

**АЛГОРИТМ РАСПОЗНАВАНИЯ СТАДИЙ СНА  
ПО ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАММАМ ПРИ ИХ ОПИСАНИИ  
АВТОРЕГРЕССИОННОЙ МОДЕЛЬЮ**

Безрук В.М.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники  
Лысенко В.А., АО «Научно-исследовательский институт радиоизмерений»  
61166, Харьков, пр. Ленина, 14, ХНУРЭ, тел. (057) 702-14-29  
E-mail: [bezruk@kture.kharkov.ua](mailto:bezruk@kture.kharkov.ua); факс (057) 702-91-13

Some practical peculiarities of random signals recognition methods are considered for non-traditional cases when the signals with unknown probabilistic characteristics are presented for recognition along with the signals preset in a probabilistic sense. Through statistical simulation the analysis of indices of recognition quality and speed of action for the considered algorithms of signal recognition was performed.

**Введение.** Анализ структуры ночного сна играет важную роль в диагностике заболеваний головного мозга. При функциональных заболеваниях нервной системы и при психозах жалобы на нарушения сна нередко бывают основными, а иногда и единственными. Поэтому исследование структуры ночного сна оказывается полезным и при анализе функции и механизмов сна. Также актуальными являются исследования структуры сна и в кардиологической практике, в частности, у больных ишемической болезнью сердца, поскольку опасные кризы сердечно-сосудистой системы часто возникают во время ночного сна.

Установлено, что электроэнцефалограмма (ЭЭГ) может служить индикатором уровня бодрствования мозга и адекватно отражают глубину сна. Однако распознавание стадий сна по записи ЭЭГ связано со значительными затратами времени, труда и средств, поскольку записи ЭЭГ ночного сна занимает сотни метров бумажной ленты. Кроме того, при визуальном анализе используются только описательные критерии для идентификации стадий сна, что порождает субъективные расхождения среди специалистов при оценке моментов перехода между стадиями сна. Поэтому возникает необходимость объективизации и автоматизации процесса исследования структуры сна. Для этого могут быть использованы математические методы распознавания ЭЭГ, представляющих собой случайные сигналы. Однако автоматизированное определение стадий сна по ЭЭГ с использованием математических методов распознавания случайных сигналов связано с определенными трудностями, вызванными близостью спектрального состава ЭЭГ для отдельных фаз и стадий сна, отличием соответствующих ЭЭГ у разных людей, а также возникновением различного рода артефактов.

Возможны различные подходы и алгоритмы распознавания к решению указанной задачи, которые определяются выбранным математическим описанием (математической моделью) ЭЭГ как случайных сигналов. Возможно использование спектральных методов распознавания, основанных на математическом описании сигналов коэффициентами разложения в ряды по некоторым базисным функциям (ДЭФ, Уолша, Хаара) [1]. Известно также применение для описания ЭЭГ авторегрессионной (АР) модели, что приводит к авторегрессионным алгоритмам распознавания стадий сна [2, 3].

В данной работе для учета влияния артефактов предложено использовать авторегрессионный метод распознавания заданных сигналов при наличии класса неизвестных сигналов [3]. Он позволит снизить вероятность ошибочных решений для решения задачи автоматического распознавания стадий сна в реальных условиях. Приведено описание предложенного алгоритма распознавания стадий сна по ЭЭГ, а также некоторые результаты его исследований методом статистического моделирования на ЭВМ.

**Описание алгоритма распознавания.** Предполагается, что ЭЭГ адекватно описывается математической моделью в виде процесса авторегрессии

$$X_t = a_1^i \cdot X_{t-1} + a_2^i \cdot X_{t-2} + \dots + a_{p_i}^i \cdot X_{t-p} + \sigma_i v_t. \quad (1)$$

Параметры АР модели  $A_i = (a_1^i, a_2^i, \dots, a_{p_i}^i, \sigma_i, i, p_i)$  в каждый момент времени  $t$  удовлетворяют условиям стабильности и принадлежат к одному из  $M$  классов. Полагается, что параметры модели АР, выбранной для описания ЭЭГ, известны либо могут быть оценены по классифицированным обучающим выборкам реализаций ЭЭГ. Принято также считать, что параметры модели ЭЭГ остаются неизменными на значительном промежутке времени.

После получения очередного отсчета  $x_t$  реализации ЭЭГ при уже имеющихся отсчетах  $\tilde{x}_t = (x_t, \dots, x_{t-T})$  необходимо принять решение, к какому классу принадлежит анализируемый участок ЭЭГ в момент времени  $t \geq T$  ( $T$  - длительность анализируемого участка ЭЭГ).

В ряде практических случаев длительность интервала времени анализа ЭЭГ  $T$ , по которому следует принимать решение, оказывается значительно меньше интервала времени постоянства параметров модели АР, выбранной для описания ЭЭГ. При этом можно предложить более простое по затратам решение поставленной задачи автоматизированного распознавания стадий сна по сравнению с рассмотренным в работе [2] авторегрессионным алгоритмом распознавания ЭЭГ. Для учета появляющихся в реальных условиях работы артефактов в решающем правиле распознавания предлагается ввести дополнительный  $M+1$ -й класс неизвестных сигналов. С учетом выражения для многомерной плотности вероятности для гауссовских авторегрессионных последовательностей алгоритм автоматизированного распознавания  $M$  заданных стадий сна по ЭЭГ при наличии класса неизвестных сигналов будет иметь следующий вид [3]

$$H^k : K_k(\tilde{x}) < \Lambda_k, \quad k = \overline{1, M} \quad (2a)$$

$$K_k(\tilde{x}) - K_i(\tilde{x}) + \ln \frac{(2\pi\sigma_i)^{p_i-L}}{(2\pi\sigma_k)^{p_k-L}} \geq \ln \frac{P_k}{P_i}, \quad (2б)$$

$$H^{M+1} : K_k(\tilde{x}) > \Lambda_k, \quad k = \overline{1, M}. \quad (2в)$$

Здесь 
$$K_k(\tilde{x}) = \frac{1}{2\sigma_k^2} \sum_{l=p-L}^L \left[ x_l - \mu_k - \sum_{j=p+1}^{p_k} a_j^k (x_{l-j} - \mu_k) \right]^2$$
 - соотношение,

определяющее нормированную ошибку предсказания в АР модели;

$\Lambda_k = \ln \frac{(2\pi)^{\frac{L}{2}} \sigma_k^{L-p_k} \lambda_k}{P_k}$  - некоторые пороговые значения, определяемые из условия обеспечения заданных вероятностей правильного распознавания заданных  $M$  стадий сна;

$p_k, a_j^k$  - порядок и параметры АР модели ЭЭГ для  $k$ -ой стадии сна.

Согласно этому алгоритму распознавания решение в пользу  $i$ -й стадии сна принимается в два этапа: при выполнении хотя бы одного из неравенств (1а), а также при выполнении системы неравенств (2б). Когда выполняются неравенства (2в), решение принимается в пользу  $M+1$ -го класса неизвестных сигналов.

В алгоритме распознавания (2) полагаются известными параметры АР моделей. При неизвестных параметрах можно получить их оценки по классифицированным обучающим выборкам ЭЭГ, например, из уравнения Юла-Уокера. При этом алгоритм работает в режиме обучения и распознавания. В режиме обучения по классифицированным выборкам ЭЭГ для заданных стадий сна вычисляются оценки корреляционных функций, через которые определяются параметры модели АР. На этапе распознавания по предъявленной для анализа реализации ЭЭГ длительностью  $T$  принимается решения о ее принадлежности к одному из  $M$  классов, соответствующих

стадиям сна, либо принимается решение о принадлежности к классу неизвестных наблюдений.

Геометрический смысл правила принятия решений согласно (2) состоит в том, что для ЭЭГ, соответствующих заданным стадиям сна, в пространстве сигналов строятся замкнутые собственные области. При попадании наблюдаемой реализации ЭЭГ в одну из собственных областей принимается решение в пользу соответствующей стадии сна. В противном случае наблюдаемая реализация ЭЭГ относится к  $M+1$ -му классу неизвестных сигналов.

**Некоторые результаты исследований.** Проведены исследования предложенного алгоритма распознавания методом статистического моделирования с помощью созданного пакета программ, программно реализующего алгоритм в режиме обучения и распознавания. При исследованиях использовались выборки реализаций ЭЭГ объемом по 50000 отсчетов для каждой из 6-ти стадий сна. По классифицированным обучающим выборкам ЭЭГ найдены параметры решающего правила (4). Контрольные выборки использованы при исследованиях практических особенностей решения задачи автоматизированного распознавания стадий сна по ЭЭГ. В результате исследований получена зависимость средней вероятности ошибочного распознавания стадий сна  $P_o$  от интервала наблюдения ЭЭГ  $T$  для текущей стадии сна (рис. 1,  $P_o$  - по вертикальной оси,  $T$  - по горизонтальной оси). Она дает возможность выбрать приемлемое время наблюдения ЭЭГ в реальных условиях работы.

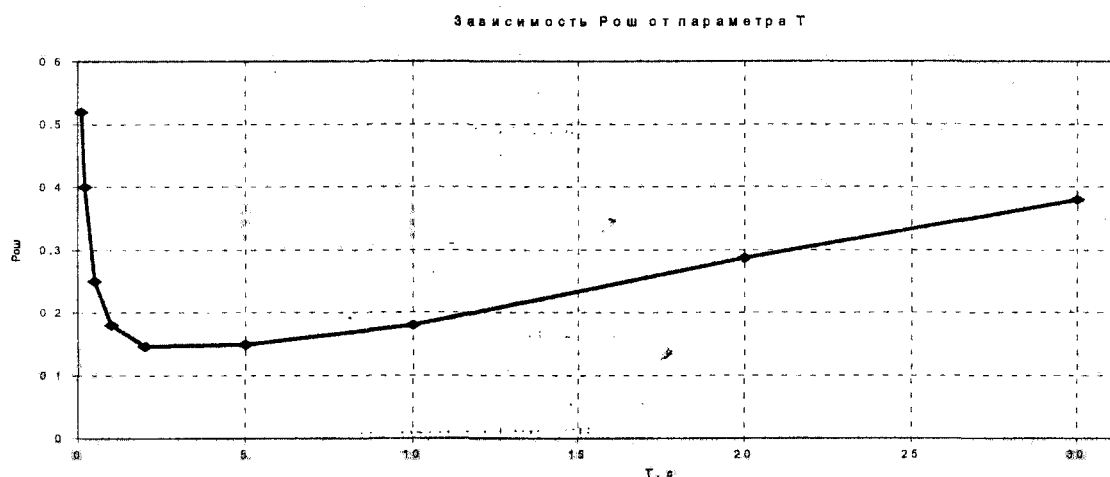


Рис. 1

### Литература

1. Неймарк Ю.П. Распознавание образов в медицинской диагностике. - М.: Наука, 1985. 376 с.
2. Липейка А., Малинаускас В., Гринявичус К., Лесене В. Автоматическое определение стадий сна по электроэнцефалограмме // Статистические проблемы управления. - Вильнюс: УМ АН Лит ССР, 1981. Вып. 51. С.85-97.
3. Безрук В.М., Коваленко Н.П. Синтез и анализ алгоритмов распознавания гауссовских случайных сигналов при наличии класса неизвестных сигналов на основе авторегрессионной модели // АСУ и приборы автоматики. - 2000. Вып.111. С.115-120.