Министерство образования и науки Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра радиофизики и нелинейной динамики

Применение метода эмпирических мод для анализа сигналов сложной структуры

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студентки 4 курса 421 группы
направления 03.03.03 «Радиофизика»
физического факультета
Дрозденко Татьяны Александровны

Научный руководитель
профессор, д.ф.-м.н., профессор ____________________ А.Н. Павлов

Зав. кафедрой
д.ф.-м.н., профессор ____________________ В.С. Анищенко

Саратов 2016 год

ВВЕДЕНИЕ

Анализ динамики систем с меняющимися во времени характеристиками является актуальной проблемой при решении многих задач, предусматривающих обработку цифровых сигналов. Преимущественно, исследования проводятся на основе классических методов обработки экспериментальных данных, например, спектрального или корреляционного анализа. Однако они применимы только в условиях квазистационарности анализируемых процессов [1, 2].

Несмотря на то, что за последние десятилетия был достигнут значительный прогресс в развитии методов изучения динамики систем с характеристиками, меняющимися во времени [3–5], совершенствование существующих методов и развитие новых подходов, позволяющих получать информацию об особенностях сложной структуры экспериментальных данных, по-прежнему остается актуальной задачей радиофизики. Одним из перспективных подходов является метод разложения сигнала на внутренние (эмпирические) моды [6]. Этот метод часто рассматривают как составную часть преобразования Гильберта-Хуанга, которое является обобщением преобразования Гильберта на многокомпонентные процессы, характеризующиеся широким диапазоном частот. Однако, сам принцип разложения на эмпирические моды (*empirical mode decomposition*) может применяться не только для проведения частотно-временного анализа нестационарных процессов, но и с целью разложения сигнала на более простые составляющие, которые могут анализироваться по отдельности. Метод эмпирических мод к настоящему времени хорошо себя зарекомендовал при решении широкого круга задач. Если сравнивать этот метод, например, с вейвлет-анализом, то обнаруживаются как отдельные преимущества, так и отдельные недостатки. Например, метод EMD позволяет улучшать частотно-временное разрешение процессов с быстро меняющимися характеристиками по сравнению с методами, применяющими непрерывное вейвлет-преобразование. Плюс данного подхода состоит еще и в том, что он не требует выбора базиса. А в качестве недостатка можно отметить незавершенность теории данного метода. Если теория вейвлетов базируется на строгом математическом аппарате (доказанных теоремах, основных положениях теории вейвлетов), то математический аппарат метода EMD только формируется, что приводит, например, к определенным сложностям интерпретации выделенных эмпирических мод и результатов их анализа. По этой причине исследование возможностей данного метода и его использование при решении различных задач важны для развития этого сравнительно нового, но, по мнению ряда исследователей, весьма перспективного инструментария.

Целью данной выпускной квалификационной работы является изучение динамики структурных элементов почки на основе метода эмпирических мод.

Задачами выпускной квалификационной работы являются исследование динамики одиночных и парных нефронов крыс с применением метода разложения сигналов на эмпирические моды и расчета старшего показателя Ляпунова и сравнительный анализ динамики нефронов крыс с нормальным и повышенным артериальным давлением.

Материалы исследования. Исследования проводились на основе анализа экспериментальных данных (сигналы проксимального давления фильтрата в проксимальных канальцах нефронов. Цифровая обработка сигналов проводилась на основе метода эмпирических мод [6] и метода расчета старшего показателя Ляпунова [7].

Выпускная квалификационная работа содержит введение, три главы (1.Метод эмпирических мод; 2. Динамика нефронов и методы ее исследования; 3. Результаты проведенных исследований), заключение и список использованных источников. Общий объем работы 42 стр.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Метод эмпирических мод. Метод эмпирических мод предусматривает разложение сигнала на «внутренние» моды, присутствующие в многокомпонентных процессах. Этот метод был предложен в рамках преобразования Гильберта-Хуанга, которое является обобщением стандартного преобразования Гильберта [1]. Преобразование Гильберта целесообразно применять в том случае, когда анализируемый процесс $x(t)$ является узкополосным. При использовании преобразования Гильберта существует еще одна проблема – появление отрицательной мгновенной частоты колебаний в случае анализа сигналов с ненулевым средним уровнем. Чтобы избежать таких нефизических ситуаций, был предложен метод эмпирических (или «внутренних») мод [6]. Название «внутренней» моды означает, что вводятся в рассмотрение функции времени, которые являются составными частями анализируемого процесса.

Для применения преобразования Гильберта необходимо привести сигнал к нулевому среднему уровню. Для этого нужно вычислить верхнюю и нижнюю огибающие сигнала, усреднить их, и такое усреднение даст временную зависимость среднего значения сигнала. Если теперь вычесть из анализируемого сигнала вычисленный средний уровень, то это приведет к «выпрямлению» сигнала, и его среднее значение будет находиться в окрестности нуля. Далее можно повторить процедуру вычисления локального среднего уровня (путем усреднения огибающих сигнала) и его последовательное вычитание из исходного процесса. Описанная процедура определяет первую эмпирическую моду, которая получается после неоднократных вычитаний локального среднего уровня. Эта мода является наиболее высокочастотной. Если ее затем вычесть из исходного сигнала, то можно по аналогии находить и более медленные моды, до тех пор, пока не будет получена монотонная функция времени, описывающая тренд анализируемого процесса. Таким образом, решаемая задача состоит в том, чтобы разложить исходный сигнал $x(t)$ на совокупность составляющих c_j

(эмпирических мод), для каждой из которых должны выполняться следующие условия [6]:

1) Должно обеспечиваться равенство нулю локального среднего уровня, вычисляемого как среднее значение верхней и нижней огибающих эмпирической моды в каждый момент времени.
2) Количество локальных минимумов (максимумов) функции должно совпадать (или быть отличным не более чем на 1) с количеством пересечений нулевого уровня.

Рассмотрим процедуру определения эмпирических мод на примере некоторого произвольного сигнала $x(t)$. Вначале найдем по-отдельности все локальные максимумы сигнала, а затем – все локальные минимумы. Построим верхнюю и нижнюю огибающие путем интерполяции соответствующих последовательностей локальных максимумов и локальных минимумов. Усредним найденные огибающие, в результате чего получим временную зависимость локального среднего уровня $m_1(t)$. Перейдем от исходного сигнала $x(t)$ к сигналу с устраненным средним уровнем

$$h_1(t)=x(t) - m_1(t). \tag{1}$$

Далее для функции $h_1(t)$ снова вычисляются огибающие, они усредняются, что приводит к появлению функции $m_{11}(t)$. Затем найденный средний уровень вычитается, и вычисления повторяются. В виде итерационной процедуры описанную последовательность действий можно сформулировать следующим образом:

$$\begin{gathered} h_{11}(t) = h_1(t) - m_{11}(t), \\ \ldots \\ h_{1k}(t) = h_{1(k-1)}(t) - m_{1k}(t). \end{gathered} \tag{2}$$

Как только итерационная процедура завершается, можно найти первую эмпирическую моду

$$c_1(t) = h_{1k}(t). \tag{3}$$

Она отражает ритмический процесс в составе анализируемого сигнала, который происходит с максимальной частотой. Зафиксировав первую моду, мы переходим к новому сигналу

$$r_1(t) = x(t) - c_1(t). \tag{4}$$

Полученный сигнал $r_1(t)$ теперь воспринимается в качестве исходного, и для него заново проводится итерационная процедура вычисления локальных средних значений. Таким образом будет найдена вторая эмпирическая мода $c_2(t)$ и далее (по той же схеме) все остальные эмпирические моды в структуре анализируемого сигнала:

$$r_1(t) - c_2(t) = r_2(t),$$

$$\dots$$

$$r_{n-1}(t) - c_n(t) = r_n(t). \tag{5}$$

Вычисления можно проводить до тех пор, пока функция $r_n(t)$ является немонотонной. В результате исходный сигнал $x(t)$ представляется в виде суммы эмпирических мод c_j и монотонной функции r_n, описывающей тренд:

$$x(t) = \sum_{i=1}^{n} c_i(t) + r_n(t). \tag{6}$$

В данной работе метод эмпирических мод применяется для исследования динамики нефронов – структурных элементов почки в целях выявления различий механизмов динамики при изменении функционального состояния организма.

Динамика нефронов и методы ее исследования. В последние годы возник большой интерес к изучению динамики структурных элементов почки – нефронов, причем, не только у представителей медицины и физиологов, но и у физиков (прежде всего, специалистов в области нелинейной теории колебаний). Причиной данного интереса является то обстоятельство, что изменения динамики нефронов при почечной гипертонии сопровождаются изменениями режимов колебаний, которые могут быть охарактеризованы в терминах хаотических колебаний, синхронизации хаоса и т.д. [8, 9].

Нефрон является структурным элементом почки, которому отводится важная роль в регуляции кровяного давления, фильтрации крови, поддержания нормального уровня pH и регуляции количества метаболитов и электролитов.

Существует два физиологических механизма, которые осуществляют регуляцию скорости почечного кровотока в нефронах: канальцево-гломеулярная обратная связь (КГОС) и миогенный отклик гладких мышц стенок сосудов. Фильтрация кровотока, контролируемая механизмом КГОС, осуществляется в зависимости от концентрации ионов *NaCl* в фильтрате, протекающем по петле Генле и попадающем в дистальный каналец. Этот механизм приводит к появлению колебаний скорости потока жидкости или давления в петле Генле с частотой 0,02-0,04 Гц. Незатухающие колебания, вызванные механизмом КГОС, являются почти периодическими при нормальном артериальном давлении, но сильно хаотическими при гипертонии.

Второй механизм, связанный с миогенным откликом, приводит к появлению ритмического процесса, имеющего более высокую частоту (0,1-0,2 Гц) и меньшую амплитуду. Из-за того, что оба механизма регуляции почечного кровотока воздействуют на одну и ту же артериолу, они так же взаимодействуют и между собой. Чаще всего нефрон рассматривают как биологический осциллятор, способный генерировать колебания с двумя характерными ритмами: медленный ритм, обусловленный КГОС, с периодом около 30 секунд и сравнительно быстрый ритм с периодом 5-10 секунд, вызванный миогенным откликом сосудов.

В предыдущих исследованиях [8, 9] достаточно подробно изучались эффекты взаимодействия ритмических процессов в динамике нефронов. С этой целью применялись методы исследования, основанные на непрерывном вейвлет-преобразовании, которое является одним из стандартных вариантов частотно-временного анализа сигналов сложной структуры. Было показано, что если для нормотензивных крыс колебания близки к периодическим (строго периодических колебаний в динамике объектов живой природы не наблюдается из-за процессов адаптации и т.п., но можно говорить о почти периодической динамике), то для гипертензивных крыс колебания имеют несомненно более сложный вид, позволяя говорить о хаотической динамике.

Вследствие нестационарности (изменения характеристик колебательного процесса во времени), спектральный анализ ранее проводился на основе вейвлет-преобразования.

Результаты проведенных исследований. Учитывая изменения динамики нефронов при развитии почечной гипертонии, в данной работе была поставлена задача исследования, что будет происходить с динамикой медленных и быстрых ритмов нефронов спонтанных гипертензивных крыс по сравнению с динамикой соответствующих ритмов нефронов нормотензивных крыс. При этом отдельно исследовалась динамика одиночных нефронов и парных нефронов. В первом случае важно было установить изменения, происходящие на уровне отдельных структурных элементов почки. Во втором случае принципиальным моментом являлось изучение влияния связи на динамику нефронов.

Чтобы количественно охарактеризовать процесс хаотизации динамики нефронов при развитии гипертонии, в качестве количественного показателя степени хаотичности была выбрана величина старшего показателя Ляпунова, который вычислялся по эмпирическим модам на основе алгоритма [7].

Экспериментальная база данных включала записи давления фильтрата в проксимальных канальцах нефронов двух групп крыс – нормотензивных и спонтанных гипертензивных. В ходе экспериментов были записаны сигналы нормотензивных крыс (32 одиночных нефронов и 18 парных нефронов) и спонтанных гипертензивных крыс (38 одиночных нефронов и 20 парных нефронов). Это обеспечивало достаточную статистику для сравнения динамики в норме и при гипертонии, а также сопоставление эффектов, наблюдаемых в отсутствие связи структурных элементов почки (одиночные нефроны) и при ее наличии (парные нефроны).

Вначале проводилось разложение сигналов на эмпирические моды. Учитывая, что экспериментальные данные содержат два характерных ритма колебаний (с известными частотами), можно достаточно легко идентифицировать соответствующие этим ритмам эмпирические моды. Было отмечено усложнение поведения медленной моды при гипертонии – вместо периодических колебаний наблюдается хаотическое поведение. Быстрая мода также меняется, и визуально заметно усложнение режима колебаний по сравнению с нефронами нормотензивных крыс. Чтобы количественно охарактеризовать усложнение динамики, были проведены расчеты показателей Ляпунова для каждой из мод.

Результаты проведенного статистического анализа состоят в следующем. Для медленных ритмов нефронов нормотензивных и спонтанных гипертензивных крыс получены значения λ_1=0.11 и λ_1=0.24. Таким образом, развитие почечной гипертонии более чем в 2 раза увеличивает количественные значения меры хаотичности. Для быстрых ритмов нефронов нормотензивных и спонтанных гипертензивных крыс были получены результаты λ_1=0.53 и λ_1=0.86. Мы видим, что для быстрых ритмов наблюдаются более высокие значения показателей Ляпунова, и динамика нефронов спонтанных гипертензивных крыс характеризуется более высокими значениями меры хаотичности. Несмотря на то, что для быстрых ритмов относительные изменения являются менее выраженными в процентном отношении (увеличение менее чем в 2 раза по сравнению с нормой), абсолютные величины показателей Ляпунова для быстрых мод в 3-5 раз выше, чем для медленных.

Далее были проведены сравнительные исследования динамики одиночных и парных нефронов нормотензивных крыс, целью которых было выяснить, как наличие связи между структурными элементами почки влияет на их динамику. В соответствии с полученными результатами, наличие связи между нефронами уменьшает степень хаотичности как для медленных ритмов (λ_1=0.07 по сравнению с λ_1=0.11), так и для быстрых (λ_1=0.38 по сравнению с λ_1=0.53). Соответствующие изменения являются значительными (36% и 28%) и существенно превышают ошибку метода расчета старшего показателя Ляпунова, которая обычно не превышает 10% (в случае рассмотрения усредненных значений показателей при варьировании параметров алгоритма).

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что наличие связи между структурными элементами почки приводит к уменьшению степени хаотичности ритмических процессов, как для медленных, так и для быстрых ритмов.

Аналогичные исследования далее были проведены для нефронов спонтанных гипертензивных крыс. Как следует из результатов статистического анализа, степень хаотичности уменьшается и для парных нефронов гипертензивных крыс (λ_1=0.21 для медленного ритма и λ_1=0.79 для быстрого ритма) по сравнению с динамикой одиночных нефронов (λ_1=0.24 для медленного ритма и λ_1=0.86 для быстрого ритма), но в процентном отношении это изменение менее существенно по сравнению с динамикой нефронов нормотензивных крыс. Так, уменьшение значений старшего показателя Ляпунова составило 12% для медленного ритма и 8% для быстрого. Для сравнения, в случае нормотензивных крыс появление связи между нефронами приводило к уменьшению показателей на 36% и 28%, то есть эти изменения были примерно в 3 раза более сильными.

Как следует их приведенных значений старшего показателя Ляпунова, уменьшение значений показателя происходит при наличии связей между структурными элементами почки. Достаточно сильное уменьшение отмечено для нефронов нормотензивных крыс. Это позволяет предположить, что взаимная подстройка (синхронизация динамики нефронов) к их более регулярной динамики. Данный вывод в целом не противоречит известным теоретическим представлениям, когда динамика ансамблей взаимодействующих элементов становится проще динамики отдельных (невзаимодействующих) осцилляторов. Примером могут служить нейронные генераторы ритмов, которые (при наличии связи между нейронами) генерируют четкий ритмический процесс, а в отсутствие связей динамика отдельных нейронов является более хаотической.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной выпускной квалификационной работе были проведены исследования динамики нефронов нормотензивных и гипертензивных крыс по экспериментальным данным. Согласно существующим представлениям, развитие гипертонии приводит к усложнению колебательных процессов в функционировании структурных элементов почки. Однако до сих пор ведутся дискуссии, с чем связано данное усложнение. В работе рассмотрены изменения в динамике быстрых и медленных ритмов нефронов спонтанных гипертензивных крыс по сравнению с динамикой соответствующих ритмов нефронов нормотензивных крыс.

Чтобы количественно описывать степень хаотичности колебательных процессов, выбрана стандартная мера хаотичности — старший показатель Ляпунова. Для отдельного рассмотрения динамики быстрых и медленных ритмов проведено разложение экспериментальных сигналов на эмпирические моды с выбором мод, соответствующих по частотному диапазону ритмам, связанным с механизмом канальцево-гломерулярной обратной связи и миогенной динамикой.

Было показано, что развитие гипертензии сопровождается хаотизацией колебательных процессов в динамике нефронов, которая затрагивает все ритмические процессы. Степень хаотичности для быстрой моды в 3-4 раза выше, чем для медленной. Таким образом, можно предположить, что основной вклад в хаотизацию динамики нефронов вносит миогенный механизм регуляции.

В ходе сравнительного исследования динамики одиночных и парных нефронов было обнаружено, что наличие связи между структурными элементами почки приводит к уменьшению степени хаотичности колебаний. Для нормотензивных крыс этот эффект выражен сильнее, чем для гипертензивных. Это позволяет предположить, что развитие гипертонии сопровождается ослаблением взаимодействия между нефронами.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

[1] Бендат, Дж. Прикладной анализ случайных данных / Дж. Бендат, А. Пирсол. – М.: Мир, 1989. – 540 с.

[2] Press, W. H. Numerical recipes in C: the art of scientific computing / W. H. Press, S. A. Teukokolsky, W. T. Vetterling, B. P. Flanney. – Cambridge: Cambridge University Press, 1992. – P. 988.

[3] Daubechies, I. Ten lectures on wavelets / I. Daubechies. – Philadelphia: S.I.A.M., 1992. – P. 618.

[4] Mallat, S. G. A wavelet tour of signal processing / S. G. Mallat. – New York: Academic Press, 1998. – P. 674.

[5] Addison, P. S. The illustrated wavelet transform handbook: applications in science, engineering, medicine and finance / P. S. Addison. – Bristol ; Philadelphia: IOP Publishing, 2002. – P. 372.

[6] Huang, N. E. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis / N. E. Huang, Z. Shen, S. R. Long, M. C. Wu, H. H. Shi, Q. Zheng, N.-C. Yen, C. C. Tung, H. H. Liu // Proc. R. Soc. Lond. A. – 1998. – Vol. 454. – P. 903–995.

[7] Wolf, A. Determining Lyapunov exponents from a time series / A. Wolf, J. B. Swift, H. L. Swinney, J. A. Vastano // Physica D. – 1985. – Vol. 16. – P. 285–317.

[8] Holstein-Rathlou, N.-H. Synchronization of proximal intratubular pressure oscillations: evidence for interaction between nephrons / N.-H. Holstein-Rathlou // Pflugers Arch. – 1987. – Vol. 408. – P. 438–443.

[9] Sosnovtseva, O. V. Bimodal oscillations in nephron autoregulation / O. V. Sosnovtseva, A. N. Pavlov, E. Mosekilde, N.-H. Holstein-Rathlou // Phys. Rev. E. – 2002. – Vol. 66. – P. 061909.