

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию ПАВЛОВА Александра Сергеевича «Границы возникновения режимов обобщенной и фазовой синхронизации и особенности поведения показателей Ляпунова вблизи этих границ в однонаправлено связанных потоковых системах», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – «Радиофизика»

Задача управления режимами работы систем, демонстрирующих динамический хаос или периодическое поведение, является актуальной как в радиофизике, так и в иных областях физики. Восприимчивость системы к непериодическому управлению существенным образом отличается от восприимчивости к управлению периодическим сигналом. В частности, благодаря инвариантности к дискретным сдвигам во времени, отклик нехаотической автоколебательной системы на периодическое воздействие может быть нейтрально устойчив, чего не наблюдается при воздействии шумом с равномерным сплошным спектром, когда нейтральная устойчивость отклика системы становится вырожденным случаем. В этом плане управление хаотическим сигналом представляет собой интересный особый случай: отсутствует симметрия к сдвигам во времени, но есть выделенные временные масштабы, а сам сигнал порождается детерминированной конечномерной системой.

В диссертационной работе Павлова А.С. «Границы возникновения режимов обобщенной и фазовой синхронизации и особенности поведения показателей Ляпунова вблизи этих границ в однонаправлено связанных потоковых системах» рассматривается проблема синхронизации хаотическим сигналом хаотических и периодических систем с непрерывным временем. Анализируются обобщенная и фазовая синхронизации, их взаимосвязь и сопоставляются условия их возникновения в системе. Рассматриваются практические приложения обобщенной синхронизации; в частности, возможные пути совершенствования способов скрытой передачи информации на основе обобщенной синхронизации. Исследуется поведение показателей Ляпунова при установлении режимов обобщенной и фазовой синхронизации. Предлагаются и прорабатываются способы оценки старшего и нулевого условных показателей Ляпунова по временному ряду.

Рассматриваемая диссертационная работа состоит из введения, трех оригинальных глав и заключения.

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертации; формулируются цели, предмет и методы исследования и выносимые на защиту положения; описываются научная новизна и практическая значимость работы, личный вклад соискателя А.С. Павлова и краткое содержание работы.

**В первой главе** дается вводное обсуждение режимов обобщенной и фазовой синхронизации, рассматриваются соотношения между ними. Анализируется поведение двух систем: однонаправлено связанных осцилляторов Ресслера и генераторов Кияшко-Пиковского-Рабиновича. Варьируются параметр связи и параметр ведомого осциллятора, определяющий характерную частоту колебаний. Путем численного счета находятся границы фазовой и обобщенной синхронизации, потери «фазовой когерентности», понимаемой в смысле возможности введения фазового описания для динамики системы. Анализируются Фурье-спектры ведомой системы. Переходы к фазовой и обобщенной синхронизации сопоставляются с изменением пиков в Фурье-спектре, соответствующих средней частоте ведущей системы и средней собственной частоте ведомой системы. Рассматриваются, как высота пиков, так и их интегральная «мощность», учитывающая ширину. Анализируется влияние степени когерентности аттрактора на установление синхронизации.

**Во второй главе** рассматриваются обобщенная и фазовая синхронизация для случая параметров ведомых систем из главы 1, соответствующих «окнам» периодической динамики. Исследуются возможные практические приложения режима обобщенной синхронизации при воздействии хаотического сигнала на периодическую систему для скрытой передачи информации. Предлагается и анализируется схема передачи информации. Установлено, что по сравнению со случаем хаотической ведомой системы использование периодических осцилляторов в качестве принимающего устройства позволяет решить проблему нестабильной работы способа при неидентичности управляющих параметров взаимодействующих систем, повысить устойчивость к шумам и качество передачи информации.

**Третья глава** посвящена изучению поведения показателей Ляпунова при установлении режимов обобщенной и фазовой хаотической синхронизации. Разрабатываются методы оценки условных (старшего и нулевого) показателей Ляпунова по временным рядам. Метод апробирован на модельных одномерных системах с дискретным и непрерывным временем, находящихся под действием шума. При сопоставлении получено хорошее совпадение результатов предложенного метода с результатами расчета того же показателя Ляпунова при помощи алгоритма Бенеттина и процедуры ортогонализации Грамма-Шмидта.

Исследования в работе проведены систематически и основательно, позволяя получить целостную картину предмета исследования, с надлежащим подбором методов.

**По работе имеются следующие замечания и вопросы:**

(1) На представленных графических материалах неясна плотность расчетных точек, используемых для построения графиков. Например, при рассмотрении рис. 1.1 (стр. 25) складывается впечатление, что расчетные точки лежат за изломах линий. Неясно, связана ли негладкость зависимостей с точностью их расчета или зависимости, действительно, негладкие. Представляется, что имеет место второе. В этом слу-

чае был бы желателен и кажется возможным существенно более подробный расчет кривых, с гораздо большей плотностью точек. Интересно явно увидеть мелкомасштабный характер зависимости: имеет ли место множество «мешков» или границы имеют тонкую структуру. Похожий вопрос возникает и с последующими рисунками, хотя кривые на них гладкие, сложно понять, не является ли эта гладкость результатом интерполяции. Если границы имеют тонкую структуру, использование интерполяции помимо точек расчетных данных представляется неуместным. Если плотность расчетных точек слишком велика, чтобы помечать точки символами, было бы удобно, чтобы это было явно указано.

(2) Работа могла бы «выиграть» от некоторых дополнительных аналитических рассмотрений пусть и при предельно грубых допущениях, но позволяющих получить дополнительный взгляд на механизмы эффектов.

(3) Стр. 24, последнее предложение предпоследнего абзаца:

«Причины такого поведения границы обобщенной синхронизации были объяснены в работе [94]» -- Для диссертационной работы представляется уместным не только дать ссылку, но и коротко привести объяснение, поскольку вопрос важен для восприятия материала работы.

(4) В работе имеются незначительные опечатки, не сказывающиеся на восприятии материала. Например,

стр. 19, строка 8: Предложение «При этом следует, в качестве взаимодействующих систем могут выступать даже динамические системы с различной размерностью фазового пространства» очевидно нуждается в корректировке.

стр. 19, строка 17: «ведомой системой» >> «ведомой системы»

стр. 22, перед формулой (1.8) не требуется двоеточие

стр. 27: нет уверенности, что цифра в предпоследней строке приведена без опечатки.

стр. 94, предпоследняя строка первого абзаца: «длительности» >> «длительности»

Существенных с научной точки зрения замечаний материал диссертации у меня не вызвал.

Отмеченные замечания являются частными и не влияют на общее положительное впечатление от работы А.С. Павлова, которая выполнена на хорошем профессиональном уровне. Анализ полученных в диссертационной работе результатов дает основания отметить, что работу отличает актуальность обсуждаемых проблем, адекватность предложенных и использованных подходов и обстоятельность в проведении исследовательской работы. Результаты, выводы и научные положения работы являются новыми, а их обоснованность и достоверность не вызывает сомнений. Материалы работы достаточно полно отражены в четырех публикациях в широкодоступной центральной печати, в журналах, входящих в перечни ведущих рецензируемых и зару-

бежных научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени доктора и кандидата наук, и пяти трудах и тезисах конференций. Результаты докладывались на представительных российских и международных конференциях. Несомненно, автор является квалифицированным специалистом в области радиофизики и сложной динамики нелинейных систем. Диссертационная работа А.С. Павлова написана грамотным литературным языком, хорошо оформлена и является законченным научным исследованием.

В целом, диссертационная работа «Границы возникновения режимов обобщенной и фазовой синхронизации и особенности поведения показателей Ляпунова вблизи этих границ в однонаправленных связанных потоковых системах» написана на хорошем научном уровне, удовлетворяет всем требованиям пп. 9-14 "Положения о присуждении ученых степеней", утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемых к кандидатским диссертациям, и соответствует специальности 01.04.03 – «Радиофизика». Ее автор, Александр Сергеевич Павлов достоин присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Ст.н.с. группы Динамики геологических систем  
Института механики сплошных сред УрО РАН,  
канд. физ.-мат. наук

(Денис Сергеевич Голдобин)

614013 г. Пермь, ул. Акад. Королева, 1, ИМСС УрО РАН

тел.: +7-950-4411276

e-mail: Denis.Goldobin@gmail.com

