

УДК 004.9:004.94:004.946:355.45

DOI: [10.26102/2310-6018/2026.61.10.007](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2026.61.10.007)

Система управления вибротактильным жилетом и оружейным контроллером XR-тренажера на основе инерциального датчика

А.Г. Кравец^{1,2}, П.Д. Коробкин¹✉

¹Государственный университет «Дубна», Дубна, Российская Федерация

²Волгоградский государственный технический университет, Волгоград,
Российская Федерация

Резюме. В работе предложен метод событийной координации двух взаимосвязанных подсистем XR-тренажера: трехканального вибротактильного жилета и оружейного контроллера с инерциальным модулем MPU6050. Метод формализован правилом $F: (s, q, c) \rightarrow u$, которое преобразует тип события, вектор ориентации контроллера и контекст состояния сценария в вектор управляющих действий для XR-сцены, оружейного контроллера и жилета; обмен реализован сообщениями JSON/HTTP. Жилет обеспечивает адресную вибростимуляцию по зонам корпуса, а контроллер имитирует отдачу и дым и передает ориентационные параметры в виртуальную среду. Для силовой части жилета разработана расчетная модель токовых и энергетических режимов, связывающая число одновременно активных каналов с мгновенным и средним током и оценкой автономности; согласованность модели проверена схемотехническим моделированием в LTspice. Для MPU6050 сформирован алгоритм обработки, включающий статическую коррекцию смещений, скользящее среднее и комплементарную фильтрацию с $\alpha = 0,98$. При предварительной квазистатической проверке наблюдавшиеся абсолютные отклонения крена и тангажа составили 1–2°. Поскольку исходные данные не содержат числа измерений, повторов и статистических характеристик серии, этот диапазон не интерпретируется как статистически подтвержденная точность. Динамические режимы, рыскание и сквозная интеграция системы требуют отдельной валидации.

Ключевые слова: вибротактильный жилет, XR-тренажер, IMU, MPU6050, слияние данных, комплементарный фильтр, LTspice, MOSFET, Raspberry Pi.

Для цитирования: Кравец А.Г., Коробкин П.Д. Система управления вибротактильным жилетом и оружейным контроллером XR-тренажера на основе инерциального датчика. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2026;14(10). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/article?id=2370> DOI: 10.26102/2310-6018/2026.61.10.007

Control system for a vibrotactile vest and weapon controller of an XR trainer based on an inertial measurement unit

A.G. Kravets^{1,2}, P.D. Korobkin¹✉

¹Dubna State University, Dubna, the Russian Federation

²Volgograd State Technical University, Volgograd, the Russian Federation

Abstract. A method for event-driven coordination of two interconnected XR-trainer subsystems – a three-channel vibrotactile vest and a weapon controller with an MPU6050 inertial module – is proposed. The method is formalized by the rule $F: (s, q, c) \rightarrow u$, which maps event type, controller orientation vector, and scenario-state context to a control-action vector for the XR scene, weapon controller, and vest; exchange is implemented via JSON/HTTP messages. The vest provides targeted vibrostimulation across body zones, while the controller simulates recoil and smoke and transmits orientation parameters to the virtual environment. For the vest power stage, a computational model of current and energy

regimes is developed, relating the number of simultaneously active channels to instantaneous and average current and battery-life estimates; the model's consistency is verified by LTspice circuit simulation. For the MPU6050, a processing algorithm is formed, comprising static bias correction, moving-average smoothing, and complementary filtering with $\alpha = 0.98$. During preliminary quasi-static verification, the observed absolute pitch and roll deviations ranged from 1 to 2 degrees. Because the source data do not provide the number of measurements, repetitions, or statistical characteristics of the series, this range is not interpreted as a statistically validated accuracy estimate. Dynamic modes, yaw, and end-to-end system integration require separate validation.

Keywords: vibrotactile vest, XR trainer, IMU, MPU6050, data fusion, complementary filter, LTspice, MOSFET, Raspberry Pi.

For citation: Kravets A.G., Korobkin P.D. Control system for a vibrotactile vest and weapon controller of an XR trainer based on an inertial measurement unit. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2026;14(10). (In Russ.). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/article?id=2370> DOI: 10.26102/2310-6018/2026.61.10.007

Введение

Традиционные методы подготовки личного состава силовых структур сопряжены с риском травматизма и значительными материальными затратами. Исследования травматизма среди военнослужащих связывают существенную долю происшествий с нарушением требований безопасности и недостаточной профессиональной подготовкой [1, 2]. XR-технологии позволяют многократно воспроизводить потенциально опасные сценарии в контролируемой цифровой среде [3, 4]. Однако для специализированного тренажера недостаточно одной визуальной иммерсии: требуется доступная и адаптируемая архитектура, которая связывает локализованную тактильную обратную связь с положением оружейного контроллера и событиями виртуальной сцены.

В пределах рассмотренных решений научная новизна выражена двумя конкретными результатами. Во-первых, разработан метод событийной координации подсистем XR-тренажера, задающий правило $F: (s, q, c) \rightarrow u$ для преобразования типа события, ориентации контроллера и контекста состояния сценария в вектор управляющих действий XR-сцены, оружейного контроллера и жилета. Во-вторых, разработана расчетная модель токовых и энергетических режимов трехканального жилета, связывающая расписание активации каналов с мгновенным и средним током и оценкой автономности; для последовательного режима выполнена схемотехническая проверка в LTspice. Обработка MPU6050 рассматривается как прикладной результат реализации, а не как самостоятельная алгоритмическая новизна, поскольку используемый комплементарный фильтр известен [5]. Наблюдавшийся диапазон отклонений $1\text{--}2^\circ$ представляет только предварительную квазистатистическую оценку и не является статистически подтвержденной характеристикой точности.

Общие предпосылки такого подхода подтверждаются исследованиями XR в реабилитации, образовании и профессиональной подготовке: виртуальные среды позволяют организовать повторяемые упражнения с контролируемой нагрузкой [6], а результативность обучения зависит от сценария, аппаратной реализации и методики [4]. Перенос навыков из виртуальной среды в практическую деятельность показан, в частности, для хирургической подготовки и обучения технике безопасности [7, 8].

Ключевым требованием к XR-системам обучения является обеспечение реалистичной сенсорной обратной связи, а также визуальных и тактильных сигналов [9, 10]. В работах по сенсорному обучению показано, что такие формы обратной связи могут использоваться для коррекции движений, повышения

информативности тренировочного процесса и формирования устойчивых двигательных паттернов [11]. В контексте человеко-машинного взаимодействия тактильные интерфейсы рассматриваются как средства передачи пользователю искусственных тактильных ощущений, повышая тем самым реалистичность и информативность взаимодействия с виртуальной средой [12, 13].

Существующие коммерческие средства тактильной обратной связи различаются числом каналов и физическим принципом воздействия, но обычно поставляются как самостоятельные носимые продукты с интерфейсами конкретного производителя^{1,2}. Для рассматриваемой задачи требуется не максимальное число тактильных точек как таковое, а открытая связь тактильных зон с событиями специализированного учебного сценария и ориентацией разработанного оружейного контроллера.

Настоящая работа посвящена разработке и исследованию системы управления вибротактильным жилетом и оружейным контроллером XR-тренажера для подготовки сотрудников силовых структур. Жилет обеспечивает многоканальную вибростимуляцию по зонам корпуса, а оружейный контроллер реализует имитацию отдачи и дыма из ствола и оценку ориентации оружия по данным инерциального измерительного блока. Предлагаемое решение ориентировано на доступные компоненты и открытые программные интерфейсы; предмет исследования составляют метод координации подсистем, расчетная модель силовой части и алгоритм ориентационного трекинга.

Цель исследования – разработать метод событийной координации жилета и оружейного контроллера, построить расчетную модель токовых и энергетических режимов трехканальной силовой части, а также реализовать алгоритм оценки крена и тангажа по данным MPU6050 и провести его предварительную квазистатическую проверку.

Задачи исследования:

1. Построить архитектуру системы с независимыми каналами вибростимуляции на MOSFET-транзисторах и беспроводным управлением с микрокомпьютера Raspberry Pi.
2. Выполнить инженерный расчет и схемотехническую верификацию электрических схем в LTspice с определением токов, напряжений и времени автономной работы для различных сценариев активации каналов жилета.
3. Реализовать подсистему ориентации на базе IMU MPU6050 с алгоритмами слияния данных акселерометра и гироскопа.
4. Провести предварительную квазистатическую проверку алгоритма обработки MPU6050 и установить границы применимости полученного диапазона отклонений.

Доказательная база включает инженерный расчет, схемотехническое моделирование жилета в LTspice и обработку данных MPU6050, зарегистрированных в фиксированных квазистатических положениях. Эти материалы позволяют проверить внутреннюю согласованность расчетной модели и работоспособность этапов алгоритма на уровне отдельных подсистем. Они не являются статистической валидацией точности IMU и не подтверждают работоспособность полного XR-комплекса: число измерений и повторов, доверительные интервалы и среднеквадратические характеристики серии в исходных материалах отсутствуют, а сквозная интеграция, сетевые задержки и динамические режимы не исследованы.

¹ *TactSuit Compare (Technical Specifications)*. bHaptics. URL: <https://www.bhaptics.com/en/tactsuit/compare/> (дата обращения: 22.07.2026).

² VR Electronics Ltd. *Technical Specification 2023. Teslasuit Version 4.7/4.7.2 XR*. Teslasuit. URL: <https://teslasuit.io/wp-content/uploads/TS-specs.pdf> (дата обращения: 22.07.2026).

Материалы и методы

Вибротактильный жилет представляет собой носимое устройство с тремя независимо управляемыми каналами вибростимуляции. Каждый канал содержит два параллельно включенных вибромотора постоянного тока, полевой транзистор IRL540N и защитную цепь; управляющие команды поступают на Raspberry Pi Zero 2 W по открытому интерфейсу JSON/HTTP. Питание исполнительной части осуществляется от Li-ion аккумулятора с напряжением 3–4,2 В и платой BMS.

На Рисунке 1 представлена общая структурная схема жилета. Управление парой вибромоторов осуществляется MOSFET-транзистором с логическим уровнем затвора, подключенным к GPIO Raspberry Pi. Для подавления выбросов при коммутации используются защитный диод Шоттки и электролитические конденсаторы емкостью 1000 мкФ; питание подается через BMS.

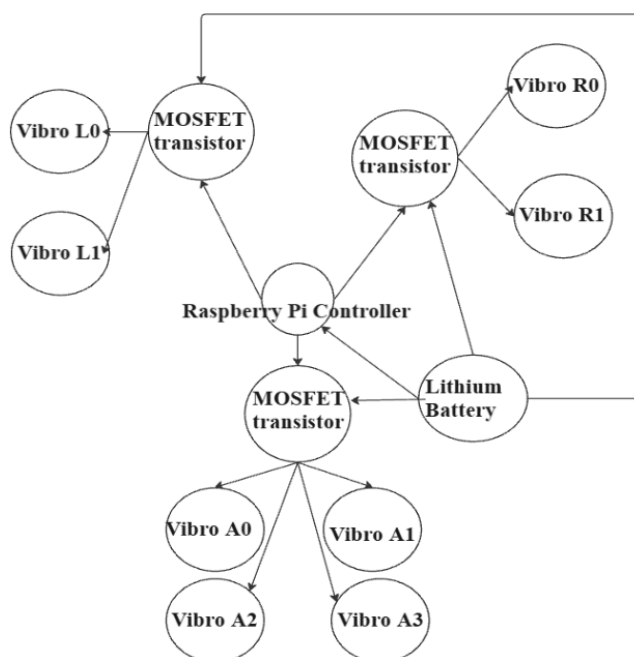


Рисунок 1 – Общая структурная схема вибротактильного жилета
Figure 1 – General structural diagram of the vibrotactile vest

Такая архитектура обеспечивает адресное управление отдельными секциями жилета при моделировании попаданий по различным участкам тела в XR-сценарии [14].

Для оценки токовых режимов и расчета времени автономной работы построена схема вибротактильного жилета в программе LTspice (Рисунок 2).

Паспортные данные одного мотора: номинальное напряжение $U_{\text{ном}} = 3$ В, ток $I_{\text{ном}} = 0,5$ А. Отсюда активное сопротивление:

$$R_{\text{мот}} = \frac{U_{\text{ном}}}{I_{\text{ном}}} = \frac{3}{0,5} = 6 \text{ Ом.} \quad (1)$$

Поскольку в каждом канале используются два параллельно включенных мотора, эквивалентное сопротивление пары составляет:

$$R_{\text{пары}} = \frac{R_{\text{мот}}}{2} = \frac{6}{2} = 3 \text{ Ом.} \quad (2)$$

В LTspice каждая пара моделируется резистором $R_{\text{мот}} = 3$ Ом, подключенным между шиной питания 3 В и стоком MOSFET-ключа. При полностью открытом транзисторе стационарный ток на канал составляет:

$$I_{\text{пары}} = \frac{U_{\text{пит}}}{R_{\text{пары}}} = \frac{3}{3} = 1 \text{ A.} \quad (3)$$

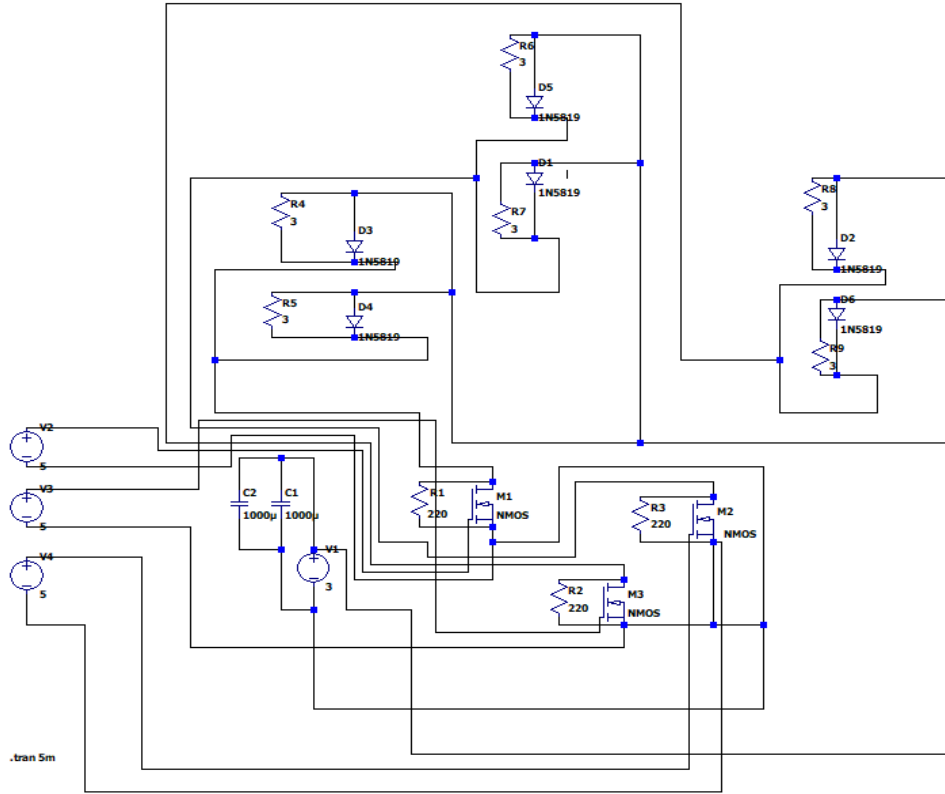


Рисунок 2 – Схема вибротактильного жилета в LTspice с MOSFET-ключами для расчета токов и напряжений

Figure 2 – LTspice circuit of the vibrotactile vest with MOSFET switches for current and voltage calculations

Для оценки автономности использовалась токовая модель разряда Li-ion аккумулятора емкостью $Q = 3 \text{ A} \cdot \text{ч}$ (3000 мА·ч). Для каждого i -канала вводится функция активации $u_i(t) \in \{0,1\}$, где единичное значение соответствует активному состоянию канала. Суммарный ток определяется числом одновременно работающих каналов.

Число одновременно активных каналов в момент времени t задается выражением:

$$m(t) = \sum_i u_i(t) \in \{0,1,2,3\}. \quad (4)$$

Мгновенный суммарный ток силовой части определяется зависимостью:

$$I_{\Sigma}(t) = \frac{U}{R_{\text{пары}}} \cdot \sum_i u_i(t) = \frac{U}{R_{\text{пары}}} \cdot m(t), \quad (5)$$

где $u_i(t)$ – состояние i -го канала, U – напряжение питания, $R_{\text{пары}}$ – эквивалентное сопротивление пары двигателей. Режимы с постоянным $m \in \{1,2,3\}$ являются частными случаями этой зависимости. При расчетных параметрах $U = 3 \text{ В}$ и $R_{\text{пары}} = 3 \text{ Ом}$ ток одного канала равен 1 А, верхняя расчетная граница тока составляет 3 А.

Для периодических процессов средний ток потребления за длительность цикла $T_{\text{ц}}$ рассчитывается как:

$$I_{\text{cp}} = \frac{1}{T_{\text{ц}}} \int_0^{T_{\text{ц}}} I_{\Sigma}(t) dt. \quad (6)$$

В предположении квазистационарного режима разряда ориентировочное время

непрерывной работы определяется выражением:

$$t_{\text{авт}} \approx \frac{Q}{I_{\text{ср}}} \quad (7)$$

Пример переменного во времени $m(t)$. Для исследованной в LTspice последовательности на интервале $0 \leq t \leq 550$ мс функция принимает значение $m(t) = 1$ при $t \in [0;150) \cup [200;350) \cup [400;550)$ мс и $m(t) = 0$ при $t \in [150;200) \cup [350;400)$ мс. Следовательно, при $U = 3$ В и $R_{\text{пары}} = 3$ Ом суммарный ток $I_{\Sigma}(t)$ равен 1 А во время импульсов и 0 А в паузах. Средний ток за цикл длительностью $T_{\text{ц}} = 550$ мс с суммарной активной фазой 450 мс составляет:

$$I_{\text{ср}} = 1 \text{ А} \cdot \frac{450}{550} \approx 0,818 \text{ А}. \quad (8)$$

При взаимном перекрытии импульсов та же зависимость (5) без изменения структуры модели описывает участки с $m(t) = 2$ или $m(t) = 3$. Таким образом, модель учитывает произвольное расписание активации каналов и согласуется со схемотехнической симуляцией исследованного режима, но не заменяет натурного измерения тока.

Для рассматриваемого источника ($Q = 3000$ мА·ч) получаем оценки времени работы:

Таблица 1 – Оценка времени автономной работы устройства при различных режимах нагрузки
Table 1 – Estimated battery runtime of the device under various load conditions

Режим работы	Число каналов m	Средний ток $I_{\text{ср}}$, А	Расчетное время $t_{\text{авт}}$, ч
Непрерывный, 1 канал	1	1,00	3,0
Непрерывный, 2 канала	2	2,00	1,5
Непрерывный, 3 канала (макс.)	3	3,00	1,0
Циклический импульсный (LTspice)	переменное	0,82	$\approx 3,67$

Реальное время работы будет меньше из-за падения КПД преобразователей, роста внутреннего сопротивления при повышенной температуре и нелинейного снижения напряжения при глубоком разряде.

Для интенсивного тренировочного сценария с импульсной активацией в работе принята консервативная оценка 1–1,5 ч. Эти значения являются инженерными расчетами; фактическая автономность должна уточняться натурным измерением с учетом КПД преобразователей, внутреннего сопротивления аккумулятора и реального профиля событий.

В оружейном контроллере используется схожий принцип силового управления: Raspberry Pi 5 через MOSFET-ключи включает вибромотор в прикладе и нагревательный элемент парогенерирующего узла, формируя имитацию отдачи и дыма. Контроллер передает событие спуска и текущие ориентационные параметры на XR-хост в формате JSON по HTTP; переход к постоянному WebSocket-соединению рассматривается как вариант последующего снижения накладных расходов и задержек.

Помимо имитации выстрела, оружейный контроллер должен обеспечивать данные о своем положении в виртуальную среду. Для определения ориентации оружейного контроллера в пространстве применен 6-осевой инерциальный

измерительный модуль MPU6050 (акселерометр + гироскоп). Датчик подключен к Raspberry Pi 5 по шине I²C. Схема подключения приведена на Рисунке 3.

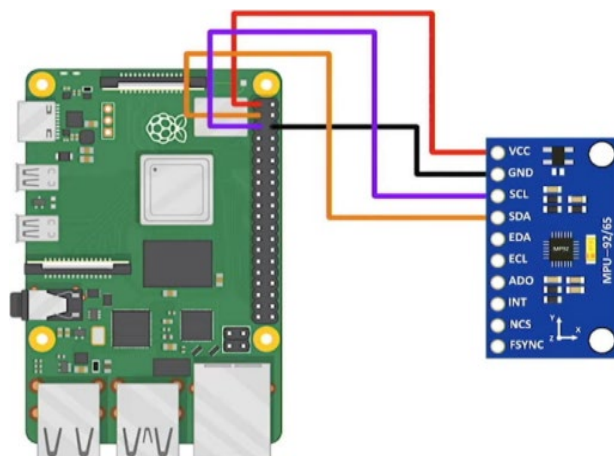


Рисунок 3 – Схема подключения модуля IMU MPU6050 к Raspberry Pi 5 по интерфейсу I²C
Figure 3 – I²C connection diagram between the IMU MPU6050 module and Raspberry Pi 5

Raspberry Pi 5 считывает данные акселерометра и гироскопа, выполняет слияние данных и передает в XR-движок оценку углов крена и тангажа по беспроводному каналу Wi-Fi. Угол рыскания при использовании только акселерометра и гироскопа может оцениваться лишь кратковременно, так как при длительном интегрировании угловой скорости накапливается дрейф. Для устойчивого определения рыскания требуется дополнительный магнитометр или внешний источник коррекции.

Метод событийной координации формализуется правилом $F: (s, q, c) \rightarrow u$, где s – тип события, q – вектор текущих ориентационных параметров контроллера, c – контекст состояния сценария, включающий результат взаимодействия и, при попадании по пользователю, идентификатор зоны; $u = (u_{XR}, u_{оруж}, u_{жилет})$ – вектор управляющих действий для виртуальной сцены, оружейного контроллера и жилета. Вычислительная процедура включает регистрацию аппаратного события, формирование пакета (s, q) , определение результата взаимодействия в состоянии c , вычисление u и передачу соответствующих команд. Детализация условного правила приведена в Таблице 2; JSON/HTTP выступает транспортной реализацией и не изменяет логики отображения.

Таблица 2 – Условная логика отображения событий в управляющие действия
Table 2 – Conditional mapping of events to control actions

Условие / событие	Используемые данные	Выход правила F	Управляющее действие
Нажатие спуска, $s = shot$	Ориентация q ; текущее состояние сценария c	u_{XR} = проверка выстрела; $u_{оруж}$ = (отдача, дым); $u_{жилет}$ = $\emptyset$	Регистрация выстрела, трассировка в Unity и синхронизация локальных эффектов контроллера
Результат взаимодействия: попадание по цели	Идентификатор цели; состояние сценария c	u_{XR} = реакция цели; $u_{жилет}$ = $\emptyset$	Изменение состояния виртуальной сцены и регистрация события
Результат взаимодействия: попадание по пользователю	Зона z ; заданные сценарием интенсивность a и длительность τ	$u_{жилет} = (z, a, \tau)$	Адресная активация соответствующего канала жилета и регистрация события

В терминах теории систем XR-комплекс представлен как распределенная дискретно-событийная система: пара (q, c) описывает наблюдаемую часть состояния x , событие s инициирует переход $\delta(x, s)$, а правило F реализует выходное отображение $\lambda(x, s) = u$. Тем самым управление имеет событийный характер: управляющее воздействие формируется не по непрерывному времени, а при наступлении значимого события и с учетом текущего состояния сценария.

Гирокоп измеряет угловую скорость и обеспечивает точные краткосрочные данные о вращении [15, 16]. Модель измерений гироскопа описывается выражением:

$$\omega_{\text{изм}} = \omega_{\text{ист}} + b_{\text{gyro}} + n_{\text{gyro}}, \quad (9)$$

где b_{gyro} – постоянное смещение; n_{gyro} – шумовая компонента.

Как видно из Рисунка 4, в состоянии покоя гироскоп выдает ненулевые показания вследствие систематического смещения. Аналогичное смещение наблюдается и по осям акселерометра.

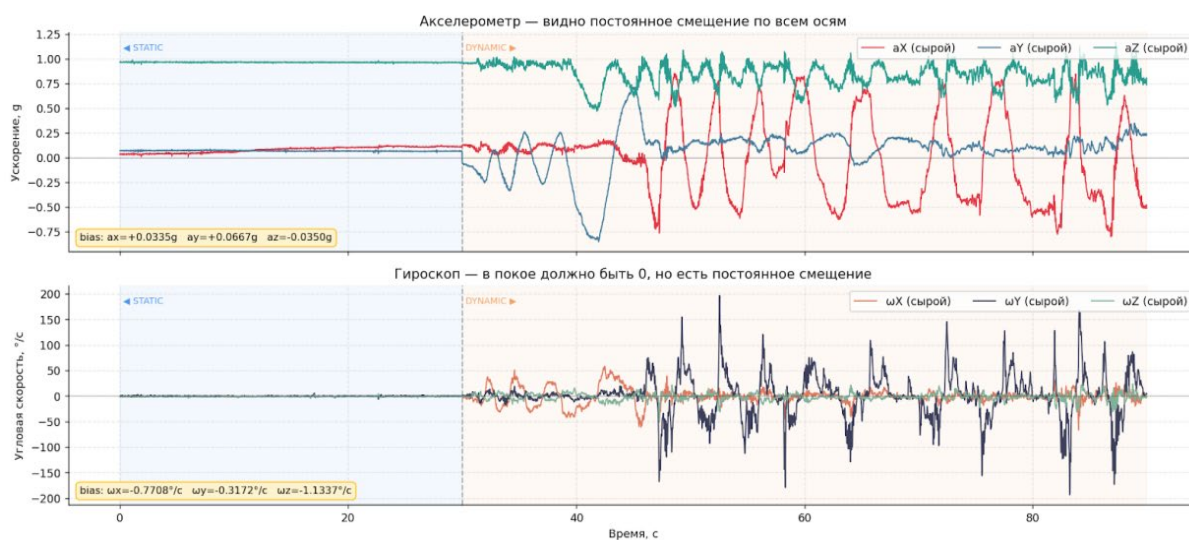


Рисунок 4 – Сырые данные датчика без удаления смещения
Figure 4 – Raw sensor data without bias removal

Алгоритм обработки MPU6050 выполняется последовательно: считываются сырые данные акселерометра и гироскопа; по неподвижной регистрации оцениваются и вычитаются постоянные смещения; сигналы сглаживаются скользящим средним; по акселерометру вычисляются оценки наклона, а по гироскопу – приращения углов; затем оценки объединяются комплементарным фильтром с $\alpha = 0,98$ и передаются в XR-среду. Число отсчетов статической регистрации и размер окна скользящего среднего в исходных материалах не зафиксированы, что учитывается при интерпретации результатов.

Предварительная проверка выполнялась в квазистатическом режиме. После статической калибровки модуль последовательно устанавливали в фиксированные положения с известными углами наклона; после стабилизации рассчитанные значения крена и тангажа сравнивали с заданными. В имеющихся материалах отмечен диапазон абсолютных отклонений $1-2^\circ$. Число проверенных положений, число повторов и объем выборки для каждого положения не приведены; первичная таблица измерений, среднее значение ошибки, среднеквадратичное отклонение и доверительные интервалы отсутствуют. Поэтому результат используется как предварительная оценка наблюдавшегося диапазона, а не как метрологическая или статистическая

характеристика точности. Динамические режимы, вибрация и рыскание в проверку не входили.

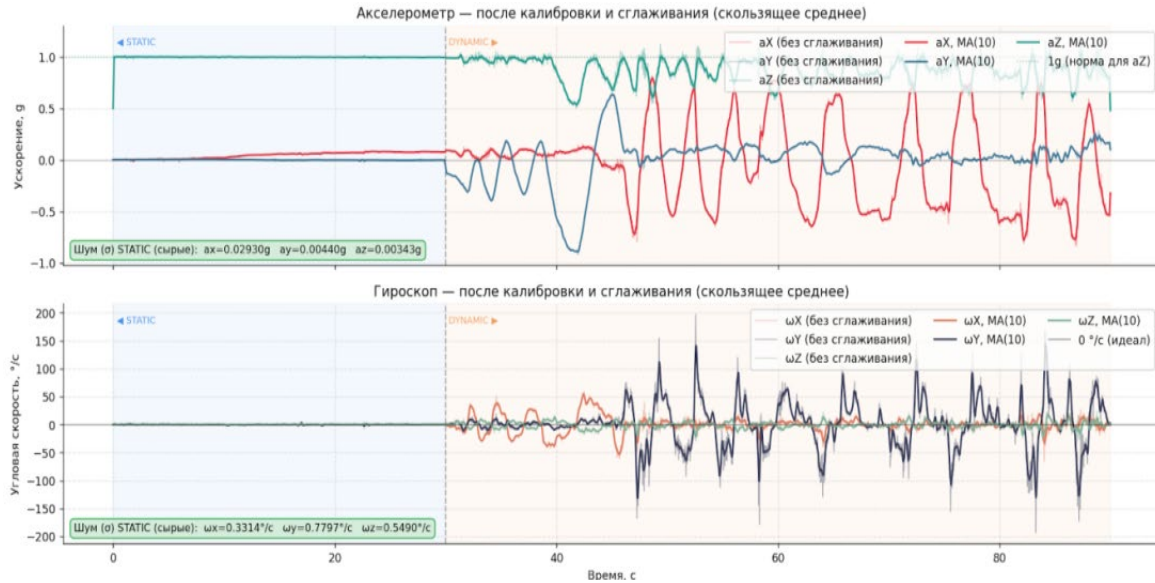


Рисунок 5 – Данные акселерометра и гироскопа после калибровки MPU6050: удаление смещения и сглаживание методом скользящего среднего

Figure 5 – MPU6050 accelerometer and gyroscope data after calibration: bias removal and moving-average smoothing

В неподвижном положении акселерометр в основном измеряет ускорение свободного падения. Поэтому по направлению вектора гравитации можно оценить наклон модуля. Такой способ не накапливает дрейф, но чувствителен к резким движениям и вибрациям. В работе по данным акселерометра вычислялись углы крена и тангажа [15]:

$$\theta_{acc} = \arctan2(a_x, \sqrt{a_y^2 + a_z^2}), \phi_{acc} = \arctan2(a_y, a_z). \quad (10)$$

По результатам статической калибровки были определены остаточные смещения по каждой оси, включая повышенный разброс по оси X, вероятно связанный с перекосом датчика.

Следует учитывать, что акселерометр надежно работает только в относительно спокойных режимах. При быстрых движениях, вибрациях и кратковременных линейных ускорениях его показания начинают искажаться. Гироскоп ведет себя иначе: он хорошо отслеживает быстрые изменения ориентации, но при длительном интегрировании постепенно накапливает дрейф. Поэтому использовать каждый датчик отдельно нецелесообразно. В данной работе для объединения их показаний применяется комплементарный фильтр [15].

Идея фильтра состоит в разделении сигналов по частотным диапазонам. Быстрые изменения ориентации берутся преимущественно из данных гироскопа. Медленная и более устойчивая составляющая корректируется по акселерометру. За счет этого фильтр позволяет сохранить быстродействие гироскопа и одновременно уменьшить накопление дрейфа. Итоговое значение угла вычисляется как взвешенная сумма:

$$\hat{\theta}_k = \alpha \cdot (\hat{\theta}_{k-1} + \omega_k \Delta t) + (1 - \alpha) \cdot \theta_{acc,k}, \quad (11)$$

где $\alpha \in (0, 1)$ – коэффициент фильтра, определяющий вес каждого датчика [15]; ω_k – угловая скорость по данным гироскопа на шаге k ; Δt – период дискретизации.

Высокое значение α , близкое к 1, увеличивает вклад гироскопа и сохраняет быстродействие; при меньшем α возрастает вклад акселерометра и устойчивость к дрейфу.

На Рисунке 6 представлена структурная схема комплементарного фильтра, иллюстрирующая разделение частотных диапазонов [15].

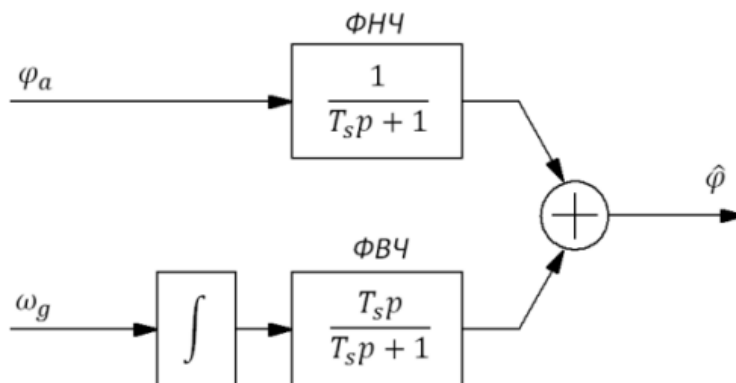


Рисунок 6 – Структурная схема комплементарного фильтра
Figure 6 – Block diagram of the complementary filter

Результаты применения комплементарного фильтра представлены на Рисунке 7. После удаления смещений и слияния данных траектории оценок крена и тангажа визуально устойчивее сырых сигналов. В проверенных квазистатических положениях наблюдались абсолютные отклонения 1–2°. Из-за отсутствия первичной таблицы измерений и описания повторности этот результат носит предварительный иллюстративный характер: он подтверждает выполнение вычислительной процедуры в рассмотренных положениях, но не устанавливает статистическую точность алгоритма и не заменяет динамических испытаний.

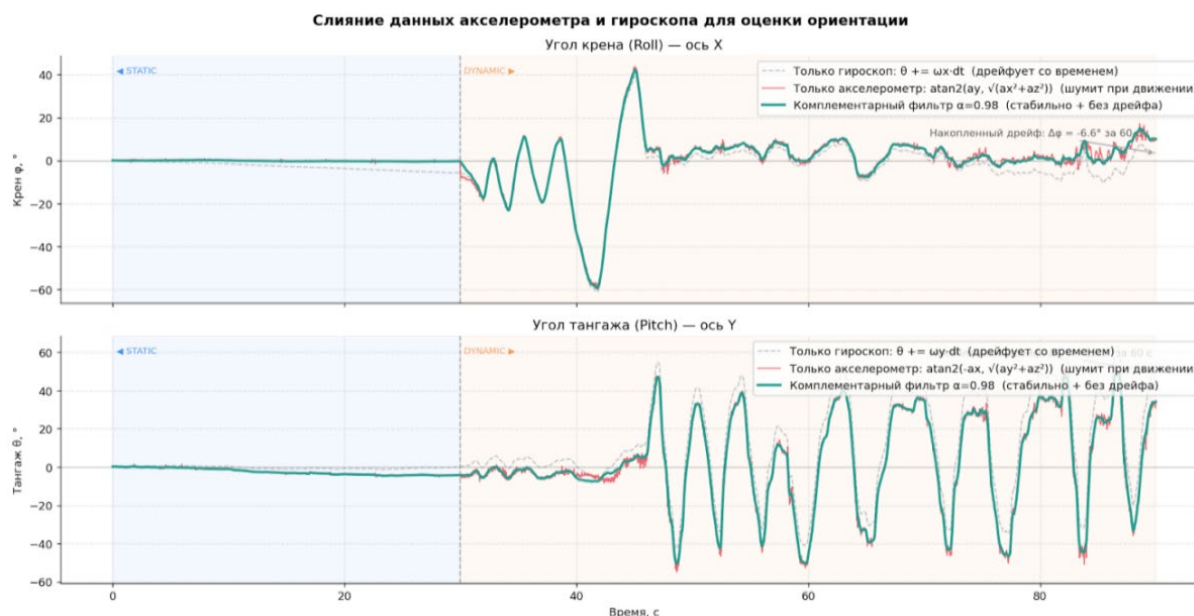


Рисунок 7 – Слияние данных акселерометра и гироскопа комплементарным фильтром ($\alpha = 0,98$) при оценке крена и тангажа в квазистатическом режиме

Figure 7 – Accelerometer and gyroscope data fusion with a complementary filter ($\alpha = 0.98$) for quasi-static roll and pitch estimation

Результаты

Получены три группы результатов: формализованный метод событийной координации подсистем, расчетные и модельные характеристики трехканальной силовой части жилета, а также предварительные результаты квазистатической обработки данных инерциального модуля оружейного контроллера.

Вибротактильный жилет. Расчетный ток одного канала равен 1 А, двух одновременно включенных каналов – 2 А, трех – 3 А при напряжении 3 В. В смоделированной последовательности импульсов по 150 мс с началом через 200 мс ток аккумулятора не превышал 1 А, поскольку одновременно работала одна секция. Для аккумулятора 3000 мА·ч расчетная непрерывная автономность составила 3, 1,5 и 1 ч для одного, двух и трех каналов соответственно; оценка для интенсивного импульсного сценария – 1–1,5 ч.

Подсистема ориентации. После статической калибровки остаточные показания акселерометра составили $a_x = +0,045g$, $a_y = +0,00026g$ и $a_z = +0,9975g$; повышенный разброс по оси X связывается с возможным перекосом модуля при установке. После сглаживания и применения комплементарного фильтра с $\alpha = 0,98$ в проверенных фиксированных положениях наблюдались абсолютные отклонения крена и тангажа 1–2°. Этот диапазон является предварительным описанием имеющихся наблюдений. Из-за отсутствия числа повторов, объема выборки и первичных данных невозможно вычислить среднюю ошибку, стандартное отклонение или доверительный интервал и статистически распространить результат за пределы рассмотренных положений.

Обсуждение

Расчет и LTspice-моделирование показывают внутреннюю согласованность расчетной модели токовых режимов для исследованных вариантов включения каналов. Квазистатические записи MPU6050 демонстрируют выполнение последовательности калибровки, сглаживания и слияния данных и позволяют указать лишь наблюдавшийся диапазон отклонений. Они не дают оснований утверждать установленную точность алгоритма, его эффективность при движении или работоспособность полного XR-комплекса: сквозной обмен между Unity, оружейным контроллером и жилетом не испытывался.

Ограничения исследования: в LTspice вибромоторы представлены преимущественно активной нагрузкой, без детального учета индуктивности обмоток и пусковых переходных процессов; автономность получена расчетом, а не разрядным испытанием. Проверка IMU ограничена фиксированными и квазистатическими положениями. При быстрых поворотах, линейных ускорениях и вибрации от имитации отдачи ошибка может увеличиваться; шестикоординатный MPU6050 также не обеспечивает долговременную коррекцию рыскания без магнитометра или внешнего источника. Не измерены сквозная задержка JSON/HTTP-обмена и потери сообщений.

Архитектура на основе MOSFET-ключей с логическим управлением обеспечивает гибкость в задании паттернов тактильной обратной связи: интенсивность, длительность и пространственное распределение вибрации могут задаваться программно из игрового движка.

Сравнение с существующими решениями: bHaptics TactSuit представляет готовый тактильный жилет с SDK производителя¹, а Teslasuit – интегрированную носимую платформу профессионального класса². Научно-методическое отличие предлагаемого решения состоит в задании событийного правила $F: (s, q, c) \rightarrow u$, которое связывает входное событие и наблюдаемое состояние системы с вектором управляющих действий, а также в дополнении этого правила расчетной моделью режимов питания. Тем самым

сравнивается способ системной координации функций, а не только состав аппаратуры. Превосходство по числу каналов, точности, автономности или эксплуатационной зрелости не утверждается.

Таблица 3 – Сопоставление метода событийной координации и аппаратной реализации с коммерческими тактильными системами

Table 3 – Comparison of the event-coordination method and hardware implementation with commercial haptic systems

Параметр	Предложенное решение	bHaptics TactSuit ¹	Teslasuit ²
Роль в XR-системе	Подсистема специализированного тренажера: жилет и оружейный контроллер	Коммерческий тактильный жилет	Интегрированная носимая платформа
Тактильная обратная связь	Три независимо управляемых канала; по два вибромотора в канале	Многоточечная вибрационная обратная связь	Электростимуляция и вибрационная обратная связь
Трекинг оружейного контроллера	Внешний IMU MPU6050; предварительно наблюдавшийся диапазон отклонений крена и тангажа 1–2° в квазистатике; статистическая точность не установлена	Не является функцией жилета; используется отдельный контроллер или трекер	Инерциальный трекинг носимой платформы; не специализирован для разработанного оружейного контроллера
Программная интеграция	Событийное правило F : (тип события, ориентация, контекст состояния) $\rightarrow$ вектор управляющих действий; транспорт JSON/HTTP	SDK и протоколы производителя	Проприетарная экосистема производителя
Представленная в работе доказательная база	Расчетная модель, LTspice-симуляция и предварительная квазистатическая проверка IMU; натурная и статистическая валидация не выполнена	Технические характеристики производителя	Технические характеристики производителя
Целевая задача	Доступный адаптируемый XR-тренажер для учебных сценариев силовых структур	Массовые VR-приложения	Профессиональные и корпоративные применения

Заключение

Научная новизна работы выражена двумя конкретными результатами:

1. Разработан метод событийной координации подсистем XR-тренажера, задающий правило F : $(s, q, c) \rightarrow u$ от типа события s , вектора ориентации q и контекста состояния c к вектору управляющих действий $u = (u_{XR}, u_{оруж}, u_{жилет})$; в терминах дискретно-событийного управления правило F реализует выходное отображение $\lambda(x, s) = u$ при переходе состояния $\delta(x, s)$.

2. Разработана расчетная модель $I_{\Sigma}(t) = \frac{U}{R_{пары}} \cdot \Sigma u_i(t)$, $I_{ср} = \frac{1}{T_{ц}} \cdot \int I_{\Sigma}(t) dt$, $t_{авт} \approx \frac{Q}{I_{ср}}$, связывающая расписание активации каналов с мгновенным и средним током и оценкой автономности; для постоянных $m = 1, 2$ и 3 получены 1, 2 и 3 А и соответственно 3, 1,5 и 1 ч, а согласованность модели с последовательным режимом, в котором ток не превышает 1 А, проверена схмотехнической симуляцией LTspice.

Прикладной результат реализации. Сформирован алгоритм обработки MPU6050, включающий статическую коррекцию смещений, скользящее среднее и

комплементарную фильтрацию с $\alpha = 0,98$. В проверенных квазистатистических положениях наблюдался диапазон абсолютных отклонений $1-2^\circ$ по крену и тангажу, однако статистическая точность алгоритма из-за отсутствия первичной выборки и повторных измерений не установлена; данный результат не включается в самостоятельные положения научной новизны.

Границы достоверности результатов. Расчетная модель проверена только на уровне инженерного расчета и LTspice-симуляции; натурные токовые и разрядные испытания не проводились. Для IMU отсутствует статистическая база, необходимая для оценки точности, а предварительная проверка не распространяется на рыскание, резкие движения и вибрацию. Сквозная интеграция подсистем требует отдельного экспериментального подтверждения.

Научно-техническая значимость результатов состоит в формализованном представлении метода преобразования событий в управляющие воздействия и модели токовых и энергетических режимов, дополненных прикладным алгоритмом ориентационного трекинга. Представление XR-комплекса как распределенной дискретно-событийной системы разделяет состояние, входные события, переходы и выходные воздействия, что соответствует задачам системного анализа, связывает информационные и энергетические параметры подсистем и задает проверяемые условия для последующей натурной и статистической валидации.

Практическая значимость состоит в возможности использовать разработанные схемы, расчетные зависимости и открытый формат обмена как основу адаптируемого XR-тренажера. Для перехода от предварительных результатов к подтвержденной системе необходимо сохранить и опубликовать первичные измерения IMU, задать число положений и повторов, рассчитать среднюю абсолютную ошибку, RMSE, стандартное отклонение и доверительные интервалы, провести натурные разрядные и динамические испытания, измерить задержки и потери сообщений и проверить согласованную работу Unity-сцены, оружейного контроллера и жилета.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Реутский И.А., Ведманов Ю.В. Совершенствование и развитие мероприятий по снижению и профилактике травматизма среди военнослужащих. *Вестник Российской военно-медицинской академии*. 2012;(1):261–265.
Reutskiy I.A., Vedmanov Yu.V. Perfection and development of actions for decrease and preventive maintenance of a traumatism among military men. *Bulletin of the Russian Military Medical Academy*. 2012;(1):261–265. (In Russ.).
2. Евдокимов В.И., Сиващенко П.П., Хомянец В.В. и др. *Медико-статистические показатели травматизма военнослужащих Вооруженных Сил Российской Федерации (2003–2019 гг.)*. Санкт-Петербург: Политехника-принт; 2021. 212 с.
3. Rizzo A.S., Koenig S.Th. Is clinical virtual reality ready for primetime? *Neuropsychology*. 2017;31(8):877–899. <https://doi.org/10.1037/neu0000405>
4. Jensen L., Konradsen F. A review of the use of virtual reality head-mounted displays in education and training. *Education and Information Technologies*. 2018;23(11):1515–1529. <https://doi.org/10.1007/s10639-017-9676-0>
5. Mahony R., Hamel T., Pflimlin J.-M. Nonlinear complementary filters on the special orthogonal group. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2008;53(5):1203–1218. <https://doi.org/10.1109/TAC.2008.923738>
6. Saposnik G., Cohen L.G., Mamdani M., et al. Efficacy and safety of non-immersive virtual reality exercising in stroke rehabilitation (EVREST): A randomised, multicentre, single-blind, controlled trial. *The Lancet Neurology*. 2016;15(10):1019–1027.

- [https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(16\)30121-1](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(16)30121-1)
7. Seymour N.E., Gallagher A.G., Roman S.A., et al. Virtual reality training improves operating room performance: results of a randomized, double-blinded study. *Annals of Surgery*. 2002;236(4):458–464.
 8. Chittaro L., Buttussi F. Assessing knowledge retention of an immersive serious game vs. a traditional education method in aviation safety. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. 2015;21(4):529–538. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2015.2391853>
 9. Park S.U., Lee H.K., Kim H.B., et al. Wearable interactive full-body motion tracking and haptic feedback network systems with deep learning. *Nature Communications*. 2025;16(1):8604. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-63644-3>
 10. Abad S.-A., Herzig N., Raitt D., Koltzenburg M., Wurdemann H. Bioinspired adaptable multiplanar mechano-vibrotactile haptic system. *Nature Communications*. 2024;15(1):7631. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-51779-8>
 11. Sigrist R., Rauter G., Riener R., Wolf P. Augmented visual, auditory, haptic, and multimodal feedback in motor learning: a review. *Psychonomic Bulletin & Review*. 2013;20(1):21–53. <https://doi.org/10.3758/s13423-012-0333-8>
 12. Culbertson H., Schorr S.B., Okamura A.M. Haptics: The present and future of artificial touch sensation. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*. 2018;1(1):385–409. <https://doi.org/10.1146/annurev-control-060117-105043>
 13. Botev J., da Silva E.D., Sun N. *Haptic Directional Awareness in Virtual Reality*. ORBilu. URL: <https://orbilu.uni.lu/bitstream/10993/62719/1/Botev%202024%20-%20Haptic%20Directional%20Awareness%20in%20Virtual%20Reality.pdf> [Accessed 22th July 2026].
 14. Kravets A.G., Korobkin P.D. Immersive XR System for Law-Enforcement Personnel Training. In: *Creativity in Intelligent Technologies and Data Science: 6th International Conference (CIT&DS 2025), 22–25 September 2025, Volgograd, Russia*. Cham: Springer; 2026. P. 219–235. https://doi.org/10.1007/978-3-032-14674-8_14
 15. Ивойлов А.Ю. О применении МЭМС-датчиков при разработке системы автоматической стабилизации двухколесного робота. *Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета*. 2017;(3):32–51. <https://doi.org/10.17212/2307-6879-2017-3-32-51>
Ivoilov A.Yu. About the application of MEMS sensors in the development of two-wheeled robot automatic stabilization system. *Transactions of Scientific Papers of the Novosibirsk State Technical University*. 2017;(3):32–51. (In Russ.). <https://doi.org/10.17212/2307-6879-2017-3-32-51>
 16. Павлов О.В. Определение пространственного положения шлема в наголовной информационно-управляющей системе. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2018;(9):126–136.
Pavlov O.V. Determination of helmet spatial position in helmet-mounted information and control system. *News of the Tula State University. Technical Sciences*. 2018;(9):126–136. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Кравец Алла Григорьевна, доктор технических наук, профессор, Волгоградский государственный технический университет, Волгоград; Государственный университет «Дубна», Дубна, Российская Федерация.
e-mail: allagkravets@yandex.ru
ORCID: [0000-0003-1675-8652](https://orcid.org/0000-0003-1675-8652)

Alla G. Kravets, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Volgograd State Technical University, Volgograd; Dubna State University, Dubna, the Russian Federation.

Коробкин Павел Дмитриевич, магистрант, **Pavel D. Korobkin**, Master's Degree student,
Государственный университет «Дубна», Dubna State University, Dubna, the Russian
Дубна, Российская Федерация. Federation.
e-mail: kpd.20@uni-dubna.ru

*Статья поступила в редакцию 28.04.2026; одобрена после рецензирования 01.10.2026;
принята к публикации 13.10.2026.*

*The article was submitted 28.04.2026; approved after reviewing 01.10.2026;
accepted for publication 13.10.2026.*