

УСТРАНЕНИЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ РАССТРОЙСТВ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРЯМЫХ И ОБРАТНЫХ СВЯЗЕЙ В СИСТЕМЕ “ЧЕЛОВЕК–МАШИНА”

А.И. Федотчев¹, О Сан Чжун², С.Г. Матрусов³

¹ Институт биофизики клетки РАН, Пущино

² Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва

³ Больница Пущинского научного центра РАН, Пущино

Представлен подход к устранению профессиональных болевых и стрессогенных функциональных расстройств у человека-оператора, основанный на использовании прямых и обратных взаимодействий в системе “человек–машина”. Подход предполагает организацию терапевтических процедур, при которой взаимодействие между пациентом и лечебным прибором опосредуется управляющими сигналами обратной связи от эндогенных ритмов самого пациента – ритма дыхания и ритмов электроэнцефалограммы (ЭЭГ). Приведены результаты экспериментального тестирования данного подхода при подавлении болевых синдромов электрическими воздействиями, управляемыми ритмом дыхания пациента, а также при устранении стресс-вызванных функциональных нарушений аудио-визуальными воздействиями, управляемыми двойной обратной связью от ЭЭГ осцилляторов субъекта.

Ключевые слова: *надежность человека-оператора, функциональные нарушения, коррекция, биоуправление с обратной связью, эндогенные ритмы организма, электроэнцефалограмма (ЭЭГ), узкочастотные ЭЭГ осцилляторы*

Обеспечение надежности человека-оператора при его взаимодействии с разнообразными техническими системами является актуальной задачей современных биомедицинских исследований. Главными негативными следствиями взаимодействий в системах “человек–машина”, снижающими надежность человека-оператора и требующими своевременного лечения, являются формирование профессиональных болевых синдромов и развитие производственного стресса [1]. Фармакологическая коррекция таких патологических состояний с неизбежностью ухудшает когнитивные функции оператора любого уровня и часто сопровождается привыканием и побочными эффектами [2], что делает медикаментозный путь терапии бесперспективным. Поэтому крайне востребованными являются нелекарственные

средства системного воздействия, направленные на своевременное восстановление организма до оптимального состояния.

В данной работе для эффективной нелекарственной коррекции болевых синдромов и стрессогенных состояний предлагается использовать позитивный аспект взаимодействий в системе “человек–машина”. В частности, анализируется возможность такой организации терапевтических процедур, при которой взаимодействие между пациентом и лечебным прибором опосредуется управляющими сигналами обратной связи от эндогенных ритмов самого пациента – ритма дыхания и ритмов электроэнцефалограммы (ЭЭГ). Ниже представлены результаты экспериментального тестирования предложенного подхода в двух сериях исследований.

Эксперимент 1

Высокая распространенность острых и хронических профессиональных болевых синдромов, их тяжелое гуманитарное, социальное и экономическое бремя способствовали тому, что в медицине сформировалось новое актуальное направление – медицина боли, которое включает широкий спектр вопросов: от механизмов формирования болевых синдромов и их диагностики до современных подходов к лекарственной и нелекарственной терапии боли [3]. Широко распространенным средством нелекарственного обезболивания является метод транскутанной электронейростимуляции (ТЭНС). Данный метод заключается в стимуляции периферических нервов короткими электрическими импульсами, прикладываемыми к интактной поверхности кожи. В числе явных достоинств метода ТЭНС можно назвать его неинвазивность, простоту применения, портативность реализующих метод устройств и возможность их самостоятельного использования пациентом. Однако эффективность существующих вариантов ТЭНС ограничивается феноменом привыкания, при котором мозг отфильтровывает постоянно повторяющиеся стимулы [4].

Для устранения привыкания и усиления возбудимости заинтересованных структур мозга при проведении процедур ТЭНС нами предложено использовать прямые и обратные взаимодействия в системе “человек–машина” [5]. Это достигается путем организации такого взаимодействия между пациентом и прибором, при котором параметры стимулирующего тока автоматически управляются эндогенным ритмом дыхания пациента благодаря включению в цепь нейростимулятора резистивного датчика дыхания (рис. 1).

Экспериментальное тестирование описанного подхода проведено с участием 11 пациентов поликлиники, которые обратились к врачу с жалобами на профессиональные болевые синдромы различной этиологии (головные боли напряжения – 4 пациента, боли в области шеи – 4 пациента и боли в кисти – 3 пациента) и дали добровольное согласие на участие в эксперименте. Перед проведением и по окончании процедуры электронейростимуляции у каждого пациента регистрировали уровень артериального давления и пульс, а также оценивали уровень и особенности болевых ощущений, используя стандартный тест субъективной оцен-

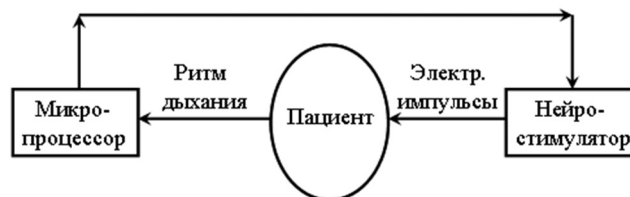


Рис. 1. Схема обезболивающей электронейростимуляции, управляемой дыханием пациента

ки боли по 10-балльной шкале [6]. После записи исходных электрографических показателей (ЭЭГ, ЭКГ, ЭМГ, КГР) осуществляли электрическую стимуляцию в течение 15 мин с помощью серийного транскутанного электронейростимулятора ЭТНС-100-01 с частотой электрических импульсов 4 Гц и максимальным током 10 мА. Амплитуда электрических воздействий модулировалась собственным ритмом дыхания пациента в пределах 0,1–10 мА благодаря включению в цепь стимулятора сигналов обратной связи от периметрического резистивного датчика дыхания, который фиксировался на груди испытуемого.

Установлено, что под влиянием ТЭНС, управляемой ритмом дыхания пациента, наиболее существенные сдвиги отмечаются в отношении субъективных оценок уровня болевых ощущений. Если до воздействия оценка уровня боли составляла в среднем $4,5 \pm 0,2$ балла, то после процедуры обезболивания она сократилась почти наполовину и составила в среднем $2,8 \pm 0,2$ балла ($p < 0,001$). При этом отмечен также значимый ($p < 0,05$) рост оценок самочувствия. Существенный эффект стимуляции проявился и в объективных электрофизиологических показателях. Так, отмечен рост мощности альфа-ритма ЭЭГ и изменение характера дыхания, которое стало реже, но с достоверно возросшей амплитудой. Важно подчеркнуть, что при традиционных видах ТЭНС подобные эффекты после однократного воздействия, как правило, не наблюдаются, а достигаются в результате нескольких процедур.

Эксперимент 2

Недавние исследования показывают, что негативное воздействие психосоциальных стресс-факторов становится главной причиной производственной заболеваемости [7]. Для

своевременного устранения стресс-вызванных расстройств наиболее разработанной к настоящему времени является технология адаптивного биоуправления функциями с обратной связью (БОС) по электроэнцефалограмме (ЭЭГ). Технология ЭЭГ-БОС представляет собой комплекс процедур, при которых человеку посредством различных технических средств обратной связи подается информация о текущем состоянии биотоков его мозга. В соответствии с мощностью определенного ЭЭГ ритма пациенту предъявляют звуковые (например, музыкальные) или световые (вспышки лампочки) сигналы обратной связи. Цель метода – научить человека “силой воли” регулировать параметры собственной ЭЭГ для достижения требуемых эффектов, ориентируясь на воспринимаемые свето-звуковые воздействия [8]. С помощью ЭЭГ-БОС оказывается возможным корректировать состояния стресса [9] и тревожности [10], а также осуществлять лечение широкого спектра функциональных нарушений центральной нервной системы [11].

Несмотря на явные достоинства и широкое распространение, общепринятые методы ЭЭГ-БОС из-за необходимости осознанного восприятия сигналов обратной связи имеют существенное ограничение. Оно связано с наличием определенного порога между сознанием субъекта и центральными механизмами регуляции, который для многих людей затрудняет освоение навыка направленного контроля физиологических состояний и требует длительного (до 20 сеансов) обучения [12]. Кроме того, серьезным недостатком метода, значительно ограничивающим его эффективность, является использование заранее заданных традиционных ЭЭГ ритмов [13]. Последние на самом деле представляют собой композицию из нескольких узконастроенных и динамичных ЭЭГ осцилляторов с разными функциональными характеристиками [14].

Для нелекарственной коррекции стресс-вызванных функциональных расстройств разработана оригинальная технология резонансного биоуправления с двойной обратной связью от ЭЭГ осцилляторов субъекта [15], в которой упомянутые ограничения существующих методов ЭЭГ биоуправления преодолеваются за счет двух уникальных нововведений. Во-первых, в ней используются не заранее заданные излишне широкополосные (4–6 Гц) традиционные ЭЭГ ритмы, а выявляемые в реальном времени, характерные и значимые для

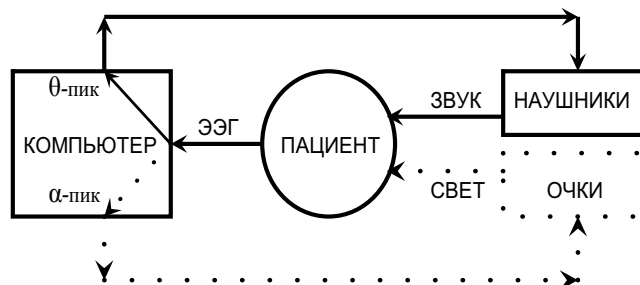


Рис. 2. Схема технологии резонансного биоуправления с двойной обратной связью от ЭЭГ осцилляторов субъекта

индивида узкочастотные (0,4–0,6 Гц) ЭЭГ осцилляторы. Во-вторых, в ней обучение человека саморегуляции своего состояния облегчается за счет введения дополнительного контура обратной связи, работающего автоматически одновременно с контуром осознанного адаптивного биоуправления (рис. 2).

Первый контур (сплошные линии) является традиционным контуром ЭЭГ биоуправления. Однако в данном случае компьютер выделяет доминирующий у пациента узкочастотный ЭЭГ-осциллятор из тета-диапазона (4–8 Гц) и генерирует на его основе звуковые сигналы обратной связи, подаваемые пациенту через наушники и служащие ему ориентиром для подавления этих компонентов собственной ЭЭГ.

Второй контур (пунктирные линии) является дополнительным контуром ритмической стимуляции, осуществляемой с помощью фотостимуляционных очков, параметры которой автоматически настраиваются компьютером на частоту доминирующего у пациента узкочастотного альфа ЭЭГ-осциллятора с целью его резонансной активации.

Таким образом, в данном методе узкочастотные ЭЭГ-осцилляторы, характерные для каждого пациента и выявляемые у него в реальном времени, одновременно используются в двух независимых контурах обратной связи. Благодаря этому метод резонансного биоуправления с двойной обратной связью от ЭЭГ осцилляторов обеспечивает помощь испытуемому в освоении навыка регуляции собственных биопотенциалов. Кроме того, в результате введения дополнительного контура устраняется известный недостаток традиционных подходов биоуправления, заключающийся в зависимо-

сти эффективности лечебных процедур от уровня мотивации субъекта [9].

Экспериментальное тестирование описанной технологии проведено с участием 18 сотрудников Пущинского научного центра РАН, обратившихся в кабинет психологической разгрузки по поводу состояний психоэмоционального напряжения и стресса и добровольно согласившихся на участие в эксперименте. Перед каждым обследованием для оценки психофизиологического состояния пациента проводился его краткий опрос и начальное тестирование с помощью теста САН, в котором испытуемые дают оценку текущего самочувствия, активности и настроения [16]. Затем устанавливали ЭЭГ-датчики (активный электрод в отведении Cz, референтный и заземляющий – на мочках ушей). Испытуемый надевал наушники (уровень звука 0–40 дБ, частота 100–2000 Гц) и очки, в затемненные линзы которых были вмонтированы красные светодиоды с мощностью, не превышающей 100 мВт.

Испытуемых просили сидеть спокойно с закрытыми глазами в течение всей процедуры. Им давали задание при появлении звука в наушниках добиваться уменьшения его уровня и высоты, не обращая внимания на световые воздействия. Пациентам сообщали, что текущие значения высоты и интенсивности звуков находятся в точном соответствии с выраженностью ее/его “патологических” ЭЭГ-компонентов, так что лечебные эффекты могут быть достигнуты с помощью подавления этих звуков. Испытуемым ничего не говорили о световой стимуляции, так как этот дополнительный контур обратной связи работает автоматически, без осознания пациентом.

Эксперимент начинался с 30-секундной записи фоновой ЭЭГ, в ходе которой с помощью ранее разработанной [17] модификации динамического спектрального анализа, основанного на быстрых преобразованиях Фурье, определялись доминирующие у данного испытуемого узкополосные (0,4–0,6 Гц) компоненты в диапазонах ЭЭГ тета (4–8 Гц) и альфа (8–13 Гц). Затем на 10 мин включался рабочий режим, где текущая амплитуда выявленного тета-осциллятора преобразовывалась в звуковые сигналы обратной связи, а текущая амплитуда альфа-осциллятора использовалась для модуляции интенсивности синусоидальных световых сигналов, генерируемых с частотой этого осциллятора.

По окончании эксперимента испытуемых расспрашивали об отмеченных эффектах, а также повторно проводили самооценку состояния с помощью теста САН. Статистическую обработку результатов проводили по критерию t Стьюдента с помощью пакета программ Origin 6.0.

Установлено, что под влиянием примененных аудио-визуальных воздействий отмечаются определенные перестройки в спектральной структуре ЭЭГ, которые сопровождаются изменениями в состоянии обследуемых. Так, в результате лечебных процедур выраженность тета-ритма ЭЭГ несколько снижается относительно начального уровня, в среднем с $20,5 \pm 1,3$ до $19,7 \pm 1,2$ мкВ/Гц, тогда как уровень альфа-ритма ЭЭГ достоверно ($p < 0,01$) возрастает с $68,4 \pm 1,7$ до $77,3 \pm 1,8$ мкВ/Гц. Общее количество успешных проб с увеличением выраженности альфа-диапазона ЭЭГ составило $86,9 \pm 5,1$ %.

Под влиянием лечебных воздействий закономерные изменения произошли также в субъективных характеристиках состояния. Значимые ($p < 0,05$) позитивные сдвиги отмечены для оценок самочувствия и настроения испытуемых.

Важно подчеркнуть, что формирование наблюдаемых позитивных эффектов происходило в данном исследовании существенно быстрее, чем в ранее предпринятой работе [18] с использованием традиционного метода ЭЭГ биоуправления. В настоящем исследовании для проявления выявленных эффектов потребовалось достоверно ($p < 0,01$) меньшее ($2,8 \pm 0,3$) количество лечебных процедур, чем в ранее проделанной работе ($4,7 \pm 0,5$).

Отмеченное увеличение эффективности ЭЭГ-БОС процедур может быть связано с главными достоинствами предложенного подхода:

- ✓ ориентацией на природные механизмы регуляции функций;
- ✓ использованием текущих значений адекватно подобранных и значимых для индивида биоэлектрических характеристик его эндогенных ритмов в виде узкополосных ЭЭГ осцилляторов субъекта;
- ✓ одновременным использованием упомянутых характеристик в двух независимых контурах обратной связи – для осознанного биоуправления и для автоматической, без осознания субъектом, модуляции параметров сенсорных воздействий.

Заключение

Таким образом, автоматическое управление лечебными воздействиями сигналами обратной связи от ритма дыхания и биопотенциалов мозга пациента представляется перспективным подходом к нелекарственной коррекции функциональных расстройств. Разработанный метод может найти применение в реабилитационных мероприятиях широкого профиля и при коррекции разнообразных функциональных расстройств, возникающих у человека-оператора в процессе профессиональной деятельности. Возможными сферами применения разработанного подхода могут быть психология труда, инженерная психология, эргономика, а также коррекция и реабилитация состояния диспетчеров и операторов в армии, на транспорте, в авиации, на атомных и тепловых станциях и т.д.

Работа поддержана Российским Гуманитарным научным фондом, грант РГНФ № 12-06-00198.

Список литературы

1. *Genaidy A.M., Sequeira R., Rinder M.M. et al.* Determinants of business sustainability: an ergonomics perspective. // *Ergonomics*, 2009, **52**, No. 3, P. 273–301.
2. *Wood S., Sage J.R., Shuman T., Anagnostaras S.G.* Psychostimulants and cognition: a continuum of behavioral and cognitive activation. // *Pharmacol. Rev.*, 2013, **66**, No. 1, P. 193–221.
3. *Яхно Н.Н., Кукушкин М.Л.* Хроническая боль: медико-биологические и социально-экономические аспекты. // *Вестник РАМН*, 2012, № 9, С. 54–58.
4. *DeSantana J.M., Walsh D.M., Vance C. et al.* Effectiveness of TENS for treatment of hyperalgesia and pain. // *Curr. Rheumatol. Rep.*, 2008, **10**, No. 6, P. 492–499.
5. *Федотчев А.И.* Автоматическая модуляция лечебных сенсорных воздействий эндогенными ритмическими процессами пациента. // *Технологии живых систем*, 2009, **6**, № 5, С. 69–74.
6. *Brugnoli M.P., Brugnoli A., Norsa A.* Nonpharmacological and noninvasive management in pain: physical and psychological modalities. // *Italian Association for the Study of Pain Therapy: La Grafica Editrice*, 2005, 115 pp.
7. *Dal Cason D.L.* Ergonomic principles and tools for best interdisciplinary psycho-physical stress prevention. // *Work*, 2012, **41**, Suppl. 1, P. 3920–3922.
8. *Hammond D.C.* What is neurofeedback: an update. // *J. Neurotherapy*, 2011, **15**, No. 4, P. 305–336.
9. *McCraty R., Atkinson M., Lipsenthal L., Arguelles L.* New hope for correctional officers: an innovative program for reducing stress and health risks. // *Appl. Psychophysiol. Biofeedback*, 2009, **34**, No. 4, P. 251–272.
10. *Bhat P.* Efficacy of Alfa EEG wave biofeedback in the management of anxiety. // *Ind. Psychiatry J.*, 2010, **19**, No. 2, P. 111–114.
11. *Larsen S., Sherlin L.* Neurofeedback: an emerging technology for treating central nervous system dysregulation. // *Psychiatr. Clin. North Amer.*, 2013, **36**, No. 1. P. 163–168.
12. *Федотчев А.И., Бондарь А.Т., Ким Е.В.* Адаптивное биоуправление с обратной связью и контроль функционального состояния человека. // *Успехи физиол. наук*, 2002, **33**, № 3, С. 79–96.
13. *Базанова О.М., Афтанас Л.И.* Использование индивидуальных характеристик ЭЭГ для повышения эффективности нейробиоуправления. // *Журн. неврологии и психиатрии*, 2006, **106**, № 2, С. 31–36.
14. *Федотчев А.И., Бондарь А.Т., Акоев И.Г.* Ритмическая структура ЭЭГ человека: современное состояние и тенденции исследований. // *Успехи физиол. наук*, 2000, **31**, № 3, С. 39–53.
15. *Федотчев А.И., Бондарь А.Т.* Метод двойной обратной связи от ЭЭГ осцилляторов пациента для коррекции стресс-вызванных функциональных расстройств. // *Журн. высшей нервной деятельности*, 2008, **58**, № 2, С. 210–215.
16. *Доскин В.А., Лаврентьева Н.А., Мирошников М.Н., Шарай В.В.* Тест дифференцированной самооценки функционального состояния. // *Вопросы психологии*, 1973, № 6, С. 141–145.
17. *Salansky N., Fedotchev A., Bondar A.* High frequency resolution EEG. // *Amer. J. EEG Technol.*, 1995, **35**, No. 2, P. 98–112.
18. *Fedotchev A.I., Kim E.V.* Correction of functional disturbances during pregnancy by the method of adaptive EEG biofeedback training. // *Human Physiology*, 2006, **32**, No. 6, P. 652–656.

ELIMINATION OF OCCUPATIONAL FUNCTIONAL DISORDERS THROUGH THE USE OF FORWARD AND BACKWARD LINKAGES IN THE “MAN-MACHINE” SYSTEM

A.I. Fedotchev¹, Oh Sang Joon², S.G. Matrusov³

¹ Institute of Cell Biophysics of RAS, Pushchino, Russia

² N.E. Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

³ Hospital of Pushchino Scientific Center of RAS, Pushchino, Russia

An approach to eliminate pain and stress-induced professional functional disorders of the human operator is presented. It is based on the use of forward and backward interactions in the “man-machine” system. Approach involves organizing of therapeutic procedures, in which the interaction between the patient and medical device is mediated by feedback signals from the patient's own endogenous rhythms – breathing rate and rhythms of the electroencephalogram (EEG). Positive results of clinic-like testing of this approach are described. In the first experiment it was the suppression of pain syndromes via electrical stimulation, controlled by breathing rate of the patient. In the second experiment it was eliminating the stress-induced disturbances via audio-visual stimulation, controlled by double feedback from EEG oscillators of the subject.

Key words: reliability of a human operator, functional disorders, correction, biofeedback, endogenous rhythms, electroencephalogram (EEG), narrow-band EEG oscillators

E-mail: fedotchev@mail.ru