной функциях, их использование не рекомендуется. В процессе исследований реализованы подходы к сбору и обработке данных о перемещении человека на беговой платформе для получения и последующего использования траектории пользователя.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности улучшения рассмотренных функций управления за счет варьирования значений коэффициентов, обработки отдельных сценариев взаимодействия с платформой (резкий разгон или остановка человека) с использованием дополнительного алгоритмического обеспечения или методов машинного обучения, а также использования комбинаций различных функций на отдельных участках платформы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванова А.В.* Технологии виртуальной и дополненной реальности: возможности и препятствия применения // Стратегические решения и риск-менеджмент. 2018. № 3. С. 88–107. <https://doi.org/10.17747/2078-8886-2018-3-88-107>

2. *Krasnyanskiy M., Obukhov A., Dedov D., Siukhin A.* Modeling of the Learning Process in Adaptive Training Complexes // *J. Appl. Engineering Sci.* 2018. V. 16. No. 4. P. 487–493. <https://doi.org/10.5937/jaes16-17627>
3. *Almeida A., Rebelo F., Noreiga P., Vilar E.* Virtual Reality Self-induced Cybersickness: an Exploratory Study // *Advances in Intelligent Syst. and Comput.* 2018. P. 26–33. [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-60582-1\\_3](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-60582-1_3)
4. *Risi D., Palmisano S.* Effects of Postural Stability, Active Control, Exposure Duration and Repeated Exposures on HMD Induced Cybersickness // *Displays.* 2019. V. 60. P. 9–17. <https://dx.doi.org/10.1016/j.displa.2019.08.003>
5. *Canessa A., Casu P., Solari F., Chessa M.* Comparing Real Walking in Immersive Virtual Reality and in Physical World using Gait Analysis // *VISIGRAPP (2: HUCAPP)*. 2019. P. 121–128. <http://dx.doi.org/10.5220/0007380901210128>
6. *Alqahtani A.S., Daghestani L.F., Ibrahim L.F.* Environments and System Types of Virtual Reality Technology in STEM: A survey // *Int. J. Advanced Comput. Sci. and Appl.* 2017. V. 8. No. 6. P. 77–89. <http://dx.doi.org/10.14569/IJACSA.2017.080610>
7. *Wehden L.O., Reer F., Janzik R., Tang W.Y., Quandt T.* The Slippery Path to Total Presence: How Omnidirectional Virtual Reality Treadmills Influence the Gaming Experience // *Media and Communication.* 2021. V. 9. No. 1. P. 5–16. <http://dx.doi.org/10.17645/mac.v9i1.3170>
8. *Debska M., Polechonski J., Mynarski A., Polechonski P.* Enjoyment and Intensity of Physical Activity in Immersive Virtual Reality Performed on Innovative Training Devices in Compliance with Recommendations for Health // *Int. J. Environmental Research and Public Health.* 2019. V. 16. No. 19. P. 3673. <https://doi.org/10.3390/ijerph16193673>
9. *Vanoglio F., Olivares A., Bonometti G.P., Damiani S., Gaiani M., Comini L., Luisa A.* A Decision Making Algorithm for Rehabilitation after Stroke: A Guide to Choose an Appropriate and Safe Treadmill Training // *Neurorehabilitation.* 2021. P. 1–11. <http://dx.doi.org/10.3233/NRE-210065>
10. *Kim J., Gravunder A., Park H.S.* Commercial Motion Sensor Based Low-cost and Convenient Interactive Treadmill // *Sensors.* 2015. V. 15. No. 9. P. 23667–23683. <http://dx.doi.org/10.3390/s150923667>
11. *Haji Maghsoudi O., Vahedipour A., Spence A.* Three-dimensional-based Landmark Tracker Employing a Superpixels Method for Neuroscience, Biomechanics, and Biology Studies // *Int. J. Imaging Syst. and Technology.* 2019. V. 29. No. 4. P. 419–430. <https://doi.org/10.1002/ima.22317>
12. *Hejrati B., Crandall K.L., Hollerbach J.M., Abbott J.J.* Kinesthetic Force Feedback and Belt Control for the Treadport Locomotion Interface // *IEEE Trans. Haptics.* 2015. V. 15. No. 8. P. 176–187. <https://doi.org/10.1109/TOH.2015.2404357>
13. *Zhao H., Hao F.* Target Tracking Algorithm for Table Tennis Using Machine Vision // *J. Healthcare Engineering.* 2021. P. 1–7. <https://doi.org/10.1155/2021/9961978>
14. *Ikkbal M.S., Ramadoss V., Zoppi M.* Dynamic Pose Tracking Performance Evaluation of HTC Vive Virtual Reality System // *IEEE Access.* 2020. V. 9. P. 3798–3815. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3047698>
15. *Vieten M.M., Weich C.* The Kinematics of Cyclic Human Movement // *PloS one.* 2020. V. 15. No. 3. P. 0225157. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0225157>

16. *Alamdari A., Krovi V.N.* A Review of Computational Musculoskeletal Analysis of Human Lower Extremities // Human Modelling for Bio-Inspired Robotics. 2017. P. 37–73. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803137-7.00003-3>
17. *Goncalves G., Melo M., Barbosa L., Vasconcelos-Raposo J., Bessa M.* Evaluation of the Impact of Different Levels of Self-representation and Body Tracking on the Sense of Presence and Embodiment in Immersive VR // Virtual Reality. 2021. P. 1–14. <https://doi.org/10.1007/s10055-021-00530-5>
18. *Souza G.S.D.S.E., Rodrigues F.B., Andrade A.O., Vieira M.F.* A Simple, Reliable Method to Determine the Mean Gait Speed Using heel Markers on a Treadmill // Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering. 2017. V. 20. No. 8. P. 901–904. <https://doi.org/10.1080/10255842.2017.1309395>
19. *Caramenti M., Lafortuna C.L., Mugellini E., Abou Khaled O., Bresciani J.P., Dubois A.* Matching Optical Flow to Motor Speed in Virtual Reality While Running on a Treadmill // PloS one. 2018. V. 13. No. 4. P. e0195781. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0195781>
20. *Mombaur K., Clever D.* Inverse Optimal Control as a Tool to Understand Human Movement // Geometric and Numerical Foundations of Movements. 2017. P. 163–186. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-51547-2\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-319-51547-2_8)
21. *Spence A.J., Nicholson-Thomas G., Lampe R.* Closing the Loop in Legged Neuromechanics: an Open-source Computer Vision Controlled Treadmill // J. Neuroscience Methods. 2013. V. 215. No. 2. P. 164–169. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2013.03.009>
22. *Karpushkin S., Dedov D., Siukhin A., Kolodin A., Volkov A.* Structural Model of Software and Hardware Platform for the Training Complex Based on a Controlled Treadmill // Int. Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM. 2020. V. 15. No. 1.3. P. 613–619. <https://doi.org/10.5593/sgem2019/1.3/S03.078>
23. *Koerner L.J., Caswell T.A., Allan D.B., Campbell S.I.* A Python Instrument Control and Data Acquisition Suite for Reproducible Research // IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement. 2019. V. 69. No. 4. P. 1698–1707. <https://doi.org/10.1109/TIM.2019.2914711>
24. *Egger J., Gall M., Wallner J., Boechat P., Hann A., Li X., Schmalstieg D.* HTC Vive MeVisLab Integration via OpenVR for Medical Applications // PloS one. 2017. V. 12. No. 3. P. e0173972. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0173972>
25. *Yim A., Chung C., Yu A.* Matplotlib for Python Developers: Effective Techniques for Data Visualization with Python // Packt Publishing Ltd, 2018. 300 p.

*Статъя представена к публикации членом редколегии А.И. Михальским.*

Поступила в редакцию 03.08.2021

После доработки 15.11.2021

Принята к публикации 20.11.2021