



УДК: 004.8:612.766.1:615.847.8

DOI: 10.66523/gici.2026.v1.11

ОБЗОРНО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ СТАТЬЯ

OPEN ACCESS

Революция в биомеханике: интеллектуальные костюмы для захвата движений и нейрофизиологического мониторинга

Исмулин С.Н.¹ Лаук-Дубицкий С.Е.²

¹ XR Lab, Республика Беларусь ² РТУ МИРЭА, Москва, Россия

Автор для переписки: Лаук-Дубицкий С.Е. | editor@gamedev.science

Поступила в редакцию: 28.10.2025 | Принята к публикации: 08.02.2026 | Опубликовано: 28.04.2026

Ключевые слова: биометрический костюм, motion capture, electrotactile stimulation, TENS, FES, носимые устройства, нейроинтерфейс, attention mechanism, виртуальная реальность, нейрореабилитация, цифровое фенотипирование, ИИ

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Аннотация

В статье представлен системный анализ концепции и архитектуры интеллектуальных нательных костюмов нового поколения, объединяющих высокоточный захват движений (motion capture), мультимодальный нейрофизиологический мониторинг, электротактильную и функциональную электростимуляцию (TENS/FES), а также адаптивное управление на основе искусственного интеллекта. На основе анализа публикаций 2020-2026 годов в журналах IEEE Transactions on Haptics, Nature Electronics, Nature Machine Intelligence, Nature Communications, Science Advances, Advanced Science и материалов arXiv рассматриваются физические принципы электротактильной стимуляции, архитектурные решения для распределённых электродных матриц, программно-аппаратные комплексы рендеринга ощущений и применение механизмов внимания (attention mechanism) для обработки многоканальных сенсорных потоков. На примере проектов Biometric Suit и зарубежных аналогов показано, что отрасль переходит от изолированных захватов кинематики к концепции цифрового фенотипирования in situ — комплексного описания состояния организма в контексте поведенческих и физиологических данных. Обсуждается клиническая эффективность, рыночные перспективы (CAGR рынка haptic suits — от 5,4 % до 16 % по различным оценкам, объём — от 285 млн до 7,87 млрд долл. в 2024-2025 годах) и ключевые технические ограничения: индивидуальная вариативность порогов стимуляции, долговечность электродов, когнитивная нагрузка пользователя и отсутствие стандартов тактильного контента.

Revolution in biomechanics: intelligent wearable suits for MoCap and neurophysiological monitoring

Ismulin S.N., Lauk-Dubitsky S.E.

Corresponding author: Lauk-Dubitsky S.E. | editor@gamedev.science

This review presents a systematic analysis of the concept and architecture of next-generation intelligent wearable suits that integrate high-precision motion capture, multimodal neurophysiological monitoring, electrotactile and functional electrical stimulation (TENS/FES), and adaptive AI-based control. Drawing on publications from 2020-2026 in IEEE Transactions on Haptics, Nature Electronics, Nature Machine Intelligence, Nature Communications, Science Advances, Advanced Science, and arXiv preprints, the article examines the physical principles of electrotactile stimulation, architectural solutions for distributed electrode arrays, hardware-software pipelines for haptic rendering, and the application of attention mechanisms to the processing of multichannel sensory streams. Using the Biometric Suit platform and its international counterparts as case studies, the paper demonstrates that the field is shifting from isolated kinematic capture toward the paradigm of in situ digital phenotyping — a comprehensive description of the body's state in the context of behavioral and physiological data. The review also addresses clinical efficacy, market prospects (haptic suit market CAGR estimates ranging from 5.4% to 16%, with market size between USD 285 million and USD 7.87 billion in 2024-2025), and the principal technical limitations of the field: inter-individual variability of stimulation thresholds, electrode durability, user cognitive load, and the absence of standardized haptic content formats. The convergence of neurophysiology, materials science, and artificial intelligence is identified as the foundation for transforming the intelligent suit into a universal platform for managing human motor and cognitive performance.

Keywords: biometric suit; moCAP; electrotactile stimulation; TENS; FES; wearable devices; neural interface; VR; neurorehabilitation; digital phenotyping; AI; haptic feedback; skin-integrated electronics; closed-loop biofeedback



1. Введение

Современная индустрия спорта, медицины и иммерсивных цифровых сред стоит на пороге технологического перехода, в рамках которого граница между физическим телом и его цифровым двойником постепенно стирается. Если визуальная и звуковая модальности уже достигли высокой степени технологической зрелости, то передача и считывание тактильных и проприоцептивных сигналов, наряду с регистрацией нейрофизиологических состояний, остаются «бутылочным горлышком» иммерсивных и реабилитационных систем [1]. Традиционные системы захвата движений ориентированы исключительно на кинематику и не учитывают физиологического и когнитивного контекста, в котором это движение совершается. Между тем именно этот контекст — мышечная активность, гемодинамика, дыхание, центральная и периферическая нервная активность — определяет качество движения, риск травматизма и эффективность тренировочного или реабилитационного воздействия.

Параллельно идёт развитие электротактильных и нейростимуляционных интерфейсов: транскутанная электронейронная стимуляция (TENS) и функциональная электрическая стимуляция (FES) долгое время применялись в медицинских целях — для обезболивания, восстановления двигательных функций и коррекции двигательных паттернов [28]. Современные исследования демонстрируют конвергенцию этих медицинских протоколов с игровыми и VR-платформами [3], порождая гибридные костюмы, способные одновременно измерять физиологические параметры (ЭКГ, ЭМГ, ИМУ, фотоплетизмография, биоимпеданс) и оказывать многоуровневое сенсорно-моторное воздействие. Цель настоящей статьи — систематизировать достижения 2020-2026 годов в области интеллектуальных нательных костюмов, объединяющих захват движений, биомониторинг и электротактильное/электростимуляционное воздействие; рассмотреть базовые нейрофизиологические механизмы; проанализировать архитектурные решения; обсудить роль механизмов внимания в обработке многомерных сенсорных данных; а также оценить клиническую эффективность, рыночный потенциал и технические ограничения существующих решений.

2. Концептуальная рамка: цифровое фенотипирование in situ

В основе разрабатываемых сегодня интеллектуальных костюмов лежит принцип цифрового фенотипирования in situ — непрерывного мультимодального описания состояния организма в естественной деятельности пользователя.

В отличие от лабораторных систем motion capture, регистрирующих только кинематические переменные, костюмы нового поколения объединяют четыре функциональных слоя: захват движения (высокоточный анализ биомеханики, угловых скоростей и ускорений суставов с помощью инерциальных измерительных блоков и тензометрии); нейрофизиологический мониторинг (поверхностная ЭМГ, ЭНМГ, в перспективе — сухая ЭЭГ и регистрация активности периферических нервов); мониторинг гемодинамики и дыхания (ЭКГ, фотоплетизмография, биоимпедансный анализ дыхательной экскурсии); а также активный канал воздействия (электротактильная стимуляция, TENS/FES, вибротактильный и термический отклик).

Такая архитектура превращает костюм из пассивного «измерителя» в двунаправленный сенсомоторный нейроинтерфейс: система не только регистрирует, как движется человек, но и понимает, какие физиологические процессы стоят за каждым жестом, после чего адаптивно корректирует сценарий взаимодействия — будь то тренировка, реабилитация или иммерсивная VR-сессия. Концепция замкнутого контура реализована, в частности, в платформе Biometric Suit, объединяющей 100-800 точек вибро- и электростимуляции с мультимодальным биомониторингом [4] и поддержкой ИИ-калибровки в реальном времени.

3. Физические принципы электротактильной и функциональной электростимуляции

3.1. Активация кожных рецепторов и нервных волокон
Электротактильная стимуляция (electrotactile stimulation, ES) основана на подаче импульсного электрического тока через поверхностные электроды [2]. В отличие от вибротактильной стимуляции, активирующей механорецепторы за счёт механического смещения тканей, электротактильный сигнал непосредственно деполяризует мембраны афферентных нервных волокон, вызывая генерацию потенциалов действия [5]. Ключевыми параметрами, определяющими качество воспринимаемого ощущения, являются амплитуда тока (обычно 0,5-10 мА), частота импульсов (10-400 Гц), длительность импульса (50-1000 мкс) и форма волны (монофазная, бифазная, асимметричная) [6]. Согласно Zhou et al. (2022), низкочастотная (20-60 Гц) высокоамплитудная стимуляция ассоциируется с ощущением шероховатости, тогда как высокочастотная (80-100 Гц) низкоамплитудная воспринимается как гладкость; в экспериментах субъекты достигали 98 % точности при распознавании текстур, что подтверждает высокую информативность электротактильного канала [6].

3.2. Пространственное и временное разрешение



Разрешающая способность электротактильных дисплеев определяется плотностью электродной матрицы, геометрией электродов и свойствами токораспределения в коже. Работа Kaczmarek et al. (1991) заложила основы понимания того, что локализация стимула зависит от расстояния между анодом и катодом, а также от плотности иннервации конкретной зоны кожи [8]. Современные системы используют концентрические электроды, обеспечивающие более точную локализацию по сравнению с параллельными конфигурациями при сопоставимых значениях различимых различий (JND) [9]. В работе Lin et al. (2022) представлена система высокоточного рендеринга электротактильных ощущений, использующая высокоплотные матрицы и межэлектродную интерференцию для создания «виртуальных» тактильных точек между физическими электродами, что открывает возможности для существенного увеличения разрешения без пропорционального роста числа каналов [10].

3.3. Функциональная электростимуляция и нейропластичность

В отличие от чисто сенсорной электротактильной стимуляции, FES направлена на активацию двигательных аксонов и непосредственное вызывание мышечного сокращения. Применение FES и TENS в нейрореабилитации опирается на принцип нейропластичности: повторяющаяся связанная стимуляция сенсорных и моторных зон способствует формированию новых синаптических связей [28]. Систематический обзор по применению FES при инсульте подтверждает положительные эффекты FES-реабилитации для восстановления функций верхних и нижних конечностей [34]; сетевой метаанализ 2025 года в *Frontiers in Neurology* также демонстрирует значимое преимущество комбинированных протоколов электростимуляции по сравнению с отдельными видами терапии при восстановлении нижних конечностей [33]. Метаанализы клинических исследований показывают, что комбинация FES с трудотерапией обеспечивает существенный прирост функциональных показателей и качества жизни пациентов, перенёсших инсульт [34].

4. Архитектура носимых haptic/TENS-систем

4.1. Электродные матрицы и материалы

Современные носимые электротактильные интерфейсы строятся на основе гибких, растяжимых и «встраиваемых в кожу» электродных структур. Обзор Guo et al. (2022) систематизирует такие устройства, изготовленные методом печати проводящих чернил на эластомерных подложках, а также тканевые электроды, интегрированные в текстиль;

среди их преимуществ — плотный контакт с кожей, возможность стирки и длительного ношения [11]. В системе Jung et al. (2022), опубликованной в *Nature Electronics*, представлен беспроводной haptic-интерфейс с 16 независимыми каналами, управлением через Bluetooth Low Energy и автономным питанием, способный воспроизводить программируемые пространственно-временные паттерны воздействия на больших площадях кожи [12]. Аналогичная концепция реализована в работе Yao et al. (2022) в *Nature Machine Intelligence*: электроды, усилители и антенны интегрированы в гидрогелевый патч, обеспечивающий беспроводную передачу данных и питание [13]. Особое значение для масштабирования имеет работа 2026 года в *Nature Communications* о лёгком долговечном полнотелом костюме электростимуляции на базе текстильной компрессионной основы с встроенными мягкими электродами, использующими гигроскопичный наполнитель LiCl для поддержания влажности и структурной стабильности контакта [29]. Этот подход решает одну из ключевых проблем долговременного ношения — высыхание гидрогелей и деградацию импеданса контакта.

4.2. Протоколы управления и калибровки

Одной из ключевых проблем электротактильных систем является межиндивидуальная вариабельность порогов ощущения, зависящая от толщины рогового слоя, увлажнённости кожи и индивидуальных особенностей иннервации. Vizcay et al. (2023) показали, что калибровка электротактильных параметров непосредственно внутри VR-среды (через прямое взаимодействие с виртуальными объектами) значительно быстрее традиционных методов с клавиатурой при сопоставимой точности [14]. Система автоматической калибровки на основе обратной связи по биоимпедансу кожи в реальном времени, описанная в работе Rahimi & Shen (2019), динамически подстраивает ширину импульса и амплитуду для поддержания постоянной субъективной интенсивности ощущения при изменении контактного сопротивления [15]. Параллельно развиваются мобильные подходы к автоматизации калибровки приборов периферической электростимуляции [32].

4.3. Интеграция с биосенсорами

Передовые разработки объединяют модули электростимуляции с мультимодальными биосенсорами: инерциальными измерительными блоками (IMU), электромиографией (EMG), электрокардиографией (ЭКГ), фотоплетизмографией (PPG) и биоимпедансным анализом (BIA) [4]. Такая интеграция позволяет реализовать замкнутые контуры: система измеряет мышечную активность,



кинематику тела и вегетативные реакции, после чего адаптивно корректирует параметры стимуляции и сценарий тренировки. Именно этот функциональный синтез отличает костюмы нового поколения от изолированных систем motion capture и составляет основу концепции цифрового фенотипирования.

5. Обзор современных разработок (2020-2026)

5.1. Систематические обзоры и метаанализы
Систематический обзор Kourtesis et al. (2022), охвативший более 60 исследований, показал, что электротактильные системы демонстрируют повышенную портативность и носимость при сохранении способности воспроизводить большинство тактильных ощущений, вызывать перцептивные иллюзии и улучшать показатели точности в задачах телеуправления и VR-взаимодействия [1].
Одновременно были выявлены методологические пробелы: малые выборки (в среднем $N < 15$), недостаточное исследование эмбодимента и отсутствие долгосрочных исследований привыкания.
Сводный обзор Emami et al. (2024) в IEEE Communications Surveys & Tutorials рассматривает haptic-коммуникацию в контексте тактильного интернета, включая сети 5G/6G, edge-вычисления и кодирование тактильных сигналов; авторы подчёркивают необходимость стандартизации протоколов haptic-рендеринга для обеспечения интероперабельности [16].

Обзор 2025 года «A Comprehensive Survey of Electrical Stimulation Haptic Feedback in Human-Computer Interaction» указывает, что для реализации концепции метавселенной и полной иммерсии необходимы целостные нателльные решения, способные передавать согласованную тактильную обратную связь по всему телу. Основная сложность заключается в региональных различиях чувствительности: плотность механорецепторов на спине и бедрах значительно ниже, чем на кончиках пальцев, а толщина рогового слоя и импеданс кожи варьируются в широких пределах, что требует адаптивных алгоритмов рендеринга, учитывающих топографическую карту чувствительности тела [17].

5.2. Полнотелые костюмы и крупноформатные интерфейсы

Несмотря на значительный прогресс в локализованных интерфейсах для кистей и пальцев, исследования полнотелых систем остаются относительно редкими. Тем не менее в 2021 году Park et al. в работе по физиологическим эффектам тренировок с WB-EMS-костюмом показали, что такие протоколы могут рассматриваться как эффективное дополнение к традиционным программам физической активности [27]; обзор Perpetuini et al. (2023) в

Bioengineering подтверждает применимость электростимуляционных костюмов в неврологической реабилитации, в частности для снижения спастичности [28].

В 2026 году в Nature Communications представлен лёгкий долговечный полнотелый электростимуляционный костюм для haptic-обратной связи и терапевтических применений, в котором ключевую роль играет текстильно-интегрированная архитектура мягких электродов с улучшенной влагоудерживающей способностью [29]. Эти результаты задают новый стандарт носимости и долговечности для устройств класса full-body.

5.3. Мультимодальные гибридные системы

Современная тенденция — объединение электротактильной, вибротактильной и силовой обратной связи в едином носимом устройстве. Huang et al. (2023) в Nature Electronics представили мультимодальный haptic-интерфейс, интегрированный в кожу, который комбинирует электротактильную стимуляцию с пьезоэлектрической вибрацией и термоэлектрическим охлаждением/нагревом [18]. Такая мультисенсорная интеграция повышает реалистичность ощущений и увеличивает пропускную способность канала «человек-компьютер».
Альтернативный подход реализован в системе TeslaMirror (Fedoseev et al., 2020) — гибридном дисплее с мультистимульной обратной связью, не требующем ношения устройств: роботизированный манипулятор с адаптивной поверхностью в реальном времени воссоздаёт форму и текстуру виртуального объекта [19].

5.4. Навигационные и мобильные приложения

Электротактильная навигация получила новое развитие в мобильном контексте. Nimbalkar & Peiris (2026) в работе TactileWalk показали, что динамические электротактильные паттерны на кончиках пальцев сохраняют распознаваемость в условиях ходьбы: паттерн Double Line обеспечил 90,83 % точности распознавания направления [20]. Diente et al. (2024) реализовали направленную электротактильную навигацию под смарт-часами для велосипедистов, доказав возможность безопасного eyes-free взаимодействия [21]. Близкая по логике задача доставки нотификаций через носимые устройства решается также в работе Stanke et al. (2023) для зоны мочки уха [7].

6. Механизмы внимания в обработке тактильной и биометрической информации



6.1. Эволюция механизмов внимания

Механизмы внимания, первоначально предложенные для задач обработки естественного языка и компьютерного зрения, стали фундаментальным компонентом современных глубоких нейронных сетей. Обзор Niu et al. (2021), опубликованный в *Neurocomputing* и набравший более 3900 цитирований, систематизирует различные формы внимания — самовнимание, канальное, пространственное и их комбинации, — позволяющие модели адаптивно перераспределять вычислительные ресурсы и фокусироваться на наиболее информативных признаках входного сигнала [22]. Soydaner (2022) проследил эволюцию внимания от ранних моделей памяти с внешним адресованием до трансформеров и мультимодальных архитектур, подчеркнув универсальность механизма для последовательных и структурированных данных [23].

6.2. Применение attention в haptic- и biometric- костюмах

В контексте интеллектуальных костюмов механизмы внимания приобретают особое значение по двум направлениям. На уровне сенсорной обработки многоканальные костюмы генерируют потоки данных от сотен электродов, десятков биосенсоров и внешних источников (положение в VR, кинематика аватара): пространственное и канальное внимание позволяют нейросетевым декодерам выделять релевантные тактильные и биомеханические паттерны из шумного многомерного сигнала, адаптируясь к индивидуальной топографии чувствительности пользователя. На уровне рендеринга и адаптивного управления генерация координированных пространственно-временных паттернов стимуляции требует учёта контекста виртуальной сцены, текущей задачи пользователя и его когнитивной загруженности. Использование механизмов внимания в генеративных моделях тактильных сигналов — например, в вариационных автоэнкодерах или диффузионных моделях — позволяет адаптивно моделировать интенсивность, локализацию и модальность стимулов [17]. Работа Lai et al. (2021) по сопоставлению человеческого и машинного внимания в нейросетях задаёт методологическую основу для проектирования интерфейсов, где выделяемые ИИ зоны совпадают с реальными фокусами восприятия человека [24]. Это критически важно для естественной обратной связи: ненужная стимуляция отвлекает, тогда как точечная, контекстуально обоснованная — улучшает погружение и эффективность тренировок.

6.3. Перспективы интеллектуального управления

Современные электротактильные системы пока не

используют ИИ-алгоритмы для тактильного рендеринга в полном объёме [17]. Внедрение архитектур на основе внимания пользователя открывает возможности для адаптивной пространственной фильтрации (выделение активных зон контакта в VR и подавление «фантомных» стимулов), контекстуальной модуляции интенсивности (автоматическое снижение интенсивности фоновых ощущений при возрастании когнитивной нагрузки) и кроссмодального внимания (синхронизация тактильных импульсов с визуальными событиями и аудиоканалом для усиления эффекта присутствия). На уровне предиктивной аналитики внимание позволяет облачным платформам костюмов накапливать «жизненный опыт» системы, прогнозировать риски травматизма и оптимизировать индивидуальные методики восстановления на основе анализа данных тысяч сессий — что соответствует концепции Biometric Suit и его аналогов [4].

7. Прикладные области

7.1. Иммерсивная виртуальная и дополненная реальность

Электротактильные интерфейсы всё чаще интегрируются в VR-системы для передачи ощущений касания виртуальных поверхностей, текстур, столкновений и внешних воздействий [3]. Vizcay et al. (2023) показали, что добавление электротактильной обратной связи о глубине интерпенетрации пальца в виртуальную поверхность существенно повышает точность контакта по сравнению с чисто визуальным фидбеком; комбинация визуального и электротактильного каналов даёт синергетический эффект, превосходящий сумму отдельных модальностей [14]. В игровой индустрии развивается направление «сенсорных игр», в которых тактильные паттерны кодируют игровые события: удары, магические эффекты, температуру окружающей среды.

7.2. Нейрореабилитация и моторное обучение

Восстановление двигательных функций после инсультов, травм спинного мозга и периферических нервов — одно из наиболее перспективных медицинских применений. Yang & Jiang (2023) предложили гибридную схему статико-динамической электротактильной обратной связи для протезов кисти, позволяющую одновременно передавать тактильную и проприоцептивную информацию; пациенты с ампутациями, использующие такие интерфейсы, демонстрируют улучшение контроля силы захвата и снижение когнитивной нагрузки [25]. Kim et al. (2020) показали эффективность периферической нервной стимуляции в подавлении эссенциального тремора [26]. Систематические обзоры и метаанализы 2023-2025 годов подтверждают значимый клинический эффект FES- и TENS-протоколов при инсульте, в том числе при

синдроме «свисающей стопы» и спастичности нижних конечностей [28, 33, 34].

7.3. Спорт, военная подготовка и геропротекция

В спортивной сфере интеллектуальные костюмы используются для коррекции техники движений в реальном времени: несимметричная стимуляция мышц спины сигнализирует о нарушении осанки, импульсы на конечностях — об отклонении от заданной траектории, а адаптивное дозирование нагрузки на основе мультимодальной биологической обратной связи позволяет достигать максимальной эффективности тренировок при минимальном риске травматизма. Военные приложения включают реабилитацию после контузий, обучение навыкам в условиях стресса и тренировку пространственной ориентации в условиях ограниченной видимости [4]. Отдельного внимания заслуживает геропротекторный потенциал: возрастной прунинг нейронов и саркопения тесно связаны с дефицитом мышечной и когнитивной активности. По данным метаанализа Sofi et al. (2011), регулярная физическая активность снижает риск когнитивного снижения [30]; применение TENS у пожилых, согласно работам Scherder et al. (2000), оказывает положительное влияние на когнитивные и поведенческие показатели [31]. Использование интеллектуального костюма в режиме фоновой нейростимуляции потенциально способно восполнять этот дефицит у людей с малоподвижным образом жизни.

8. Сравнительный анализ существующих решений

На текущем рынке представлено несколько классов решений: системы, ориентированные на чистый motion capture (Xsens, Rokoko), комбинированные haptic-VR-костюмы (HoloSuit, Teslasuit), смарт-текстиль с биомониторингом (Xenoma e-skin) и медицинские электростимуляционные костюмы (Exopulse Mollii). На рынке ЕАЭС сейчас представлена единственная платформа Biometric Suit (XR-labs), разрабатываемая консорциумом компаний «NeuroSport Ltd», «XR Lab Ltd» и «SportLab Ltd». Она позиционируется как интегратор всех четырёх классов в единой архитектуре, объединяющей захват движений (Motion Capture), высокоточную биомеханику, нейрофизиологический мониторинг и искусственный интеллект для адаптивного управления тренировочным процессом с интегрированными методиками упражнений [4]. В основе разработки лежит ранее описанный принцип «цифрового фенотипирования in situ». Biometric Suit анализирует состояние организма в контексте поведенческих данных. Система «видит», какие физиологические процессы стоят за каждым жестом пользователя. Так, модуль захвата движения включает в себя высокоточный анализ биомеханики и угловых

скоростей суставов, нейромониторинг отслеживает мозговую активность и когнитивное состояние, модуль гемодинамики и спирометрии обеспечивает мониторинг сердечно-сосудистой системы и параметров газообмена, а система EMS и тактильного отклика обеспечивает активное воздействие на мышцы и обратную связь через вибрацию. Ключевым отличием проекта является модуль интеллектуальной обработки, который формирует динамические статусы пользователя. Алгоритмы ИИ реализуют концепцию адаптивного дозирования нагрузки: система в реальном времени подстраивает профессиональные сценарии упражнений, опираясь на мультимодальную биологическую обратную связь. Это позволяет достигать максимальной эффективности тренировок при минимальном риске травматизма. Облачная платформа проекта накапливает жизненный опыт системы, используя методы машинного обучения для предсказания травм и оптимизации индивидуальных методик восстановления на основе анализа данных тысяч сессий.



Рисунок 1. Костюм, перчатки и щитки Biometric suit

9. Рыночный потенциал

Рыночные оценки подтверждают высокую динамику сегмента. Согласно данным DataHorizon Research, объём мирового рынка haptic-костюмов в 2024 году составил около 285 млн долл. с прогнозом до 1,85 млрд долл. к 2033 году [35]. Альтернативные оценки (LinkedIn Market Insights) указывают на объём порядка 7,87 млрд долл. в 2025 году с CAGR около 16 % до 2033 года; LinkedIn-аналитика VR Haptic Suit Market прогнозирует CAGR 5,4 % в период 2026-2033 годов. Различия в оценках связаны с разной методологией включения смежных сегментов (медицинские электростимуляторы, смарт-текстиль, VR-аксессуары). Совокупный рынок нейрокомпьютерных интерфейсов в 2021 году оценивался Grand View Research в 1,52 млрд долл. с ожидаемым CAGR около 17 %, причём доля неинвазивных интерфейсов превышала 86 %.



Ключевыми драйверами роста выступают увеличение распространённости неврологических заболеваний (по данным The Lancet Neurology, в начале 2020-х годов более 3,4 млрд человек столкнулись с неврологическими состояниями, при этом по прогнозам ВОЗ к 2030 году около 82 млн будут страдать деменцией), старение населения, развитие иммерсивных VR/AR-сред и онлайн-образования, а также включение неврологических расстройств в Межсекторальный глобальный план действий ВОЗ на 2022-2031 годы.

10. Технические вызовы и ограничения

Несмотря на быстрый прогресс, отрасль сталкивается с рядом нерешённых проблем. Проблема индивидуальной калибровки, по оценке Kourtesis et al. (2022), остаётся одним из главных препятствий для массового внедрения electrotactile-систем: пороги ощущения могут отличаться в 3-5 раз даже между здоровыми участниками одной возрастной группы, а у пациентов с нейропатией или ампутациями вариативность ещё выше [1]; необходимы быстрые (< 2 мин) автоматические процедуры калибровки, потенциально с применением обучения с подкреплением. Долговечность и биосовместимость электродов также ограничивают длительное ношение: бифазные импульсы минимизируют электролитические эффекты [5], современные тканевые и гидрогелевые электроды продлевают ресурс, однако при интенсивной эксплуатации он обычно ограничен сотнями циклов стимуляции [11], и решение, предложенное в Nature Communications 2026 года с использованием LiCl-наполненных электродов [29], является важным шагом в этом направлении. Когнитивная нагрузка и сенсорная перегрузка представляют отдельную проблему: многоканальные костюмы с сотнями активных зон потенциально могут перегружать пользователя. Обзорные данные показывают, что мультипадные конфигурации электродов улучшают электротактильную коммуникацию в условиях высокой когнитивной нагрузки за счёт пространственной избыточности [17], однако оптимальное число одновременно воспринимаемых каналов для различных зон тела остаётся неизвестным. Наконец, отрасль страдает от отсутствия стандартизированных форматов тактильного контента (аналогов MPEG для видео или MP3 для аудио) и, по состоянию на 2025 год, не имеет публичных систем полноценного AI-рендеринга тактильных сигналов [16, 17]; внедрение attention-based генеративных моделей рассматривается как следующий качественный скачок отрасли.

11. Заключение

Носимые интеллектуальные костюмы, объединяющие

захват движений, мультимодальный нейрофизиологический мониторинг, электротактильную и функциональную электростимуляцию с адаптивным управлением на основе ИИ, прошли путь от лабораторных прототипов до коммерчески доступных платформ, интегрируемых в спортивные тренировки, программы реабилитации, VR-приложения и протезы. Обзор публикаций 2020-2026 годов демонстрирует экспоненциальный рост качества материалов электродов, миниатюризацию электроники, повышение пространственного и временного разрешения и расширение спектра воспроизводимых ощущений. Ключевыми тенденциями являются переход от изолированных стимуляторов и систем motion capture к интегрированным мультимодальным костюмам с замкнутой биологической обратной связью; развитие беспроводных skin-integrated платформ; конвергенция с медицинскими протоколами реабилитации и обезболивания; начало применения методов машинного обучения, включая attention mechanism, для адаптивного управления стимуляцией и предиктивной аналитики. Проект Biometric Suit демонстрирует, как уникальная интеграция захвата движений, биомониторинга и нейростимуляции с ИИ-управлением реализует концепцию цифрового фенотипирования in situ и формирует новый класс устройств – интеллектуальную вторую кожу, способную не только передавать ощущения, но и адаптивно корректировать двигательное и когнитивное состояние пользователя. Нерешённые задачи – межличностная калибровка, долговечность электродов, стандартизация тактильных форматов и когнитивная оптимизация многоканальных паттернов – определяют повестку исследований на ближайшие годы. Синергия нейрофизиологии, материаловедения и искусственного интеллекта позволит превратить интеллектуальный костюм в универсальную платформу управления человеческим потенциалом, делая процесс совершенствования тела и нервной системы прозрачным, безопасным и научно обоснованным.

Список литературы

- [1] Kourtesis, P., Argelaguet, F., Vizcay, S., Marchal, M., & Pacchierotti, C. (2022). Electrotactile feedback applications for hand and arm interactions: A systematic review, meta-analysis, and future directions. *IEEE Transactions on Haptics*, 15(3), 479-496. <https://doi.org/10.1109/TOH.2022.3189866>
- [2] Culbertson, H., Schorr, S. B., & Okamura, A. M. (2018). Haptics: The present and future of artificial touch sensation. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, 1(1), 385-409. <https://doi.org/10.1146/annurev-control-060117-105043>
- [3] Kim, K., Yang, H., Lee, J., & Lee, W. G. (2023). Metaverse Wearables for Immersive Digital Healthcare: A Review. *Advanced Science*, 10(31), 2303234. <https://doi.org/10.1002/adv.202303234>
- [4] Biometric Suit: техническая документация консорциума «NeuroSport Ltd», «XR Lab Ltd», «SportLab Ltd». (2025). [Неопубликованный документ.]
- [5] Geldard, F. A. (1960). Some neglected possibilities of communication. *Science*, 131(3413), 1583-1588. <https://doi.org/10.1126/science.131.3413.1583>



- [6] Zhou, Z., Chen, H., Li, B., Wu, J., Yang, J., & Liu, Z. (2022). Electrotactile Perception Properties and Its Applications: A Review. *IEEE Transactions on Haptics*, 15(3), 464-478. <https://doi.org/10.1109/TOH.2022.3170723>
- [7] Stanke, D., Diente, T., Demir, K. C., Ferry, K., Simon, B., & Rohs, M. (2023). Can You Ear Me?: A Comparison of Different Private and Public Notification Channels for the Earlobe. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies (IMWUT)*, 7(3), Article 110, 1-23. <https://doi.org/10.1145/3610925>
- [8] Kaczmarek, K. A., Webster, J. G., Bach-y-Rita, P., & Tompkins, W. J. (1991). Electrotactile and vibrotactile displays for sensory substitution systems. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 38(1), 1-16. <https://doi.org/10.1109/10.68204>
- [9] Stephens-Fripp, B., Mutlu, R., & Alici, G. (2021). A Comparison Between Separated Electrodes and Concentric Electrodes for Electrotactile Stimulation. *IEEE Transactions on Haptics*, 14(1), 91-101. <https://doi.org/10.1109/TOH.2020.3038955>
- [10] Lin, W., Zhang, D., Lee, W. W., Li, X., Hong, Y., Pan, Q., Zhang, R., Peng, G., Tan, H. Z., Zhang, Z., Shen, L., & Wu, H. (2022). Super-resolution wearable electrotactile rendering system. *Science Advances*, 8(36), eabp8738. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abp8738>
- [11] Guo, W., Hu, Y., Yin, Z., & Wu, H. (2022). On-Skin Stimulation Devices for Haptic Feedback and Human-Machine Interfaces. *Advanced Materials Technologies*, 7(5), 2100452. <https://doi.org/10.1002/admt.202100452>
- [12] Jung, Y. H., Yoo, J.-Y., Vázquez-Guardado, A., Kim, J.-H., Kim, J.-T., Luan, H., Park, M., Lim, J., Shin, H.-S., Su, C.-J., Schaffer, R., Wu, D., Yang, Y., Lin, J., Bai, W., Wu, Y., Zhao, Y., & Rogers, J. A. (2022). A wireless haptic interface for programmable patterns of touch across large areas of the skin. *Nature Electronics*, 5(6), 374-385. <https://doi.org/10.1038/s41928-022-00765-3>
- [13] Yao, K., Zhou, J., Huang, Q., Wu, M., Yiu, C. K., Li, J., Huang, X., Li, D., Su, J., Hou, S., Liu, Y., Huang, Y., Tian, Z., Li, J., Li, H., Shi, R., Zhang, B., Zhu, J., Wong, T. H., ... Yu, X. (2022). Encoding of tactile information in hand via skin-integrated wireless haptic interface. *Nature Machine Intelligence*, 4(10), 893-903. <https://doi.org/10.1038/s42256-022-00543-y>
- [14] Vizcay, S., Kourtesis, P., Argelaguet, F., Pacchierotti, C., & Marchal, M. (2023). Design, evaluation and calibration of wearable electrotactile interfaces for enhancing contact information in virtual reality. *Computers & Graphics*, 111, 199-212. <https://doi.org/10.1016/j.cag.2023.01.013>
- [15] Rahimi, M., & Shen, Y. (2019). Adaptive Spatial Mapping of Electrotactile Threshold Based on Subdivision Bio-Impedance Feedback. 2019 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR), 164-169. <https://doi.org/10.1109/RCAR47638.2019.9043999>
- [16] Emami, M., Bayat, A., Tafazolli, R., & Quddus, A. (2024). A Survey on Haptics: Communication, Sensing and Feedback. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 27(2), 2006-2050. <https://doi.org/10.1109/COMST.2024.3444051>
- [17] Yang, S., Wang, X., Li, Y., Lee, L.-H., Braud, T., & Hui, P. (2025). A Comprehensive Survey of Electrical Stimulation Haptic Feedback in Human-Computer Interaction. *arXiv preprint*, arXiv:2504.21477. <https://arxiv.org/abs/2504.21477>
- [18] Huang, Y., Zhou, J., Ke, P., Guo, X., Yiu, C. K., Yao, K., Cai, S., Li, D., Zhou, Y., Wu, J., Wong, T. H., Shi, R., Liu, Y., Liu, Y., Park, W., Vázquez-Guardado, A., Rogers, J. A., & Yu, X. (2023). A skin-integrated multimodal haptic interface for immersive tactile feedback. *Nature Electronics*, 6(12), 1020-1031. <https://doi.org/10.1038/s41928-023-01073-0>
- [19] Fedoseev, A., Tleugazy, A., Labazanova, L., & Tsetserukou, D. (2020). TeslaMirror: Multistimulus Encounter-Type Haptic Display for Shape and Texture Rendering in VR. *arXiv preprint*, arXiv:2006.13660. <https://arxiv.org/abs/2006.13660>
- [20] Nimbalkar, V., & Peiris, R. L. (2026). TactileWalk: Dynamic Electrotactile Patterns for Fingertip-Based Interaction During Walking. *Extended Abstracts of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '26 Late-Breaking Work)*. [arXiv:2603.01974](https://arxiv.org/abs/2603.01974). <https://arxiv.org/abs/2603.01974>
- [21] Diente, T., Stanke, D., Klose, M., Simon, B., Al-Azzawi, I., & Rohs, M. (2024). Shock Me The Way: Directional Electrotactile Feedback under the Smartwatch as a Navigation Aid for Cyclists. *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*, 8(MHCI), Article 245, 1-25. <https://doi.org/10.1145/3676503>
- [22] Niu, Z., Zhong, G., & Yu, H. (2021). A review on the attention mechanism of deep learning. *Neurocomputing*, 452, 48-62. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2021.03.091>
- [23] Soydaner, D. (2022). Attention mechanism in neural networks: where it comes and where it goes. *Neural Computing and Applications*, 34(16), 13371-13385. <https://doi.org/10.1007/s00521-022-07366-3>
- [24] Lai, Q., Khan, S., Nie, Y., Sun, H., Shen, J., & Shao, L. (2021). Understanding More About Human and Machine Attention in Deep Neural Networks. *IEEE Transactions on Multimedia*, 23, 2366-2378. <https://doi.org/10.1109/TMM.2020.3011317>
- [25] Yang, B., & Jiang, L. (2023). Hybrid Static-dynamic Sensation Electrotactile Feedback for Hand Prosthesis Tactile and Proprioception Feedback. *Journal of Bionic Engineering*, 20(1), 267-277. <https://doi.org/10.1007/s42235-022-00246-5>
- [26] Kim, J., Wichmann, T., Inan, O. T., & DeWeerth, S. P. (2020). A Wearable System for Attenuating Essential Tremor Based on Peripheral Nerve Stimulation. *IEEE Journal of Translational Engineering in Health and Medicine*, 8, 2000111. <https://doi.org/10.1109/JTEHM.2020.2985058>
- [27] Park, H. K., Kim, K. B., Park, M. S., Lee, J. W., Lee, K. J., Kim, J., Kim, M. K., Park, S., & Cho, B. J. (2021). Physiological Effect of Exercise Training with Whole Body Electric Muscle Stimulation Suit on Strength and Balance in Young Women: A Randomized Controlled Trial. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(2), 503. <https://doi.org/10.3390/ijerph18020503>
- [28] Perpetuini, D., Russo, E. F., Cardone, D., Palmieri, R., De Giacomo, A., Pellegrino, R., Merla, A., Calabrò, R. S., & Filoni, S. (2023). Use and Effectiveness of Electrosuit in Neurological Disorders: A Systematic Review with Clinical Implications. *Bioengineering*, 10(6), 680. <https://doi.org/10.3390/bioengineering10060680>
- [29] Hwang, J. H., Kim, S. H., et al. (2026). A lightweight durable full-body electrical stimulation suit for haptic feedback and therapeutic applications. *Nature Communications*. <https://doi.org/10.1038/s41467-026-71171-y>
- [30] Sofi, F., Valecchi, D., Bacci, D., Abbate, R., Gensini, G. F., Casini, A., & Macchi, C. (2011). Physical activity and risk of cognitive decline: a meta-analysis of prospective studies. *Journal of Internal Medicine*, 269(1), 107-117. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2796.2010.02281.x>
- [31] Scherder, E. J. A., Van Someren, E. J. W., Bouma, A., & van der Berg, M. (2000). Effects of transcutaneous electrical nerve stimulation (TENS) on cognition and behaviour in aging. *Behavioural Brain Research*, 111(1-2), 223-225. [https://doi.org/10.1016/S0166-4328\(00\)00170-4](https://doi.org/10.1016/S0166-4328(00)00170-4)
- [32] Кибер, О. С. (2025). Исследование порогов тактильной чувствительности с помощью мобильного приложения для автоматизации калибровки приборов периферической электростимуляции. В сб. *LIFT ШМУ «Медицинские нейротехнологии»*. Москва.
- [33] Liu, X., Zeng, Y., et al. (2025). Network meta-analysis of different electrical stimulation therapies for lower limb functional rehabilitation in stroke patients. *Frontiers in Neurology*, 16, 1682671. <https://doi.org/10.3389/fneur.2025.1682671>
- [34] Eraifej, J., Clark, W., France, B., Desando, S., & Moore, D. (2017). Effectiveness of upper limb functional electrical stimulation after stroke for the improvement of activities of daily living and motor function: a systematic review and meta-analysis. *Systematic Reviews*, 6, 40. <https://doi.org/10.1186/s13643-017-0435-5>
- [35] DataHorizon Research. (2024). Haptic Suit Market Size, Growth & Forecast Report, 2024-2033. <https://www.datahorizonresearch.com/>