

ПРИМЕНЕНИЕ ВИБРОТАКТИЛЬНОЙ СТИМУЛЯЦИИ ПАЛЬЦЕВ КИСТИ В ИНТЕРФЕЙСЕ МОЗГ — КОМПЬЮТЕР ДЛЯ РЕАБИЛИТАЦИИ ПОСТИНСУЛЬТНЫХ ПАЦИЕНТОВ

И.С. Гремицкий

gis171200@student.bmstu.ru

SPIN-код: 5715-9675

Д.Ю. Кулешов

kuleshovdyu@student.bmstu.ru

SPIN-код: 5449-9453

В.А. Попова

popovava@student.bmstu.ru

SPIN-код: 7205-6852

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Представлен обзор современных интерфейсов мозг — компьютер (ИМК) с вибротактильной стимуляцией. Данная технология способна помочь с реабилитацией пациентов, имеющих двигательные и зрительные нарушения, поскольку в ней задействована лишь сенсорная чувствительность в обход зрительного пути. Выполнен обзор литературы, посвященной исследованию нарушений сенсорной чувствительности у постинсультных пациентов, а также рассмотрена возможность регистрации вызванных потенциалов Р300 при разных режимах стимуляции пальцев кисти с помощью вибротактильных моторов. Показаны численные характеристики Р300, приведены качественные изображения управляющего ИМК сигнала. Полученные данные требуют проверки в дальнейших исследованиях.

Ключевые слова

Инсульт, реабилитация, интерфейс мозг — компьютер, сенсорная чувствительность, электроэнцефалография, вызванные потенциалы, Р300, вибротактильная стимуляция, когерентное усреднение

Поступила в редакцию 23.08.2021

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021

Введение. Согласно статистике Министерства здравоохранения Российской Федерации, имеется тенденция роста заболеваемости инсультом и уменьшения смертности пациентов (рис. 1).

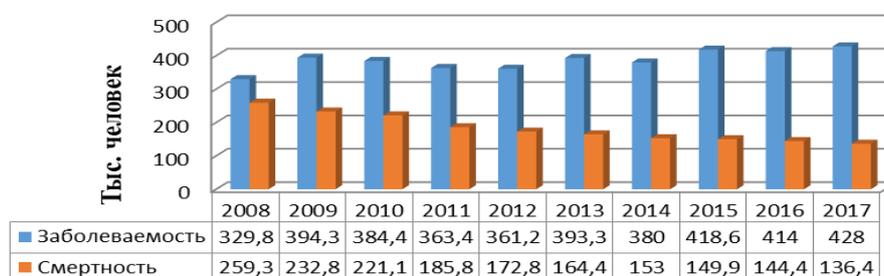


Рис. 1. Статистика первичной заболеваемости и смертности взрослого населения РФ при инсульте

У 80 % постинсультных пациентов наблюдаются двигательные нарушения, что служит основной причиной их инвалидизации [1]. На сегодняшний день в комплекс реабилитационных мероприятий активно внедряются высокотехнологичные нейропротезы и экзоскелеты.

Большинство существующих систем управления для постинсультной реабилитации основаны на регистрации результатов поверхностной электромиографии (ЭМГ) с функционально сохраненных участков поврежденных конечностей. Эффективность методов на основе ЭМГ была продемонстрирована на примере инвалидных кресел, протезов и экзоскелетов [2]. Однако для постинсультных пациентов характерно уменьшение амплитуды ЭМГ-сигнала, что может сказаться на качестве работы системы. В таких случаях прибегают к применению интерфейсов мозг — компьютер (ИМК).

В современных интерфейсах мозг — компьютер (ИМК), основанных на выделении сигнала Р300, наиболее часто используют визуальную форму стимуляции. Однако среди постинсультных пациентов помимо двигательных дефектов в 20 % случаев наблюдаются зрительные нарушения. В таких случаях возможно применение ИМК, базирующегося на принципе вибротактильной стимуляции. В данной технологии задействована лишь сенсорная чувствительность, что делает доступной реабилитацию пациентов с двигательными и зрительными нарушениями.

Технология интерфейс мозг — компьютер. Это современная технология, позволяющая на основе регистрации активности головного мозга управлять внешними исполнительными устройствами без участия периферических нервов и мышц. В основе реабилитационных ИМК лежит принцип биологической обратной связи, суть которого заключается в передаче испытуемому информации о состоянии и изменении собственных физиологических процессов посредством внешней цепи обратной связи, организованной преимущественно с помощью микропроцессорной или компьютерной техники.

По методам регистрации активности головного мозга ИМК можно подразделить на инвазивные и неинвазивные. Инвазивные технологии имеют меньшую чувствительность к артефактам, лучшее временное и пространственное разрешение, однако из соображений биологической совместимости и безопасности инвазивного вмешательства в большинстве случаев применяют неинвазивные технологии. Современные неинвазивные ИМК имеют скорость передачи информации 175 бит/мин [3, 4].

Сигналами, отражающими активность головного мозга, могут служить сигналы электроэнцефалографии (ЭЭГ), магнитоэнцефалографии (МЭГ) и т. п. Для регистрации МЭГ или распределения и интенсивности кровотока в мозге требуются громоздкое и дорогостоящее оборудование, поэтому большинство посвященных ИМК работ основываются на регистрации биоэлектрической активности головного мозга с помощью ЭЭГ. Однако выделить биоэлектрическую активность головного мозга и расшифровывать ее в режиме реального времени с помощью неинвазивных методов регистрации — сложно реализуемая задача [5].

По типу используемых нейромеханизмов неинвазивные ИМК на основе ЭЭГ можно подразделить на независимые (без предъявления стимула) и зависимые (с предъявлением стимула). К независимым относятся ИМК, работа которых основана на регистрации медленных корковых потенциалов (МКП) и сенсомоторных ритмов (СМР). В работе [6] выбор отдельной буквы осуществлялся в результате произвольного возникновения медленных корковых потенциалов в ответ на ее предъявление пациенту на мониторе. Более сорока пациентов с боковым амиотрофическим склерозом на различных этапах заболевания обучались контролировать МКП с помощью интерфейса, в итоге семь из этих пациентов с синдромом запертого человека (СЗЧ) смогли продолжать использовать эту технологию. В зависимых ИМК используются два нейромеханизма: стационарные визуальные вызванные потенциалы (SSVEP) и когнитивные вызванные потенциалы P300 [7]. Скорость передачи информации в P300-ИМК может достигать 20...25 бит/мин [8].

В то время как управлению медленными корковыми потенциалами и сенсорно-моторными ритмами обучаются посредством зрительной и слуховой обратной связи, для ИМК на основе P300 такая интенсивная и длительная подготовка не обязательна. В ИМК на основе когнитивного вызванного потенциала P300 часто используют визуальную стимуляцию [9]. Однако при исследовании работы пользователей с закрытыми глазами в контуре ИМК с вибротактильной стимуляцией было показано, что характеристики десинхронизации ЭЭГ-паттернов, изменения кортикоспинальной возбудимости и точности классификации не отличаются от таковых в классических ИМК, использующих зрительную стимульную среду [10]. Интерфейсы на основе вибротактильной стимуляции применяются при работе с пациентами, страдающими фотосенситивной эпилепсией, а также с пациентами, у которых диагностируются нарушения или полная утрата зрения. При использовании таких интерфейсов осуществляется стимуляция области, ответственной за утраченное движение. Вслед за вибротактильной стимуляцией в головном мозге возникает корковый ответ, а затем когнитивный потенциал P300, который можно зарегистрировать с поверхности скальпа.

Вибротактильные ИМК. В исследовании [11] была оценена возможность использования ИМК с управляемыми командами и коммуникационной вибротактильной обратной связи на основе P300 для пациентов с апаллическим синдромом (бодрствующая кома). В работе требовалось получить оценку когнитивных функций пациентов, которая могла бы дополнить сведения, полученные с помощью традиционных методов реабилитации. В данном исследовании пациентам было предложено мысленно подсчитывать стимулы либо на левом, либо на правом запястье. В исследовании использовали две парадигмы. В первой применяли два стимулятора — на левом и правом запястьях, во второй парадигме помимо двух стимуляторов на запястьях использовали дистрактор — стимулятор на спине, предназначенный для отвлечения внимания испытуемых.

В результате у 41 % пациентов отмечены признаки следования командам после использования первой парадигмы. Кроме того, 2 из 12 пациентов могли установить надежную связь с окружением на основе второй парадигмы. Таким образом, ИМК на основе вибротактильной стимуляции можно применять для ускорения процесса перехода пациентов к интенсивной реабилитации. При этом нужно доработать методы до более универсальных, поскольку на данном этапе в исследовании упоминается факт настройки контура обратной связи в целях достижения высокой точности.

Похожая серия исследований [12] (для таких же парадигм вибротактильного воздействия) была проведена для пациентов с СЗЧ и боковым амиотрофическим склерозом (БАС), а также с СЗЧ и инсультом. Пациентам требовалось подсчитывать редкие стимулы, создаваемые вибромоторами на запястье левой руки, чтобы ответить «да», а на запястье правой руки, чтобы ответить «нет». В результате пациенты достигли более высокой точности при использовании первой парадигмы. Пациенты с СЗЧ и БАС продемонстрировали более высокую точность, чем пациенты с СЗЧ и инсультом, в двух парадигмах. Эти данные свидетельствуют о том, что для контроля этого типа ИМК необходимы специфические когнитивные способности, которые могут быть утрачены в определенных подгруппах пациентов с тяжелыми нарушениями мозгового кровообращения.

Сенсорная чувствительность постинсультных пациентов. Одним из распространенных последствий инсульта является потеря сенсорной чувствительности. Для возможности применения вибротактильных стимулов необходимо оценить уровень сохранности сенсорной чувствительности. В работе [13] была исследована тактильная и проприоцептивная чувствительность пациентов, впервые перенесших инсульт. Оценка сенсорной чувствительности проводили с применением комплекса клинической оценки чувствительности у пациентов с неврологическими заболеваниями — the Rivermead Assessment of Somatosensory Perception (RASP). Изучали способность распознавания пациентами тактильной стимуляции и топестезия — способность при одновременной стимуляции двух близкорасположенных зон различить эти зоны. В результате было выявлено, что у половины участвовавших в исследовании постинсультных пациентов сенсорная чувствительность сохранилась на нормальном уровне.

Похожее исследование тактильной чувствительности, а также ее изменения во времени было проведено для постинсультных пациентов в работе [14]. Данные собирали через 5 дней, 3 месяца и 12 месяцев с начала болезни. Для оценки сенсорной чувствительности применяли комплекс RASP, а оценку проводили по шкале National Institutes of Health Stroke Scale (NIHSS). По результатам исследования сенсорные нарушения были выявлены у 59,4 % пациентов по оценке RASP и 52,5 % по оценке NIHSS. Эти данные согласуются с описанными выше и подтверждают сохранение сенсорной чувствительности у постинсультных пациентов. За 12 месяцев исследования число пациентов с нарушениями снизилось до 39 %. Это говорит о постепенном восстановлении сенсорной чувстви-

тельности. Причем лучше всего восстанавливались тактильная чувствительность и проприоцепция (ощущение положения конечности в пространстве). На основании этих данных, можно сделать предположение, что по мере реабилитации, у пациентов возвращается чувствительность, что будет способствовать повышению эффективности применения вибротактильной модальности стимулов для ИМК.

В работе [15] изучали тактильную чувствительность пальцев рук у здоровых, постинсультных пациентов и пациентов с сахарным диабетом с применением штангенциркуля. Чувствительность оценивали по минимальному расстоянию заостренных ножек штангенциркуля, при котором испытуемый ощущал две отдельные точки легкого укола. Для обозначения этого расстояния авторы применяли термин «порог тактильной чувствительности». У молодых здоровых испытуемых расстояние между точками стимуляции, которое они ощущали, достигало 1...2 мм, у здоровых испытуемых в возрастной группе 60...85 лет — 2...3 мм. При обследовании пациентов, перенёвших инсульт, порог тактильной чувствительности оказался 4...5 мм. У пациентов, перенесших инсульт на фоне сахарного диабета, данное значение оказалось 5...8 мм. Таким образом, у перенесших инсульт пациентов отмечено снижение тактильной чувствительности. Значит, для использования ИМК на основе вибротактильной стимуляции для постинсультных пациентов следует увеличить значение порога тактильной чувствительности.

Для эффективного расположения вибротактильных стимуляторов важна также локализация области, где тактильная чувствительность утрачена и где она сохранена после перенесенного инсульта. В исследовании [16] пациенты, перенесшие инсульт, находили у себя участки тактильной стимуляции. Исследование проводили на двух испытуемых. Для пациентов были организованы две серии тестов: клинический тест, выполняемый вручную, и автоматический, с использованием специально разработанного устройства — тест по определению зон с недостатком чувствительности в соответствии со шкалой Nottingham Sensory Assessment (NSA). Осуществляли воздействие на определенные стандартные точки на кисти пациента, после чего пациента просили определить положение анализатора, глаза пациента были при этом закрыты. Результаты исследования различных зон кисти оценивали по шкале 0–2, где 0 — отсутствие чувствительности, 1 — сниженная чувствительность, 2 — чувствительность в норме. В автоматическом анализе применяли устройство Re-Naptic Glove — специально разработанную перчатку с 24 вибростимуляторами, оказывающими тактильные воздействия на различные зоны исследуемой кисти, что позволяло оценить распределения чувствительности. Длительность стимула составляла 1,5 с, частота стимуляции 150 Гц.

По результатам первого теста установлено, что чувствительность первого пациента сохранилась на нормальном уровне на обеих руках. В это же время у второго пациента отмечается сниженная чувствительность (а в некоторых зонах

даже ее отсутствие) на пораженной руке и сниженная чувствительность на другой. По результатам автоматического теста у второго пациента зафиксировано смещение зон чувствительности кисти в проксимальном направлении, что, вероятно, связано с более обширной областью поражения соматосенсорной коры.

По результатам проведенного литературного обзора можно сделать вывод, что в зависимости от степени поражения у постинсультных пациентов значительно различается тактильная чувствительность. Полная утрата тактильной чувствительности характерна для пациентов с обширной зоной поражения головного мозга и реабилитационный потенциал у таких пациентов отсутствует. У части пациентов, не имеющих обширных повреждений головного мозга вследствие инсульта и не утративших чувствительность полностью, отмечается ее постепенное восстановление во времени. Использование эффективных средств оценки чувствительности позволит выделять пациентов, для которых реабилитационные мероприятия с применением ИМК, основанной на вибротактильной стимуляции, будут эффективны.

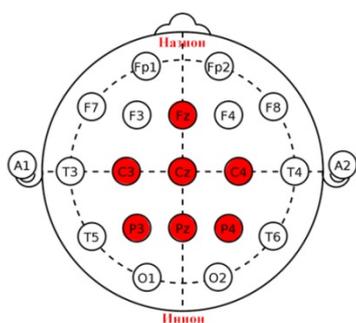


Рис. 2. Международная схема расположения электродов «10–20» (красным цветом отмечены электроды, используемые в исследовании)

Описание эксперимента. ЭЭГ-сигнал регистрировали с помощью электроэнцефалографа «Нейрон-Спектр-5» [17]. Расположение электродов соответствовало международной системе «10–20» (рис. 2). При работе использовались электроды Fpz, Fz, Cz, Pz, C3, C4, P3, P4, в качестве референтных отведений — ушные электроды A1, A2. Заземляющий электрод располагался в отведении AFz. Частота дискретизации составляла 500 Гц, полоса пропускания 0,5...75 Гц. Контроль импеданса электрод — кожа осуществляли в начале и в конце каждого исследования, при этом его значение не превышало 10 кОм.

Использовали вибромоторы QX-6A-3V [18], управление которыми осуществлялось с помощью микроконтроллера MSP430G2553.

Эксперимент состоял из девяти серий. В каждой серии варьировалась частота подачи стимула (1, 2, 4 Гц) и длительность воздействия вибротактильного мотора (40, 80, 120 мс). Пауза между экспериментальными сериями составляла 15 с.

В эксперименте принимало участие двое добровольцев мужского пола в возрасте 21 и 19 лет, предварительно получивших подробную инструкцию о процедуре проведения исследования. Добровольцы располагались в удобном кресле, в расслабленном состоянии. Они зажимали вибромоторы в правой и левой руке между большим и указательным пальцами.

Задача испытуемых состояла в подсчете количества возникающих стимуляций в виде вибрации в правой руке — подсчете целевых стимулов. Добровольцы при этом не разговаривали и не смотрели на свои руки [19].

Обработка ЭЭГ-сигнала осуществлялась в программной среде MATLAB R2019a. Сигнал подвергали цифровой фильтрации с целью удаления сетевой помехи 50 Гц, далее было проведено когерентное усреднение целевых и нецелевых стимулов.

Результаты. В результате обработки данных из разных серий посредством обработки ЭЭГ-сигнала был выделен потенциал P300 на целевой вибротактильный стимул. Полученные графики имели вариабельность амплитуды и латентности потенциала P300 (рис. 3).

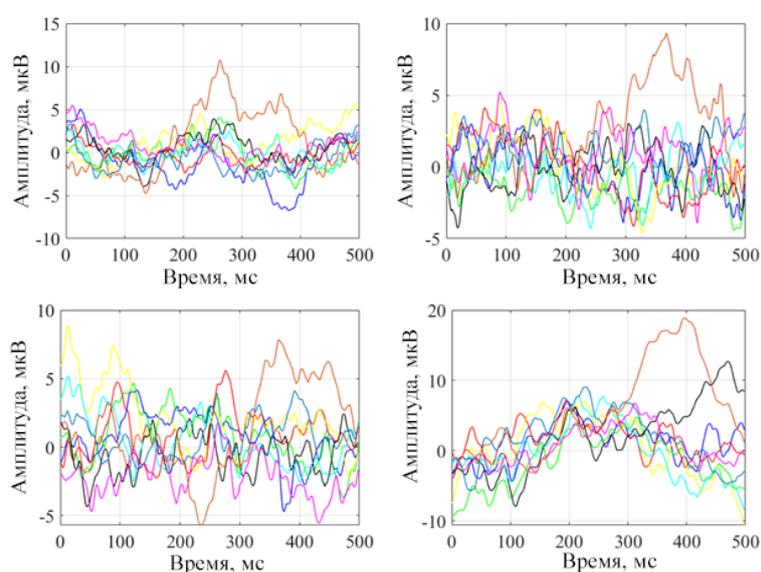


Рис. 3. Типичные графики P300, полученные при вибротактильной стимуляции пальцев кисти здоровых испытуемых

Полученные в ходе исследования амплитуды A выделенного потенциала и латентности (времени от момента подачи стимула до возникновения характерного амплитудного пика) L приведены в табл. 1. Для амплитуды рассчитано среднее квадратичное отклонение.

Рассмотрим выделение потенциала P300 — отношение усреднения вызванных потенциалов в ответ на целевой стимул к усредненным нецелевым стимулам:

$$\text{Extraction} = \frac{\max P300}{\max \text{noise}},$$

где Extraction — выделение P300; $\max P300$ — максимальная амплитуда P300; $\max \text{noise}$ — максимальная амплитуда нецелевых сигналов.

Если параметр Extraction строго больше 1,1, то будем считать, что мы получили и успешно выделили сигнал P300. Приведем сводную таблицу выделения P300 и статистику подсчета целевых стимулов испытуемыми (табл. 2). Точность выделения для первого испытуемого составила 83 %, для второго — 88 %.

Таблица 1

Результаты исследования

Серия	Cz-электрод		Pz-электрод	
	A, мкВ	L, мс	A, мкВ	L, мс
<i>Испытуемый 1</i>				
1	11,9 ± 3,5	230	14,8 ± 1,5	388
2	11,8 ± 2,3	246	9,8 ± 1,6	342
3	10,6 ± 1,5	280	8,1 ± 2,1	384
4	12,2 ± 0,8	362	8,0 ± 1,9	372
5	8,6 ± 2,2	272	7,8 ± 1,6	390
6	6,2 ± 2,1	228	5,7 ± 3,3	358
7	13,2 ± 4,2	326	14,5 ± 2,6	328
8	9,8 ± 1,2	372	9,3 ± 1,4	370
9	10,7 ± 4,2	264	6,3 ± 2,9	348
<i>Испытуемый 2</i>				
1	18,9 ± 3,6	398	20,3 ± 3,9	414
2	9,6 ± 0,7	376	8,6 ± 0,5	376
3	9,6 ± 3,6	374	7,8 ± 2,2	366
4	19,2 ± 2,7	370	13,8 ± 2,4	448
5	9,8 ± 1,2	360	10,4 ± 1,0	432
6	12,1 ± 3,5	268	8,6 ± 1,6	352
7	14,3 ± 1,2	368	16,2 ± 2,4	408
8	11,2 ± 3,8	368	9,8 ± 0,4	370
9	10,5 ± 3,4	338	9,6 ± 1,3	338

Таблица 2

Результаты выделения потенциала P300

Серия	Количество целевых стимулов в серии	Испытуемый 1			Испытуемый 2		
		Погрешность подсчета целевых стимулов пациентом	Cz	Pz	Погрешность подсчета целевых стимулов пациентом	Cz	Pz
1	27	0	1,8	2,8	0	1,9	2,5
2	25	0	2,4	2,5	+1	1,3	2,0
3	31	0	1,8	1,4	+2	1,9	1,4
4	20	0	2,0	1,7	+1	1,8	2,2
5	21	0	1,7	1,7	0	1,1	1,9
6	32	0	1,1	1,1	0	1,6	1,0
7	22	0	2,4	3,6	+2	1,5	2,4
8	21	0	2,2	2,2	0	1,3	1,7
9	26	0	2,4	0,9	0	1,3	1,6

Рассмотрим характерный сигнал Р300 для различных режимов стимуляции. Данные изображения получены путем усреднения режимов стимуляции с одинаковой частотой подачи стимулов (рис. 4).

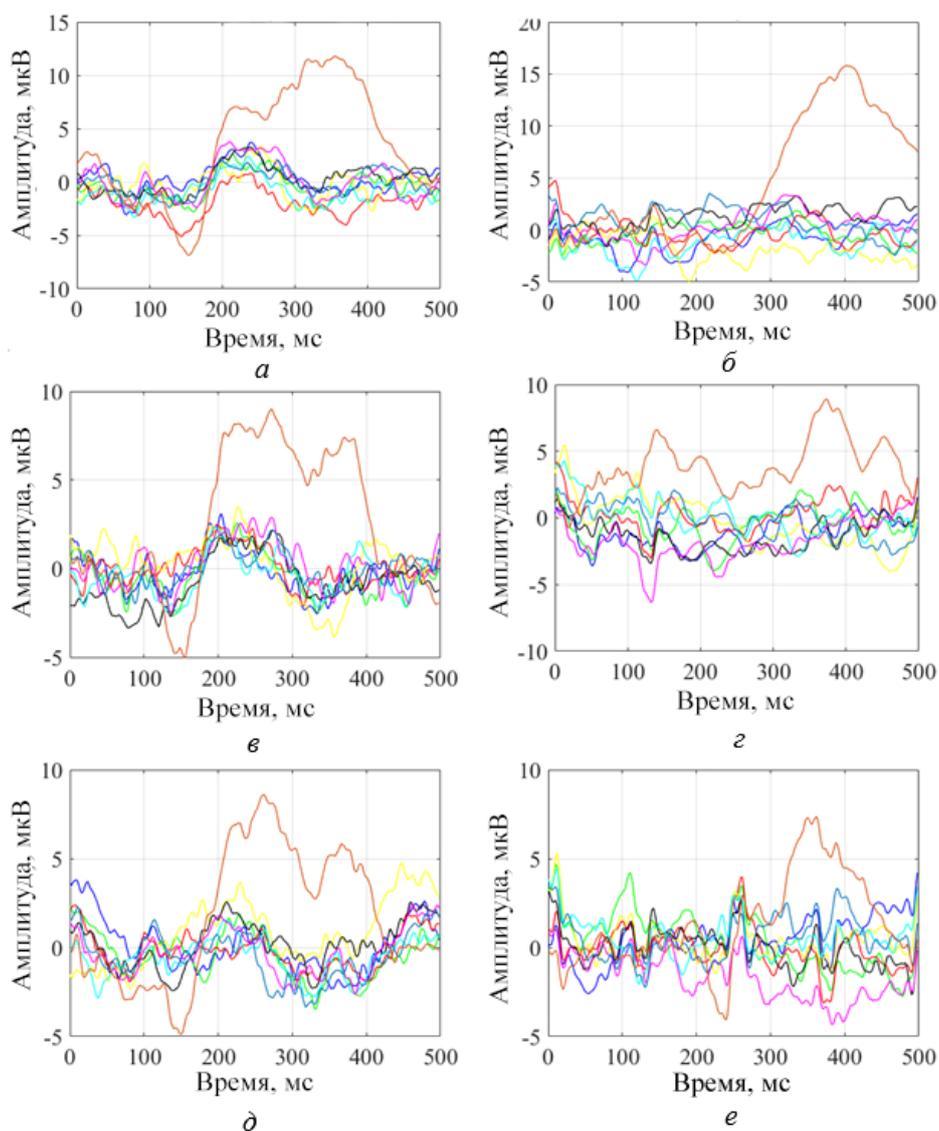


Рис. 4. Характерная форма Р300 для стимуляции при 1, 2, 4 Гц:

а — испытуемый 1, частота 1 Гц; *б* — испытуемый 2, частота 1 Гц;
в — испытуемый 1, частота 2 Гц; *г* — испытуемый 2, частота 2 Гц;
д — испытуемый 1, частота 4 Гц; *е* — испытуемый 2, частота 4 Гц

В целях изучения порядка подачи целевых стимулов были проведены усреднения идущих подряд стимулов, для которых межстимульный интервал минимален и равен одному стимулу, а также для редких не идущих подряд стимулов.

Усреднения для каждой такой выборки представлены на одном графике: красным цветом — подряд идущие стимулы, черным — редкие, синим — остальные стимулы (рис. 5). Как видно на рисунке, повторяющиеся целевые стимулы не дают значительного вклада в P300.

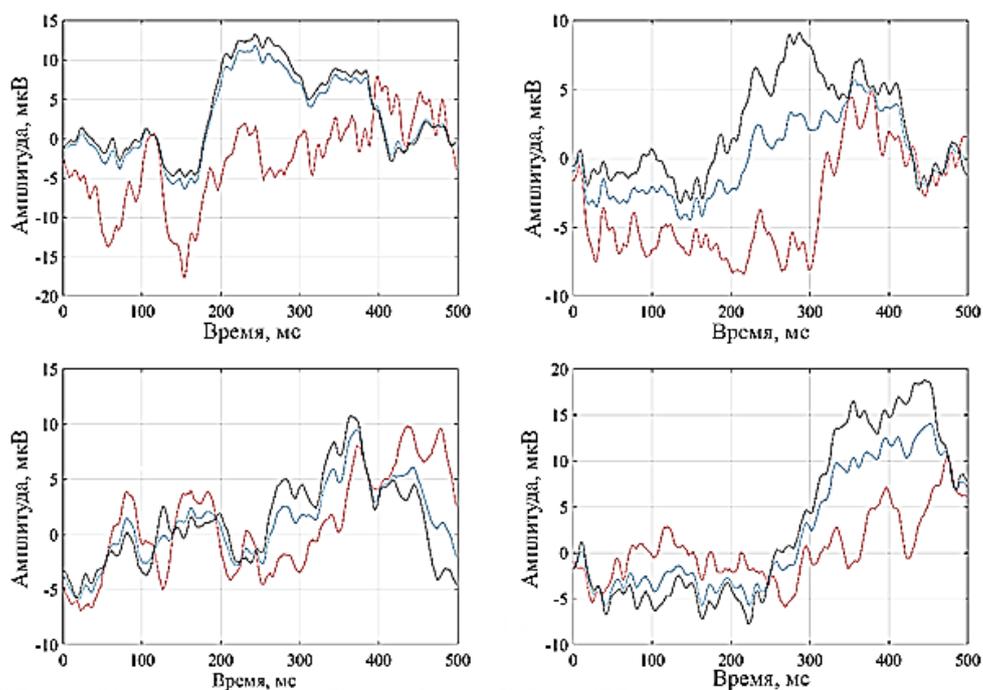


Рис. 5. Влияние идущих подряд целевых стимулов на сигнал P300

Заключение. Использование ИМК с вибротактильной стимуляцией способно дополнить применяемые на сегодняшний день ИМК с визуальной и аудиальной стимуляциями, поскольку позволяет работать с пациентами, имеющими нарушения зрения или слуха. В результате проведенного анализа литературных источников установлено, что возможность применения вибротактильных стимулов напрямую связана со степенью поражения пациента. Испытуемые с серьезными повреждениями нервной системы, обусловленной обширным поражением вследствие перенесенного инсульта, не могли установить надежную связь с помощью ИМК на основе вибротактильных стимулов, а при отсутствии обширных поражений у значительной части пациентов тактильная чувствительность сохранялась и со временем у части пациентов улучшалась. Эти данные говорят о возможности применения вибротактильной стимуляции для задач реабилитации, эффект которой с течением времени будет возрастать благодаря постепенному восстановлению у пациента тактильной чувствительности. Однако данный вопрос требует дальнейших исследований, ввиду недостаточного количества данных о постинсультных пациентах.

В рамках настоящей работы был проведен экспериментальный анализ возможности регистрации потенциала P300 при разных режимах стимуляции

пальцев кисти. Создаваемая вибромоторами стимуляция позволила зарегистрировать у здоровых испытуемых вызываемый потенциал P300. У испытуемых отмечена большая амплитуда зарегистрированного потенциала P300 при частотах стимуляции 1 и 2 Гц. Повторение целевых стимулов при проведении эксперимента не давало значительного вклада в регистрируемый потенциал P300. Данные были зарегистрированы на двух испытуемых и требуют проверки в испытаниях с участием большего числа добровольцев, что будет реализовано в дальнейших исследованиях.

Литература

- [1] Фадеев П.А. Инсульт. Доступно и достоверно. М., Мир и образование, 2008.
- [2] Calabrò R.S., Naro A., Russo M. et al. Is two better than one? Muscle vibration plus robotic rehabilitation to improve upper limb spasticity and function: a pilot randomized controlled trial. *PloS One*, 2017, vol. 12, no. 10, art. e0185936. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185936>
- [3] Kübler A., Kotchoubey B., Kaiser J. et al. Brain-computer communication: unlocking the locked in. *Psychol. Bull.*, 2001, vol. 127, no. 3, pp. 358–375. DOI: <https://doi.org/10.1037//0033-2909.127.3.358>
- [4] Nagel S., Spüler M. World's fastest brain-computer interface: combining EEG2Code with deep learning. *PloS One*, 2019, vol. 14, no. 9, art. e0221909. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0221909>
- [5] Bradberry T.J., Gentili R.J., Contreras-Vidal J.L. Reconstructing three-dimensional hand movements from noninvasive electroencephalographic signals. *J. Neurosci.*, 2010, vol. 30, no. 9, pp. 3432–3437. DOI: <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.6107-09.2010>
- [6] Birbaumer N., Hinterberger T., Kubler A. et al. The thought-translation device (TTD): neurobehavioral mechanisms and clinical outcome. *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, 2003, vol. 11, no. 2, pp. 120–123. DOI: <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2003.814439>
- [7] Farwell L.A., Donchin E. Talking off the top of your head: toward a mental prosthesis utilizing event-related brain potentials. *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.*, 1988, vol. 70, no. 6, pp. 510–523. DOI: [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(88\)90149-6](https://doi.org/10.1016/0013-4694(88)90149-6)
- [8] Lenhardt A., Kaper M., Ritter H.J. An adaptive P300-based online brain-computer interface. *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, 2008, vol. 16, no. 2, pp. 121–130. DOI: <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2007.912816>
- [9] Allison B.Z., Kübler A., Jin J. 30+ years of P300 brain-computer interfaces. *Psychophysiology*, 2020, vol. 57, no. 7, art. e13569. DOI: <https://doi.org/10.1111/psyp.13569>
- [10] Либуркина С.П., Васильев А.Н., Каплан А.Я. и др. Пилотное исследование идеомоторного тренинга в контуре интерфейса мозг-компьютер у пациентов с двигательными нарушениями. *Журнал неврологии и психиатрии им. СС Корсакова*, 2018, т. 118, № 9-2, с. 63–68. DOI: <https://doi.org/10.17116/jnevro201811809263>
- [11] Guger C., Spataro R., Pellas F. et al. Assessing command-following and communication with vibro-tactile P300 brain-computer interface tools in patients with unresponsive wakefulness syndrome. *Front. Neurosci.*, 2018, vol. 12, art. 423. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnins.2018.00423>
- [12] Heilinger A., Ortner R., La Bella V. et al. Performance differences using a vibro-tactile P300 BCI in LIS-patients diagnosed with stroke and ALS. *Front. Neurosci.*, 2018, vol. 12, art. 514. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnins.2018.00514>

- [13] Tyson S.F., Hanley M., Chillala J. et al. Sensory loss in hospital-admitted people with stroke: characteristics, associated factors, and relationship with function. *Neurorehabil. Neural Repair*, 2008, vol. 22, no. 2, pp. 166–172. DOI: <https://doi.org/10.1177/1545968307305523>
- [14] Kessner S.S., Schlemm E., Cheng B. et al. Somatosensory deficits after ischemic stroke: time course and association with infarct location. *Stroke*, 2019, vol. 50, no. 5, pp. 1116–1123. DOI: <https://doi.org/10.1161/STROKEAHA.118.023750>
- [15] Тарасенко И.А., Пьявченко Г.А., Митяева Е.В. Тактильная чувствительность кожи пальцев рук в возрастном аспекте и при некоторых заболеваниях. *Журнал научных статей здоровье и образование в XXI веке*, 2012, т. 14, № 2, с. 157–158.
- [16] Rinderknecht M.D. et al. Automated and quantitative assessment of tactile mislocalization after stroke. *Front. Neurol.*, 2019, vol. 10, art. 593. DOI: <https://doi.org/10.3389/fneur.2019.00593>
- [17] Neuron-Spectrum-5. *neurosoft.com: веб-сайт*. URL: <https://neurosoft.com/en/catalog/eeg/neuron-spectrum-5/> (дата обращения: 15.10.2021).
- [18] The installation of the product. *platan.ru: веб-сайт*. URL: https://doc.platan.ru/pdf/ec2009_QX.pdf (дата обращения: 15.10.2021).
- [19] Mao Y. et al. The influence of visual attention on the performance of a novel tactile p300 brain-computer interface with cheeks-stim paradigm. *Int. J. Neural Syst.*, 2021, vol. 31, no. 4, art. 2150004. DOI: <https://doi.org/10.1142/s0129065721500040>

Гремицкий Иван Сергеевич — студент кафедры «Биомедицинские технические системы», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Кулешов Дмитрий Юрьевич — студент кафедры «Медико-технические информационные технологии», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Попова Виктория Андреевна — студентка кафедры «Медико-технические информационные технологии», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Дмитриев Александр Николаевич, старший преподаватель кафедры «Медико-технические информационные технологии», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Гремицкий И.С., Кулешов Д.Ю., Попова В.А. Применение вибротактильной стимуляции пальцев кисти в интерфейсе мозг — компьютер для реабилитации постинсультных пациентов. *Политехнический молодежный журнал*, 2021, № 11(64). <http://dx.doi.org/11.18698/2541-8009-2021-11-746>

APPLICATION OF FINGERS VIBROTACTILE STIMULATION IN THE BRAIN — COMPUTER INTERFACE FOR THE REHABILITATION OF POST-STROKE PATIENTS

I.S. Gremitsky

gis171200@student.bmstu.ru

SPIN-code: 5715-9675

D.Yu. Kuleshov

kuleshovdyu@student.bmstu.ru

SPIN-code: 5449-9453

V.A. Popova

popovava@student.bmstu.ru

SPIN-code: 7205-6852

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper presents an overview of modern brain-computer interfaces (BCIs) with vibrotactile stimulation. This technology can help the rehabilitation of patients with motor and visual impairments, since it involves only sensory sensitivity bypassing the visual pathway. The authors made a review of the literature devoted to the study of impaired sensory sensitivity in post-stroke patients. In this paper, the possibility was considered of recording the P300 evoked potentials under different modes of fingers stimulation with the help of vibrotactile motors. The numerical characteristics of P300 and high-quality images of the control BCI signal are shown. The data obtained require verification in further research.

Keywords

Stroke, rehabilitation, brain-computer interface, sensory sensitivity, electroencephalography, evoked potentials, P300, vibrotactile stimulation, coherent averaging

Received 23.08.2021

© Bauman Moscow State Technical University, 2021

References

- [1] Fadeev P.A. Insul't. Dostupno i dostoverno [A stroke. Easily and trustworthy]. Moscow, Mir i obrazovanie Publ., 2008 (in Russ.).
- [2] Calabrò R.S., Naro A., Russo M. et al. Is two better than one? Muscle vibration plus robotic rehabilitation to improve upper limb spasticity and function: a pilot randomized controlled trial. *PLoS One*, 2017, vol. 12, no. 10, art. e0185936. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185936>
- [3] Kübler A., Kotchoubey B., Kaiser J. et al. Brain-computer communication: unlocking the locked in. *Psychol. Bull.*, 2001, vol. 127, no. 3, pp. 358–375. DOI: <https://doi.org/10.1037//0033-2909.127.3.358>
- [4] Nagel S., Spüler M. World's fastest brain-computer interface: combining EEG2Code with deep learning. *PLoS One*, 2019, vol. 14, no. 9, art. e0221909. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0221909>
- [5] Bradberry T.J., Gentili R.J., Contreras-Vidal J.L. Reconstructing three-dimensional hand movements from noninvasive electroencephalographic signals. *J. Neurosci.*, 2010, vol. 30, no. 9, pp. 3432–3437. DOI: <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.6107-09.2010>
- [6] Birbaumer N., Hinterberger T., Kubler A. et al. The thought-translation device (TTD): neurobehavioral mechanisms and clinical outcome. *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, 2003, vol. 11, no. 2, pp. 120–123. DOI: <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2003.814439>

- [7] Farwell L.A., Donchin E. Talking off the top of your head: toward a mental prosthesis utilizing event-related brain potentials. *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.*, 1988, vol. 70, no. 6, pp. 510–523. DOI: [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(88\)90149-6](https://doi.org/10.1016/0013-4694(88)90149-6)
- [8] Lenhardt A., Kaper M., Ritter H.J. An adaptive P300-based online brain–computer interface. *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, 2008, vol. 16, no. 2, pp. 121–130. DOI: <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2007.912816>
- [9] Allison B.Z., Kübler A., Jin J. 30+ years of P300 brain–computer interfaces. *Psychophysiology*, 2020, vol. 57, no. 7, art. e13569. DOI: <https://doi.org/10.1111/psyp.13569>
- [10] Liburkina S.P., Vasil'yev A.N., Kaplan A.Ya. et al. Brain-computer interface-based motor imagery training for patients with neurological movement disorders. *Zhurnal neurologii i psikiatrii im. SS Korsakova* [S.S. Korsakov Journal of Neurology and Psychiatry], 2018, vol. 118, no. 9-2, pp. 63–68. DOI: <https://doi.org/10.17116/jnevro201811809263> (in Russ.).
- [11] Guger C., Spataro R., Pellas F. et al. Assessing command-following and communication with vibro-tactile P300 brain-computer interface tools in patients with unresponsive wakefulness syndrome. *Front. Neurosci.*, 2018, vol. 12, art. 423. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnins.2018.00423>
- [12] Heilinger A., Ortner R., La Bella V. et al. Performance differences using a vibro-tactile P300 BCI in LIS-patients diagnosed with stroke and ALS. *Front. Neurosci.*, 2018, vol. 12, art. 514. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnins.2018.00514>
- [13] Tyson S.F., Hanley M., Chillala J. et al. Sensory loss in hospital-admitted people with stroke: characteristics, associated factors, and relationship with function. *Neurorehabil. Neural Repair*, 2008, vol. 22, no. 2, pp. 166–172. DOI: <https://doi.org/10.1177/1545968307305523>
- [14] Kessner S.S., Schlemm E., Cheng B. et al. Somatosensory deficits after ischemic stroke: time course and association with infarct location. *Stroke*, 2019, vol. 50, no. 5, pp. 1116–1123. DOI: <https://doi.org/10.1161/STROKEAHA.118.023750>
- [15] Tarasenko I.A., P'yavchenko G.A., Mityaeva E.V. Tactile sensitivity of the skin of fingers in the age aspect and for some diseases. *Zhurnal nauchnykh statey zdorov'ye i obrazovanie v XXI veke* [The Journal of Scientific Articles Health and Education Millennium], 2012, vol. 14, no. 2, pp. 157–158 (in Russ.).
- [16] Rinderknecht M.D. et al. Automated and quantitative assessment of tactile mislocalization after stroke. *Front. Neurol.*, 2019, vol. 10, art. 593. DOI: <https://doi.org/10.3389/fneur.2019.00593>
- [17] Neuron-Spectrum-5. *neurosoft.com: website*. URL: <https://neurosoft.com/en/catalog/eeg/neuron-spectrum-5/> (accessed: 15.10.2021).
- [18] The installation of the product. *platan.ru: website*. URL: https://doc.platan.ru/_pdf/ec2009_QX.pdf (accessed: 15.10.2021).
- [19] Mao Y. et al. The influence of visual attention on the performance of a novel tactile p300 brain-computer interface with cheeks-stim paradigm. *Int. J. Neural Syst.*, 2021, vol. 31, no. 4, art. 2150004. DOI: <https://doi.org/10.1142/s0129065721500040>

Gremitsky I.S. — Student, Department of Biomedical Engineering Systems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Kuleshov D.Yu. — Student, Department of Medical and Technical Information Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Application of fingers vibrotactile stimulation in the brain — computer interface ...

Popova V.A. — Student, Department of Medical and Technical Information Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific technologies — Dmitriev A.N., Senior Lecturer, Department of Medical and Technical Information Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Gremitsky I.S., Kuleshov D.Yu., Popova V.A. Application of fingers vibrotactile stimulation in the brain — computer interface for the rehabilitation of post-stroke patients. *Politekhniicheskiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2021, no. 11(64). <http://dx.doi.org/11.18698/2541-8009-2021-11-746.html> (in Russ.).