

**«Научные и научно педагогические кадры инновационной России»
2009-2013 год**

Шифр заявки 2011-1.2.2-201-007-027 «Диагностика нестационарных сигналов в биологии и медицине и разработка информационных характеристик работы сердечно-сосудистой и нервной систем человека»

АННОТАЦИЯ НИР 2011-1.2.2-201-007-027 (4 этап)

Интеллектуальная деятельность человека является одной из его специфических особенностей и наиболее сложно организованных психических функций и потому чрезвычайно сложна для инструментальных исследований. Не существует общепринятых взглядов, – каким образом головной мозг и центральная нервная система обеспечивают процесс мышления и принятия решений. Как правило, в динамике изучаются электрофизиологические корреляты в условиях моделирования умственной нагрузки. При этом важно подобрать как адекватные модели интеллектуальной деятельности, так и соответствующие психофизиологические показатели. Очевидно, что такие модели не могут охватить все сферы мыслительной деятельности человека.

Феномен кратковременных периодов корреляции и стабилизации пространственно-временных характеристик биопотенциалов мозга во время определённых этапов когнитивной деятельности был впервые показан в работах М.Н.Ливанова с соавторами. Пространственная консолидация ЭЭГ была обнаружена в виде её когерентных структур, или комплексов, совпадающих по основным пикам спектральных паттернов в разных областях коры головного мозга. Такие процессы как память, внимание, когнитивные или познавательные операции, если и проявляются на уровне ЭЭГ, то в сильно завуалированном виде – на грани порога статистической значимости. Смена таких операций при последовательном способе обработки

информации сопровождается в ЭЭГ каскадом кратковременных переходных процессов с последующей временной стабилизацией новых устойчивых состояний, сопровождающейся увеличением числа статистически значимых корреляционных связей между лобно-центрными отделами левого полушария. Считается, что определённым когнитивным актам соответствуют достаточно стабильные пространственные структуры ЭЭГ в виде эффектов синхронизации/десинхронизации.

Практически все результаты исследований интеллектуальной деятельности были получены в условиях моделирования различных творческих и математических заданий. В то же время игра в шахматы является идеальным способом для изучения творческого процесса, когда профессиональный шахматист находится в условиях реального (не имеющего аналогов) интеллектуального стресса, а не его моделирования.

Целью четвертого этапа ПНИР является исследование динамических спектральных характеристик нестационарной ЭЭГ во время шахматной партии и нахождение пространственно-временных корреляций различных ее каналов, вычисленных с помощью спектральных интегралов.

Для анализа динамических спектральных характеристик нестационарного сигнала на четвертом этапе поисковой научно-исследовательской работы (ПНИР) разработан вейвлет-анализ пространственно-распределенной ЭЭГ.

Основные результаты 4 этапа

Проведен критический анализ предыдущих методов, анализирующих корреляцию нестационарных сигналов. Показано, что такой весьма распространенный показатель, как когерентность, является плохим индикатором степени синхронизма различных каналов ЭЭГ, так как эта величина зависит от амплитудной и фазовой вариабельности сигналов, а также от их шумов. Величина когерентности зависит также от

продолжительности эпохи анализа ЭЭГ, от числа усредняемых эпох, от величины временного сдвига между эпохами, от типа применяемого окна и др. Вычисление степени когерентности двух сигналов в различных программных пакетах, таким образом, может приводить к различным результатам. Все это не позволяет рассматривать когерентность в качестве информативного показателя оценки степени синхронизма и делает задачу поиска новых математических методов описания нестационарных сигналов ЭЭГ весьма актуальной.

Составлен обзор работ по влиянию когнитивных задач на ЭЭГ человека.

Проведен анализ стандартных методов оконного преобразования Фурье, применяемого для анализа нестационарных сигналов. Показано, что явный вид оконного преобразования Фурье (преобразования Габора) зависит от величины окна W , поэтому выбор его оптимального размера для нестационарного сигнала, характерные частоты которого произвольно изменяются во времени, представляет собой сложную задачу.

Составлены карты корреляций различных каналов электроэнцефалограммы (ЭЭГ) во время шахматной партии. С помощью биотехнической системы (БТС), предназначенной для регистрации и количественной оценки ряда психофизиологических характеристик шахматистов высшей квалификации, изучена ЭЭГ испытуемого во время игры вслепую в шахматы с компьютерной шахматной программой.

Предлагаемый метод расчёта корреляций многоканальной нестационарной ЭЭГ, использующий интегральное вейвлетное преобразование, даёт принципиально новую информацию о динамике спектральных характеристик процесса с высокой дискретизацией по времени, выполняет пространственно-временной анализ нарастания и угасания всплесков активности, возникающих в различных структурах коры

головного мозга во время проведения шахматной партии. Анализ спектральных интегралов позволил выявить пространственные взаимоотношения переходных процессов ЭЭГ во всех спектральных диапазонах, оценить моменты резких перестроек частотных диапазонов для различных каналов ЭЭГ и найти степень их синхронизации.

Научные результаты, полученные на разработанном и испытанном комплексе, могут иметь большое значение для нейрофизиологов, занимающихся изучением нераскрытых психофизиологических механизмов интеллектуальной деятельности, а также для специалистов в области искусственного интеллекта.

АННОТАЦИЯ НИР 2011-1.2.2-201-007-027 (3 этап)

На автоматизированном комплексе динамического позиционирования в гравитационном поле выполнена пассивная ортостатическая проба (*ТТ* – тилт тест). Изучена вариабельность ритма сердца во время такой нестационарной кардиологической пробы. Предложен новый метод изучения спектральных свойств нестационарного сигнала ритмограммы, основанный на применении теории вейвлетов к сигналу, имеющему частотную модуляцию. Математическая модель, учитывающая реальный факт, что сердечный удар с номером n происходит в момент времени tn , позволяет аналитически вычислить интегральное вейвлет–преобразование (CWT), которое отображает спектральные свойства сигнала на плоскость, координатами которой являются время и частота. В работе предложены количественные критерии спектральных свойств переходных этапов нестационарной ритмограммы. Поведение максимальной частоты от времени, вычисленной по экстремуму (CWT), позволяет определить вклад дыхательных волн, обусловленных динамикой влияния симпатического и парасимпатического отделов вегетативной нервной системы (*ВНС*), на ритмограмму в переходные периоды. Полученные таким образом частоты дыхательных волн не зависят

от среднего значения $RRNN$, что даст возможность привести данные различных авторов к единой частотной шкале в Гц.

Динамика развития во времени t спектральных интегралов выявила различные сценарии возникновения и исчезновения частот в сигнале ритмограммы, что позволило классифицировать динамику взаимодействия симпатического и парасимпатического отделов ВНС во время переходных периодов ТТ. О различном поведении системы регуляции частоты сердечного ритма во время ТТ свидетельствуют колебательный или аperiodический характер зависимости спектральных интегралов, а также характерные времена нарастания и исчезновения ритмов сердца в нескольких спектральных диапазонах.

На третьем этапе поисковой научно-исследовательской работы (ПНИР): выполнен анализ сценариев переходных процессов, возникающих во время ортостатической пробы; выполнен анализ физиологических процессов во время такого испытания; проанализирован вейвлет-анализ скелетона.

Основные результаты 3 этапа

При обследовании испытуемых на автоматизированном комплексе динамического позиционирования в гравитационном поле было установлено, что метод Фурье расчета спектральных свойств сигнала, базирующийся на предположениях о стационарности сигнала, и основанный на представлении ритмограммы в виде равноотстоящей по времени сетки RR интегралов, дает неправильные результаты и требует существенной переработки. Предложен новый метод изучения спектральных свойств нестационарного сигнала ритмограммы, основанный на применении теории вейвлетов к сигналу, имеющему частотную модуляцию. Простая математическая модель, учитывающая реальный факт, что сердечный удар с номером n происходит в момент времени t_n , позволяет аналитически вычислить интегральное

вейвлет–преобразование $V(v,t)$, которое отображает спектральные свойства сигнала на плоскость, координатами которой являются время t и частота v .

В работе предложены количественные критерии спектральных свойств переходных этапов нестационарной ритмограммы. Поведение максимальной частоты $v_{\max}(t)$ от времени, вычисленной по экстремуму $V(v,t)$, позволяет определить вклад дыхательных волн, обусловленных динамикой влияния симпатического и парасимпатического отделов BHC , на ритмограмму в переходные периоды. Полученные таким образом частоты дыхательных волн не зависят от среднего значения $RRNN$, что даст возможность привести данные различных авторов к единой частотной шкале в $\Gamma\mu$.

Динамика развития во времени t спектральных интегралов $E_{\mu}(t)$ выявила различные сценарии возникновения и исчезновения частот в сигнале ритмограммы, что позволило классифицировать динамику взаимодействия симпатического и парасимпатического отделов BHC во время переходных периодов TT . О различном поведении системы регуляции частоты сердечного ритма во время TT свидетельствуют колебательный или апериодический характер зависимости $E_{\mu}(t)$, а также характерные времена нарастания и исчезновения ритмов сердца в нескольких спектральных диапазонах μ .

По результатам выполненных работ можно сделать следующие выводы:

- 1) Для сильного влияния TT характерное время нарастания высокочастотной активности $HFHR$ во время подъема механургического стола $\tau_{\text{up}}=105$ с, а время спадания этой активности во время опускания $\tau_{\text{down}}=37$ с. Длительность переходного периода свидетельствует о недостаточной регуляции частоты сердечного ритма при изменении положения тела в гравитационном поле.
- 2) Коэффициенты нестационарности $K_{nst}(\mu)$ ($\mu=HFHR$) для слабого воздействия TT на испытуемого $K_{nst}(\mu)=37.9\%$, а при сильном влиянии TT – $K_{nst}(\mu)=67.4\%$. Таким образом, величина $K_{nst}(\mu)$ ($\mu=HFHR$) является

количественной мерой, показывающей разную степень устойчивости организма к гравитационным нагрузкам.

3) В зависимости от степени адаптации величина CS изменяется в пределах от $CS_{max} \approx 9$ для испытуемых с хорошей степенью адаптации до $CS_{max} \approx 145$ для испытуемых с пониженной степенью адаптации.

4) Утвержденная стандартизированная программа смены положений человека во время пассивной ортостатической пробы допускает абсолютную стандартизацию всех характерных времен нарастания нагрузок. Это дает возможность объективно анализировать различия адаптационных возможностей здоровых людей, а также разрабатывать диагностику больных людей, страдающих различными заболеваниями.

АННОТАЦИЯ НИР 2011-1.2.2-201-007-027 (2 этап)

Применение вейвлет преобразования для расчета количественных параметров переходных процессов нестационарной электроэнцефалограммы (ЭЭГ), полученной при фотостимуляции

Клиническая электроэнцефалография (ЭЭГ), является уникальным методом, позволяющим изучить динамику изменений функционального состояния головного мозга. Биоэлектрическая активность мозга, регистрируемая с поверхности головы, есть отражение сложного взаимодействия корково-корковых и корково-подкорковых взаимоотношений, отражение взаимодействия синхронизирующих и десинхронизирующих процессов. Все эти обстоятельства свидетельствуют о том, что описание и определение выявляемых изменений в ЭЭГ является достаточно сложным. Для того чтобы интерпретировать ЭЭГ данные, необходимо, во-первых, правильно “распознать” и описать все

регистрируемые паттерны биоэлектрической активности и, во-вторых, надо знать физиологическую сущность выявляемых изменений. Большое значение при этом приобретает не только амплитудно-частотные параметры, но и выраженность каждого паттерна, каждой составляющей ЭЭГ.

Биоэлектрическая активность мозга представляет собой суперпозицию колебаний разных частот, в которых выделяют четыре основных диапазона: дельта (0,1 – 4 Гц), тета (4 – 7,5 Гц), альфа (7.5 – 14 Гц) и бета (14 – 50 Гц). Кроме того, в ЭЭГ выделяют пароксизмы, вспышки различных частотных диапазонов ЭЭГ и «графо-элементы», представляющие собой пики, острые волны, спайки или медленные спайки. Их сочетания с тета- и дельта-волнами называются эпи-комплексами. Эти виды биоэлектрической активности относятся к пароксизмальным видам биоэлектрической активности.

Различить стадии патологического процессов позволяет оценка реактивных паттернов ЭЭГ, определяемая по степени отчетливости усвоения ритмов фотостимуляции. Выделенные пять типов реактивных паттернов ЭЭГ по-разному сочетаются с фоновыми паттернами.

Реакция перестройки или навязывания ритма заключается в изменении спонтанной активности коры, в результате чего биоэлектрическая активность (БЭА) мозга приобретает ритмический характер в соответствии с частотой подаваемых афферентных раздражений. В норме оптимум усвоения лежит в пределах основной ритмики здорового мозга - 8-22 Гц, при патологии характер перестройки меняется. При этом отчетливость усвоения связана прямой корреляционной зависимостью с состоянием возбудимости нервной системы: чем она выше, тем отчетливее усвоение реакции фотостимуляции (РФС).

Любому типу фоновой ЭЭГ могла соответствовать любая степень отчетливости усвоения РФС. Под реакцией усвоения понимается

перестройка фоновой БЭА либо в соответствии с частотой подаваемых стимулов, либо в кратное число увеличивающая или уменьшающая частоту подаваемых стимулов. При увеличении частоты перестройка БЭА называется реакцией усвоения ритмов с гармониками, а при уменьшении – реакцией с субгармониками. Частота встречаемости каждого из “реактивных” паттернов была неодинакова у разных пациентов и могла по-разному сочетаться с фоновыми паттернами ЭЭГ. Однако процессы усвоения ритмической фотостимуляции в настоящее время изучаются качественными методами анализа нестационарной ЭЭГ.

Большое количество сигналов, изучаемых в физике, существенно нестационарны. Это означает, что их характеристики, вычисленные для достаточно большого интервала времени T , изменяются, если взять любой другой интервал времени T , смещенный на произвольный момент времени относительно первого. Нестационарность многих сигналов приводит к тому, что многие традиционные методы исследования сигналов (оконное преобразование Фурье, корреляционный анализ) оказываются неприменимыми. В настоящее время для анализа многих нестационарных процессов используется теория вейвлетов. Вейвлетное преобразование, применяемое при обработке нестационарных сигналов, напоминает оконное преобразование Фурье и отличается от него заменой гармонических колебаний на компактные функции, локализованные как по времени, так и по частоте.

Цель настоящей работы – разработка количественных параметров, характеризующих нестационарный сигнал ЭЭГ, возникающий под действием фотостимуляции.

В данном этапе ПНИР (контракт 14.740.11.1055) рассмотрена динамика усвоения и забывания ритма фотостимуляции ФСТ для нестационарной ЭЭГ, изменяющейся под действием фотовспышки. Предлагаемый метод

вычисления времен усвоения и забывания ритмов применен для количественного анализа и классификации переходных процессов, характеризующих свойства центральной нервной системы человека. Данный метод использован при разработке информационных параметров, описывающих медицинские нестационарные сигналы во время многих функциональных проб (электрокардиограмма, электроэнцефалограмма, пульсовая волна, звуковые сигналы сердца при физических нагрузках, дыхательных, лекарственных пробах и психоэмоциональных тестах).

В отличие от визуального и спектрального анализа применение интегрального вейвлет-преобразования позволяет классифицировать и количественно оценивать такие переходные процессы и дает новую информацию о развитии амплитудно-частотных изменений нестационарной ЭЭГ при ФСТ. Предложены и вычислены количественные параметры характеризующие сигналы: коэффициент нестационарности сигнала $K_{nst}(\mu)$, коэффициент усвоения ритма $K_M(\mu)$ и удержания ритма $K_C(\mu)$. Для различных спектральных диапазонов коэффициенты нестационарности ЭЭГ записи, показанной на рис 5, равны $K_{nst}(\delta)=57\%$, $K_{nst}(\theta)=83\%$, $K_{nst}(\alpha)=86\%$, $K_{nst}(\beta)=95\%$. Для этой записи коэффициент усвоения ритма $K_M(P)=83.43$, коэффициент удержания ритма $K_C(P)=0.49$. Вычислены времена усвоения τ_M и запаздывания τ_R ритма ЭЭГ относительно начала работы ФСТ, а также времена забывания ритма τ_F и отставания τ_L сигнала ЭЭГ при выключении ФСТ. Для записи, изображенной на рис.5, $\tau_M = 2.83$ s и запаздывания $\tau_R = 1.06$ s. Время забывания ритма τ_F и время отставания ритма τ_L ЭЭГ относительно сигнала вспышки равно $\tau_F = 0.24$ s, $\tau_L = 0.06$ s.

Данный метод количественного описания переходных процессов может быть применен для характеристики нестационарного разрушения материалов, зарождения магнитных бурь под действием солнечного ветра, динамики поглощения волн в плазме под действием генераторов излучений, переходных процессов в электрических цепях и др.

АННОТАЦИЯ НИР 2011-1.2.2-201-007-027 (1 этап)

Целью данной НИР является разработка компьютерного комплекса программ анализа нестационарных сигналов человека во время различных стрессовых воздействий.

В настоящее время существенно возросло число техногенных катастроф, связанных с нарушением способности человека выполнять возложенные на него функциональные обязанности. Это относится к таким процессам, как управление движением и полетами, управление оборудованием атомных станций, химических производств, выполнение специальных заданий по предотвращению и ликвидации последствий катастроф (МЧС, войска специального назначения). Природные катастрофы (землетрясения, пожары, ураганы, цунами и пр.) также резко усиливают стрессовое воздействие на человека. Большую роль в этом также играет все возрастающая урбанизация человека, резкое возрастание темпа его жизни и интенсификации ритма выполнения его профессиональных обязанностей, а также увеличивающаяся сложность задач, решаемых человеком в процессе своей жизни. Во всех этих случаях требуется разработка методики состояния человека с целью минимизации рисков, связанных с его профессиональной деятельностью. Это в свою очередь требует непрерывного мониторинга и контроля за функциональным состоянием исполнителя в режиме реального времени.

Контроль за состоянием человека может быть осуществлен с помощью диагностики различных физиологических сигналов, отражающих функциональное состояние многих органов. Быстроменяющиеся внешние условия часто приводят к тому, что характер таких физиологических сигналов также изменяется. Это, в свою очередь, приводит к тому, что многие статистические и спектральные свойства многих физиологических

сигналов становятся зависящими от времени, приобретая при этом нестационарные свойства.

К таким нестационарным сигналам, диагностирующим физиологическое состояние человека, относятся:

- 1) Электрокардиограмма (ЭКГ) характеризующая состояние сердца человека;
- 2) Электроэнцефалограмма (ЭЭГ), характеризующая деятельность нейронных ансамблей головного мозга ;
- 3) Пульсовая волна, описывающая состояние сосудистой системы человека;
- 4) Систолическое и диастолическое артериальное давление, показывающее работу сердечно-сосудистой системы человека;
- 5) Миогенные сигналы, описывающие электрическую активность мышц и нейронных популяций.

К сожалению, многие методы, описывающие такие сигналы, базируются на предположении о том, что исследуемый сигнал является стационарным. Это обстоятельство заставляет разрабатывать новые подходы к таким процессам. Предлагаемый в данной НИР метод позволяет анализировать переходные процессы в кардиограмме. Разработанные количественные параметры используются для анализа состояния нервной и сердечно – сосудистой системы человека в условиях многих функциональных проб (динамометрия, велоэргометрия, бегущая дорожка, психоэмоциональные пробы и др.). Нестационарный характер таких воздействий позволяет выявить различия адаптационных возможностей здоровых людей и людей, страдающих различными заболеваниями.

На первом этапе поисковой научно-исследовательской работы (ПНИР) получены следующие основные результаты:

Предложен новый параметр $CS_n(t)$ (CardStress), представляющий собой количественную характеристику изменения активности регуляторных механизмов сердечно – сосудистой системы, основанную на относительном уменьшении вариабельности сердечного ритма во время функциональной пробы по сравнению с исходным уровнем. Проведен анализ вариабельности сердечного ритма в условиях нестационарной нагрузки – нормобарической остронарастающей гипоксической гипоксии, которая достигалась методом возвратного дыхания. Проведено сравнение величины $CS_n(t)$ с традиционными методами анализа ритмограмм (оконное спектральное преобразование Фурье и гистограммы). Параметр $CS_n(t)$ используется для анализа состояния сердечно – сосудистой системы в условиях многих функциональных проб (динамометрия, велоэргометрия, бегущая дорожка, психоэмоциональные пробы и др.), где нестационарный характер таких воздействия позволяет выявить различия адаптационных возможностей здоровых людей и тех, кто страдает сердечной недостаточностью.

Созданный в данной ПНИР метод классифицирует адаптивные возможности человека-оператора в условиях сложных стрессовых нагрузок при проведении различных психоэмоциональных проб и физических нагрузок. Динамический контроль состояния здоровья оператора (военнослужащего) необходим для адекватного физиологического и медико-психологического сопровождения его профессиональной деятельности, для выявления начальных признаков повышенного уровня нервно-эмоционального стресса, ведущего к риску возникновения аварийных ситуаций, а также для выявления фактов переутомления оператора, снижающего его работоспособность. Данная методика используется при оперативном подборе кадров, способных выполнять задания в условиях экстремального характера, а также для характеристики психофизиологического потенциала сотрудников и оценки их профессиональной пригодности.