

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

**«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н. Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»**

Кафедра дискретной математики и информационных технологий

**ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ АНАЛОГОВЫХ СИГНАЛОВ
МЕТОДАМИ ФЛИККЕР-ШУМОВОЙ СПЕКТРОСКОПИИ**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студента 2 курса 271 группы
направления 09.04.01 — Информатика и вычислительная техника
факультета КНиИТ
Королева Германа Константиновича

Научный руководитель
доцент, к. ф.-м. н.

Л. Б. Тяпаев

Заведующий кафедрой
доцент, к. ф.-м. н.

Л. Б. Тяпаев

Саратов 2023

ВВЕДЕНИЕ

В нашей работе рассматривается проблема характеристики аналоговых сигналов. В качестве сигналов, будут использоваться данные электроэнцефалографии (ЭЭГ). Электроэнцефалография – неинвазивный метод исследования функционального состояния головного мозга путем регистрации его электрической активности, отводимой с области скальпа (поверхности кожи волосистой части головы). Регистрация производится при помощи прибора – электроэнцефалографа через специальные электроды располагаемые на области скальпа по определенной системе. Запись регистрируемых сигналов производится посредством их преобразования некоторым АЦП.

Рассмотрим возможность определения вида психического заболевания у человека по имеющимся данным ЭЭГ. Психическое расстройство характеризуется клинически значимым нарушением когнитивной функции, эмоциональной регуляции или поведения человека. Обычно оно сопровождается дистрессом или серьезными функциональными нарушениями. Существует множество различных типов таких расстройств, каждое из которых имеет свои причины возникновения, симптоматику, механизмы развития и методы лечения. Примерами таких расстройств являются: депрессия, синдром дефицита внимания, синдром Аспергера, синдром Альцгеймера, шизофрения и другие. В мире такие расстройства имеют широкое распространение:

- По данным ВОЗ на 2019 г. в 2019 году во всем мире психическими расстройствами страдали почти один миллиард человек.
- Заместитель министра здравоохранения Олег Салагай заявил, что около 5,6 млн граждан России страдают психическими расстройствами.

Диагностика таких заболеваний является сложным процессом с применением различных методов (например клинические, психометрические, лабораторные и инструментальные), вердикт может вынести только квалифицированный специалист. При диагностике также нередко применяются методы компьютерного анализа ЭЭГ в качестве вспомогательных средств, например:

- методы математического анализа временных рядов;
- распознавание некоторых патологических графоэлементов и состояний;
- метод количественной ЭЭГ нейрометрии.

В работе [?] предлагается использовать метод фликкер-шумовой спектроскопии для определения психического заболевания без необходимости ис-

пользования других инструментов диагностики. Фликкер-шумовая спектроскопия – метод анализа временных рядов, полученных в результате неких физических измерений. Сущность ФШС подхода состоит в придании информационной значимости корреляционным взаимосвязям, которые реализуются в последовательности нерегулярностей сигналов – всплесков, скачков, изломов производных различных порядков как носителей информации на каждом пространственном уровне иерархической организации исследуемой эволюции. Этот метод может стать инструментом для решения проблемы индивидуализации при анализе биомедицинских сигналов. Основное отличие ФШС от иных методов анализа хаотических сигналов состоит во введении информационных параметров, характеризующих составляющие исследуемых сигналов в разных диапазонах частот, и реализации необходимых процедур для выделения таких параметров, в возможности извлечения информации из одновременно измеряемых сигналов с целью выявления и тестирования частотно-фазовых соответствий в функционировании взаимосвязанных подсистем организма как целостной системы, а также в установлении предвестников наиболее резких изменений функционально значимых показателей состояния организма.

Целью нашей работы было исследование возможности применения метода фликкер-шумовой спектроскопии при диагностике психического заболевания по имеющимся данным ЭЭГ.

В соответствии с данной целью, перед нами стояли следующие задачи:

- расчет фактора острейности для имеющихся данных ЭЭГ;
- расчет частоты глубины синхронизации для имеющихся данных ЭЭГ;
- оценка получившихся результатов.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе описываются основы ФШС-методологии.

В ФШС-методологии рассматриваются зависимости $S(f)$, задаваемые на ограниченных временных интервалах. Такие зависимости определяются условно как спектры мощности, поскольку для них возможно появление частотных участков, на которых $S(f) < 0$. В зависимостях $S(f)$ наиболее выразительно проявляются специфические для исследуемого сигнала частоты, которые можно связывать с присущими источникам сигналов резонансами и с интерференционными вкладами таких резонансов. Хаотические, более высокочастотные нерегулярные составляющие сигнала дают монотонно изменяющиеся вклады в зависимости $S(f)$.

Интерполяционная функция для составляющей спектра мощности $S_{cS}(f)$, формируемой нерегулярностями-всплесками, записывается в виде

$$S_S(f) \approx \frac{S_S(0)}{1 + (2\pi f T_{0S})^{n_0}}.$$

Здесь $S_S(0)$ – низкочастотный предел $S_S(f)$; параметр n_0 характеризует скорость потери корреляционных связей в последовательности нерегулярностей всплесков на временных интервалах T_{0S} .

Интерполяционная зависимость для составляющей спектра мощности $S_J(f)$, формируемой нерегулярностями-скачками, имеет вид

$$S_J(f) \approx \frac{S_J(0)}{1 + (2\pi f T_1)^{2H_1+1}},$$

где $S_J(0)$ – параметр, характеризующий низкочастотный предел $S_J(f)$.

Приведенные интерполяционные соотношения, определяющие вклад в спектр мощности нерегулярностей-всплесков и нерегулярностей-скачков соответственно, имеют одинаковый функциональный вид, параметры в этих соотношениях в общем случае различаются, так что $S_S(0) \neq S_J(0)$, $T_1 \neq T_{0S}$ и $2H_1 + 1 \neq n_0$. Для оценки суммарного хаотического вклада в спектр мощности удобно использовать интерполяцию:

$$S(f) \approx \frac{S(0)}{1 + (2\pi f T_0)^n}.$$

Здесь $S(0)$, T_0 и n – феноменологические параметры, которые вводятся для описания спектров мощности при обработке экспериментально получаемых временных рядов. Удобство такого представления обусловлено тем, что в высокочастотной области при $f > \max(2\pi T_0^{-1}, 2\pi T_1^{-1})$ вклады нерегулярностей-скачков и нерегулярностей-всплесков могут быть сопоставимыми. Именно поэтому в качестве меры хаотической составляющей сигнала, формируемой нерегулярностями-всплесками и нерегулярностями-скачками в области высоких частот, выбирается параметр $S(T_0^{-1})$.

Новые возможности ФШС открываются при использовании этого подхода для анализа потоков (массовых, электрических, магнитных) в распределенных системах, размеры которых превосходят пространственные масштабы областей заметного изменения анализируемых динамических переменных и эволюция фрагментов (подсистем) которых в сильной мере оказывается "переплетенной" из-за реализующихся сложных нелинейных взаимосвязей между фрагментами. Для анализа динамики "сверхпереплетений" в распределенных системах необходимо иметь данные о флуктуирующих значениях динамических переменных $V_i(t)$, которые измерены в различных точках i ($i = 1, 2, \dots, N$) исследуемой системы и определяются существующими в системе потоками, охватывающими в определенной временной последовательности области локализации измерительных устройств. Очевидно, что характер потоков в распределенных системах может со временем изменяться, потоки могут разделяться, частично соединяться с потоками, идущими из других областей системы. Информация о динамике реализующихся корреляционных взаимосвязей между динамическими переменными $V_i(t)$, измеряемыми в разных точках i , может быть извлечена при анализе временных зависимостей соответствующих корреляторов.

Далее из всего многообразия вводимых корреляционных соотношений будем рассматривать лишь простейшие типы корреляторов, которые определяются нерегулярностями-скачками измеряемых динамических переменных. Как следует из постулируемого вида динамики процессов на каждом пространственно-временном уровне иерархии, "двухточечные" корреляторы, характеризующие взаимосвязи между динамическими переменными $V_i(t)$ и $V_j(t)$ и определяемые лишь нерегулярностями-скачками этих динамических

переменных, должны представляться в виде:

$$q_{ij}(\tau, \theta_{ij}) = \left\langle \left[\frac{V_i(t) - V_i(t + \tau)}{\sqrt{2}\sigma_i} \right] \left[\frac{V_j(t + \theta_{ij}) - V_j(t + \theta_{ij} + \tau)}{\sqrt{2}\sigma_j} \right] \right\rangle,$$

где τ – время задержки (считаем, что $\tau > 0$), θ_{ij} – параметр смещения во времени, который определяется из требования положительной определенности коррелятора $q_{ij}(\tau, \theta_{ij})$ и максимальности его возможного значения. Знак и величина этого параметра характеризуют не только причинноследственную связь ("направленность потока") сигналов $V_i(t)$ и $V_j(t)$, но и характерную скорость передачи информации между точками i и j при заданном расстоянии между ними. При $\theta_{ij} > 0$ можно говорить о распространения потока в исследуемой системе от точки i к точке j , при $\theta_{ij} < 0$ – от точки j к точке i . Заметим, что в качестве параметров σ_i и σ_j динамических переменных $V_i(t)$ и $V_j(t)$ можно рассматривать либо стандартные среднеквадратичные отклонения, либо величины "приведенных" стандартных среднеквадратичных отклонений, определяемых согласно:

$$\sigma_i(\tau) = \left\{ \langle [V_i(t) - V_i(t + \tau)]^2 \rangle_{T-\tau-|\theta_{ij}|} \right\}^{1/2}.$$

Конечно, помимо представленных выше корреляторов, формируемых нерегулярностями-скачками измеряемых одновременно в точках i и j динамических переменных $V_i(t)$ и $V_j(t)$, можно анализировать обычно вводимые двухточечные корреляторы, вклад в которые дают оба типа указанных нерегулярностей – скачки и всплески:

$$Q_{ij}(\tau) = \left\langle \left[\frac{V_i(t)}{\sqrt{2}\sigma_{si}} \right] \left[\frac{V_j(t + \tau)}{\sqrt{2}\sigma_{sj}} \right] \right\rangle_{T-\tau},$$

ФШС-подход позволяет получать прямую информацию о динамике корреляционных взаимосвязей между одновременно измеряемыми сигналами – динамическими переменными $V_i(t)$ и $V_j(t)$ одной сущности, измеряемыми в пространственно разнесенных точках i и j исследуемой системы, либо сигналами разной природы. Принятие нерегулярностей динамических переменных в качестве носителей информации позволяет не только в наиболее общей феноменологической форме классифицировать всю содержащуюся в хаотиче-

ских сериях информацию, но и различимо извлекать необходимую ее часть. При этом число "требуемых" параметров или характерных зависимостей в каждом конкретном случае должно определяться поставленной задачей. При этом в одном и том же анализируемом объекте возможно выявлять разные качества и различать особенности разных уровней организации этого объекта.

Во второй главе описываются данные, над которыми проводилось исследование, и результаты применения ФШС-методов к этим данным.

В работе использовались данные ЭЭГ из двух медицинских центров, записанные за 2011-19 годы. Участники были разделены на 5 групп:

- болезнь Альцгеймера – два старших невролога поставили участникам исследования данный диагноз в соответствии с критериями Национального института старения и Ассоциации болезни Альцгеймера;
- контрольная группа – участники, проходящие обычную ЭЭГ по показаниям, не связанным с нервно-психическими заболеваниями. Ни у одного из участников этой группы не было диагностировано какое-либо заболевание, характерное для любой из других групп. В этой группе критерии исключения также включали диагноз биполярного расстройства; злоупотребление психоактивными веществами, психические или общие медицинские состояния, требующие госпитализации и др.
- депрессия – участники с диагнозом большого депрессивного расстройства (БДР), госпитализированные в течение индексного времени. Этот диагноз был установлен двумя старшими психиатрами в соответствии с критериями DSM-IV и DSM-V после психиатрического интервью, в ходе которого было установлено, что тяжесть депрессии была как минимум умеренной. Кроме того, участники должны были иметь по крайней мере один предыдущий большой депрессивный эпизод до 30 лет, а именно, индексный эпизод был рецидивирующим;
- умеренные когнитивные нарушения – два старших невролога поставили участникам исследования данный диагноз в соответствии с критериями Национального института старения и Ассоциации болезни Альцгеймера;
- шизофрения – диагноз шизофрении был установлен двумя старшими психиатрами в соответствии с критериями МКБ-10. Кроме того, участника пришлось госпитализировать в течение индексного времени.

Записи ЭЭГ были ретроспективно получены из медицинских карт всех пациентов. ЭЭГ выполнялась в обычных клинических условиях опытным лаборантом. Всем включенным участникам проводилась ЭЭГ с 8:00 до 13:00 с использованием 19-электродный стандарт в соответствии с международной системой размещения электродов 10-20. Участники отдыхали с открытыми и закрытыми глазами. Пациенты, которые прошли ЭЭГ во сне, были исключены.

Для исследования результатов ЭЭГ использовалась программное обеспечение "FNS Toolkit" версии 2.56. Оно распространяется по лицензии BSD и доступно по адресу <https://gitlab.com/ypolyakov/fns>. Программное обеспечение написано на языке MatLab (MatLab – высокоуровневый интерпретируемый язык программирования вместе с пакетом прикладных программ и интегрированной средой для разработки, выполнения инженерных и математических расчетов, работы с матричными базами данных, визуализации).

FNS Toolkit представляет собой набор процедур MATLAB FNS для анализа временных и пространственных рядов, генерируемых естественными системами. FNS Toolkit может применяться к трем видам задач:

- определение параметров или закономерностей, характеризующих динамику или структурные особенности сложных систем;
- поиск предвестников резких изменений состояния различных сложных систем на основе априорной информации о динамике систем;
- определение динамики потоков в распределенных системах на основе анализа динамических корреляций в стохастических сигналах, одновременно измеряется в разных точках пространства.

Инструментами для каждого типа задач являются процедура параметризации FNS, коэффициент нестационарности FNS и двойной (кросс) коррелятор FNS соответственно.

Входные файлы должны иметь формат с табуляцией в качестве разделителя: первое поле – это момент времени (или пространственная координата), второе поле – фактическое значение ряда. Перевод данных в формат, подходящий для программы происходил с помощью скрипта на языке Python.

Для поиска диагностических признаков психических заболеваний используем ЭЭГ-сигналы фиксируемые на электродах. Два основных параметра – $S(T_0^{-1})$ (фактор острейности), описанный ранее и частота f_s глубины

синхронизации сигнала.

Для вычисления частоты глубины синхронизации сигнала определим число пар n_s локальных максимумов $q(\tau_0, \theta)$ вдоль оси θ , расположенных симметрично относительно $\theta = 0$ и превышающих пороговую величину $q = 0.1$. Динамику корреляционных взаимосвязей будем анализировать на последовательности 9 интервалов длительностью $T_s = 800f_d^{-1}$, составляющих общий временной интервал T_{tot} .

Число n_s пар локальных максимумов, приходящихся в среднем на единицу времени в каждом из 9 временных интервалов T_s , может характеризовать частоту $f_s = n_s/T_s$ глубины синхронизации соответствующих электродов и выступать в качестве одного из критериев при отнесении пациента к той или иной группе.

Рассмотрим классификацию пациентов по видам заболевания, которую можно сделать на основании вышеприведенных данных. Стоит отметить, что пациенты с умеренными когнитивными нарушениями в среднем имеют достаточно низкие значения фактора острейности для всех электродов, из-за чего их сложно отличить от здоровых (например, среднее значение $Sc(T_0^{-1})$ для электрода F_7 у здоровых пациентов составляет 5.58, а у пациентов с диагнозом умеренные когнитивные нарушения – 6.27). Пациенты из здоровой группы были разделены в таблице на две подгруппы только для удобства отображения. В первую очередь выводы делались относительно фактора острейности, в некоторых случаях, когда окончательное решение принять было затруднительно использовался параметр f_s .

Пациенты с диагнозом шизофрения определялись по значениям фактора острейности для электродов F_3 и F_4 . Пациентов с диагнозом Альцгеймер и депрессия можно отличить от здоровых по электродам T_5 и T_6 , однако этого недостаточно для определения заболевания. Решить эту проблему можно обратившись к электродам O_1 и O_2 . В идеально-предельных случаях, большое значение параметра f_s при малом значении фактора острейности означает, что пациент здоров, в противном случае – болен. Результаты исследования приведены в таблице 1.

Из 209 пациентов (не считая пациентов с умеренными когнитивными искажениями) с врачебной диагностикой совпадают 163 и соответственно 46 отличаются, что составляет 22%.

Таблица 1 – Классификация пациентов по виду заболевания

Альцгеймер	Здоровый	Здоровый	Депрессия	Шизофрения
<i>alz</i> ₀	<i>alz</i> ₆	<i>controls</i> ₄₂	<i>dep</i> ₀	<i>schiz</i> ₁
<i>alz</i> ₁	<i>alz</i> ₁₂	<i>controls</i> ₄₃	<i>dep</i> ₁	<i>schiz</i> ₂
<i>alz</i> ₂	<i>alz</i> ₁₇	<i>controls</i> ₄₅	<i>dep</i> ₂	<i>schiz</i> ₃
<i>alz</i> ₃	<i>alz</i> ₁₈	<i>controls</i> ₄₆	<i>dep</i> ₃	<i>schiz</i> ₄
<i>alz</i> ₄	<i>alz</i> ₂₀	<i>controls</i> ₄₇	<i>dep</i> ₄	<i>schiz</i> ₅
<i>alz</i> ₅	<i>alz</i> ₂₉	<i>controls</i> ₄₈	<i>dep</i> ₅	<i>schiz</i> ₆
<i>alz</i> ₇	<i>alz</i> ₃₃	<i>controls</i> ₄₉	<i>dep</i> ₆	<i>schiz</i> ₇
<i>alz</i> ₈	<i>alz</i> ₃₅	<i>controls</i> ₅₀	<i>dep</i> ₉	<i>schiz</i> ₈
<i>alz</i> ₉	<i>alz</i> ₃₆	<i>controls</i> ₅₁	<i>dep</i> ₁₀	<i>schiz</i> ₉
<i>alz</i> ₁₀	<i>alz</i> ₃₇	<i>controls</i> ₅₃	<i>dep</i> ₁₁	<i>schiz</i> ₁₁
<i>alz</i> ₁₁	<i>alz</i> ₄₀	<i>controls</i> ₅₄	<i>dep</i> ₁₂	<i>schiz</i> ₁₂
<i>alz</i> ₁₃	<i>alz</i> ₄₂	<i>controls</i> ₅₅	<i>dep</i> ₁₃	<i>schiz</i> ₁₄
<i>alz</i> ₁₄	<i>dep</i> ₇	<i>controls</i> ₅₆	<i>dep</i> ₁₅	<i>schiz</i> ₁₆
<i>alz</i> ₁₅	<i>dep</i> ₈	<i>controls</i> ₅₇	<i>dep</i> ₁₆	<i>schiz</i> ₁₉
<i>alz</i> ₁₆	<i>dep</i> ₁₄	<i>controls</i> ₅₈	<i>dep</i> ₁₈	<i>schiz</i> ₂₀
<i>alz</i> ₁₉	<i>dep</i> ₁₇	<i>controls</i> ₅₉	<i>dep</i> ₂₁	<i>schiz</i> ₂₁
<i>alz</i> ₂₁	<i>dep</i> ₁₉	<i>controls</i> ₆₀	<i>dep</i> ₂₃	<i>schiz</i> ₂₂
<i>alz</i> ₂₂	<i>dep</i> ₂₀	<i>controls</i> ₆₁	<i>dep</i> ₂₅	<i>schiz</i> ₂₃
<i>alz</i> ₂₃	<i>dep</i> ₂₂	<i>controls</i> ₆₃	<i>dep</i> ₂₆	<i>schiz</i> ₂₄
<i>alz</i> ₂₄	<i>dep</i> ₂₄	<i>controls</i> ₆₄	<i>controls</i> ₉	<i>schiz</i> ₂₅
<i>alz</i> ₂₅	<i>dep</i> ₂₇	<i>controls</i> ₆₅	<i>controls</i> ₁₃	<i>schiz</i> ₂₆
<i>alz</i> ₂₆	<i>controls</i> ₁	<i>controls</i> ₆₆	<i>controls</i> ₄₄	<i>schiz</i> ₂₇
<i>alz</i> ₂₇	<i>controls</i> ₂	<i>controls</i> ₆₉	<i>controls</i> ₆₂	<i>schiz</i> ₂₉
<i>alz</i> ₂₈	<i>controls</i> ₃	<i>controls</i> ₇₀	<i>controls</i> ₆₈	<i>schiz</i> ₃₀
<i>alz</i> ₃₀	<i>controls</i> ₄	<i>controls</i> ₇₂	<i>controls</i> ₉₅	<i>schiz</i> ₃₂
<i>alz</i> ₃₁	<i>controls</i> ₅	<i>controls</i> ₇₃		<i>schiz</i> ₃₃
<i>alz</i> ₃₂	<i>controls</i> ₆	<i>controls</i> ₇₄		<i>schiz</i> ₃₆
<i>alz</i> ₃₄	<i>controls</i> ₇	<i>controls</i> ₇₅		<i>schiz</i> ₃₈
<i>alz</i> ₃₈	<i>controls</i> ₈	<i>controls</i> ₇₇		<i>schiz</i> ₃₉
<i>alz</i> ₃₉	<i>controls</i> ₁₀	<i>controls</i> ₇₈		<i>schiz</i> ₄₀
<i>alz</i> ₄₁	<i>controls</i> ₁₁	<i>controls</i> ₇₉		<i>schiz</i> ₄₁
<i>controls</i> ₀	<i>controls</i> ₁₂	<i>controls</i> ₈₀		
<i>controls</i> ₂₀	<i>controls</i> ₁₄	<i>controls</i> ₈₁		
<i>controls</i> ₂₈	<i>controls</i> ₁₅	<i>controls</i> ₈₂		
<i>controls</i> ₃₀	<i>controls</i> ₁₆	<i>controls</i> ₈₃		
<i>controls</i> ₅₂	<i>controls</i> ₁₇	<i>controls</i> ₈₄		
<i>controls</i> ₆₇	<i>controls</i> ₁₈	<i>controls</i> ₈₅		
<i>controls</i> ₇₁	<i>controls</i> ₁₉	<i>controls</i> ₈₆		
<i>controls</i> ₇₆	<i>controls</i> ₂₁	<i>controls</i> ₈₇		
	<i>controls</i> ₂₂	<i>controls</i> ₈₈		
	<i>controls</i> ₂₃	<i>controls</i> ₈₉		
	<i>controls</i> ₂₄	<i>controls</i> ₉₀		
	<i>controls</i> ₂₅	<i>controls</i> ₉₁		
	<i>controls</i> ₂₆	<i>controls</i> ₉₂		
	<i>controls</i> ₂₇	<i>controls</i> ₉₃		
	<i>controls</i> ₂₉	<i>controls</i> ₉₄		
	<i>controls</i> ₃₁	<i>schiz</i> ₀		
	<i>controls</i> ₃₂	<i>schiz</i> ₁₀		
	<i>controls</i> ₃₃	<i>schiz</i> ₁₃		
	<i>controls</i> ₃₄	<i>schiz</i> ₁₅		
	<i>controls</i> ₃₅	<i>schiz</i> ₁₇		
	<i>controls</i> ₃₆	<i>schiz</i> ₁₈		
	<i>controls</i> ₃₇	<i>schiz</i> ₂₈		
	<i>controls</i> ₃₈	<i>schiz</i> ₃₁		
	<i>controls</i> ₃₉	<i>schiz</i> ₃₄		
	<i>controls</i> ₄₀	<i>schiz</i> ₃₅		
	<i>controls</i> ₄₁	<i>schiz</i> ₃₇		

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе показано, что существует возможность характеристики аналоговых сигналов методами фликкер-шумовой спектроскопии. Иными словами, возможно абстрагирование от индивидуальных особенностей биомедицинских показателей, содержащихся в специфических и неспецифических составляющих ЭЭГ, и поиск физиологических критериев указанных патологий могут осуществляться на основе анализа количественных показателей, характеризующих меру нарушения частотно-фазовой синхронизации результатов ЭЭГ. Определить вид некоторых болезней можно с помощью метода фликкер-шумовой спектроскопии.

Основные источники информации:

- 1 Тимашев С.Ф. Фликкер-шумовая спектроскопия как "прибор" для индивидуальной медицины будущего / С.Ф. Тимашев, С.А. Дёмин, О.Ю. Панищев, Ю.С. Поляков, А.Я. Каплан, Ю.А. Нефедьев // Ученые записки Казанского университета. Серия Физико-математические науки. – 2012. – Т. 154. № 4. – С. 161-177.
- 2 Эпштейн Э. М. Друде теория металлов / Физическая энциклопедия: Т. 2. – М.: Большая Российская энциклопедия, 1990. – С. 20–21.
- 3 Владимиров В. С. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1967. – 436 с.
- 4 Климонтович Ю. Л. Статистическая физика открытых систем. Том 2. – М.: Янус-К, 1999. – 438 с.
- 5 Timashev S.F. Review of flicker noise spectroscopy in electrochemistry / S.F. Timashev, Yu.S. Polyakov // Fluct. Noise Letters. – 2007. – V. 7, No 2. – P. R15-R47
- 6 Тимашев С.Ф. Фликкер-шумовая спектроскопия: информация в хаотических сигналах / С.Ф. Тимашев // М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 248 с.
- 7 Тимашев С.Ф. Динамические явления в сложных системах / С.Ф. Тимашев, С.А. Дёмин, О.Ю. Панищев, Ю.С. Поляков, А.Я. Каплан – Казань: Изд. МОиН РТ, 2011. – С. 279-296.