

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации А.А. Кислицына «Моделирование индикаторов разладки в нестационарных временных рядах электроэнцефалограмм», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 - математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

В диссертационной работе Алексея Алексеевича Кислицына исследуется вопрос о построении статистического индикатора, обозначающего значимое изменение выборочного распределения фрагмента временного ряда в скользящем окне наблюдения. Значимое изменение подразумевает задание того уровня значимости, на котором следует учитывать различие между выборочными распределениями. В стационарных распределениях уровень значимости может быть задан априори исходя из практических требований к точности решаемой задачи. Если же распределение нестационарно, то само понятие уровня значимости нуждается в уточнении. Автор работы предложил математическую модель формализации уровня значимости для нестационарных случайных процессов. Это – так называемый согласованный уровень стационарности, который определяется как такое расстояние между выборками из одного и того же распределения, вероятность превышения которого равна самому этому расстоянию. Для его построения автор предложил довольно нетривиальную процедуру статистического анализа, реализуемую в случае, когда данных достаточно много. Весь изучаемый фрагмент временного ряда разбивается на непересекающиеся сегменты. В контексте изучения эволюции распределений этих сегментов автор рассматривает конкретный способ разбиения – на пары соседствующих друг с другом сегментов, так называемых встык-выборок. Изучается последовательность расстояний между выборочными функциями распределений этих пар. Именно, строится выборочная функция распределения указанных расстояний и находится стационарная точка для функции, дополняющей эту функцию распределения до единицы. Полученное число зависит от двух параметров – длины фрагмента и длины сегментов, на которые этот фрагмент разбивается. Тем самым в вычислительном плане задача становится весьма трудоемкой. Дело в том, что применительно к тому или иному временному ряду следует определить оптимальный уровень

различения «свой-чужой» в задаче признания принадлежности текущей выборки «своему» или «чужому» распределениям. Оптимизация проводится по двум указанным параметрам с точки зрения правильности срабатывания индикатора разделения. Требование ускорения процесса перебора вариантов обусловлено тем, что практическая задача, которая решается в данном диссертационном исследовании, относится к предсказанию наступления приступа эпилепсии по анализу данных, получаемых с электроэнцефалограмм реальных пациентов.

Таким образом, задачи, которые поставлены соискателем в диссертации, весьма актуальны. Во-первых, это разработка модели такого индикатора разладки, численное значение которого определялось бы не столько общими признаками самого временного ряда (такими, например, как традиционно используемыми медианой, интерквартильным размахом, средним, дисперсией и т.п.), сколько свойствами, связанными с изменчивостью выборочных распределений, что важно именно в контексте нестационарных временных рядов. Во-вторых, область применения создаваемой теории относится к активно развивающейся области цифровой медицины, ориентированной на персонального пользователя. В-третьих, необходимость использования аппроксимационных процедур привела автора к созданию экономного численного алгоритма, использующего идеи конечнократных аппроксимаций Фейнмана-Чернова в теории полугрупп.

Первые две главы диссертации посвящены описанию теоретических свойств предлагаемой модели разладки. Особое место занимает модель приближенного вычисления согласованного уровня стационарности с использованием теоремы Чернова. Суть этого подхода в теории полугрупп состоит в том, что при достаточно широких предположениях относительно итерационной последовательности однопараметрических операторов она сходится к оператору полугруппы. Этот подход, в частности, позволил корректно описать математическую процедуру конечнократного приближения интегралов Фейнмана в задачах квантовой механики, обосновать алгоритм построения разрешающего оператора в задаче Коши, а также использовать этот подход к построению равновесных матриц плотности квантовых систем. Достаточно активно теорема Чернова используется в последнее время в работах О.Г. Смолянова и В.Ж. Сакбаева применительно к исследованию свойств объектов, которые могут быть названы средними полугруппами. Процедуры усреднения

полугрупп естественно возникли в квантовой механике в связи с концепцией линейного квантования, когда квантовый оператор Гамильтона имеет вид линейной комбинации некоторых эрмитовых операторов, каждый из которых является генератором полугруппы. Нетривиальность использования этого подхода в математической статистике состоит в том, что ранее не было необходимости интерпретировать кинетическое уравнение в терминах механических систем, поскольку именно из таковых оно и было получено. Однако в свете исследований по нестационарным временным рядам возникла задача моделирования эволюции выборочных функций распределения, не имеющей под собой формального динамического основания, так как элементы ряда – это некоторая последовательность наблюдаемых данных, не имеющих, вообще говоря, механического смысла в терминах гамильтоновой механики. Соискателем было замечено, что предложенная им схема обладает свойствами, которые соответствуют условиям применения теоремы Чернова. Именно, анализируется однопараметрическая функция (параметр – это расстояние между выборочными распределениями), равная единице в нуле и имеющая в нуле конечную производную, понимаемую в прикладном контексте как разностную производную эмпирических частот распределения расстояний между распределениями. Итерационный процесс типа Чернова сходится к полугруппе. Полугрупповым свойством как раз обладает выражение со стационарной точкой функции уровня значимости распределения. Это утверждение позволило соискателю провести усреднение таких стационарных точек для сегментов разных длин, на которые разрезается временной ряд, и построить эквивалентный в смысле теоремы Чернова уровень стационарности совокупности сегментов. Такой подход позволил существенно сократить вычислительные процедуры и получить алгоритм, который может быть использован в реальном времени. Это – один из основных теоретических результатов работы.

В практической области развитый автором статистический метод применяется далее к задаче предсказания приступа эпилепсии, который трактуется как разладка временного ряда уровней стационарности, вычисляемых по сегментам электроэнцефалограммы. Соискателем было показано, что предлагаемый им метод имеет достаточно высокую точность по сравнению с традиционно используемыми методиками. При этом тестирование алгоритма проводилось на реальных медицинских данных.

Программный комплекс состоит из трех крупных программ, каждая из которых может работать как в автономном режиме, так и совместно с остальными двумя. Первая программа вычисляет точное значение двухпараметрической статистики согласованного уровня стационарности как предиктора приступа эпилепсии. Вторая программа реализует аппроксимацию этого индикатора с использованием теоремы Чернова. Естественным дополнением является программа построения эволюционной схемы решения уравнения Лиувилля, сохраняющей нормировку, положительность и полугрупповое свойство на каждом шаге по времени. Также разработан пользовательский интерфейс, что показывает высокий уровень квалификации диссертанта как в области математики, так и в сфере программирования.

Резюмируя, укажу, что в диссертации построен и обоснован алгоритм обнаружения разрядки в нестационарном временном ряде, имеющий актуальную и важную область применения. В целом диссертация Алексея Алексеевича Кислицына дает полное представление о разработанном им методе. Приведенные в работе практические примеры показывают, что этот метод имеет большие перспективы для применения. Работа содержит обоснованные и корректно доказанные математические результаты, подробно описанные численные алгоритмы и дискретные схемы их реализации.

Отмечу некоторые недостатки диссертации.

1. В работе довольно подробно изложены различные аспекты распознавания приступа эпилепсии, проблемы и предлагаемые многочисленные варианты их решений. Однако собственно математическая сторона существующего положения дел в области распознавания разрядки изложена весьма конспективно. Также хотелось бы более развернутого перечня существующих направлений работ в области применения теоремы Чернова. То есть в диссертации, на мой взгляд, недостаточно внимания уделено обзорной части.

2. При описании результатов тестирования алгоритмов приведены несколько графиков с иллюстрацией положений гипотезы о разрядке. Хотелось бы более полного визуального представления функционирования индикатора разрядки для разных пациентов.

3. После построения вычислительной схемы для аппроксимации решения уравнения Лиувилля ожидается применение этого алгоритма для моделирования эволюции электроэнцефалограмм в состоянии до или после приступа. Однако практического применения данного алгоритма в диссертации не приведено.

Перечисленные замечания не снижают общей положительной оценки работы. Диссертация А.А. Кислицына выполнена на высоком научном уровне и содержит решение важной и сложной задачи, связанной с исследованием и моделированием индикаторов разладки в нестационарных временных рядах. Все результаты диссертации полно представлены в публикациях соискателя и правильно отражены в автореферате.

Считаю, что диссертационная работа «Моделирование индикаторов разладки в нестационарных временных рядах электроэнцефалограмм» удовлетворяет требованиям Положения ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 - математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, а ее автор - Кислицын Алексей Алексеевич - заслуживает присуждения ему искомой степени.

Отзыв составил официальный оппонент

Шамаров Николай Николаевич

д.ф.-м.н., доцент кафедры высшей математики,

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»

141700, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

Телефон: (495) 576-51-55, E-mail: nshamarov@yandex.ru

15 апреля 2021 г.

Н.Н. Шамаров

Подпись доцента Н.Н. Шамарова заверяю

СПЕЦИАЛИСТ ПО КАДРАМ
Наумова А.С.

15.04.2021 г.