





Научная статья

УДК 159.91;159.9.078

<https://doi.org/10.21702/rpj.2023.2.1>

Аппаратно-программный комплекс для проведения тензотремометрических измерений в психофизиологических исследованиях

Артём В. Белинский^{1*}, Важа М. Девишвили¹,
Александр М. Черноризов¹, Михаил А. Лобин²

¹ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация

² ПАО «Первая грузовая компания», Москва, Российская Федерация

* Почта ответственного автора: V10046231@yandex.ru

Аннотация

Введение. Одним из методов оценки психоэмоциональных реакций (ПЭР) человека является измерение активности моторной системы. Для регистрации произвольных компонентов ПЭР традиционно используются методы измерения физиологического тремора. В работе приводится сравнительный анализ различных методов и методик регистрации тремора и предлагается описание нового устройства в форм-факторе ручки, оснащённой тензометрическими датчиками для оценки выраженности стрессовой ПЭР. **Методы.** Устройство включает в себя тензометрические датчики, подключённые к аппарату аналого-цифрового преобразования и микроконтроллеру для передачи сигнала на терминал администратора. Сигнал содержит данные тензотремометрии по трём пальцам, скорректированные относительно нормального уровня силы (НУС) испытуемого. Получаемый сигнал разбивается на взаимопересекающиеся сегменты, которые затем фильтруются относительно частоты физиологического тремора, и анализируются с помощью критерия Эппса-Синглтона. **Результаты.** Апробирован план исследования, позволяющий определить степень выраженности стрессовой реакции с помощью предлагаемого устройства. Показано, что при подаче стрессового стимула изменения, регистрируемые на фоновой треморограмме, совпадают по времени с моментом предъявления

стрессового стимула. Предлагается опытный образец программно-аппаратного комплекса для определения наличия ПЭР, базирующийся на методах регистрации и анализа данных тензотремометрии. **Обсуждение результатов.** Формулируются предположения о специфике связи изменений треморограммы с характеристиками стрессора и предлагаются дальнейшие направления развития этой технологии.

Ключевые слова

психоэмоциональные реакции (ПЭР), стресс, непроизвольные движения, вегетативная нервная система, физиологический тремор, тензотремометрия, скользящее окно, критерий Эппса-Синглтона, силочувствительные резисторы, нормальный уровень силы

Для цитирования

Белинский, А. В., Девишвили, В. М., Черноризов, А. М., Лобин, М. А. (2023). Аппаратно-программный комплекс для проведения тензотремометрических измерений в психофизиологических исследованиях. *Российский психологический журнал*, 20(2), 6–20. <https://doi.org/10.21702/rpj.2023.2.1>

Введение

Одним из классических показателей стрессовой психоэмоциональной реакции (ПЭР) является тремор (Александров, Углисова, Степанов, Иванова, 2017). Физиологический нормальный (мышечный) тремор – это колебания усилий, возникающих в результате организованной работы различных нейромоторных единиц.

Основными характеристиками, которые анализируются при изучении тремора, являются частота и амплитуда. Согласно имеющимся в литературе данным, характеристики тремора позволяют диагностировать текущее психофизиологическое состояние человека в частотном диапазоне 8–16 Гц (Александров, 2018; Дик, Ноздрачев 2019; Кручинин, Лебедев, Холмогорова 2013; Aleksanyan, Bureneva, & Safyannikov 2018; Carignan, Daneault, & Duval 2012; Young, 1933).

Наиболее широко используемыми способами измерения тремора являются электромиография, акселерометрия, тензотремометрия и видеорегистрация (Говорова, Попова, Таппахов 2019). Выбор способа обусловлен целями исследования, процедурой проведения эксперимента, удобством организации рабочего места, а также способом обработки данных.

Задача акселерометрии – измерение амплитуды тремора на основе данных об ускорении и изменении координат с использованием информации датчиков

ПСИХОФИЗИОЛОГИЯ

угловой скорости (Бобылев, Болотин, Воронов, Кручинин, 2012; Ишлинский, 2018). С биомеханической точки зрения, акселерометрия относится к классу кинематических методик. Хотя она весьма удобна, у неё имеется ряд существенных ограничений: неточность работы гироскопа, зависимость от точности работы АЦП и качества усилителя (что накладывает экономические ограничения на такие решения), а также значительные сложности с регистрацией данных в случае, когда амплитуда движения пальца мала (Elble & McNames, 2016). Тот факт, что акселерометр измеряет абсолютное ускорение (совокупность ускорений, действующих на него) ограничивает применения этого метода в случаях, когда необходимо динамическое изменение положение рук. Еще одним существенным недостатком акселерометрии является отсутствие возможности для дифференциации на поструральный, физиологический и другие виды тремора.

Электромиография (ЭМГ) в значительной мере обеспечивает получение нужных данных и обладает целым рядом достоинств, в частности, низкой ценой, неинвазивностью и безопасностью, а также стабильностью сигнала за счет прочного крепления (Мейгал, Риссанен, Зарипова, Мирошниченко, Карьялайнен 2015). В большинстве случаев в качестве способов регистрации ЭМГ применяется поверхностное отведение. Ограничением в данном случае выступает то, что пара поверхностных электродов даёт информацию лишь об активности близко расположенных двигательных единиц в поперечнике мышцы. Однако в случае необходимости сложного математического анализа ЭМГ проигрывает другим методам за счет того, что существенная часть данных теряется из-за неизбежной низкочастотной фильтрации сигнала кожей и подкожной жировой клетчаткой (Gugi & Moschytz, 1997).

Видеорегистрация (Pintea et al., 2019; Williams et al., 2020) - удобный бесконтактный метод, который требует сложного аппарата для анализа (зачастую с использованием искусственных нейронных сетей) и не позволяет анализировать высокочастотный и/или малоамплитудный тремор из-за технических ограничений записывающей аппаратуры. При повышении точности до нужных пределов высокая итоговая стоимость стенда делает его труднодоступным для широкого применения.

Альтернативой описанным методам является тензотремометрия (ТТМ). Она позволяет избежать нежелательной «физиологической» фильтрации, неинвазивна, безопасна и предоставляет возможность для регистрации тремора любой частоты и амплитуды. «Золотым стандартом» ТТМ является балочный датчик, опирающийся на свойство тензорезисторов линейно менять своё сопротивление при деформации. Такой датчик состоит из одного или нескольких тензорезисторов, закрепленных на металлической балке, упруго сгибающейся под воздействием силы (Ичкитидзе и др., 2019). Основной проблемой подобных датчиков является невозможность точной регуляции диапазона чувствительности, так как в большинстве случаев разрешение такого датчика является фиксированным значением (Ом/Н), не меняющимся от приложенной силы. Это свойство лежит в основе широкого применения балочных

датчиков в весах различного назначения, однако оно не позволяет использовать их при исследовании тремора. Это связано с тем, что изменение амплитуды тремора может составлять десятые, сотые или даже тысячные доли от общей силы нажатия, а тензодатчики, позволяющие надежно отслеживать подобную точность, имеют высокую стоимость и труднодоступны.

Высокую точность при малых и сверхмалых смещениях имеют датчики на основе конденсаторных (Denner, 1999) или индукционных схем (Pedersen, 2006), но они непригодны для использования, когда приложенные силы значительны. Такие датчики могут иметь ограниченное применение в измерении тремора покоя, однако использование их в условиях двигательной активности представляется труднореализуемым или вовсе невозможным.

Для поиска технического (программно-аппаратного) решения, позволяющего снять эти ограничения с метода ТТМ, была создана экспериментальная методика, основанная на регистрации треморовых показателей методом тензотремографии при активных действиях кисти руки. Ранее подобные исследования ограничивались измерением «средних» сил или же касались изучения патологического тремора (Baur, Fürholzer, Jasper, Marquardt, & Hermsdörfer 2009; Lin et al., 2019).

Для анализа треморограммы в процессе двигательной активности необходимо использовать более сложную аппаратуру, которая позволила бы не только обеспечивать достаточное разрешение для фиксации небольших изменений, но и отсекал влияние двигательной активности, включая мелкую моторику. Такой результат невозможно получить при акселерометрии, видеорегистрации и электромиографии, и наиболее популярный способ ТТМ на основе традиционных балочных датчиков не обладает необходимым разрешением.

В данном исследовании разработан опытный образец аппаратно-программного комплекса (АПК), содержащий статистические и аппаратные улучшения, позволяющие с помощью ТТМ измерять тремор пальцев, удерживающих перо. Приводятся результаты пилотных экспериментов, иллюстрирующих потенциал развития диагностики стрессовых реакций с помощью методов регистрации и анализа данных ТТМ с помощью предлагаемого комплекса улучшений.

Методы

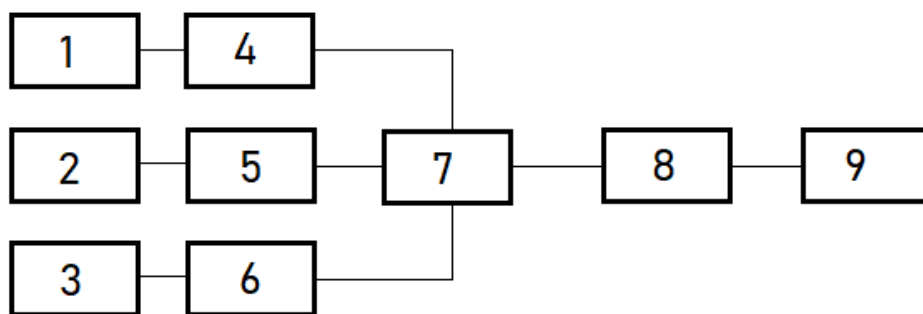
Предлагаемая методика измерения опирается на датчики силы принципиально нового типа, которые обеспечивают высокую точность измерения небольших изменений тремора в широком диапазоне двигательных усилий. Такие датчики построены на принципе действия силочувствительного резистора, которые обладают высокой чувствительностью в определенном диапазоне сил, и значительно более низкой в остальных диапазонах (Baker & Sanchez, 2006). Подстраивая диапазон высокой чувствительности под индивидуальные параметры тремора испытуемого, можно

ПСИХОФИЗИОЛОГИЯ

получить измерения тремора с высокой точностью, нивелируя информацию о других действующих на датчики сил. Принципиальная схема устройства представлена на рисунке 1.

Рисунок 1

Принципиальная схема устройства



Примечание. 1, 2, 3 – тензодатчики на основе силочувствительных резисторов, 4, 5, 6 – резисторные делители, 7 – модуль АЦП, 8 – микроконтроллер, 9 – модуль связи с терминалом администратора.

При создании экспериментального образца были проанализированы наиболее частые активности, требующие включения мелкой моторики. Исходя из того, что использование письменных принадлежностей встречается в повседневной жизни достаточно часто, и при использовании они удерживаются тремя пальцами, для экспериментального образца была выбрана форма, похожая на ручку (рисунок 2), дополнительное описание устройства представлено в (Белинский, Девишвили, Черноризов, Лобин, 2023). Экспериментальное устройство имеет выносной модуль в виде ручки с встроенным электронным пером, совместимым с планшетами фирмы Wacom, что обеспечивает потенциальную возможность расширения сценариев использования устройства для получения данных тензотремографии одновременно с анализом почерка по получаемым с планшета данным. На модуле закреплены три тензодатчика в углублениях, сделанных так, чтобы находиться под пальцами при удержании пера динамическим штативным захватом. Динамический штативный захват – это способ удержания письменных принадлежностей, упирающихся в средний палец, в то время как большой и указательный пальцы контролируют карандаш, ручку, маркер или мелок (Donica, Massengill, & Gooden, 2018).

Рисунок 2

Внешний вид устройства

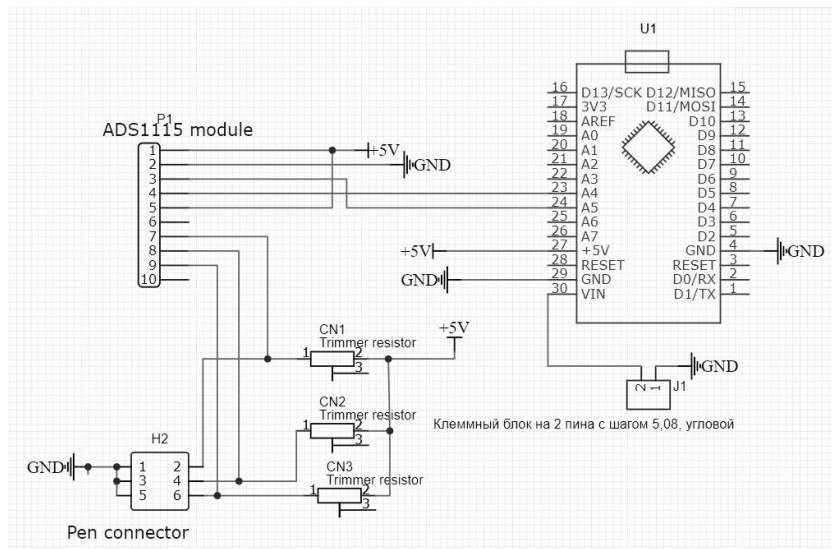


Сбор, преобработка и передача данных на терминал администратора осуществляется главным модулем, включающим в себя микроконтроллер на базе ATmega328PB, устройство аналого-цифрового преобразования с точностью 16 бит, а также микросхему связи с терминалом администратора, предоставляющую собой USB-UART преобразователь для передачи данных. Электрическая схема представлена на рисунке 3.

Поскольку изменения в характере тремора могут происходить на достаточно высоких частотах, частота дискретизации была выбрана соответственно теореме Котельникова более 120 Гц, чтобы полностью охватить значимые диапазоны тремора (5–60 Гц) (Котельников, 1933). Опытный образец позволяет получать данные с трех тензодатчиков параллельно и независимо друг от друга, однако дальнейшее развитие устройства предполагает расширение количества точек сбора данных.

ПСИХОФИЗИОЛОГИЯ

Рисунок 3
Электрическая схема образца



Примечание. U1 – микроконтроллер, P1 – модуль АЦП, H2 – контакты для подключения выносного модуля, CN1-3 – подстроечные резисторы.

Изменения силы нажатия на перо, вызванные тремором, компенсировались использованием датчиков на основе силочувствительных резисторов (Baker & Sanchez, 2006). При подключении таких датчиков в качестве одного из плеч резисторного делителя итоговое напряжение на втором плече зависит от силы нажатия не линейно и хорошо аппроксимируется прямой в пределах небольших диапазонов, где и происходят всплески, характерные для тремора.

Для учета индивидуальной для каждого испытуемого манеры удержания письменных принадлежностей использовался подстроечный резистор номиналом 100 кОм. Это дало возможность перед началом исследования провести с испытуемым калибровочную сессию. Нормальный уровень силы со слишком низким значением (менее половины диапазона измерения) или со слишком высоким значением (значительно более половины диапазона измерения) приводит к потере точности. Для калибровки испытуемому предлагалось взять перо динамическим штативным захватом, и затем аппаратура подстраивалась таким образом, чтобы нормальный уровень силы (НУС) испытуемого соответствовал значению в 2,7 Вольт на плече делителя (~55% шкалы измерения на АЦП с диапазоном 0–5 В). Именно это значение позволяет получить хорошую точность при измерении силы, однако точный математический аппарат относительно выбора наилучшего значения ещё предстоит разработать.

Поскольку каждая из частот тремора несет информацию об определенном источнике моторной реакции, для анализа необходимо производить выделение

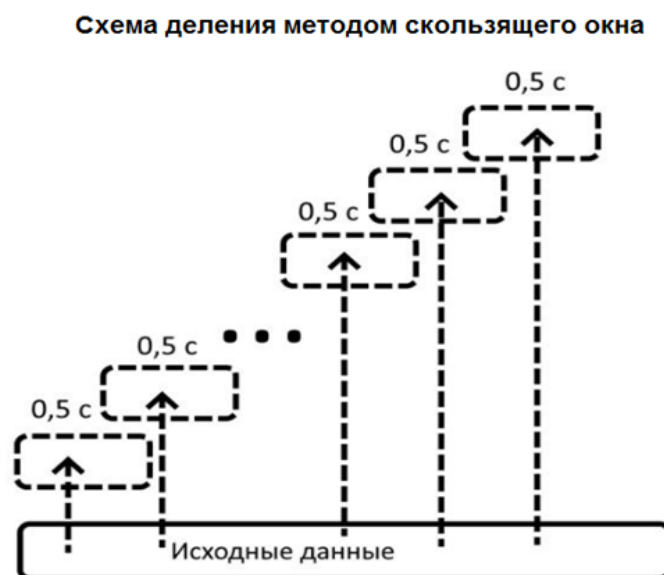
отдельных полос частот. Для этого был выбран фильтр Баттерворта 6-го порядка, а фильтрация производилась в прямом и обратном направлении.

При обработке записи использовался метод скользящего окна, подразумевающий дробление записи на пересекающиеся участки, которые затем анализируются независимо друг от друга. Схематично метод представлен на рисунке 4. Данный метод позволяет определять время появления реакции на стимул на тензотрёморограмме (ТТГ), а пересечение окон позволяет точно определить интервал, содержащий реакцию полностью (Fumarola, Ciampi, Appice, & Malerba, 2009).

Для статистического анализа был выбран критерий Эппса-Синглтона (Epps & Singleton, 1986). Основным преимуществом этого критерия является возможность его применения к данным, распределенным дискретно, а также к выборкам разного размера. Это достигается за счет использования характеристической функции вместо функции распределения. Кроме того, статистическая мощность этого критерия больше, чем у широко применяемого критерия Колмогорова-Смирнова (Goerg & Kaiser, 2009).

Рисунок 4

Схема деления методом скользящего окна



Для проверки методики был проведен эксперимент, в рамках которого испытуемым предлагалось удерживать модуль тензотрёморографии динамическим штативным захватом в состоянии покоя, а затем в случайный момент времени испытуемым в наушниках предъявлялся громкий (стрессорирующий) звук (105 dB)

ПСИХОФИЗИОЛОГИЯ

продолжительностью 1 секунда. Такая схема исследования аналогична экспериментальному исследованию ТТМ со стимуляцией электрическим током (Christou, Jakobi, Critchlow, Fleshner, & Enoka, 2004).

В эксперименте участвовали 7 мужчин и 3 женщины (средний возраст 25 +/- 4,2 года). Каждый испытуемый получал инструкцию, а затем проводилась пробная серия из одного испытания с подачей стимула и одного контрольного испытания для демонстрации схемы эксперимента. При контрольных испытаниях испытуемый не получал стимула. Далее каждый испытуемый проходил серию из шести в случайном порядке чередуемых испытаний со стрессором (3) и контрольных испытаний («состояния покоя») (3). Данные контролировались на качество сбора и наличие артефактов. Целью эксперимента являлась проверка гипотезы о том, что с помощью предлагаемого комплекса математически-аппаратных улучшений можно получить информацию о моменте реакции человека на стимул с помощью метода ТТМ.

Результаты

На рисунках 5 и 6 представлены записи, демонстрирующие характерные отличия данных ТТМ, полученные при подаче стрессорного стимула, от данных ТТМ, полученных в контрольных испытаниях.

Рисунок 5

Результат тензотремометрии в спокойном состоянии

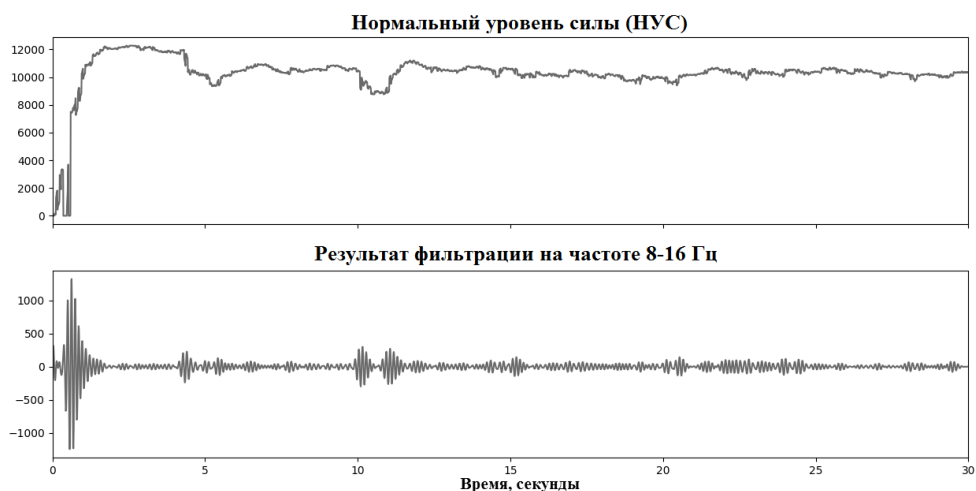


Рисунок 6

Результат тензотремометрии при предъявлении стрессового стимула (звук). Время предъявления стимула – 15 с.



На рисунке 6 виден характерный пик на 16 секунде, связанный с моментом подачи эмоционально значимого стимула на 15 секунде. Всплеск ТТМ активности в начале записи на рисунке 5 объясняется тем, что испытуемый в момент записи перехватил перо для большего удобства.

Таблица 1

Результат статистической обработки тензотремометрии

Стимульный материал предъявлялся (Звук)			Стимульный материал не предъявлялся		
Критерий	р - значение*	Δ, % НУС	Критерий	р - значение*	Δ, % НУС
Эппса-Синглтона			Эппса-Синглтона		
40,25	0,0043	10,83	26,42	0,003	3,11

Примечание: Знаком «*» отмечена значимость на уровне $p < 0,05$.

Результаты эксперимента представлены в таблице 1. Анализ данных показал, что момент подачи стимула совпал с участком, на котором были найдены различия в данных ТТМ для каждого пальца. При предъявлении стрессового стимула в виде звука по критерию Эппса-Синглтона было получено значение 40,25 при $p = 0,0043$. Контрольное условие по критерию Эппса-Синглтона получило значение 26,42 при $p = 0,003$. Данная разница обозначает статистически значимое отличие выборок, что подтверждает предположение о том, что стимул оказал влияние. При этом

ПСИХОФИЗИОЛОГИЯ

различие между минимальной и максимальной амплитудой тремора на записи в стрессовой ситуации Δ , % НУС = 10,83 значительно больше, чем в контрольном условии Δ , % НУС = 3,11, что дополняет предположение о влиянии стимула на тремор.

Обсуждение результатов

Результаты данного исследования свидетельствуют о том, что предлагаемый метод, используя данные тензотремометрии, позволяет отслеживать момент возникновения стресса у испытуемых. Так, момент стресса отражается на тензотремограмме (после фильтрации и обработки) в виде характерного всплеска, свидетельствующего о резком увеличении силы нажатия, и на выборке 10 человек получены статистически значимые различия показателей тензотремографии при предъявлении звукового стимула в качестве экспериментального стрессора. Полученные результаты согласуются с данными работы Christou et al. (2004) о наличии тенденции к увеличению амплитуды тремора на частоте 1–2 Гц у молодых здоровых испытуемых. В то же время Blakemore, Shoorangiz & Anderson (2018) не обнаружили значимых различий у здоровых испытуемых по частотно-амплитудным характеристикам тензотремографических показателей, регистрируемых в процессе предъявления эмоционально значимых изображений.

Предыдущие исследования в области тензотремографии опирались на классические балочные тензодатчики (Кручинин и др., 2013; Сафьянников, Буренева, Жирнова 2018; Blakemore et al., 2018; Christou et al., 2004; Ferencík, Jaščur, Bundzel, & Cavallo, 2020).

Данная работа предлагает методику более точного измерения тремора под статической нагрузкой с помощью тензодатчиков типа «силочувствительный резистор» в сочетании с методикой фильтрации данных после оцифровки. Получение такой информации открывает перспективы для развития методов диагностики стресса при выполнении физически тяжелых задач в условиях статической или преимущественно статической нагрузки. Кроме этого, предлагаемое усовершенствование математического аппарата для исследования тремора при динамической нагрузке позволяет решать задачи по исследованию тремора и стресса в процессе письма или выполнения других задач, сопряженных с активным использованием мелкой моторики. Такие исследования ранее не проводились или проводились весьма ограниченно в связи со сложностью используемых методов.

Предлагаемое улучшение метода сбора данных за счет опоры на тензометрические датчики, которые не имеют ограничения по частоте, позволяет собирать данные на частотах от 0,1 Гц до 120 Гц. Для измерений в данной работе был выбран диапазон 8–16 Гц как наиболее характерный для физиологического

тремора. Предлагаемый метод позволяет достигать разрешения около 1/100 грамма на целевом диапазоне сил, однако компенсирует это пониженным разрешением вне этого диапазона. Это делает его более применимым для измерения амплитуды тремора при задачах на захват, позволяя откалибровать устройство так, чтобы целевой диапазон повышенной точности соответствовал диапазону изменения сил.

Таким образом, основные сценарии использования предлагаемой методики лежат в области, где использование других методов значительно затруднено. В первую очередь это ситуации динамической деятельности с тремором невысокой частоты и амплитуды, где необходима большая точность для получения достоверной информации о силе тремора, но при этом существует постоянное изменение абсолютного ускорения движения пальцев и кисти. В то же время, для получения данных о треморе других частей тела и исследований при свободных руках предлагаемая методика подходит крайне ограниченно, что сужает область её применения и основные сценарии использования.

Результаты пилотного исследования свидетельствуют о том, что при подаче стрессующего сигнала формируется определенная реакция в виде краткосрочного изменения характера тремора, которая затем может быть выделена путем анализа сигнала. Однако, виды и мощность стимулов, которые могут быть определены по ТТГ, а также необходимые характеристики и параметры итогового устройства, которые позволили бы определять наличие реакции на тот или иной специфический вид стрессора, нуждаются в специальном исследовании.

Заключение

Разработана методика и программное обеспечение анализа данных тензотремометрии. Опытный образец выполнен в виде ручки с внешним блоком предобработки данных и подключается к терминалу администратора с помощью USB-кабеля. Методика использует тензотремометрические датчики нового типа, что значительно расширяет возможности существующих тензотремометрических решений для оценки параметров тремора на различных частотах. Предусмотрена возможность настройки чувствительности устройства с помощью подстроечных резисторов, а также возможность отдельной замены модуля тензотремометрии для решения других задач.

Методика позволяет проводить анализ индивидуальных особенностей тремора в автоматическом режиме с помощью метода скользящего окна и критерия Эппса-Синглтона. Предлагаемая методика может служить заменой методу акселерометрии в ситуациях его ограниченной применимости и расширяет инструментальные возможности психологов и медиков в разных областях науки и практики: изучение двигательной сферы в норме и патологии, диагностика и мониторинг стресса, «детекция лжи».

Литература

- Александров, А. Ю. (2018). *Психофизиологические подходы к комплексной оценке динамики эмоциональных состояний* (кандидатская диссертация). Санкт-Петербургский государственный университет.
- Александров, А. Ю., Уплисова, К. О., Степанов, А. В., Иванова, В. Ю. (2017). Использование особенностей физиологического тремора и периферической гемодинамики для оценки эмоциональных реакций, возникающих при сокрытии информации. *Материалы XXIII съезда Физиологического общества им. И. П. Павлова с международным участием*. <https://doi.org/10.31857/s0131164620010038>
- Белинский, А. В., Девишвили, В. М., Черноризов, А. М., Лобин, М. А. (2023). Влияние эмоционального напряжения на параметры тремора в процессе письма. *Мир науки. Педагогика и психология*, 11(1). <https://doi.org/10.15862/28PSMN123>
- Бобылев, А. Н., Болотин, Ю. В., Воронов, А. В., & Кручинин, П. А. (2012). О двух модификациях метода наименьших квадратов в задаче восстановления утерянной информации системы видеонализа по показаниям акселерометра. *Российский журнал биомеханики*, 1, 89–101.
- Говорова, Т. Г., Попова, Т. Е., Таппахов, А. А. (2019). Тремография в клинической практике. *Нервно-мышечные болезни*, 9(4), 61–72.
- Дик, О. Е., Ноздрачев, А. Д. (2019). *Механизмы изменения динамической сложности паттернов физиологических сигналов*. Издательство Санкт-Петербургского университета.
- Ичкитидзе, Л. П., Герасименко, А. Ю., Кицук, Е. П., Петухов, В. А., Селищев, С. В., Терещенко, С. А. (2019). *Униполярный датчик деформации*. Государственная регистрация патента на изобретение РФ №2685570, G01B 7/16, B82Y 30/00, от 22.04.2019, Бюл. № 12. Роспатент.
- Ишлинский, А. Ю. (2018). *Классическая механика и силы инерции*. Издательство URSS.
- Котельников, В. А. (1933). *О пропускной особенности «эфира» и проволоки в электросвязи*. Материалы к I Всесоюзному съезду по вопросу реконструкции дела связи. РККА.
- Кручинин, П. А., Лебедев, А. В., Холмогорова, Н. В. (2013). Особенности частотного анализа сигналов силомоментных датчиков в задаче исследования физиологического тремора. *Российский журнал биомеханики*, 1, 64–77.
- Мейгал, А. Ю., Риссанен, С. М., Зарипова, Ю. Р., Мирошниченко, Г. Г., Карьялайнен, П. (2015). Возможности, открываемые использованием нелинейных параметров поверхностной электромиограммы в диагностике заболеваний и состояний двигательной системы человека. *Физиология человека*, 41(6), 119–119. <https://doi.org/10.7868/S0131164615050100>
- Сафьянников, Н. М., Буренева, О. И., Жирнова, О. А. (2018). Изометрический метод непрерывного потокового отслеживания нейрофизиологических состояний человека для профессиональной диагностики и отбора. *Человеческий фактор в сложных технических системах и средах (Эрго-2018)*.
- Aleksanyan, Z., Bureneva, O., & Safyannikov, N. (2018). Tensometric tremorography in high-precision medical diagnostic systems. *Medical Devices: Evidence and Research*, 321–330. <https://doi.org/10.2147/mder.s168831>
- Baker, J. R., & Sanchez, C. S. (2006). *U.S. Patent No. 7,113,179*. U.S. Patent and Trademark Office.
- Baur, B., Fürholzer, W., Jasper, I., Marquardt, C., & Hermsdörfer, J. (2009). Effects of modified pen grip and handwriting training on writer's cramp. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, 90(5), 867–875. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2008.10.015>

- Blakemore, R. L., Shoorangiz, R., & Anderson, T. J. (2018). Stress-evoking emotional stimuli exaggerate deficits in motor function in Parkinson's disease. *Neuropsychologia*, 112. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2018.03.006>
- Carignan, B., Daneault, J. F., & Duval, C. (2012). The organization of upper limb physiological tremor. *European journal of applied physiology*, 112(4), 1269–1284. <https://doi.org/10.1007/s00421-011-2080-3>
- Christou, E. A., Jakobi, J. M., Critchlow, A., Fleshner, M., & Enoka, R. M. (2004). The 1-to 2-Hz oscillations in muscle force are exacerbated by stress, especially in older adults. *Journal of applied physiology*, 97(1), 225–235. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00066.2004>
- Denner, J. A. (1999). *U.S. Patent No. 5,911,162*. U.S. Patent and Trademark Office.
- Donica, D. K., Massengill, M., & Gooden, M. J. (2018). A quantitative study on the relationship between grasp and handwriting legibility: does grasp really matter? *Journal of Occupational Therapy, Schools, & Early Intervention*, 11(4), 411–425. <https://doi.org/10.1080/19411243.2018.1512068>
- Elble, R. J., & McNames, J. (2016). Using portable transducers to measure tremor severity. *Tremor and Other Hyperkinetic Movements*, 6. <https://doi.org/10.5334/tohm.320>
- Epps, T. W., & Singleton, K. J. (1986). An omnibus test for the two-sample problem using the empirical characteristic function. *Journal of Statistical Computation and Simulation*, 26(3–4), 177–203. <https://doi.org/10.1080/00949658608810963>
- Ferenčík, N., Jaščur, M., Bundzel, M., & Cavallo, F. (2020). The rehapiano—detecting, measuring, and analyzing action tremor using strain gauges. *Sensors*, 20(3), 663. <https://doi.org/10.3390/s20030663>
- Fumarola, F., Ciampi, A., Appice, A., & Malerba, D. (2009). A sliding window algorithm for relational frequent patterns mining from data streams. In *International Conference on Discovery Science* (pp. 385–392). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-04747-3_30
- Goerg, S. J., & Kaiser, J. (2009). Nonparametric testing of distributions—the Epps–Singleton two-sample test using the empirical characteristic function. *The Stata Journal*, 9(3), 454–465. <https://doi.org/10.1177/1536867x0900900307>
- Gygi, A. E., & Moschytz, G. S. (1997, June). Low-pass filter effect in the measurement of surface EMG. In *Proceedings of Computer Based Medical Systems* (pp. 183–188). IEEE. <https://doi.org/10.1109/cbms.1997.596431>
- Lin, Y. C., Chao, Y. L., Hsu, C. H., Hsu, H. M., Chen, P. T., & Kuo, L. C. (2019). The effect of task complexity on handwriting kinetics. *Canadian Journal of Occupational Therapy*, 86(2), 158–168. <https://doi.org/10.1177/0008417419832327>
- Pedersen, M. (2006). Micro-mechanical capacitive inductive sensor for wireless detection of relative or absolute pressure. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 120(3), 1163. <https://doi.org/10.1121/1.2355936>
- Pintea, S. L., Zheng, J., Li, X., Bank, P. J. M., van Hilten, J. J., & van Gemert, J. C. (2019). Hand-Tremor Frequency Estimation in Videos. *Computer Vision – ECCV 2018 Workshops*, 213–228. https://doi.org/10.1007/978-3-030-11024-6_14
- Williams, S., Fang, H., Relton, S. D., Wong, D. C., Alam, T., & Alty, J. E. (2020). Accuracy of Smartphone Video for Contactless Measurement of Hand Tremor Frequency. *Movement Disorders Clinical Practice*, 8(1), 69–75. <https://doi.org/10.1002/mdc3.13119>
- Young, I. C. (1933). A study of tremor in normal subjects. *Journal of Experimental Psychology*, 16(5), 644–656. <https://doi.org/10.1037/h0071165>

Поступила в редакцию: 04.01.2023

Поступила после рецензирования: 14.04.2023

Принята к публикации: 04.05.2023

Заявленный вклад авторов

Белинский Артём Викторович – разработка дизайна эксперимента, подготовка текста статьи, проведение эксперимента.

Девишвили Важа Михайлович – замысел исследования и устройства, коррекция текста статьи и дизайна эксперимента.

Черноризов Александр Михайлович – подготовка и редакция текста статьи.

Лобин Михаил Александрович – разработка технического и программного решения, анализ данных.

Информация об авторах

Белинский Артём Викторович – аспирант, Московский Государственный Университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация; WOS Researcher ID: HKE-3297-20239; SPIN-код: 3534-9913; AuthorID: 1203100; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5366-7018>; e-mail: V10046321@yandex.ru

Девишвили Важа Михайлович – кандидат биологических наук, доцент, Московский Государственный Университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация; SPIN-код: 7602-7515, AuthorID: 805295; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7554-7463>; e-mail: vmdev@mail.ru

Черноризов Александр Михайлович – доктор психологических наук, профессор, Московский Государственный Университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация; WOS ResearcherID: J-4122-2012; Scopus Author ID: 57060395200; SPIN-код: 5534-1216, AuthorID: 12427; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5199-5050>; e-mail: amchern53@mail.ru

Лобин Михаил Александрович – старший разработчик, ПАО «Первая грузовая компания», Москва, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4169-155X> e-mail: lobin@list.ru

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.