

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) RU ⁽¹¹⁾ 2 565 993 ⁽¹³⁾ C1

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
(51) МПК
[A61B 5/0476 \(2006.01\)](#)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

Статус: прекратил действие, но может быть восстановлен (последнее изменение статуса):
08.04.2019)
Пошлина: учтена за 4 год с 21.05.2017 по 20.05.2018

(21)(22) Заявка: [2014120257/14](#), 20.05.2014(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
20.05.2014

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 20.05.2014

(45) Опубликовано: [20.10.2015](#) Бюл. № 29

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: ГРУБОВ В.В. и др. Возрастная динамика частотно-временных особенностей сонных веретен на ЭЭГ крыс с генетической предрасположенностью к эпилепсии. Вестник ТГУ. 2013, 18, 4, с.1288-1291. RU 2337610 C1, 10.11.2008. RU 2467384 C1, 20.11.2012. RU 2484766 C1, 20.06.2013. US 2011082381 A1, 07.04.2011. ГРУБОВ В.В. и др. Вейвлетный анализ сонных веретен на

ЭЭГ и разработка метода их автоматической диагностики. Известия вузов "ПНД". 2011, 19, 4, с. 91-105. SITNIKOVA T. et al. Sleep spindles and spike-wave discharges in EEG: Their generic features, similarities and distinctions disclosed with Fourier transform and continuous wavelet analysis. J Neurosci Methods. 2009 Jun 15;180(2):304-16

Адрес для переписки:

410054, г.Саратов, ул. Политехническая, 77,
СГТУ имени Гагарина Ю.А., патентно-лицензионный отдел ЦТТ, Галковской И.Л.

(72) Автор(ы):

Храмов Александр Евгеньевич (RU),
Грубов Вадим Валерьевич (RU),
Москаленко Ольга Игоревна (RU),
Короновский Алексей Александрович (RU),
Ситникова Евгения Юрьевна (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А." (СГТУ имени Гагарина Ю.А.) (RU)

(54) СПОСОБ ВЫДЕЛЕНИЯ ВЕРЕТЕНОПОДОБНЫХ ПАТТЕРНОВ ПО ВРЕМЕННЫМ ДАННЫМ ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАММ**(57) Реферат:**

Изобретение относится к области медицины, а именно к электрофизиологии. Регистрируют сигнал ЭЭГ и осуществляют непрерывное вейвлетное преобразование. Определяют мгновенное и интегральное распределения энергии вейвлетного спектра по временным масштабам, которые соответствуют частотным диапазонам 5-9 Гц для веретеноподобных паттернов и 9-16 Гц для сонных веретен. В каждый момент времени определяют суммарное значение энергии вейвлетного спектра и на основании мгновенных распределений энергии вейвлетного спектра определяют фазы поведения системы таким образом, чтобы в одной из фаз на выбранные диапазоны временных масштабов приходилась большая часть энергии вейвлетного спектра. Усредняют мгновенные распределения энергий вейвлетного спектра по интервалу времени в диапазоне 1-1.5 с, задают пороговые значения энергии и по значениям энергии вейвлетного спектра, приходящимся на диапазоны 5-9 Гц и 9-16 Гц, определяют веретеноподобные паттерны. Способ позволяет повысить достоверность автоматического выявления сонных веретен и других веретеноподобных паттернов, что достигается за счет использования метода вейвлетного преобразования и нахождения пороговых значений энергии вейвлетного спектра. 1 з.п. ф-лы, 3 ил.

Изобретение относится к области биомедицинских технологий и предназначено для выделения характерных фаз поведения биологических систем по временным данным. В частности, изобретение может быть эффективно использовано в задачах автоматического выделения различных паттернов на временных рядах электроэнцефалограмм (ЭЭГ), электрокардиограмм, соннограмм и других сигналов физиологической природы, а также при исследовании перемежающегося поведения, широко распространенного в динамических системах различной природы.

Выделение характерных фаз поведения систем важно в задачах различных областей, включая нейрофизиологию. В частности, достаточно важной и актуальной технической задачей является создание способов автоматической разметки (выделения) различных паттернов на электроэнцефалограммах (пик-волновые эпилептические разряды, неэпилептическая активность - сонные веретена, фоновая активность, дельта-волны и т.д.) для диагностики заболеваний центральной нервной системы. В настоящее время широко известны способы выделения характерных фаз поведения систем, основанные на анализе «текущего» периода или амплитуды колебаний системы [Берже П., Помо И., Видаль К. Порядок в хаосе. М.: Мир, 1991, R.G. Andrzejak, G. Widman, K. Lehnertz, C. Rieke, C.E. David, P. Elder, *Epilepsy Res.* 44 (2001), 129-140, A. Subasi, *Expert Systems with Applications* 29 (2005), 343-355, Короновский А.А., Храмов А.Е., Письма в ЖТФ 27(1), (2001), 3-11 и др.]. Такие способы работают достаточно хорошо, если одна из фаз (обычно ее называют ламинарной фазой) представляет собой сигнал, очень близкий к строго регулярному, либо другая (турбулентная) фаза характеризуется существенно большей амплитудой по сравнению с ламинарной фазой. В то же самое время, такие способы оказываются непригодными при анализе реальных сигналов, в первую очередь, физиологической и биологической природы.

Наиболее близким к заявляемому способу является способ выделения характерных фаз поведения систем по временным данным, предложенный в [Грубов В.В., Ситникова Е.Ю., Назимов А.И., Руннова А.Е., Храмов А.Е., Храмова М.В. Возрастная динамика частотно-временных особенностей сонных веретен на ЭЭГ крыс с генетической предрасположенностью к эпилепсии. *Вестник ТГУ.* 18, 4 (2013) 1288-1291].

В этом способе используется непрерывное вейвлетное преобразование [Короновский А.А., Храмов А.Е. Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения. М.: Физматлит, 2003]. Суть метода заключается в следующем: осуществляют непрерывное вейвлетное преобразование анализируемого сигнала, выбирают характерный диапазон временных масштабов и в каждый момент времени определяют суммарное значение энергии вейвлетного спектра, приходящейся на этот

диапазон. Далее задают диапазон допустимых значений и по вхождению мгновенной энергии вейвлетного спектра в этот диапазон определяют наличие той или иной фазы поведения системы. Отличительной чертой этого способа от известных аналогов, использующих вейвлетное преобразование, является то, что в ходе его осуществления пороговое значение энергии вейвлетного спектра понижают на 40% и возвращают к исходной величине, когда суммарное значение энергии достигает заданного порогового значения.

Такой способ позволяет с высокой степенью точности проводить выделение ламинарных и турбулентных фаз по временным реализациям динамических систем различной природы, включая живые системы. При помощи такого способа возможно диагностировать наличие эпилептических пик-волновых разрядов в электроэнцефалограммах человека и животных, однако, для автоматического выделения сонных веретен и 5-9 Гц-колебаний этот способ оказывается непригодным из-за большого числа ложных срабатываний.

Задачей изобретения является разработка универсального способа, позволяющего проводить автоматическое выделение сонных веретен и других веретеноподобных паттернов по временным рядам электроэнцефалограмм.

Техническим результатом изобретения по сравнению с прототипом является возможность определения различных веретеноподобных паттернов на ЭЭГ, регистрируемой во время сна животных или человека.

Поставленная задача решается тем, что в способе выделения характерных веретеноподобных паттернов по временным рядам ЭЭГ снимают сигнал с системы с последующим непрерывным вейвлетным преобразованием, определяют мгновенное и интегральное распределения энергии вейвлетного спектра по временным масштабам, выбирают диапазоны характерных временных масштабов исследуемого сигнала, соответствующие частотным диапазонам 5-9 Гц для 5-9 Гц веретеноподобных паттернов и 9-16 Гц для сонных веретен, в течение каждой из фаз на основании мгновенных распределений энергии вейвлетного спектра для различных фаз поведения системы таким образом, чтобы в одной из фаз на выбранный характерный диапазон временных масштабов приходилась большая часть энергии вейвлетного спектра, усредняют мгновенные распределения энергий вейвлетного спектра по интервалу времени в диапазоне 1-1.5 с, задают пороговые значения энергии и путем сравнения суммарных значений энергии вейвлетного спектра, приходящихся на выбранные диапазоны характерных временных масштабов, в различные моменты времени с выбранными пороговыми значениями выделяют различные веретенообразные паттерны.

Изобретение поясняется чертежами, где на фиг. 1 представлен типичный фрагмент электроэнцефалограммы с веретеноподобным паттерном (а), мгновенная энергия вейвлетного спектра $w(t)$ (б) и усредненная по характерному временному интервалу $T=1.5$ с энергия $\langle w(t) \rangle$ (в), где также отмечено пороговое значение энергии $w_{кр}$; на фиг. 2 - типичный фрагмент электроэнцефалограммы с веретеноподобным паттерном (а), усредненная по характерному временному интервалу $T=1.5$ с энергия вейвлетного спектра $\langle w(t) \rangle$ с отмеченными пороговыми значениями энергии вейвлетного спектра $w_{кр}$ (б) и $w'_{кр}$ (в); на фиг. 3 - типичный фрагмент электроэнцефалограммы с несколькими характерными веретеноподобными паттернами (а), проекция вейвлетной поверхности $|W(t,f)|$ на плоскость (t,f) для сигнала ЭЭГ $U(t)$ (б), энергии вейвлетного спектра $w_1(t)$ и $w_2(t)$, приходящиеся на характерные частотные диапазоны $f \in (5,9)$ и $f \in (9,16)$ Гц (в), усредненные по характерному временному интервалу $T=1.5$ с энергии вейвлетного спектра $\langle w_1(t) \rangle$ и $\langle w_2(t) \rangle$ с отмеченными пороговыми значениями энергии вейвлетного спектра $w_{1кр}$, $w_{2кр}$ и $w'_{1кр}$, $w'_{2кр}$ (г).

Изобретение поясняется чертежами, где на фиг. 1 представлен фрагмент электроэнцефалограммы с характерным веретеноподобным паттерном и высокочастотным артефактом (а), а также мгновенная энергия вейвлетного спектра $w(t)$ (б); на фиг. 2 приведен типичный фрагмент электроэнцефалограммы с веретеноподобным паттерном сложной формы (а) и усредненная по характерному временному интервалу $T=1.5$ с энергия вейвлетного спектра $\langle w(t) \rangle$ (б); на фиг. 3

приведен фрагмент типичной электроэнцефалограммы, состоящей из фоновой активности и веретеноподобных паттернов двух типов (а), проекция вейвлетной поверхности $|W(t,f)|$ (б), зависимости энергий вейвлетного спектра $w_1(t)$ и $w_2(t)$, приходящиеся на характерные частотные диапазоны $f \in (5,9)$ и $f \in (9,16)$ Гц (в) и усредненные по характерному временному интервалу $T=1.5$ с энергии вейвлетного спектра $\langle w_1(t) \rangle$ и $\langle w_2(t) \rangle$ (г).

Заявляемый способ выделения веретеноподобных паттернов на ЭЭГ осуществляется следующим образом.

Снимают сигнал ЭЭГ $U(t)$ с исследуемой системы и проводят его непрерывное вейвлетное преобразование:

$$W(s, t_0) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{\infty} U(t) \psi^* \left(\frac{t-t_0}{s} \right) dt \quad (1)$$

где $\psi(t)$ - базисный вейвлет (звездочка обозначает комплексное сопряжение), s - временной масштаб, t_0 - временной сдвиг вейвлетной функции вдоль оси времени. В качестве базисного вейвлета нужно использовать вейвлет Морле

$$\psi_0(\eta) = (1/\sqrt{\pi}) \exp(j\omega_0 \eta) \exp(-\eta^2/2) \quad [\text{Daubechies I., Ten lectures on wavelets. SIAM,}$$

1992]. Параметр базисного вейвлета выбирают равным $\omega_0=2\pi$, что, с одной стороны, обеспечивает хорошее соотношение между локализациями вейвлетной функции во времени и Фурье-пространстве [Короновский А.А., Храмов А.Е., Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения. М.: Физматлит, 2003], а с другой стороны, позволяет легко сопоставлять временные масштабы s вейвлетного преобразования (1) с частотами f спектрального представления сигнала, поскольку для данного значения параметра ω_0 выполняется соотношение $s \approx 1/f$.

По аналогии со спектром мощности Фурье-преобразования вводят в рассмотрение мгновенное $E(f)=|W(f,t_0)|^2$ и интегральное $\langle E(f) \rangle = \int |W(f,t_0)|^2 dt_0$ распределения

энергии по частотам. Поскольку веретеноподобные паттерны существенно отличаются от фоновой ЭЭГ, то и структура вейвлетной поверхности $W(t,f)$ для веретеноподобных паттернов и фоновой ЭЭГ также будет различна [Короновский А.А., Храмов А.Е., Письма в ЖТФ 27(1), (2001), 3-11; Короновский А.А., Храмов А.Е., Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения. М.: Физматлит, 2003]. Иными словами, энергия вейвлетного спектра $E(f,t)$ будет распределена по характерным частотам f , которые будут для разных фаз сигнала ЭЭГ $U(t)$ разными, причем доля энергии, приходящейся на эти характерные частоты, также будет различаться. Таким образом, можно перейти от анализа структуры вейвлетной поверхности $W(f,t)$ к анализу распределения энергии вейвлетного спектра по характерным частотам.

Для выделения веретеноподобных паттернов в каждый момент времени t определяют суммарные значения энергии вейвлетного спектра $w_i(t)$, приходящейся на выбранные характерные частотные диапазоны F_i .

$$w_i(t) = \int_{F_i} E(t, f) df \quad (2)$$

Выбор частотных диапазонов зависит от рассматриваемого сигнала, и в каждом конкретном случае выбирается на основании мгновенных распределений энергии вейвлетного спектра. Наиболее часто веретеноподобные паттерны находятся в диапазонах $F_1 \in (5;9)$ Гц (так называемые 5-9 Гц колебания) и $F_2 \in (9;16)$ Гц (сонные веретена). В то же самое время ЭЭГ является сложным сигналом, в котором могут появляться отдельные резкие всплески активности и в других частотных диапазонах. Подобные события могут вызвать кратковременный рост мгновенной энергии вейвлетного спектра $w_i(t)$, что приводит к ошибкам при диагностике (ложное детектирование). На фиг. 1 представлен фрагмент электроэнцефалограммы с характерным веретеноподобным паттерном и высокочастотным артефактом (а), а также мгновенная энергия вейвлетного спектра $w(t)$ (б). Как видно из фиг. 1б, помимо веретеноподобного паттерна 1 детектируется также высокочастотный всплеск, не

являющийся веретеноподобным паттерном 2. Для снижения вероятности ложного детектирования на следующем этапе заявляемого метода мгновенные значения энергий $w_i(t)$ дополнительно усредняются по характерному интервалу времени $T \in [1, 1.5]$ с (см. фиг. 1в).

$$\langle w_i(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_T w_i(t) dt \quad (3)$$

Регистрация веретеноподобных паттернов производится на основе анализа усредненных энергий $\langle w_i(t) \rangle$ и заданных пороговых значений энергии $w_{iкр}$. Условия для регистрации веретеноподобных паттернов первого (5-9 Гц колебания) и второго (сонные веретена) типов, соответственно, имеют вид:

$$w_1 > w_2, w_1 > w_{1кр} \quad (4)$$

$$w_1 < w_2, w_2 > w_{2кр} \quad (5)$$

Однако следует учитывать сложную динамику частоты в течение веретеноподобных паттернов. На фиг. 2 приведен типичный фрагмент электроэнцефалограммы с веретеноподобным паттерном сложной формы (а) и усредненная по характерному временному интервалу $T=1.5$ с энергия вейвлетного спектра $\langle w(t) \rangle$ (б). Как видно из фиг. 2б при детектировании происходит ошибка - дробление одно паттерна на несколько. Для ослабления данного эффекта в заявляемый метод вводится следующая процедура.

Если в момент времени t выполняется один из критериев (4), (5), то для последующих моментов времени значение $w_{iкр}$ понижают на 40%: $w'_{iкр} = 0.4 w_{iкр}$. Первоначальное значение $w_{iкр}$ возвращают в момент времени, для которого выполняется условие: $w_i(t) < w'_{iкр}$. Такое понижение порога детектирования позволяет значительно ослабить влияние сложной динамики частоты в течение веретеноподобных паттернов на качество детектирования (см. фиг. 2в).

Рассмотрим пример конкретной реализации заявляемого способа на примере временной реализации записи электрической активности головного мозга крысы линии WAG/Rij. На фиг. 3а приведен фрагмент типичной электроэнцефалограммы, состоящей из фоновой активности и веретеноподобных паттернов двух типов (серые прямоугольники на фиг. 3а, г). Проекция вейвлетной поверхности $|W(f,t)|$, полученная после выполнения непрерывного вейвлетного преобразования исследуемого сигнала ЭЭГ, показана на фиг. 3б. Видно, что фрагменты вейвлетной поверхности, соответствующие фоновой активности и веретеноподобным паттернам, оказываются принципиально различными. Энергии вейвлетного спектра $w_1(t)$ и $w_2(t)$, приходящиеся на характерные частотные диапазоны $f \in (5,9)$ и $f \in (9,16)$ Гц, показаны на фиг. 3в. На фиг. 3г приведены усредненные по характерному временному интервалу $T=1.5$ с энергии вейвлетного спектра $\langle w_1(t) \rangle$ и $\langle w_2(t) \rangle$. Рассмотрим для примера усредненную энергию вейвлетного спектра $\langle w_1(t) \rangle$. При появлении веретеноподобного паттерна величина $\langle w_1(t) \rangle$ превышает порог $w_{1кр}$ и в соответствующий момент времени детектируется веретеноподобный паттерн первого типа. Кроме того, пороговое значение энергии понижается с $w_{1кр}$ до $w'_{1кр}$ и детектирование продолжается. Когда величина $\langle w_1(t) \rangle$ перестает превышать порог $w'_{1кр}$, детектирование прекращается и пороговому значению энергии возвращается исходное значение $w_{1кр}$. Аналогично происходит детектирование веретеноподобных паттернов второго типа с помощью энергии $\langle w_2(t) \rangle$ и порогов $w_{2кр}$ до $w'_{2кр}$.

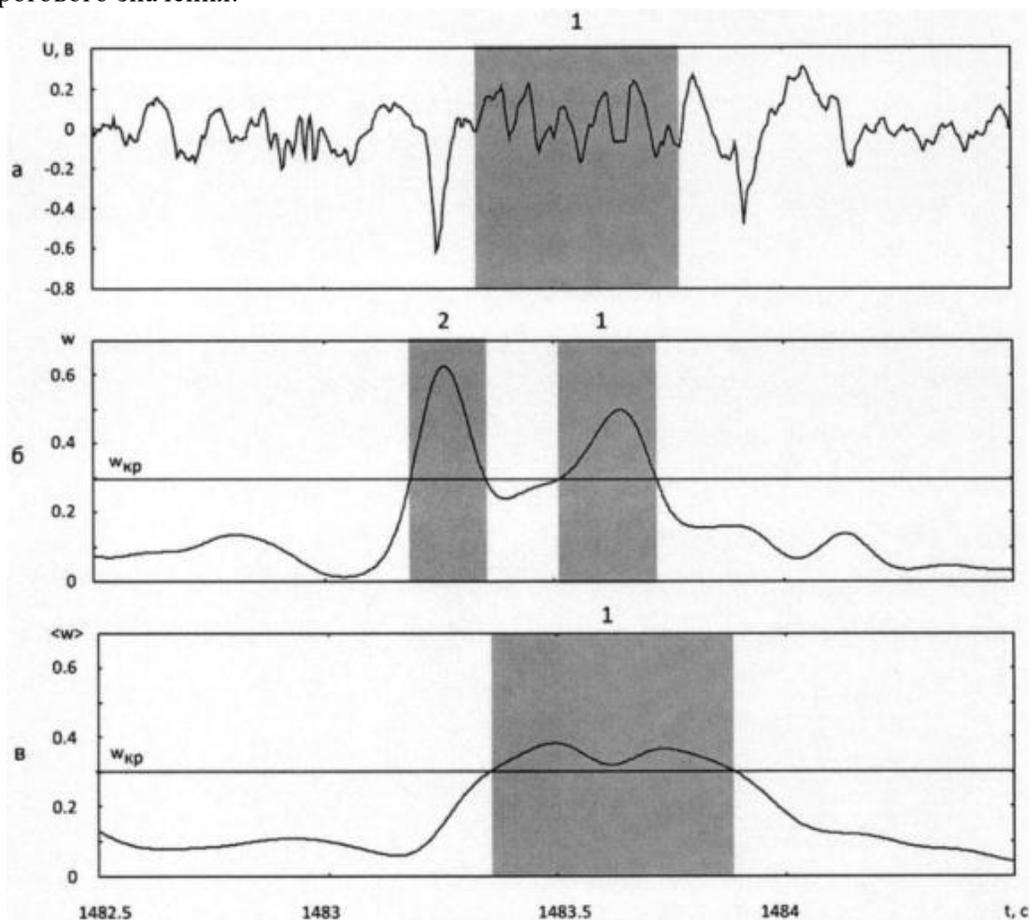
Таким образом, техническим результатом заявляемого способа выделения характерных фаз поведения является обеспечение возможности выделения сонных веретен и других веретеноподобных паттернов по временным рядам электроэнцефалограмм.

Формула изобретения

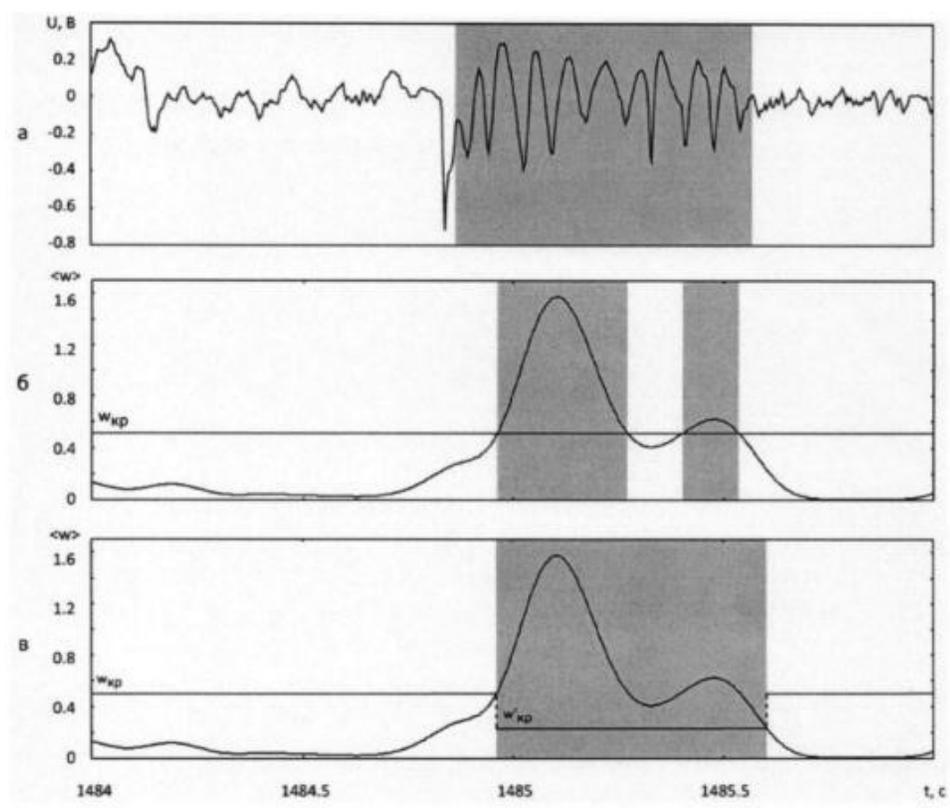
1. Способ выделения веретеноподобных паттернов по временным данным электроэнцефалограммы (ЭЭГ), характеризующийся тем, что регистрируют сигнал

ЭЭГ и осуществляют непрерывное вейвлетное преобразование; определяют мгновенное и интегральное распределения энергии вейвлетного спектра по временным масштабам, которые соответствуют частотным диапазонам 5-9 Гц для веретеноподобных паттернов и 9-16 Гц для сонных веретен; в каждый момент времени определяют суммарное значение энергии вейвлетного спектра и на основании мгновенных распределений энергии вейвлетного спектра определяют фазы поведения системы таким образом, чтобы в одной из фаз на выбранные диапазоны временных масштабов приходилась большая часть энергии вейвлетного спектра; усредняют мгновенные распределения энергий вейвлетного спектра по интервалу времени в диапазоне 1-1.5 с, задают пороговые значения энергии и по значениям энергии вейвлетного спектра, приходящимся на диапазоны 5-9 Гц и 9-16 Гц, определяют веретеноподобные паттерны.

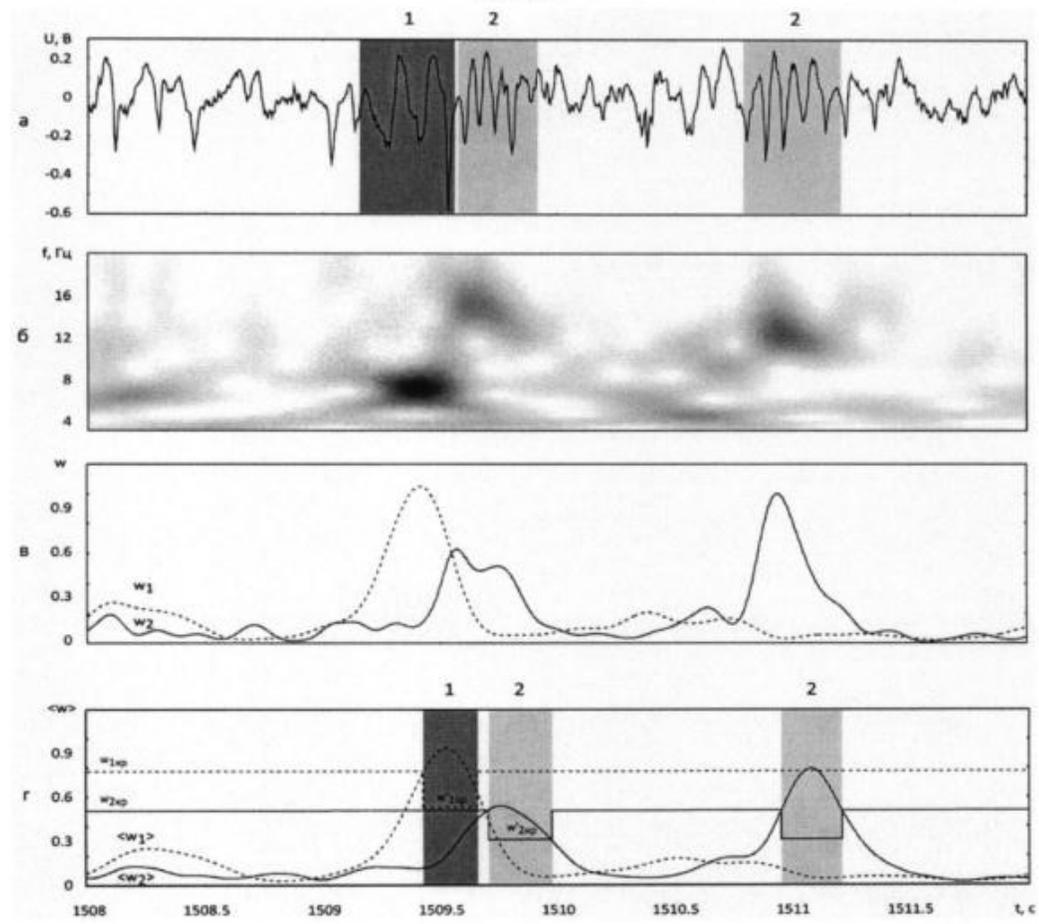
2. Способ по п.1, характеризующийся тем, что при выделении характерных фаз поведения систем пороговое значение энергии понижают на 40% и возвращают к исходной величине, когда суммарное значение энергии достигает заданного порогового значения.



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3

ИЗВЕЩЕНИЯ

ММ4А Досрочное прекращение действия патента из-за неуплаты в установленный срок пошлины за поддержание патента в силе

Дата прекращения действия патента: **21.05.2018**

Дата внесения записи в Государственный реестр: **03.04.2019**

Дата публикации и номер бюллетеня: [03.04.2019](#) Бюл. №10