

СТАТЬИ

УДК 57.01:57.03:57.056

**МУЛЬТИПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ  
И САМООРГАНИЗАЦИЯ НЕЙРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

<sup>1</sup>Аллахвердиев А.Р., <sup>2</sup>Дадашев Ф.Г., <sup>1</sup>Дадашева К.Г.

<sup>1</sup>*Институт физиологии им. А.И. Караева НАНА, Баку;*

<sup>2</sup>*Национальная Академия авиации, Баку, e-mail: dfh54@rambler.ru*

Статья посвящена обоснованию и перспективности применения мультипараметрической биологической обратной связи для исследования самоорганизации нейродинамических процессов. Выбор характеристик вероятностно-детерминационных взаимоотношений основных ритмов мозга в качестве управляемых параметров способствует выявлению общих и частных закономерностей самоорганизаций, связанных с функциональной пластичностью нейродинамических процессов. Задача реализации мультипараметрического управления нейродинамическими процессами представляется в виде решения многокритериальной задачи в биотехнической системе, аттрактором которой является «желаемое состояние» в многомерном пространстве, с координатами из выбранных информативно-системообразующих показателей. Реализация процесса самоорганизации в биотехнической системе происходит с применением принципов векторной оптимизации, где производится поэтапное снятие неопределенностей адаптивными алгоритмами (на компьютере, как техническом компоненте биотехнической системы). Адаптивный алгоритм реализации поэтапного приближения к «желаемому состоянию» позволит максимально раскрыть резервы мозга, что связано с функциональной пластичностью вероятностно-детерминационных взаимоотношений дискретно-информативных событий ЭЭГ (по С.И. Сороко), в рамках информативности выбранных параметров нейродинамических процессов. Использование синергетических принципов, как при проектировании, так и при анализе самоорганизации нейродинамических процессов при функционировании биотехнической системы позволит раскрыть индивидуальную траекторию в процессе самоуправления. Представленный методологический подход основан на научных результатах последователей школы экологической физиологии Д.А. Бирюкова.

**Ключевые слова:** функциональное состояние человека, мультипараметрическая БОС (биологическая обратная связь) – методика, синергетические принципы, биотехническая система

**MULTIPARAMETRIC FEEDBACK AND SELF-ORGANIZATION  
OF NEURODYNAMIC PROCESSES**

<sup>1</sup>Allakhverdiev A.R., <sup>2</sup>Dadashev F.G., <sup>1</sup>Dadasheva K.G.

<sup>1</sup>*Institute of Physiology n.a. A.I. Karaev, Baku;*

<sup>2</sup>*National Aviation Academy, Baku, e-mail: dfh54@rambler.ru*

The article is devoted to the rationale and prospects for the use of multiparameter biofeedback for studying the self-organization of neurodynamic processes. The choice of the characteristics of probabilistic-deterministic relationships of the main rhythms of the brain as controllable parameters, helps to identify common and particular patterns of self-organization related to the functional plasticity of neurodynamic processes. The task of implementing multiparameter control of neurodynamic processes is represented as a solution of a multicriteria problem in a biotechnical system, whose attractor is the «desired state» in a multidimensional space, with coordinates from selected informative and system-forming indicators. The implementation of the process of self-organization in the biotechnical system takes place using the principles of vector optimization, where a gradual removal of uncertainties by adaptive algorithms (on a computer as a technical component of a biotechnical system) is performed. An adaptive algorithm for the implementation of a phased approach to the «desired state» will maximize the brain reserves, which is associated with the functional plasticity of probabilistic-deterministic relationships of discrete-informative EEG (Electroencephalography) events (according to S.I. Soroko), within the informativeness of selected parameters of neurodynamic processes. The use of synergistic principles, both in the design and in the analysis of the self-organization of neurodynamic processes in the functioning of the biotechnical system, will make it possible to reveal the individual trajectory in the process of self-government. The presented methodological approach is based on the scientific results of followers of the School of Environmental Physiology named after D.A. Biryukov.

**Keywords:** human functional state, multiparametrical BioFeedBack, synergistic principles, biotechnical system

Метод биологической обратной связи (БОС), в русскоязычной литературе называемый биоуправлением (biofeedback), впервые был использован Н. Мюллером для исследования возможности висцерального обучения посредством обратной связи. Данный метод на начальном этапе применялся для изучения фундаментальных физиологических механизмов организма и в дальнейшем охватывал широкий круг

прикладных областей, в основном в клинической и в различной психокоррекционной практике. Однако, несмотря на постоянный рост в мире числа работ по проблемам практического применения методов БОС при лечении больных, он всё же не получил широкого распространения в теоретических и фундаментальных исследованиях [1].

На начальном этапе использования БОС-методики в качестве обратной связи

были выбраны отдельные параметры, такие как амплитуда  $\alpha$ -ритма мозга, ЧСС и т.д. Эти параметры в основном рассматривались как отражение отдельных функций организма. Следующий этап развития биоуправления характеризовался использованием мультипараметрической БОС.

Используемые типы мультипараметрической БОС-методики можно классифицировать по различным критериям. Например, по источникам, т.е. по тому, откуда берутся параметры. В первом случае в качестве параметра можно выбрать источник информации с одной системы, например соотношение ритмов ЭЭГ, совокупность отдельных частот variability сердечного ритма и т.д. Во втором случае отдельные параметры соответствуют различным системам организма. Например, ЭЭГ – как показатель центральной, а ЧСС – показатель вегетативной нервной системы.

По типам выдачи обратной связи выделяются одноканальные и многоканальные. К одноканальным относятся те типы мультипараметрической БОС-методики, которые в качестве обратной связи выдают фиксированные соотношения, например отношение интегрального показателя тета-ритма к альфа-ритму мозга. В качестве примера многоканального типа может быть представлена двухканальная информация (температура тела и ЧСС) в виде точки на дисплее в качестве обратной связи. Используя 3D программирование, можно представить информацию обратной связи в виде образа в пространстве. В последнее время стало популярным представление БОС в игровом виде, которое дает возможность представить большое количество параметров, используя различные элементы визуальной динамики образов. Алгоритмами управления могут быть типы мультипараметрической БОС-методики с неадаптивным и адаптивным алгоритмом. Кроме того, адаптивный алгоритм тоже подразделяется на два типа: параметрический и функциональный. Исследование самоорганизации нейродинамических процессов (НП), как основа всех необходимых важных управляющих функций организмов, является предметом различных областей нейронаук. Последователями одной из ведущих школ экологической физиологии Д.А. Бирюкова являются Н.Н. Василевский, С.И. Сороко и др. [2], которые комплексно исследовали нейродинамические основы процессов самоорганизации при адаптации к экстремальным факторам внешней среды. При этом особое внимание было уделено функциональной пластичности НП с использованием метода БОС.

Цель исследования: изучение возможности применения адаптивного алгоритма мультипараметрической БОС к исследованию самоорганизации нейродинамических процессов, посредством снятия неопределенностей связанных с индивидуальными качествами.

### Материалы и методы исследования

В предложенном нами мультипараметрическом БОС-подходе, в качестве совокупности управляемых параметров выбраны показатели биоритмологической организации основных ритмов мозга на основе концепцию школы Василевского – Сороко о вероятностно-детерминационной структуре НП.

При этом для формализации нейродинамического состояния в реальном масштабе времени вычисляется стохастическая матрица  $P = (p_{ij})$  (матрица условных вероятностей чередования дискретно-информативных событий ЭЭГ), где в качестве цепи событий выбираются отдельные доминирующие ритмы ( $\beta$ ,  $\alpha$ ,  $\theta$  и  $\delta$ ), определяемые последовательностями 0-пересечений ЭЭГ. Целевая функция биотехнической системы (БТС), обеспечивающая мультипараметрическую БОС, формируется из элементов матрицы  $P$ . Для определения интегральных показателей динамических характеристик НП как при предобработке, так и при оценке сценария после проведения БОС-тренинга нами предложен кортеж показателей детерминации НП.  $D(P) := \langle D, D_1, D_2, D_3, D_4 \rangle$ , здесь  $D$  – степень общей детерминации, которая определяется по формуле

$$D = \min \{k: [P^k - P^{k+1}] < \varepsilon\}, \quad (*)$$

где  $\varepsilon > 0$  – выбираемая пользователем точность, когда  $P^k$  степень стохастической матрицы  $P$  становится стационарной. С помощью  $D_i$  определяется детерминирующая роль в общей организации  $i$ -го компонента. Она вычисляется аналогично по формуле (\*), над матрицей из которой исключены  $i$ -я строка и столбец матрицы. О детерминирующей роли  $i$ -го компонента в общей биоритмологической организации можно судить по разности  $(D - D_i)$ , так как если он отрицателен, то  $i$ -й компонент играет детерминирующую роль, если положителен, играет дезорганизирующую роль, а если равен нулю, то нейтрален в организационном смысле. Здесь абсолютное значение разности  $(D - D_i)$  отражает степень организационной роли. К системным показателям можно отнести кортеж показателей потоковых характеристик отдельных элементов в общей биоритмологической организации НП  $F(P) := \langle F_1, F_2, F_3, F_4 \rangle$ , где  $F_j = 1 - \sum p_{ij}$ .

Триада  $\langle P, D(P), F(P) \rangle$  – отражает количественные характеристики разных сторон биоритмологической организации НП, которая используется для количественной оценки различных динамических характеристик на всех этапах, как при предобработке, так и при оценке сценария после проведения БОС-тренинга.

Целевая функция БТС формируется как нечеткая функция [3, 4] над многомерным пространством. Поэтапное приближение к желаемому состоянию из текущего составляет основу алгоритма мультипараметрической обратной связи. К каждому координату множества  $\{K_i\}_{i=1, \dots, n}$ , которые образуют «нейродинамический портрет», соответствует нечеткое множество  $K_i := \langle R^n, \mu_i(K) \rangle$ . Функция принадлежности формируется на основе статистического анализа эмпирических данных.

В этом случае алгоритм управления при реализации мультипараметрической БОС-методики сводится к многокритериальной задаче для БТС.

$$\mu_i(K) \rightarrow \max, i = 1, \dots, n,$$

где  $\mu_i: R^n \rightarrow [0, 1]$  или  $U(\mu_1(K), \mu_2(K), \dots, \mu_n(K)) \rightarrow \max$ , где  $U$  – неявный вид глобальной функции предпочтений.

Для решения поставленных задач перед БТС используется принцип векторной оптимизации. Первый принцип – свертывание векторной функции  $(\mu_1(K), \mu_2(K), \dots, \mu_n(K))$  в скалярную  $\mu^*(K)$  (функция достижимости) «желаемого состояния» и второй принцип – поэтапное снятие неопределенностей (итеративное определение весовых коэффициентов при обучении), при котором уточняется целевая функция. Вследствие чего возможно максимальное приближение к оптимизации целевой функции БТС в рамках ограничений данной методики. При аддитивном свертывании, т.е.

$$\mu^\alpha(K) = \sum_{i=1}^n \alpha_i \mu_i(K), \quad \forall \alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) \in R_+^n.$$

В результате получается глобальная целевая функция для БТС с неизвестными весовыми параметрами  $\alpha_i \in [0, 1], \sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$ . Нечеткое множество

$G_\alpha := \langle R^n, \mu^\alpha \rangle$ , являясь линейной комбинацией локальных нечетких множеств, находится между максимальной и минимальной оболочкой этих множеств.

Технический компонент БТС состоит из РС и из периферийного устройства на основе микроконтроллера ATmega 16U, где периферийное устройство выполняет роль преобработки данных.

В качестве зрительной обратной связи были использованы концентрические круги с монитора компьютера. Исследование было проведено на энцефалографе Нейровизор БММ-36. Была использована монополярная ЭЭГ зрительной коры левого полушария. Методика проведена на 9 человек. ЭЭГ зарегистрирован во время сеанса 40-минутного одноканального мультипараметрического БОС-тренинга.

### Результаты исследования и их обсуждение

Представлен результат с применением вышеизложенной методики к возможности изучения самоорганизации НП, на основе биоритмологической организации основных ритмов мозга по С.И. Сороко. Здесь представлен результат типового варианта тренинга. На рис. 1 представлены исходный (А), подлежащий изменению, и «желаемый» НП (Б), определяющий задачу БОС-тренинга.

Как представлено в методике, во время БОС-сеанса поэтапно уточняется целевая функция, зависящая от управляемости соответствующих компонентов. На рис. 2 показаны тонический (А), относительно не изменяющийся, и фазический компоненты (В) изменяющийся во время БОС-тренинга. Как видно из рисунка, на начальном этапе (В1) целевой функции доминируют последовательности  $\beta \rightarrow \theta$   $\alpha \rightarrow \theta$   $\theta \rightarrow \theta$   $\delta \rightarrow \theta$ . Следующий этап характеризуется изменчивостью последовательностей  $\beta \rightarrow \theta$  и  $\theta \rightarrow \theta$ . Последовательность  $\delta \rightarrow \theta$  является основным управляемым компонентом.

Орграф с вершинами  $\beta, \alpha, \theta$  и  $\delta$  отражает взаимоотношения ритмов мозга. Орграфы с обозначениями I, II и III соответствуют последовательностям этапов БОС-тренинга.

Показателями детерминации являются информативные интеграционные характеристики, отражающие динамическую организацию НП. В табл. 1 представлены детерминационные характеристики НП на различных этапах БОС-тренинга. Как видно,  $\alpha$ -компонент на различных этапах играет детерминационную роль.  $\beta$ -компонент, в отличие от начального состояния, постепенно увеличивает свою детерминирующую роль.

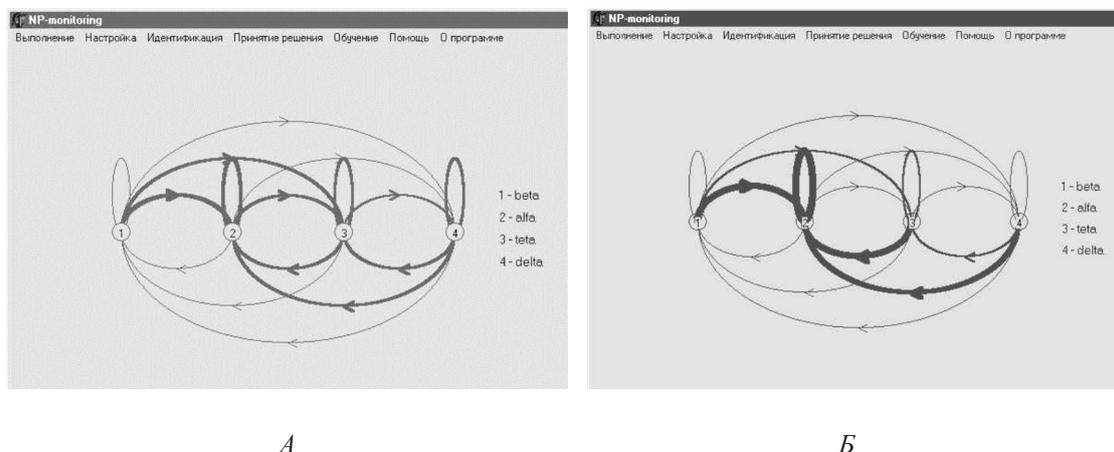


Рис. 1. Биоритмологическая организация основных ритмов мозга человека (по С.И. Сороко): А – до сеанса БОС; Б – «желаемое» состояние. Толщина дуг орграфов соответствует значению условных вероятностей чередования отдельных типов волн

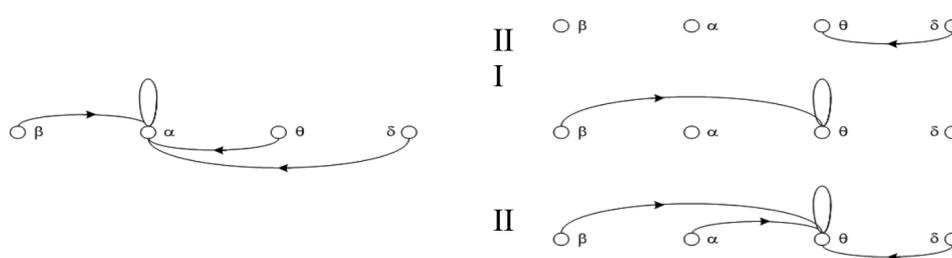


Рис. 2. Тонический (А) и фазические (В) компоненты биоритмологической организации НП

**Таблица 1**  
Показатели детерминации НП  
на различных этапах БОС-тренинга

Показатели детерминации НП	НП <sub>1</sub>	НП <sub>2</sub>	НП <sub>3</sub>
К	3	4	5
К <sub>β</sub>	4	3	3
К <sub>α</sub>	3	2	3
К <sub>θ</sub>	5	4	5
К <sub>δ</sub>	3	4	4

В табл. 2 представлены значения вероятностных потоков на различных этапах БОС-тренинга. Как видно, на трех этапах обучения  $\alpha$ -компонент играет роль «стока», а  $\beta$ - и  $\theta$ -компонент – роль источника потока. С приближением к целевому состоянию, показатели потоков градуально усиливаются. Детерминационные и потоковые характеристики, дополняя биоритмологические структуры, создают условия для исследования самоорганизации НП.

**Таблица 2**  
Вероятностные потоки НП

Этапы	Вероятностные потоки биоритмологической организации ЭЭГ			
	F <sub>β</sub>	F <sub>α</sub>	F <sub>θ</sub>	F <sub>δ</sub>
I	0,296	-0,762	-0,198	0,663
II	0,401	-1,315	0,120	0,794
III	0,556	-1,586	0,310	0,720

Технический компонент (компьютер с самообучающей программой для решения многокритериальных задач при поэтапном приближении к целевой функции) позволяет биологическому компоненту, максимально раскрывать свою потенциальную возможность при решении задач БТС. Наличие нескольких типов неопределен-

ностей, таких как информация об общих механизмах самоорганизации НП, информация об управляемости выбранных параметров, связанных с индивидуальной нейропластичностью, требуют использования адаптивных алгоритмов управления для технического компонента БТС [5, 6].

Для максимального выявления резервов, связанных с функциональной пластичностью, перспективно опираться на использование технологии синергетического тренинга [7–9].

Эффективность синергетического управления НП зависит не только от компонентов и их взаимоотношений, но и от оптимизации информационных процессов, находящихся в единой БТС.

С точки зрения исследования самоорганизации нейродинамических процессов представленный вариант мультипараметрической БОС-методики имеет следующие перспективы:

- выявление алгоритма самоорганизации при управлении состоянием, с выделением общих и частных, связанных с индивидуальными качествами закономерностей;

- определение прогностической роли взаимоотношений отдельных ритмов в биоритмологической структуре, для оптимизации нейрофункциональных состояний;

- определение психофункционального резерва организма на основе возможности реорганизации биоритмологической структуры нейродинамических процессов.

### Выводы

1. Предложенная мультипараметрическая БОС-методика поэтапным изменением весовых параметров отдельных компонентов в целевой функции способствует наилучшим образом приближению к желаемому состоянию биоритмологической организации ЭЭГ.

2. Показатели степени детерминации отдельных ритмов ЭЭГ являются информативными для отражения реорганизационных процессов при БОС-методике.

3. Выделение фазического и тонического компонентов из посттренинговой динамики дает возможность судить о роли отдельных ритмов в процессе самоорганизации нейродинамических процессов.

#### Список литературы

1. Шварц М.С. Современные проблемы биоуправления // Биоуправление. Теория и практика. Новосибирск, 1998. 238 с.
2. Сороко С.И., Турбачев В.В. Нейрофизиологические и психофизиологические основы адаптивного биоуправления // Политехника сервис. 2010. 607 с.
3. Акулов С.А., Федотов А.А. Основы теории биотехнических систем. М., 2007. 220 с.
4. Усков А.А. Системы с нечеткими моделями объектов управления: монография. Смоленск: СФРУК, 2013. 153 с.
5. Киров В.Н., Лазуренко Д.М., Шепелев И.Е., Асланян Е.В., Миняева Н.Р., Бахтин О.М. Нейротехнологии: Нейро-БОС и интерфейс «мозг – компьютер». Южный федеральный университет. 2017. 123 с.
6. Дадашев Ф.Г., Аллахвердиев А.Р., Агаев С.Р., Дадашева К.Г. Управление мультипараметрическими психофизиологическими состояниями в обеспечении функциональной надежности летного состава // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 2–2. С. 192–196.
7. Аллахвердиев А.Р., Дадашев Ф.Г., Дадашева К.Г. Синергетические принципы в управлении психофизиологическими состояниями по методу БОС // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2017. № 11. С. 291–195.
8. Bobrysheva I.E. Synergetic training device and a training mode. UK Patent Application № GB2474088 (A), 06.04.2011 // Patents Journal. Pub. № GB2474088 (A). London: IPO (UK) (GB), 2011, 6 April, 6359. 33 p.
9. Кершенгольц Б.М., Чернобровкина Т.В., Шеин А.А., Хлебный Е.С., Аньшакова В.В. Нелинейная динамика (синергетика) в химических, биологических и биотехнологических системах. Якутск, 2009. 208 с.