

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССОВ РЕГУЛЯЦИИ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПОЗЫ В ЗАДАЧАХ КЛИНИЧЕСКОЙ НЕВРОЛОГИИ

Р.А. Кууз¹, М.Г. Розенблюм², Г.И. Фирсов³

¹Московская медицинская академия им.И.М.Сеченова,

²University of Potsdam, Department of Physics, Germany,

³Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, г. Москва, Россия

Исследуются колебания центра тяжести тела человека при поддержании заданной позы. Экспериментально подтверждена автоколебательная природа наблюдаемого случайного процесса, сопровождающего поддержание позы, оценено эффективное число степеней свободы тела, определяемое минимальным числом независимых динамических переменных, необходимым для описания поведения системы. Показано, что количественные характеристики нелинейной динамики процесса поддержания позы могут быть использованы в задачах медицинской диагностики в неврологии.

Исследование колебаний центра тяжести тела человека при поддержании заданной позы представляет большой интерес с диагностической точки зрения, поскольку хорошо известно, что эти колебания несут большой объем информации о состоянии центральной нервной системы. С другой стороны, проблемы оценки функциональных состояний человека при неврологических нарушениях, а также в стрессовых ситуациях, в частности при решении сложных двигательных задач в условиях повышенного внимания, требуют не только уточнения самого понятия функционального состояния, но и расширения арсенала технических и методических средств оценки показателей функциональных состояний. В связи с этим, представляется целесообразным анализировать функциональное состояние человека как определяемую нервной системой устойчивую форму интеграции функциональных систем, представляющую собой организованную по принципу доминанты целостную адаптивную реакцию организма на всю сумму внешних и внутренних воздействий и дающую информационно-отражательную, эмоциональную и функционально-энергетическую основы поведения (деятельности) [1]. При этом, разделение состояний психической напряженности, характерной, например, для работы человека-оператора в условиях чрезвычайных ситуаций, на операциональную и эмоциональную содержит в своей основе различие эмоционально-оценочных характеристик деятельности, поскольку очень интенсивная, высоконапряженная деятельность в условиях дефицита времени на переработку информации

и принятие решений не приведет к развитию характерных для эмоционального стресса последствий, если человек находится в зоне эмоционального комфорта. В случае же любой конфликтной ситуации, связанной с несоответствием целей и мотивов и субъективным расхождением, порождающим эмоциональный дискомфорт, психическая напряженность порождает состояние эмоционального стресса со всеми его последствиями. При этом, состояние напряжения и, в частности, та область этих состояний, которая носит эмоциональный характер, сопровождается активностью скелетной мускулатуры, проявляющейся в позе. Эти реакции обусловлены нисходящими влияниями гипоталамуса через экстрапирамидные пути или влияниями с двигательной области коры, которые зарождаются благодаря гипоталамокортикальной активации [2]. С другой стороны, под функциональным состоянием понимается интегративное описание физико-химических, биологических, биолого-социальных и социально-культурных, прежде всего технических, объектов и явлений действительности, способных к системной самоорганизации и саморегуляции, имеющих ритмически изменчивую колебательную природу и допускающих те или иные способы их объективного измерения и субъективной оценки [3]. Настоящее определение обобщает широко распространенные в литературе взгляды на функциональное состояние как особое психофизиологическое явление и позволяет использовать методы кибернетики, гомеостатики и синергетики для его оценки и диагностики. На базе системно-функ-

циональных идей П.К.Анохина, в т.ч. об эфферентном синтезе, и теории Н.А.Бернштейна об иерархическом механизме управления движением статика позы может рассматриваться в контексте целостной функциональной системы организма с учетом специфических для каждого уровня управления сенсорных синтезов [4]. При этом уровни управления движениями возрастающей сложности представляют собой зафиксированные в строении ЦНС фило-онтогенетические результаты системной деятельности организма.

При этом наряду с известными подходами, связанными с анализом электроэнцефало- и кардиограмм, пульсо-и электромиограмм и других биоэлектрических сигналов, открывается возможность применения постурографических методик, в частности компьютерной стабилотграфии [5]. Колебания, обычно регистрируемые с помощью стабилотграфической платформы, имеют характер широкополосного случайного процесса со спадающим спектром в области частот от нуля до 4–6 Гц. Для их анализа использовались различные статистические характеристики, одно- и двумерные гистограммы, плотности распределения; применялся спектрально-корреляционный и авторегрессионный анализ [6]. Это позволило описать характерные особенности стабилотграмм, однако возможности применения получаемых признаков для медицинской диагностики ограничены, что заставляет искать новые методы обработки экспериментальных данных и выявления диагностических признаков.

В связи с этим, представляется целесообразным анализ динамических моделей, описывающих возникновение и основные свойства колебаний биомеханической системы, наблюдающихся при сохранении позы. В известных моделях система регуляции позы рассматривалась как система стабилизации некоторых заранее заданных координат, как правило, суставных углов. При этом предполагалось, что возникновение и случайный характер изучаемых процессов может быть объяснен воздействием на вход этой системы недоступного для измерения “белого” шума, природа которого не уточнялась. Таким образом, эти процессы рассматривались как вынужденные случайные колебания. В то же время можно предположить, что изучаемые колебания имеют динамическую природу, т.е. представляют собой стохастические автоколебания в системе регуляции позы, а не вызваны внешним по отношению к этой системе шумом. В этом случае, свойства этих колебаний определяются полностью нервно-мышечной системой, а не системой и шумом неизвестной приро-

ды (как имеет место при вынужденных колебаниях).

Задача состоит в том, чтобы экспериментально определить, является ли исследуемая система динамической, т.е. совершает автоколебания, на которые наложен шум, или же она совершает вынужденные случайные колебания. В первом случае, статистические свойства процесса на выходе системы в основном определяются свойствами самой системы, и, следовательно, являются характеристиками ее состояния и могут быть использованы для целей диагностики, а во втором случае они отражают как свойства системы (как некоторого фильтра), так и характеристики случайного внешнего возмущения.

Эту задачу можно решить, анализируя движения системы в ее фазовом пространстве. Известно [7], что если система является динамической, то в ее фазовом пространстве существует предельное множество точек (аттрактор), к которому притягиваются фазовые траектории из некоторой области начальных условий. Аттрактор, в частности, характеризуется фрактальной размерностью d и размерностью вложения m , связанной с ней соотношением $d < m < 2d + 1$ (теорема Мане), и определяющей число независимых переменных, необходимых для однозначного описания поведения системы. Для периодических колебаний, образом которых в фазовом пространстве является предельный цикл, $d = 1$, для двухчастотных квазипериодических – $d = 2$, а в случае стохастических колебаний, образом которых является странный аттрактор, $d > 2$. Случайный процесс, порожденный динамической системой, характеризуется небольшими значениями размерностей, в то время как шум, т.е. процесс, порожденный большим количеством источников (системой с очень большим числом степеней свободы), имеет много большие значения размерностей.

Была проведена оценка размерностей m и одной из оценок d – так называемой корреляционной размерности n по стабилотграммам, полученным в эксперименте со здоровыми испытуемыми и с больными с различными видами неврологической патологии (табл. 1). Полученные в случаях 6 и 7 значения $n < 2$ могут быть объяснены отсутствием развитого хаоса и близостью процесса к периодическому.

Таким образом, применение методов теории стохастических автоколебаний позволило оценить из эксперимента эффективное число степеней свободы тела человека в задаче регуляции его вертикальной позы, определяемое минимальным числом независимых динамических

Таблица 1

Испытуемый, состояние	Диагноз	<i>n</i>
К. глаза открыты	норма	2,22
М. глаза открыты	гипокинез	2,3
С. глаза открыты	норма	2,12
Б., глаза открыты	невроз, прием психотропных препаратов	3,5
Б., глаза закрыты		2,05
Д., глаза открыты	ранняя стадия невроза	1,76
Д., глаза закрыты		1,89
Л. глаза открыты	рассеянный склероз	2,94

переменных, необходимым для описания поведения системы и равным размерности вложения аттрактора m . Величина m лежит в пределах от 3 до 5. Это означает, что исследуемый объект может рассматриваться как динамическая система с малым числом степеней свободы.

Полученный результат отвечает известной концепции Н.А.Бернштейна, согласно которой основная задача координации движений сложной биомеханической системы состоит в преодолении избыточных степеней свободы за счет наложения дополнительных связей, называемых синергиями, что в значительной степени облегчает управление многомерной системой.

При некоторых неврологических патологиях может происходить разрушение этих связей, что приводит к двигательным расстройствам, например, к гиперкинезам – произвольным стереотипным колебательным движениям различных частей тела в результате последовательного сокращения мышц – антагонистов. С другой стороны, иногда наблюдается возбуждение периодических колебаний центра тяжести, в частности при неврозах и истерии. Это, по-видимому, может быть объяснено явлением синхронизации стохастических автоколебаний периодическим сигналом, поступающим из высших отделов ЦНС и проявляющимся в электроэнцефалограмме. Об этом может свидетельствовать высокая степень когерентности колебаний в сагиттальной и фронтальной плоскостях [8]. Большое значение функции когерентности свидетельствует о наличии сильной линейной инерционной статистической связи колебаний в двух плоскостях и может быть объяснено либо существованием единого мощного источника колебаний в ЦНС, либо синхронизацией колебаний в сагиттальной и фронтальной плоскостях. Выявленный феномен может быть проявлением нарушения програм-

мирования регуляции равновесия вертикальной позы и заинтересованности систем, отвечающих за это программирование, в частности лобных отделов. В частности, возможным механизмом, обуславливающим появление площадок функции когерентности, выступает электрическая деятельность мозга, проявляющаяся в тета-ритме ЭЭГ с частотой 4–7 Гц и амплитудой в десятки мкВ, при этом выраженность тета-ритма зависит от степени эмоционального, умственного напряжения, фона основной активности и возраста. Существующая взаимосвязь между активностью тета-ритма и умственным напряжением, эффективностью деятельности объясняется тем, что тета-ритм отражает активность срединно-стволовых образований головного мозга и является электрофизиологическим коррелятором механизма, квантующим поток извлекаемых из памяти энграмм. При этом значение n стремится к единице. На ранней стадии невроза, $n < 2$, что может свидетельствовать о переходе к периодичности. Таким образом, величина размерности аттрактора может быть использована как один из информативных признаков медицинской диагностики.

Рассматривалась динамическая модель, описывающая основные свойства широкополосных случайных колебаний биомеханической системы, наблюдающихся при сохранении позы в спокойной стойке [9]. Скелетно–мышечная система человека представлена трехзвенным перевернутым маятником с упругими связями. Предполагается, что управляющее воздействие со стороны ЦНС формируется одновременно на основе программного задания жесткости суставов и управления моментом сил в суставах на основе пропорциональных и пропорционально-дифференциальных запаздывающих нелинейных обратных связей. Роль датчиков положения и скорости играют суставные и мышечные рецепторы, описываемые нелинейными характеристиками типа “люфт”, а запаздывание определяется временем распространения сигналов по нервным волокнам. Результаты натурального эксперимента сравнивались с результатами моделирования динамики регуляции вертикальной позы тела человека.

Аналогичные исследования [10] не только подтвердили полученные в настоящей работе количественные характеристики хаотической динамики процессов поддержания вертикальной позы, но и наметили пути к построению многоуровневой системы управления позой, на возможные механизмы функционирования которой указано в работе [11].

Таким образом, строгий подход с использованием различных количественных характеристик хаотических движений в задачах ранней диагностики функциональных нарушений в организ-

ме человека [12, 13] может оказаться перспективней используемых в настоящее время статистических и спектральных методов анализа различных биосигналов.

Литература

1. Кудрин И.Д., Зюбан А.А., Овчинников Б.В. К оценке функционального состояния организма человека // Военно-медицинский журнал. – 1981. – № 10. – С. 46-49.
2. Нормальная физиология. Курс физиологии функциональных систем / Под ред. К.В.Судакова. – М.: Медицинское информационное агентство, 1999. – 718 с.
3. Винарская Е.Н., Кууз Р.А., Розенблум М.Г., Фирсов Г.И. Методы нелинейной динамики в задачах оценки функционального состояния человека // Известия ТРТУ. – Медицинские информационные системы–МИС-2000. – Таганрог: ТРТУ, 2000. – № 4 (18). – С. 7-10.
4. Иванов-Муромский К.А. Нейрофизиология, нейрокибернетика, нейробионика. – К.: Вища школа, 1985. – 240 с.
5. Гурфинкель В.С., Коц Я.М., Шик М.Л. Регуляция позы человека. – М.: Наука, 1965. – 256 с.
6. Кууз Р.А., Фирсов Г.И. Применение методов компьютерной стабилометрии для решения задач функциональной диагностики в неврологии // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2001. – № 5-6. – С. 24-33.
7. Landa P.S., Rosenblum M.G., Firsov G.I. Deterministic 1/f fluctuations in biomechanical system // Noise in physical systems and 1/f fluctuations. – New York: AIP Press, 1993. – P. 716– 719
8. Rosenblum M.G., Firsov G.I., Kuuz R.A., Pompe B. Human Postural Control– Force Plate Experiments and Modelling// Nonlinear Analysis of Physiological Data. / Ed. by

H.Kantz, J.Kurths and G.Mayer-Kress. – Berlin: Springer, 1998. – P. 283-306.

9. Винарская Е.Н., Кууз Р.А., Розенблум М.Г., Фирсов Г.И. Моделирование регуляции вертикальной позы тела человека // Образование. Экология. Экономика. Информатика. VIII Международная конференция (Астрахань, 15-20 сентября 2003). Тезисы докладов. – Астрахань: ГУП “Изд.-полигр. комплекс “Волга”, 2003. – С.71.

10. Кононов А.Ф., Слива С.С. Применение методов нелинейной динамики для анализа системы поддержания вертикальной позы человека // Российский журнал биомеханики. – 2000. – № 2. – С. 70.

11. Литвинцев А.И. О механизмах регуляции вертикальной позы человека // Автоматика и телемеханика. – 1972. – № 4. – С. 71–83.

12. Кууз Р.А., Розенблум М.Г., Ронкин М.А., Фирсов Г.И. Оценка дискриминантно-прогностической способности количественных характеристик нелинейной динамики процессов регуляции позы в задачах клинической неврологии // Клинические нейронауки: нейрофизиология, неврология, нейрохирургия. Межд. конф. KNN@N’2003 (Украина, Крым, Ялта-Гурзуф, 1–10 июня 2003). – Запорожье: Запорожский гос. ун-т, 2003. – С. 124-126.

13. Diukova G.M., Stoliarova A.V., Kuuz R.A., Firsov G.I., Vein A.M. Posturography in Hysteria // International Symposium of Gait Disorders. (Prague, Czech Republic. September 4–6. 1999): Book of Abstracts. – Prague, Qualisis, 1999. – P. 122.

Информация для контактов:

Кууз Роберт Александрович.

Лаборатория клинко-электрофизиологических исследований Московской медицинской академии им.И.М.Сеченова. 119021 Россия, Москва, ул. Россолимо, 11.
Тел. (095) 245-04-70.

Розенблум Михаил Григорьевич.

Физический факультет Потсдамского университета University of Potsdam, Department of Physics, Am Neuen Palais 10, D-14415 Potsdam, Germany.

Фирсов Георгий Игоревич.

Лаборатория методов исследования динамических процессов и систем Института машиноведения им.А.А.Благонравова Российской Академии наук. 101990 Россия, Москва Малый Харитоньевский пер., 4. Тел.: (095) 924-00-72. E-mail: firsovgi@mtu-net.ru