# Разработка и апробация стимулятора пассивных движений для нейрореабилитации на основе интерфейсов мозг-компьютер

И. П. Ганин*, И. Б. Бейлина‡, А. Н. Васильев§, А. Я. Каплан¶

Разработан стимулятор пассивных движений пальца, апробированный у 24 здоровых испытуемых. В отдельных режимах активное внимание по сравнению с отвлечённым сопровождалось увеличением амплитуды P300, точности классификации вызванных потенциалов и десинхронизации мю-ритма. Рассматривается развитие устройства и обратной связи по ЭЭГ для сенсомоторного тренинга и нейрореабилитации.

**Ключевые слова:** пассивные движения, соматосенсорные вызванные потенциалы, активное внимание, P300, мю-ритм, интерфейс мозг-компьютер, нейрореабилитация.

## 1. Введение

Электрическая стимуляция пальцев может использоваться в интерфейсах мозг-компьютер (ИМК) на волне P300 [1], а пассивные движения рассматриваются как средство вовлечения сенсомоторной системы в ИМК на основе представления движений [2].

*Ганин Илья Петрович* — канд. биол. наук, ст. науч. сотр., МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия, e-mail: ipganin@mail.ru, ORCID: 0000-0002-7422-925X.

*Ganin Ilya Petrovich* — Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia.

‡*Бейлина Ирина Борисовна* — студент магистратуры, МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия, e-mail: irinaborisovna2004@gmail.com.

*Beylina Irina Borisovna* — Master's student, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia.

§*Васильев Анатолий Николаевич* — канд. биол. наук, ст. науч. сотр., МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия, e-mail: a.n.vasilev.home@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1573-0730.

*Vasilyev Anatoly Nikolaevich* — Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia.

¶*Каплан Александр Яковлевич* — д-р биол. наук, профессор, зав. лабораторией, МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия, e-mail: akaplan@mail.ru, ORCID: 0000-0002-3912-4639.

*Kaplan Alexander Yakovlevich* — Dr. Sci. (Biol.), Professor, Head of Laboratory, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia.

Опубликовано на условиях лицензии CC-BY 4.0
Published under CC-BY 4.0

Пассивные движения создают проприоцептивную афферентацию без произвольного двигательного акта. Сочетание стимуляции с различением целевых стимулов позволяет исследовать взаимодействие сенсорного притока и направленного внимания.

Предполагается, что распознавание целевых движений включает сопоставление ощущений с сенсорным образом в рабочей памяти, а внимание и кинестетическое или сенсорное представление дополнительно вовлекают сенсомоторные контуры мозга. Обратная связь по ЭЭГ могла бы поддерживать тренинг этих процессов; гипотеза требует проверки.

На выполненном этапе решалась задача создания стимулятора и оценки того, как активное внимание к различающимся по физическим параметрам движениям влияет на вызванные потенциалы (ВП), их классификацию и ритмическую активность.

## 2. Стимулятор и экспериментальные протоколы

Стимулятор содержит два электромагнита, управляемых Arduino Nano. Их взаимодействие с неодимовым магнитом на накладном ногте вызывает сгибание или разгибание указательного пальца правой руки. Слабые стимулы создавались одним электромагнитом, сильные — двумя. Электромагниты работали без слышимого звука. Положение пальца подбирали индивидуально для субъективного различения воздействий; механические параметры не измеряли. Предъявление стимулов управлялось приложением на основе программного фреймворка Resonance.

Участвовали 24 здоровых праворуких добровольца 18–24 лет. В блоке «Пассивное внимание» предъявляли однотипные стимулы, в блоках «Отвлеченное внимание» и «Активное внимание» — редкие и частые стимулы в соотношении 1:3, в пяти режимах: редкий сильный, слабый, сгибательный, разгибательный или длинный стимул, по 200 стимулов в записи. Интервал между началами стимулов составлял 700 мс, длительность — 75 мс, длинного редкого стимула — 150 мс.

При отвлечённом внимании испытуемые подсчитывали геометрические элементы изображения на экране, при активном — подсчитывали целевые стимулы.

ВП классифицировали офлайн линейным дискриминантом Фишера с проверкой по одной исключаемой эпохе и балансировкой классов при расчёте точности. Анализировали также P300 и изменения мощности ЭЭГ в диапазоне 8–12 Гц. Фиксированный порядок блоков не исключает его влияния на различия между условиями внимания.

## 3. Результаты апробации

Активное внимание сопровождалось значимым увеличением амплитуды P300 по сравнению с отвлечённым вниманием в обоих режимах различения по силе, при редком сгибании и при редком длинном стимуле. Для P300 и точности классификации применяли двухфакторный дисперсионный анализ с поправкой Шидака, для режима различения длительности — парный t-тест.

Точность классификации при активном внимании значимо превышала показатели при отвлечённом во всех режимах, кроме редкого сгибания, и достигала в среднем около 70% при редком сильном стимуле. Результат относится к офлайн-анализу физически различающихся стимулов; вклад внимания оценивался сопоставлением блоков с разными инструкциями.

По правилу 20%-го усечения крайних значений мощности исключены четыре испытуемых; во всех режимах анализировали одну выборку ($n = 20$). Значимое усиление десинхронизации мю-ритма при активном внимании по сравнению с отвлечённым выявлено при редком слабом стимуле (сравнение с поправкой Шидака, $p < 0{,}01$).

## 4. Развитие устройства и ИМК-обратной связи

Планируются повышение эргономичности, увеличение числа стимулируемых пальцев и испытания новой версии с регистрацией отклонения пальца при варьировании параметров стимуляции.

Обратную связь предполагается строить на классификации ВП по принципу ИМК-P300 и/или изменениях мю-ритма и другой ритмической активности. Задания могут включать внимание к редким движениям и последующее кинестетическое или сенсорное представление. Предполагается, что обратная связь поможет изменять стратегию внимания или представления ощущений.

Протоколы и воспроизводимость маркеров предстоит исследовать на здоровых испытуемых; позднее возможно привлечение пациентов с нарушениями движений кисти, в том числе после инсульта.

Разработка стимулятора и апробация протоколов создают основу для поиска нейрофизиологических маркеров восприятия пассивных движений и разработки ИМК с обратной связью для сенсомоторного тренинга.

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М. В. Ломоносова № 121032300070-1.

## Список литературы

[1] J. Li, J. Pu, H. Cui, X. Xie, S. Xu, T. Li, Y. Hu, "An Online P300 Brain–Computer Interface Based on Tactile Selective Attention of Somatosensory Electrical Stimulation", *Journal of Medical and Biological Engineering*, **39** (2019), 732–738. DOI: 10.1007/s40846-018-0459-x.

[2] M. Arvaneh, C. Guan, K. K. Ang et al., "Facilitating motor imagery-based brain–computer interface for stroke patients using passive movement", *Neural Computing and Applications*, **28** (2017), 3259–3272. DOI: 10.1007/s00521-016-2234-7 .

Статья поступила 23 октября 2026 г.

### Development and testing of a passive movement stimulator for neurorehabilitation based on brain–computer interfaces

I. P. Ganin, I. B. Beylina, A. N. Vasilyev, A. Y. Kaplan

A passive finger movement stimulator was developed and tested in 24 healthy participants. In specific stimulation conditions, active attention was associated with greater P300 amplitude, higher evoked potential classification accuracy, and stronger mu-rhythm desynchronization than distracted attention. Further development of the device and EEG-based feedback for sensorimotor training and neurorehabilitation is discussed.

**Keywords:** passive movements, somatosensory evoked potentials, active attention, P300, mu rhythm, brain–computer interface, neurorehabilitation.

## References

[1] J. Li, J. Pu, H. Cui, X. Xie, S. Xu, T. Li, Y. Hu, "An Online P300 Brain–Computer Interface Based on Tactile Selective Attention of Somatosensory Electrical Stimulation", *Journal of Medical and Biological Engineering*, **39** (2019), 732–738. DOI: 10.1007/s40846-018-0459-x.

[2] M. Arvaneh, C. Guan, K. K. Ang et al., "Facilitating motor imagery-based brain–computer interface for stroke patients using passive movement", *Neural Computing and Applications*, **28** (2017), 3259–3272. DOI: 10.1007/s00521-016-2234-7.

Received on October 23, 2026