

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 331.101.1:159.9

doi: 10.30987/2658-4026-2025-4-510-520

Перспективы развития технологий силовой обратной связи в интерфейсах робототехнических систем

Сергей Федорович Сергеев^{1✉}, Алексей Викторович Сергеев², Игорь Юрьевич Даляев³, Михаил Игоревич Надежин⁴, Вероника Игоревна Тимофеева⁵

^{1,2,3,4,5}Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики, Санкт-Петербург, Россия

¹ s.f.sergeev@spbu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6677-8320>

² etechnician@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-4798-6570>

³ igor@rtc.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0494-065X>

⁴ m.nadezhin@rtc.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3365-6658>

⁵ v.timofeeva@rtc.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7758-2315>

Аннотация.

Статья посвящена комплексному анализу развития технологий мультимодальных интерфейсов, в частности, систем с силовой обратной связью (force feedback), для человеко-машинного взаимодействия в робототехнике, телеуправлении и виртуальной реальности. Подчеркивается роль многомодальности в снижении когнитивной нагрузки оператора и обеспечении эффекта присутствия в удаленной или виртуальной среде. Основное внимание уделяется критическим эргономическим проблемам таких интерфейсов, включая психофизиологические нагрузки, проблемы восприятия, временные задержки и вопросы безопасности. В работе проводится обзор современных методов и технологий, таких как адаптивные алгоритмы управления, новые тактильные устройства, а также их применение в медицинских симуляторах и системах виртуальной реальности. Выявлены ключевые проблемы, препятствующие широкому внедрению (задержки, аппаратные ограничения), и определены перспективные направления развития, включая интеграцию искусственного интеллекта, создание гибридных мультимодальных систем и разработку энергоэффективных интерфейсов на основе smart-материалов. Конечной целью проектирования признается создание интуитивного, безопасного и физически комфортного интерфейса, интегрирующегося в сенсомоторный контур оператора.

Ключевые слова: робототехника, силовая обратная связь, мультимодальный интерфейс, тактильная обратная связь, телеуправление, эргономика интерфейсов, виртуальная реальность

Для цитирования: Сергеев С. Ф., Сергеев А. В., Даляев И. Ю., Надежин М. И., Тимофеева В. И. Перспективы развития технологий силовой обратной связи в интерфейсах робототехнических систем // Эргодизайн. 2025. №4 (30). С. 510-520. <http://dx.doi.org/10.30987/2658-4026-2025-4-510-520>.

Original article

Open access article

Prospects for Force Feedback Technology Development in Robotic System Interfaces

Sergey F. Sergeev^{1✉}, Aleksey V. Sergeev², Igor Yu. Dalyaev³, Mikhail I. Nadezhin⁴, Veronica I. Timofeeva⁵

^{1,2,3,4,5}The Central Research and Development Institute of Robotics and Technical Cybernetics, Saint Petersburg, Russia

¹ s.f.sergeev@spbu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6677-8320>

² etechnician@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-4798-6570>

³ igor@rtc.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0494-065X>

⁴ m.nadezhin@rtc.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3365-6658>

⁵ v.timofeeva@rtc.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7758-2315>

Abstract.

The article presents a comprehensive analysis of developing multimodal interface technologies, focusing on force feedback systems for human-machine interaction in robotics, teleoperation, and virtual reality environments; emphasizes the significance of multimodality in reducing the operator's cognitive load and enhancing the presence in remote or virtual settings. The work focuses on critical ergonomic challenges, including psychophysiological stresses, perception difficulties, latency issues, and safety concerns; reviews current methodologies and technologies, such as adaptive control algorithms, novel tactile devices, and their applications in medical simulators and VR systems. The authors identify key obstacles hindering widespread adoption (latency, hardware limitations), along with promising directions for advancement, including artificial intelligence integration, hybrid multimodal system creation, and energy-efficient interface development utilizing smart materials. The ultimate design goal is to develop an intuitive, safe, and physically comfortable interface seamlessly integrated into the operator's sensorimotor loop.

Keywords: robotics, force feedback, multimodal interface, tactile feedback, teleoperation, interface ergonomics, virtual reality

For citation: Sergeev S.F., Sergeev A.V., Dal'yaev I.Yu., Nadezhin M.I., Timofeeva V.I. Prospects for Force Feedback Technology Development in Robotic System Interfaces. Ergodizayn [Ergodesign]. 2025;4(30):510-520. Doi: 10.30987/2658-4026-2025-4-510-520.

Введение

Развитие технологий мультимодальных (многомодальных) интерфейсов является растущим трендом в области обеспечения эффективного человеко-машинного взаимодействия и управления в мехатронных, робототехнических и эргатических системах [1, 2, 3]. Под многомодальностью в интерфейсах понимается параллельное использование в системах обработки и отображения информации и исполнительных органах нескольких каналов информации доступных сенсорно-исполнительным системам оператора в процессе формирования образа текущей ситуации управления. При этом решается задача снижения сложности взаимодействий человека и машины [4]. Проблема разработки многомодальных интерфейсов впервые возникла как следствие парадигмы окружающего оператора интеллектуального пространства, где одним из требований является обеспечение естественного взаимодействия с пользователем [5, 6].

Наиболее популярными модальностями сенсорных систем, поддерживаемых в данных интерфейсах, являются зрительное и слуховое восприятия оператора, которые являются наиболее распространенными способами приема и интеграции информации, используемыми человеком для взаимодействия с внешним миром. Поэтому проектирование большинства интерфейсов «человек-робот» сосредоточено преимущественно на этих модальностях, формирующих виртуальную рабочую среду [7]. Особое значение данные интерфейсы имеют в области реализации дистанционного и копирующего управления роботами и манипуляторами, использующими системы виртуальной реальности для работы в экстремальных средах [8], например в технологиях работы с агрессивными

химическими и радиоактивными веществами [9], в медицине [10].

Дистанционное копирующее управление позволяет операторам манипулировать объектами на расстоянии используя интерфейс управления роботизированной рукой или захватом манипулятора. Интерфейс в точности повторяет настройки, существующие в удаленном месте. Команды управления передаются от задающего (ведущего) устройства к исполнительному (ведомому) по каналу связи, что позволяет управлять действиями последнего.

Основная проблема, возникающая при создании мультимодальных интерфейсов для робототехнических систем данного класса связана с обеспечением точных обратных связей замыкающих контуры формирования управляющих образов, отражающих реакции и физические свойства объектов манипуляции на управляющие действия оператора. Возникает круг задач «очувствления» интерфейсов, формирования двухсторонних силовых обратных связей (силомоментной обратной связи), использования тактильного канала обратной связи. Двустороннее телеуправление с силовой обратной связью (force feedback) позволяет операторам на этапе эксплуатации управлять объектами или системами на расстоянии и воспринимать окружающую среду на удалении с помощью тактильной обратной связи. В результате возникает эффект присутствия оператора в рабочей среде и его полного «слияния» с телом робота (манипулятора) [11]. Перспективам развития данного направления работ и эрготехническому анализу интерфейсных решений робототехнических систем посвящена настоящая статья.

Эргономические проблемы интерфейсов с силовой обратной связью в робототехнике

Эргономические проблемы данных интерфейсов возникают на стыке физического взаимодействия, восприятия и когнитивной

обработки информации оператором [12]. Можно выделить следующие основные категории:

– *психофизиологические и биомеханические проблемы*. Например, мышечная усталость и физический дискомфорт. Длительное взаимодействие с интерфейсом, оказывающим активное силовое воздействие, приводит к нагрузке на суставы и мышцы оператора, вызывая утомление и даже риск возникновения повторяющихся стрессовых травм. Несоответствие между механическим сопротивлением (импедансом) задающего устройства и импедансом удаленного манипулятора. Высокий импеданс интерфейса делает его «жестким» и трудным для движения, а низкий – «вялым» и неточным. Несовпадение степеней свободы и траекторий движения интерфейса оператора и рабочего органа робота создает неестественные позы и требует от оператора дополнительных когнитивных усилий для преобразования движений;

– *проблемы восприятия и сенсомоторной интеграции*. Даже минимальные временные задержки между действием оператора и ответным силовым сигналом могут дезориентировать, вызывать головокружение и серьезно нарушать чувство присутствия (телеприсутствия). Нестабильность работы алгоритмов может приводить к неожиданным вибрациям и колебаниям. Неточная передача сил (например, шумы, дискретизация, недостаточный диапазон передаваемых усилий) искажает тактильную картину, заставляя оператора не доверять системе и работать с излишней осторожностью. Рассогласование между визуальной, слуховой и силомоментной информацией может вызвать когнитивный диссонанс и повысить нагрузку на оператора;

– *когнитивные проблемы и проблемы управления*. Необходимость непрерывно интерпретировать сложные силовые сигналы и координировать их со зрительной информацией требует высокой концентрации, что приводит к умственному утомлению и ошибкам. Сложность освоения интерфейса, особенно когда используется не прямая кинематическая схема (например, управление большим роботом с помощью маленького джойстика с масштабированием усилий). Оператору при этом трудно развить «чувство» системы. Если обратная связь неточна, запаздывает или не соответствует визуальной картине, оператор теряет доверие к системе и начинает игнорировать силовые сигналы, что

сводит на нет ее преимущества и может привести к ошибкам;

– *проблемы безопасности и надежности*. Непредсказуемое поведение системы (сбой программы, ошибка датчика) может привести к резкому, неожиданному движению манипулятора, причиняющему физическую боль или травму оператору (например, удар, защемление). Отсутствие или несовершенство алгоритмов, гарантирующих безопасное взаимодействие и систем, автоматически ограничивающих усилие в опасных ситуациях, повышает тревогу и нервно-психическое напряжение.

Современные методы и технологии силовой обратной связи в робототехнике, телеуправлении и виртуальной реальности: комплексный анализ

Силовая обратная связь является ключевым компонентом современных робототехнических систем, медицинских симуляторов и интерфейсов виртуальной реальности. Отметим, что проблеме дистанционного управления и силовым обратным связям посвящено множество обзоров, отражающих инженерные и технологические решения в области дистанционного управления [13–15]. Показано, что их внедрение позволяет значительно улучшить точность управления, обеспечить реалистичность взаимодействия и безопасность оператора при работе с удаленными или виртуальными объектами в агрессивных и опасных средах.

В обзоре [16] на базе библиометрического анализа опубликованной научной литературы в области телеуправления показаны история, эволюция, тенденции и точки интереса исследователей в области дистанционного управления. В частности показано, что на первом этапе основное внимание уделялось разработке систем дистанционного управления. Впоследствии произошел всплеск фундаментальных теоретических исследований в области линейных систем и стабилизации, которые заложили основу для оптимизации систем и стратегий управления. Внимание исследователей переключилось на повышение производительности в режиме реального времени и расширение сценариев применения мобильных роботов. В 2016–2017 годах решались проблемы повышения точности и надежности работы, а в 2019 году произошли изменения, связанные с появлением интереса к тактильным ощущениям, телеуправлению и тактильной обратной связи. В последнее время акцент

сместился в сторону искусственного интеллекта и интерактивных возможностей, связанных с появлением и развитием технологий виртуальной реальности. В кратком обзоре, представленном ниже в настоящей статье, нами проводится анализ научных работ, опубликованных в период с 2010 по 2025 год, с целью выявления современных тенденций, ключевых инженерно-психологических проблем и перспективных направлений развития технологий силовой обратной связи.

1. Стабильность взаимодействия и адаптивные алгоритмы управления

Одной из центральных проблем в системах с силовой обратной связью является обеспечение стабильности взаимодействия, особенно при работе с неизвестными или изменяющимися параметрами среды. В работе Deng et al. (2024) предложен адаптивный алгоритм управления на основе admittance-модели, который позволяет системе автоматически подстраиваться под неизвестную жесткость окружающей среды [17]. Авторы отмечают, что традиционные методы требуют предварительной идентификации параметров среды, что ограничивает их применение в реальных условиях. Разработанный алгоритм анализирует пассивность системы и регулирует параметры проводимости в реальном времени, устраняя высокочастотные колебания. Однако эксперименты проводились на шести осевых манипуляторах с идеализированными моделями среды (например, силиконовые подушки), что не позволяет в полной мере оценить работоспособность метода в условиях динамически изменяющейся жесткости или при наличии шумов в измерениях.

Аналогичные проблемы стабильности рассматриваются в исследовании Xie et al. (2020), посвященном хирургическим роботам с 7 степенями свободы. Авторы предлагают набор алгоритмов, включающий фильтрацию сигналов, компенсацию гравитации и преобразование положения, что позволяет достичь задержки обратной связи менее 100 мс. [18]. Однако точность системы существенно снижается при углах наклона манипулятора более 15°, что указывает на необходимость дальнейшего совершенствования алгоритмов компенсации. Предложенные алгоритмы требуют калибровки под конкретную геометрию манипулятора.

2. Разработка новых типов и технологий тактильных устройств в робототехнике

Разработчики технологий аффективного тактильного взаимодействия всё чаще пытаются сделать этот модус центральным в интерактивных технологиях. Достижения в области тактильных технологий и сенсорики стимулируют интерес к этой области. В обзоре Olugbade T. et al. (2023) рассматриваются аспекты аффективного тактильного взаимодействия для улучшения и поддержки человеческого опыта с технологиями или через них [19]. Отдельно рассматривается аффективное тактильное взаимодействие в контексте взаимодействия человека и робота и реального человека с виртуальным, где технические проблемы и типы опыта различаются.

Совершенствование аппаратной части устройств с силовой обратной связью остается актуальной задачей. В работе Arezoo et al. (2024) представлено портативное тактильное устройство (UHND) на основе пропеллеров, способное генерировать силу до 15 Н и крутящий момент до 1 Н·м [20]. Устройство отличается простой обеспечивает ориентацию силы в нужном направлении. Однако задержка в 370 мс и шум от работы пропеллеров могут ограничивать применение системы в реальном времени и вызывать дискомфорт у пользователя.

Использование в тактильных дисплеях специальных материалов, в частности, магнитоэологических интеллектуальных эластомеров позволяет управлять их свойствами с помощью контролируемого внешнего магнитного поля Rayami (2020). [21].

Интересное решение предложено Pierce et al. (2014) – носимый контроллер для управления роботизированным захватом, который обеспечивает кинестетическую обратную связь по силе сжатия, а также тактильную обратную связь через линейные электромагнитные приводы [22]. Несмотря на инновационность подхода, низкая скорость движения захвата (0.04 м/с) и сложность обработки вибросигналов ограничивают динамичность взаимодействия.

Масштабирование телеоперации с силовой обратной связью – перспективный подход для помощи операторам в выполнении задач в микромасштабе. В работе (Ousaid et al. (2015) рассматривается преобразование тактильной информации с микромасштаба в человеческий масштаб и обеспечение масштабирования телеоперации, одновременно с достижением стабильности и прозрачности. С этой целью активный датчик силы и тактильный интерфейс были объединены в полную цепь

телеопераций через прямую двухканальную схему. Стабильность работы обеспечивается обеспечением пассивности ведущей и ведомой подсистем. Эксперименты продемонстрировали возможности системы для обеспечения бесконтактного взаимодействия с магнитными и проникновения стеклянного зонда в каплю воды с ощущением капиллярных сил [23].

Тактильное взаимодействие человека с роботом – ключевой аспект для обеспечения естественности и безопасности в сервисной робототехнике. В статье Wang et al. (2021) представлен набор данных «TactAct», содержащий тактильную информацию для 12 типов касаний от 50 участников [24]. Данные собраны с помощью гибкого тактильного сенсора 32×32, установленного на имитаторе предплечья робота. Набор данных предназначен для разработки алгоритмов распознавания намерений и тактильного интеллекта.

В последнее время большинство исследователей привлекает кожная тактильная обратная связь. Было доказано, что она передает оператору богатую информацию, одновременно гарантируя безопасность и стабильность системы управления. В отличие от кинетической обратной связи, кожные стимулы не влияют на стабильность системы, что особенно важно в таких критических областях, как медицинская робототехника [25].

3. Применение в системах медицинской робототехники

Роботизированные технологии повышают эффективность хирургии за счет улучшенной точности, стабильности и ловкости. При ручном управлении хирургическим роботом хирург находится в стороне от операционной зоны. В процедурах с визуализацией метод прогнозирования изображения, основанный на технологии визуальной реальности, эффективно решает проблему задержки передачи информации об изображении между ведущим и ведомым манипуляторами системы телеоперации во многих областях применения. Однако задержка передачи информации о силе воздействия, которая передаётся по каналу связи, мешает работе оператора и негативно влияет на стабильность и прозрачность системы. В работе Richert, Masnab (2009) предлагается использовать нелинейную адаптивную схему управления внутренним контуром для тактильных систем «ведущий-ведомый», чтобы уменьшить влияние временной задержки [26].

Медицинская робототехника является одной из наиболее перспективных областей применения силовой обратной связи. В исследовании Talasaz et al. (2016) изучалось влияние прямой силовой и визуальной обратной связи на точность наложения швов в роботизированной хирургии [27]. Результаты показали, что комбинация обоих типов обратной связи позволяет снизить повреждение тканей и улучшить качество швов. Однако используемый ПИД-регулятор не адаптируется к изменению жесткости тканей, что требует дополнительной настройки при переходе между разными типами биологических структур.

В статье Liang et al. (2014) представлено хирургическое устройство для использования в кабинете врача, подходящее для пациентов с экссудативным средним отитом [28]. Благодаря тому, что устройство предназначено для использования в кабинете врача, нет необходимости вводить пациента в состояние общей анестезии (т. е. пациент находится в сознании). Для обеспечения высокой успешности и безопасности важно, чтобы относительное движение и сила контакта между набором инструментов устройства и барабанной перепонкой были стабилизированы. С этой целью была предложена, реализована и протестирована в макетной системе схема управления с силовой обратной связью с компенсацией движения на основе зрения.

В работе Gasparic et al. (2023) предложен новый подход к обеспечению сенсорной обратной связи в миоэлектрических протезах [29]. Комбинация ЭМГ-сигналов и вибротактильной стимуляции позволила улучшить точность захвата на 26.6% по сравнению с системами без обратной связи. Однако метод требует индивидуальной калибровки и может терять эффективность при длительном использовании из-за усталости пользователя.

Во время сердечно-сосудистых и цереброваскулярных интервенционных хирургических процедур точность продвижения направляющей проволоки критически важна для успеха и безопасности операции. Классический пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор (ПИД-регулятор) не способен адаптироваться к сложным хирургическим ситуациям, что оставляет возможности для улучшения системы. В статье Guo et al (2016) предложен нечеткий ПИД-алгоритм управления с обратной связью по усилию направляющей

проволаки [30]. Эксперименты показали, что нечеткий ПИД-регулятор с обратной связью по усилию превосходит классический ПИД-регулятор: динамика системы улучшилась, ошибка слежения уменьшилась, перерегулирование снизилось, а безопасность операции повысилась.

Тактильная обратная связь требует точной информации о силе, передаваемой с удаленного места. Однако из-за ограничений по размеру датчик силы при хирургических операциях обычно крепится вне брюшной полости пациента. Таким образом, он измеряет не только силы взаимодействия на кончике инструмента, но и динамику хирургического инструмента. В работе (Su et al. (2020) предлагается структура глубокой сверточной нейронной сети без модели для идентификации динамики инструмента, которая отличается быстрыми вычислениями и устойчивостью к шумам [31].

Системы с сенсорной мультимодальной интеграцией позволяют реализовать методы обучения на двуконсольных хирургических роботизированных системах, таких как da Vinci Si, с использованием тактильного взаимодействия «рука-в-руке». Предложенная в исследовании Shahbazi et al. (2018) платформа позволяет эксперту выполнять хирургическую процедуру на пациенте, одновременно обеспечивая обучаемого мультимодальным обучением без риска для безопасности пациента [32].

4. Виртуальная реальность и симуляция

Технологии силовой обратной связи играют важную роль в создании иммерсивного опыта в VR. Shimizu et al. (2024) разработали экзоскелет с магнитореологическими тормозами для имитации удара по виртуальному мячу [33]. Эксперименты показали, что увеличение времени приложения силы не всегда приводит к реалистичному ощущению веса, что указывает на необходимость более сложных моделей взаимодействия.

Система PhyNeSS (Deo & De, 2009), сочетающая физическое моделирование с нейронными сетями, демонстрирует потенциал машинного обучения для ускорения расчетов в реальном времени [34]. Однако предварительное моделирование занимает до 19 часов, а отсутствие поддержки топологических изменений (например, разрезов тканей) ограничивает применение в сложных хирургических сценариях.

В работе Cheng-Jun et al. (2010) описана система виртуальной сборки САПР с силовой обратной связью [35]. Была изучена

деятельность оператора и навигация в виртуальной сцене при виртуальной сборке, основанной на силовой обратной связи, решена проблема разделения между тактильным прокси-сервером и деталями, находящимися в ограниченном движении.

5. Человеческий фактор в интерфейсах с силовой обратной связью

Пользовательские свойства интерфейсов определяют качество и стабильность операторской деятельности. В статье (Pathak, Kumazawa, 2012) представлены результаты юзабилити исследования компактного устройства ввода с мультимодальным интерфейсом [36]. Интерфейс обеспечивает визуальную и звуковую обратную связь, а также тактильную обратную связь, создаваемую устройством на колёсиках, прикрепленным к компактному устройству ввода. На основе этих интерфейсов проведен ряд экспериментов для сравнения их эффективности. Критерии измерения, используемые в этом эксперименте: количество введенных символов, время выполнения задачи в секундах, а также мнение о понятности и удобстве настройки комбинации пользовательских интерфейсов в виде дискретных показателей. Результаты эксперимента показывают, что при правильном сочетании интерфейсов обратной связи для пользователя эффективность может быть повышена за счет сокращения времени работы или повышения точности ввода текста. Целесообразность сочетания интерфейсов также подтверждается удовлетворенностью пользователя использованием устройства.

В типовых задачах по проведению телеопераций в космических исследованиях несоответствие между направлением обзора оператора и требуемым управляющим воздействием вынуждает оператора выполнять ментальные вращения. В работе Kimmer et al. (2015) впервые изучено влияние тактильной обратной связи на выполнение задач с ментальными вращениями [37]. В эксперименте с участием людей анализировались два метода тактильной обратной связи: прямая силовая обратная связь и искусственные направляющие силы. Результаты показали, что ментальные вращения снижают производительность даже при наличии силовой обратной связи. Однако тактильное наведение уменьшает умственную нагрузку оператора и снижает вариативность ошибок.

6. Критические проблемы и перспективы развития силовой обратной связи

Анализ литературы позволил выявить ряд общих проблем:

– *задержки в системе* – временные задержки (100–370 мс) остаются критическим фактором, снижающим реалистичность взаимодействия;

– *аппаратные ограничения* – шум, дискомфорт и высокая стоимость тактильных устройств;

– *алгоритмические вызовы* – необходимость адаптивных регуляторов для работы с нестационарными средами.

Перспективные направления в области силовой обратной связи включают:

– развитие гибридных систем с мультимодальной обратной связью Pathak & Kumazawa (2012) [36].

– использование глубокого обучения для прогнозирования сил и ускорения расчетов Yi et al. (2011) [38], Deo (2009) [34];

– создание легких и энергоэффективных экзоскелетов на основе smart-материалов (Shimizu et al., 2024) [33];

– мультимодальные исследования, учитывающие взаимодействие различных сенсорных модальностей (например, тактильной, тепловой и звуковой) для более точного распознавания эмоциональных состояний оператора;

– использование технологий ИИ для обучения роботов посредством силовой обратной связи с оператором.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Спасский Б.А.** Обзор современных интерфейсных систем операторов мобильных наземных роботов // Робототехника и техническая кибернетика. 2016. № 4(13). С. 21–31. EDN VYROBF.
2. **Chen J.Y.C., Haas E., Pillamarri K.S., Jacobson C.N.** Human-Robot Interface. Issues in Operator Performance, Interface Design, and Technologies. Army Research Laboratory ARL-TR-3834. 2006.
3. **Dumas B., Lalanne D., Oviatt S.** Multimodal interfaces: A survey of principles, models and frameworks. Human Machine Interaction Research Results of the MMI Program. Lecture Notes in Computer Science. 2009;5440:3–26. DOI 10.1007/978-3-642-00437-7_1.
4. **Сергеев А.В., Сергеев С.Ф.** Редукция сложности в интерфейсах робототехнических и эргатических систем // Робототехника и техническая кибернетика. 2019. Том 7. № 2. С. 109–119. DOI 10.31776/RTSJ.7204. EDN WRLEPI.
5. **Юсупов Р.М., Ронжин А.Л.** От умных приборов к интеллектуальному пространству // Вестник Российской академии наук. 2010. Т. 80. № 1. С. 45–51. EDN LOKEKP.
6. **Ронжин А.Л., Юсупов Р.М.** Многомодальные интерфейсы автономных мобильных робототехнических комплексов // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2015. №. 1 (162). С. 195–206. EDN TNACTV.

Заключение

В итоге, можно сделать вывод о том, что ключевая эргономическая цель проектирования заключается в создании такого силомоментного интерфейса, который бы бесшовно интегрировался в сенсомоторный контур оператора: был физически комфортным, предоставлял точную и своевременную информацию, был интуитивно понятным и безопасным, формировал у оператора чувство погружения в рабочую среду и делал органы управления интерфейса продолжением сенсорных и исполнительных механизмов оператора.

Современные исследования демонстрируют значительный прогресс в области силовой обратной связи, однако для широкого внедрения этих технологий необходимо решить проблемы задержек, адаптивности и пользовательского комфорта. Интеграция искусственного интеллекта, совершенствование аппаратной части и развитие стандартов оценки эффективности будут способствовать созданию более надежных и удобных систем. Будущие работы должны фокусироваться на тестировании в реальных условиях, а не только в лабораторных симуляциях, чтобы обеспечить переход от экспериментальных прототипов к промышленным и медицинским применениям.

REFERENCES

1. **Spasskiy B.A.** Review of Modern Human-Robot Interface Systems of Unmanned Ground Vehicles. Robotics and Technical Cybernetics. 2016;4(13):21-31.
2. **Chen J.Y.C., Haas E., Pillamarri K.S., et al.** Human-Robot Interface. Issues in Operator Performance, Interface Design, and Technologies. Army Research Laboratory ARL-TR-3834; 2006.
3. **Dumas B., Lalanne D., Oviatt S.** Multimodal Interfaces: A Survey of Principles, Models and Frameworks. Human Machine Interaction Research Results of the MMI Program. Lecture Notes in Computer Science. 2009;5440:3-26. DOI 10.1007/978-3-642-00437-7_1.
4. **Sergeev A.V., Sergeev S.F.** Complexity Reduction of Interfaces of Robotic and Ergatic Systems. Robotics and Technical Cybernetics. 2019;7(2):109-119. DOI 10.31776/RTSJ.7204.
5. **Yusupov R.M., Ronzhin A.L.** From Smart Devices to Smart Space. Herald of the Russian Academy of Sciences. 2010;80(1):45-51.
6. **Ronzhin A.L., Yusupov R.M.** Multimodal Interfaces for Autonomous Mobile Robotic Systems. Izvestiya of Southern Federal University. Engineering Sciences. 2015;1(162):195-206.

7. **Сергеев А.В., Юсупова А.Ю., Сергеев С.Ф.** Мультимерные интерфейсы в активной управляющей индуцированной виртуальной среде // Робототехника и техническая кибернетика. 2022. Том 10. № 4. С. 261–266. DOI 10.31776/RTCJ.10403.
7. **Sergeev A.V., Yusupova A.Y., Sergeev S.F.** Multimeric Interfaces in an Active Control Induced Virtual Environment. Robotics and Technical Cybernetics. 2022;10(4):261-266. DOI 10.31776/RTCJ.10403.
8. **Сергеев А.В., Плешаков А.О., Сергеев С.Ф.** Виртуальные инструменты в интерфейсах управления промышленными роботами. Искусственный интеллект в решении актуальных социальных и экономических проблем XXI века : Сборник статей по материалам Девятой всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Пермь, 17–18 октября 2024 года. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2024. С. 252-255. EDN ZFUQQL.
8. **Sergeev A.V., Pleshakov A.O., Sergeev S.F.** Virtual Tools in Industrial Robot Control Interfaces. In: Proceedings of the 9th All-Russia and International Scientific-Practical Conference on Artificial Intelligence in Solving Relevant Social and Economic Problems of the 21st Century; 2024 Oct 17-18; Perm: Perm State National Research University; 2024. p. 252-255.
9. **Гордеев Я.Н., Кузнецов Р.А., Топоров Ю.Г.** Радиохимический комплекс: создание, становление, развитие. Димитровград: АО «ГНЦ НИИАР», 2018. 64 с. ISBN 978-5-94831-171-5.
9. **Gordeyev Ya.N., Kuznetsov R.A., Toporov Yu.G.** Radiochemical Complex: Establishment, Development, and Progress. Dimitrovgrad: SSCRIAR; 2018. 64 p.
10. **Мосоян М.С., Федоров Д.А.** Современная робототехника в медицине // Трансляционная медицина. 2020. №7(5). С. 91-108. DOI 10.18705/2311-4495-2020-7-5-91-108. EDN DBSTNO.
10. **Mosoyan M.S., Fyodorov D.A.** Modern Robotics in Medicine. Translational Medicine. 2020;7(5):91-108. DOI 10.18705/2311-4495-2020-7-5-91-108.
11. **Сергеев С.Ф.** Эргономика иммерсивных сред: методология, теория, практика : специальность 19.00.03 "Психология труда, инженерная психология, эргономика" : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора психологических наук / Сергеев Сергей Фёдорович. – Санкт-Петербург, 2010. – 42 с. – EDN ZOAZTL.
11. **Sergeev S.F.** Ergonomics of Immersive Environments: Methodology, Theory, Practice. Thesis Abstract for the Degree of Doctor of Psychology. St. Petersburg; 2010. 42 p.
12. **Сергеев С.Ф.** Введение в когнитивную эргономику и инженерную психологию: учебное пособие. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2024. 256 с.
12. **Sergeev S.F.** Introduction to Cognitive Ergonomics and Engineering Psychology. Moscow; Vologda: INFRA-Inzheneriya; 2024. 256 p.
13. **Hokayem P.F., Spong M.W.** Bilateral teleoperation: A historical survey. Automatica. 2006;42(12):2035–2057. DOI 10.1016/j.automatica.2006.06.027.
13. **Hokayem P.F., Spong M.W.** Bilateral Teleoperation: A Historical Survey. Automatica. 2006;42(12):2035-2057. DOI 10.1016/j.automatica.2006.06.027.
14. **Shimono T., Katsura S., Ohnishi K.** Haptic motion control for physical human support. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering. 2009;4(2):166-175. DOI 10.1002/tee.20394.
14. **Shimono T., Katsura S., Ohnishi K.** Haptic Motion Control for Physical Human Support. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering. 2009;4(2):166-175. DOI 10.1002/tee.20394.
15. **Muradore R., Fiorini P.** A review of bilateral teleoperation algorithms. Acta Polytech Hungarica. 2016;13(1):191–208. DOI 10.12700/APH.13.1.2016.1.13.
15. **Muradore R., Fiorini P.** A Review of Bilateral Teleoperation Algorithms. Acta Polytech Hungarica. 2016;13(1):191-208. DOI 10.12700/APH.13.1.2016.1.13.
16. **Tian J., Zhou Yu., Yin L., AlQahtani S.A., Tang M., Siyu Lu.** Control Structures and Algorithms for Force Feedback Bilateral Teleoperation Systems: A Comprehensive Review. Computer Modeling in Engineering & Sciences (CMES). 2025;142(2):973-1019. DOI 10.32604/cmcs.2024.057261.
16. **Tian J., Zhou Yu., Yin L., AlQahtani S.A., Tang M., Siyu Lu.** Control Structures and Algorithms for Force Feedback Bilateral Teleoperation Systems: A Comprehensive Review. Computer Modeling in Engineering & Sciences (CMES). 2025;142(2):973-1019. DOI 10.32604/cmcs.2024.057261.
17. **Deng X., Tian D., Chen J.** Interaction Stability of Force Feedback Device and Admittance Adaptive for Unknown Environment. 2024 IEEE 18th International Conference on Advanced Motion Control (AMC). IEEE, 2024, p. 1-6. DOI 10.1109/amc58169.2024.10505660.
17. **Deng X., Tian D., Chen J.** Interaction Stability of Force Feedback Device and Admittance Adaptive for Unknown Environment. In: Proceedings of the 2024 IEEE 18th International Conference on Advanced Motion Control (AMC); IEEE: 2024. p. 1-6. DOI 10.1109/amc58169.2024.10505660.
18. **Xie K., Luan N., Zhu X., Cao Q.** Implementation of 7-DOF External Force/Torque Feedback for Master-slave Surgical Robot System. 2020 13th International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA). IEEE, 2020, p. 649-655. DOI 10.1109/ICICTA51737.2020.00144.
18. **Xie K., Luan N., Zhu X., Cao Q.** Implementation of 7-DOF External Force/Torque Feedback for Master-Slave Surgical Robot System. In: Proceedings of the 2020 13th International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA). IEEE: 2020. p. 649-655. DOI 10.1109/ICICTA51737.2020.00144.
19. **Olugbade T., He L., Maiolino P., Heylen D., Bianchi-Berthouze N.** Touch technology in affective human-, robot-, and virtual-human interactions: A survey. Proceedings of the IEEE. 2023;111(10):1333-1354. DOI 10.1109/JPROC.2023.3272780.
19. **Olugbade T., He L., Maiolino P., Heylen D., Bianchi-Berthouze N.** Touch Technology in Affective Human-, Robot-, and Virtual-Human Interactions: A Survey. Proceedings of the IEEE. 2023;111(10):1333-1354. DOI 10.1109/JPROC.2023.3272780.
20. **Arezoo K., Tavirdizadeh P., Apilur Kh., Hadi A., Arezoo J.** A Novel Ungrounded Haptic Device for
20. **Arezoo K., Tavirdizadeh P., Apilur Kh., Hadi A., Arezoo J.** A Novel Ungrounded Haptic Device for

- Generation and Orientation of Force and Torque Feedbacks. *IEEE Transactions on Haptics*. 2024. DOI 10.1109/TOH.2024.3493377.
21. **Payami A., Hooshiar A., Alkhalaf A., Dargahi J.** Modeling of Rate-dependent Force-Displacement Behavior of MREs using Neural Networks for Torque Feedback Applications. 2020 8th International Conference on Control, Mechatronics and Automation (ICCMA). IEEE, 2020, p. 58-62. DOI 10.1109/ICCMA51325.2020.9301587.
22. **Pierce R.M., Fedalei E.A., Kuchenbecker K.J.** A wearable device for controlling a robot gripper with fingertip contact, pressure, vibrotactile, and grip force feedback. 2014 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS). IEEE, 2014, p. 19-25. DOI 10.1109/HAPTICS.2014.6775428.
23. **Ousaid A.M., Halio S.D., Regnier S., Hayward W.** A stable and transparent microscale force feedback teleoperation system. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2015;20(5):2593-2603. DOI 10.1109/TMECH.2015.2423092.
24. **Wang P., Liu J., Hou F., Chen D., Xia Z., Guo Zh.** Organization and understanding of a tactile information dataset TacAct for physical human-robot interaction. 2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2021, p. 7328-7333. DOI 10.1109/IROS51168.2021.9636389.
25. **Pacchierotti C., Prattichizzo D.** Cutaneous/tactile haptic feedback in robotic teleoperation: Motivation, survey, and perspectives. *IEEE Transactions on Robotics*. 2023;40:978-998. DOI 10.1109/TRO.2023.3344027.
26. **Richert D., Macnab C.J.B.** Direct adaptive force feedback for haptic control with time delay. 2009 IEEE Toronto International Conference Science and Technology for Humanity (TIC-STH). IEEE, 2009, p. 893-897. DOI 10.1109/TIC-STH.2009.5444371.
27. **Talasaz A., Trejos A.L., Patel R.V.** The role of direct and visual force feedback in suturing using a 7-DOF dual-arm teleoperated system. *IEEE transactions on haptics*. 2016;10(2):276-287. DOI 10.1109/TOH.2016.2616874.
28. **Liang W., Gao W., Chen S., Tan K.K.** Stabilization for an ear surgical device using force feedback and vision-based motion compensation. 2014 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. IEEE, 2014, p. 943-948. DOI 10.1109/AIM.2014.6878201.
29. **Gasparic F., Jorgovanovich N., Hofer Ch., Russold M.F., Koppe M., Stanisic D. et al.** A novel sensory feedback approach to facilitate both predictive and corrective control of grasping force in myoelectric prostheses. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 2023;31:4492-4503. DOI 10.1109/TNSRE.2023.3330502.
30. **Guo S., Chen Q., Xiao N., Wang Yu.** A fuzzy PID control algorithm for the interventional surgical robot with guide wire feedback force. 2016 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. IEEE, 2016, p. 426-430. DOI 10.1109/ICMA.2016.7558601.
31. **Su H., Qi W., Yang Ch., Arevalo J.S.S., Ferrigno G., De Momi E.** Deep neural network approach in robot tool dynamics identification for bilateral teleoperation. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2020;5(2):2943-2949. DOI 10.1109/LRA.2020.2974445.
32. **Shahbazi M., Atashzar S.F., Ward Ch., Talebi A., Patel R.** Multimodal sensorimotor integration for expert-in-
- Generation and Orientation of Force and Torque Feedbacks. *IEEE Transactions on Haptics*. 2024. DOI 10.1109/TOH.2024.3493377.
21. **Payami A., Hooshiar A., Alkhalaf A., Dargahi J.** Modeling of Rate-Dependent Force-Displacement Behavior of MREs Using Neural Networks for Torque Feedback Applications. In: Proceedings of the 2020 8th International Conference on Control, Mechatronics and Automation (ICCMA); IEEE: 2020. p. 58-62. DOI 10.1109/ICCMA51325.2020.9301587.
22. **Pierce R.M., Fedalei E.A., Kuchenbecker K.J.** A Wearable Device for Controlling a Robot Gripper with Fingertip Contact, Pressure, Vibrotactile, and Grip Force Feedback. In: Proceedings of the 2014 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS); IEEE: 2014. p. 19-25. DOI 10.1109/HAPTICS.2014.6775428.
23. **Ousaid A.M., Halio S.D., Regnier S., Hayward W.** A Stable and Transparent Microscale Force Feedback Teleoperation System. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2015;20(5):2593-2603. DOI 10.1109/TMECH.2015.2423092.
24. **Wang P., Liu J., Hou F., Chen D., Xia Z., Guo Zh.** Organization and Understanding of a Tactile Information Dataset TacAct for Physical Human-Robot Interaction. In: Proceedings of the 2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS); IEEE: 2021. p. 7328-7333. DOI 10.1109/IROS51168.2021.9636389.
25. **Pacchierotti C., Prattichizzo D.** Cutaneous/Tactile Haptic Feedback in Robotic Teleoperation: Motivation, Survey, and Perspectives. *IEEE Transactions on Robotics*. 2023;40:978-998. DOI 10.1109/TRO.2023.3344027.
26. **Richert D., Macnab C.J.B.** Direct Adaptive Force Feedback for Haptic Control with Time Delay. In: Proceedings of the 2009 IEEE Toronto International Conference Science and Technology for Humanity (TIC-STH); IEEE: 2009. p. 893-897. DOI 10.1109/TIC-STH.2009.5444371.
27. **Talasaz A., Trejos A.L., Patel R.V.** The Role of Direct and Visual Force Feedback in Suturing Using a 7-DOF Dual-Arm Teleoperated System. *IEEE Transactions on Haptics*. 2016;10(2):276-287. DOI 10.1109/TOH.2016.2616874.
28. **Liang W., Gao W., Chen S., Tan K.K.** Stabilization for an Ear Surgical Device Using Force Feedback and Vision-Based Motion Compensation. In: Proceedings of the 2014 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics; IEEE: 2014. p. 943-948. DOI 10.1109/AIM.2014.6878201.
29. **Gasparic F., Jorgovanovich N., Hofer Ch., Russold M.F., Koppe M., Stanisic D. et al.** A Novel Sensory Feedback Approach to Facilitate Both Predictive and Corrective Control of Grasping Force in Myoelectric Prostheses. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 2023;31:4492-4503. DOI 10.1109/TNSRE.2023.3330502.
30. **Guo S., Chen Q., Xiao N., Wang Yu.** A Fuzzy PID Control Algorithm for the Interventional Surgical Robot with Guide Wire Feedback Force. In: Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation; IEEE: 2016.p. 426-430. DOI 10.1109/ICMA.2016.7558601.
31. **Su H., Qi W., Yang Ch., Arevalo J.S.S., Ferrigno G., De Momi E.** Deep Neural Network Approach in Robot Tool Dynamics Identification for Bilateral Teleoperation. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2020;5(2):2943-2949. DOI 10.1109/LRA.2020.2974445.
32. **Shahbazi M., Atashzar S.F., Ward Ch., Talebi A., Patel R.** Multimodal Sensorimotor Integration for Expert-in-

the-loop telerobotic surgical training. IEEE Transactions on Robotics. 2018;34(6):1549-1564. DOI 10.1109/TRO.2018.2861916.

33. Shimizu T., Sawahashi R., Nakamura T. Weight Sensory Presentation Considering Impulsive Force of Ball Kicking by a Force Feedback Exoskeleton using MR Fluid Brakes. 2024 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). IEEE, 2024, p. 1-7. DOI 10.1109/ICIT58233.2024.10540821.

34. Deo D., De S. Phyness: A physics-driven neural networks-based surgery simulation system with force feedback. World haptics 2009-third joint eurohaptics conference and symposium on haptic interfaces for virtual environment and teleoperator systems. IEEE, 2009, p. 30-34. DOI 10.1109/WHC.2009.4810896.

35. Cheng-Jun C., Yun-feng W., Niu L. Research on interaction for virtual assembly system with force feedback. 2010 Third International Conference on Information and Computing. IEEE, 2010, Vol. 2, p. 147-150. DOI 10.1109/ICIC.2010.131.

36. Pathak A., Kumazawa I. Usability evaluation of touch panel-based mobile device on user interface with multimodal feedback. IEEE-International Conference on Advances in Engineering, Science and Management (ICAESM-2012). IEEE, 2012, p. 703-708.

37. Kimmer S., Smisek J., Schiele A. Effects of haptic guidance and force feedback on mental rotation abilities in a 6-dof teleoperated task. 2015 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. IEEE, 2015, p. 3092-3097. DOI 10.1109/SMC.2015.537.

38. Yi N., Xu-hao W., Lili H. Force feedback predictive control based on BP neural network of MIS robot. 2011 International Conference on Electric Information and Control Engineering. IEEE, 2011, p. 419-422. DOI 10.1109/ICEICE.2011.5778348.

the-Loop Telerobotic Surgical Training. IEEE Transactions on Robotics. 2018;34(6):1549-1564. DOI 10.1109/TRO.2018.2861916.

33. Shimizu T., Sawahashi R., Nakamura T. Weight Sensory Presentation Considering Impulsive Force of Ball Kicking by a Force Feedback Exoskeleton Using MR Fluid Brakes. In: Proceedings of the 2024 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT); IEEE: 2024. p. 1-7. DOI 10.1109/ICIT58233.2024.10540821.

34. Deo D., De S. Phyness: A Physics-Driven Neural Networks-Based Surgery Simulation System with Force Feedback. In: Proceedings of the World Haptics 2009-third Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems; IEEE: 2009. p. 30-34. DOI 10.1109/WHC.2009.4810896.

35. Cheng-Jun C., Yun-Feng W., Niu L. Research on Interaction for Virtual Assembly System with Force Feedback. In: Proceedings of 2010 3rd International Conference on Information and Computing; IEEE: 2010, vol. 2, p. 147-150. DOI 10.1109/ICIC.2010.131.

36. Pathak A., Kumazawa I. Usability Evaluation of Touch Panel-Based Mobile Device on User Interface with Multimodal Feedback. In: Proceedings of IEEE-International Conference on Advances in Engineering, Science and Management (ICAESM-2012); IEEE: 2012. p. 703-708.

37. Kimmer S., Smisek J., Schiele A. Effects of Haptic Guidance and Force Feedback on Mental Rotation Abilities in a 6-dof Teleoperated Task. In: Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics; IEEE: 2015. p. 3092-3097. DOI 10.1109/SMC.2015.537.

38. Yi N., Xu-Hao W., Lili H. Force Feedback Predictive Control Based on BP Neural Network of MIS Robot. In: Proceedings of the 2011 International Conference on Electric Information and Control Engineering; IEEE: 2011. p. 419-422. DOI 10.1109/ICEICE.2011.5778348.1.

Информация об авторах:

Сергеев Сергей Федорович – доктор психологических наук, ведущий научный сотрудник Центрального научно-исследовательского и опытно-конструкторского института робототехники и технической кибернетики, профессор Санкт-Петербургского государственного университета, заведующий НИЛ «Эргономика сложных систем» СПбПУ Петра Великого, академик Российской инженерной академии, международные идентификационные номера автора: Scopus-Author ID 55953906000, Research- ID-Web of Science J-4844-2013, Author-ID-РИНЦ 509432.

Сергеев Алексей Викторович – начальник отдела Центрального научно-исследовательского и опытно-конструкторского института робототехники и технической кибернетики (ЦНИИ РТК), международные идентификационные номера автора: Scopus-Author ID 57219401217, Research- ID-Web of Science AAP-8420-2021, Author-ID-РИНЦ 985302

Даляев Игорь Юрьевич – кандидат технических наук, Главный конструктор по экстремальной робототехнике и автоматизации - начальник научно-технического комплекса Центрального научно-исследовательского и опытно-конструкторского института робототехники и технической кибернетики. Международные идентификационные номера автора: Scopus-Author ID 57191156719, Research- ID-Web of Science E-1650-2014, Author-ID-РИНЦ 734095

Information about the authors:

Sergeev Sergey Fedorovich – Doctor of Psychology, Leading Researcher at Central Research and Development Institute of Robotics and Technical Cybernetics, Professor of Saint Petersburg State University, Head of the Research Laboratory of Ergonomics of Complex Systems of Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Academician of the Russian Engineering Academy, the author's international identifiers: Scopus-Author ID: 55953906000, Research-ID-Web of Science: J-4844-2013, Author-ID-RSCI: 509432.

Sergeev Aleksey Viktorovich – Head of the Department at the Central Research and Development Institute of Robotics and Technical Cybernetics (TsNII RTK), the author's international identifiers: Scopus-Author ID: 57219401217, Research-ID-Web of Science: AAP-8420-2021, Author-ID-RSCI: 985302.

Dalayev Igor Yuryevich – candidate of Science (Engineering), Chief Engineer for Extreme Robotics and Automation, Head of the Central Research and Development Institute of Robotics and Technical Cybernetics (TsNII RTK), the author's international identifiers: Scopus-Author ID: 57191156719, Research-ID-Web of Science: E-1650-2014, Author-ID-RSCI: 734095.

Надежин Михаил Игоревич – начальник отдела Центрального научно-исследовательского и опытно-конструкторского института робототехники и технической кибернетики. Международные идентификационные номера автора: Scopus-Author ID 57216794299, Web of Science ResearcherID: MFJ-0364-2025, Author-ID-РИНЦ 1005998

Тимофеева Вероника Игоревна – инженер 2 категории Центрального научно-исследовательского и опытно-конструкторского института робототехники и технической кибернетики. Международные идентификационные номера автора: Author-ID-РИНЦ 1022055

Nadezhin Mikhail Igorevich – Head of the Department of the Central Research and Development Institute of Robotics and Technical Cybernetics (TsNII RTK), the author's international identifiers: Scopus-Author ID: 57216794299, Web of Science ResearcherID: MFJ-0364-2025, Author-ID-RSCI: 1005998.

Timofeeva Veronica Igorevna – 2nd category Junior Engineer of the Central Research and Development Institute of Robotics and Technical Cybernetics (TsNII RTK), the author's international identifiers: Author-ID-RSCI:1022055.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 22.10.2025; одобрена после рецензирования 18.11.2025; принята к публикации 19.11.2025. Рецензент – Евстифеева Е.А., доктор философских наук, профессор Тверского государственного технического университета, член редакционного совета журнала «Эргодизайн»

The paper was submitted for publication on the 22nd of October 2025; approved after the peer review on the 18th of November 2025; accepted for publication on the 19th of November 2025. Reviewer – Evstifeeva E.A., Doctor of Philosophy, Professor of Tver State Technical University, member of the editorial board of the journal “Ergodesign”.

ВНИМАНИЮ АВТОРОВ!

Образец ссылок на литературные источники в журнале «Эргодизайн»

Ракитов А.И., Райков А.Н., Ковчуго Е.А. Наука, образование, инновации: стратегическое управление. М.: Наука. 2007. 228 с. ISBN 5-02-035395-7.

Меденников В.И., Муратова Л.Г., Сальников С.Г. Эффективность использования информационных интернет-ресурсов научно-исследовательских учреждений аграрного направления. М.: Аналитик. 2018. 237 с. ISBN 978-5-6040748-3-1. EDN YUTLRR.

Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. М.: Издательский центр «Академия». 2003. 464 с. ISBN 5769510528.

Беспалько В.П., Татур Ю.Г. Системно-методическое обеспечение учебного процесса // М.: МГУ. 1992. 348 с. ISBN 5-06-000170-9.

Бююль А., Цёфель П. SPSS: искусство обработки информации. Анализ статистических данных и восстановление скрытых закономерностей. М.: DiaSoft, 2002. 601 с. ISBN 593772-014-8.