



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе  
ИИИУ им. Н.И. Лобачевского

 В.Б. Казанцев

«» декабря 2017 г.

Отзыв ведущей организации  
на диссертационную работу Кульминского Данила Дмитриевича  
**«Ансамбли хаотических генераторов с запаздывающей обратной связью  
(реконструкция, коллективная динамика и приложения)»**, представленной на  
соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по  
специальности 01.04.03 – Радиофизика

В диссертации Д.Д. Кульминского рассматриваются актуальные задачи радиофизики и нелинейной динамики – выявление особенностей коллективной динамики ансамблей генераторов с запаздывающей обратной связью, разработка методов восстановления модельных уравнений связанных систем с задержкой, а также построение систем передачи информации на основе генераторов с запаздыванием. Решение подобных задач требует разработки и развития специализированных подходов, направленных на исследование определенных классов систем с максимальным использованием априорной информации об объекте исследования. Сложность практической реализации подобных методов связана с рядом особенностей экспериментальных данных, которые зачастую характеризуются широким спектром, хаотичностью, нестационарностью, шумами и искажениями различной природы. При этом в работе активно используется математический аппарат статистической радиофизики, теории колебаний и математической статистики.

Тема работы полностью соответствует специальности 01.04.03 – “радиофизика”.

Диссертация состоит из трех глав.

**В первой главе** предложен метод восстановления архитектуры связей и параметров элементов в ансамблях связанных осцилляторов, описываемых дифференциальными уравнениями с запаздыванием, по временным рядам их колебаний. Метод основан на минимизации для каждого элемента ансамбля целевой функции, характеризующей расстояние между точками реконструируемой нелинейной функции, и разделении восстановленных коэффициентов связи на значимые и незначимые. Эффективность метода продемонстрирована в численном эксперименте на примере хаотических временных рядов ансамбля, состоящего из диффузионно связанных неидентичных уравнений Маккея-Гласса в присутствии шума, а также в натурном эксперименте на примере временных рядов резистивно связанных радиотехнических генераторов с запаздывающей обратной связью.

**Во второй главе** экспериментально и численно исследованы особенности коллективной динамики осцилляторов в ансамбле идентичных бистабильных систем с запаздывающей обратной связью, глобально связанных между собой через общее поле. Исследовано влияние инерционных свойств и запаздывания общего поля на коллективную динамику осцилляторов. Показано, что разнообразие колебательных режимов в ансамбле обусловлено тем, что бистабильные состояния парциальных элементов имеют существенно различающиеся основные частоты колебаний. Продemonстрирована возможность существования состояний «химера», при которых часть элементов ансамбля совершает синхронные колебания, а другая часть элементов ансамбля колеблется несинхронно.

**В третьей главе** исследована система передачи информации с нелинейным подмешиванием информационного сигнала к хаотическому сигналу генератора с запаздывающей обратной связью, экспериментально реализованная на программируемых микроконтроллерах с цифровой линией передачи. Схема позволяет передавать и принимать речевые и музыкальные сигналы в реальном времени без заметных искажений. Также предложена новая система скрытой



передачи информации, основанная на генераторе с запаздывающей обратной связью с переключением хаотических режимов. Проведены численные и экспериментальные исследования предложенной системы. Построены зависимости вероятности ошибки на бит при передаче бинарного информационного сигнала от отношения сигнал/шум, затухания сигнала в канале связи и длины интервала времени, в течение которого передается один бит. Показана высокая устойчивость системы к шумам и амплитудным искажениям сигнала в канале связи. Разработана и впервые экспериментально реализована система передачи информации, основанная на использовании режима обобщенной синхронизации, которая содержит лишь одну ведомую автоколебательную систему в приемнике. Предложен метод диагностики режима обобщенной синхронизации между ведущей системой (передатчиком) и ведомой системой (приемником), основанный на воздействии на ведомую систему поочередно сигналом ведущей системы и его задержанной копией. Показано, что такая схема передачи информации обладает высокой устойчивостью к шумам в канале связи. Разработана модифицированная система передачи информации на эффекте обобщенной синхронизации, содержащая две ведомые системы с запаздыванием в приемнике, которая обладает более высокой скоростью передачи информации, чем система связи с одной ведомой системой в приемнике.

По диссертационной работе имеются следующие замечания.

- 1) В первой главе диссертации предложен метод реконструкции собственных параметров и архитектуры связей в ансамблях систем с запаздыванием, однако подробно не оговорены границы применимости метода. В частности, было бы уместным обсудить возможность применения метода для систем с запаздыванием высокого порядка и ограничения метода, связанные с большим числом осцилляторов в ансамбле.
- 2) Во второй главе при исследовании коллективной динамики осцилляторов с запаздыванием, глобально связанных между собой через общее поле, было бы желательно обсудить общность полученных результатов. Насколько важно наличие запаздывания в осцилляторах ансамбля? Будут ли наблюдаться

обнаруженные закономерности в ансамблях осцилляторов, не имеющих задержки?

3) В третьей главе исследована устойчивость предложенных в диссертационной работе систем передачи информации к шумам и искажениям сигнала в канале связи. Однако не приводится сравнительного количественного анализа разработанных систем связи с другими известными системами передачи информации.

Несмотря на отмеченные недостатки, в целом, диссертационная работа производит хорошее впечатление. Работа выглядит единым, цельным произведением, развивающим современные направления исследований ансамблей связанных хаотических генераторов с запаздыванием, и содержит ряд новых интересных результатов. Достоверность результатов и выводов диссертационной работы подтверждается их воспроизводимостью в численном и радиофизическом эксперименте, хорошей согласованностью между собой и с результатами других авторов.

#### **Научная и практическая значимость**

Предложенный в диссертационной работе метод реконструкции ансамблей связанных систем с запаздыванием позволяет определить архитектуру взаимодействий и восстановить с заданной точностью собственные параметры всех осцилляторов ансамбля, включая времена запаздывания, параметры инерционности, нелинейные функции и коэффициенты связи. Метод может быть использован для восстановления ансамблей, состоящих из неидентичных систем с запаздыванием с произвольным числом однонаправленных и взаимных связей между ними. Изучены особенности коллективной динамики осцилляторов в ансамбле идентичных бистабильных генераторов с запаздывающей обратной связью, глобально связанных между собой через общее поле. Установлено, что, изменяя параметры инерционности и запаздывание общего поля, можно управлять коллективным поведением осцилляторов в ансамбле, в том числе контролировать состояния «химера». Разработаны экспериментальные системы передачи информации на основе хаотических сигналов, которые имеют высокую



устойчивость к шуму и к затуханию сигнала в канале связи. Созданные макеты систем передачи информации обладают относительной простотой технической реализации, однако способны маскировать и выделять информационный сигнал в реальном времени с небольшой задержкой. Практическое применение таких систем передачи может быть востребовано в сфере проводной и беспроводной служебной связи охранных структур, а также при конфиденциальной передаче информации коммерческого значения и биомедицинских данных. Впервые экспериментально реализована схема связи на основе обобщенной синхронизации без использования вспомогательной системы в приемнике. Предложенная система позволила избежать технических трудностей создания систем передачи информации на основе обобщенной синхронизации, связанных с необходимостью обеспечить в эксперименте идентичность двух генераторов в приемнике.

Результаты работы рекомендуются к использованию в организациях, занимающихся проблемами нелинейных колебаний и волн, обработки сигналов и анализа временных рядов (Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Институт прикладной физики РАН, Физический Институт им. П.Н. Лебедева РАН), а также в учебном процессе на соответствующих специальностях (ННГУ, МГУ, МФТИ, Саратовский госуниверситет, Владимирский госуниверситет и др.).

Основные результаты работы являются новыми. Они хорошо апробированы на российских и международных научных конференциях и в полной мере опубликованы в 12 статьях в ведущих российских и зарубежных научных журналах (Physical Review E, Nonlinear Dynamics, ЖТФ, Письма в ЖТФ, Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика и др.), входящих в список ВАК. Диссертация хорошо оформлена и проиллюстрирована. Автореферат правильно отражает содержание диссертации. Таким образом, диссертационная работа представляет собой научное исследование, выполненное на высоком научном уровне и содержащее ряд ценных в научном и практическом плане результатов.

На основании сказанного можно заключить, что диссертационная работа Кульминского Данила Дмитриевича «Ансамбли хаотических генераторов с

запаздывающей обратной связью (реконструкция, коллективная динамика и приложения)» соответствует всем требованиям пп. 9-11,13,14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года №842, а ее автор, Кульминский Данил Дмитриевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиофизика.

Отзыв составил:

профессор, д.ф.-м.н.,  
зав. кафедрой теории колебаний и  
автоматического регулирования  
ННГУ им. Н.И. Лобачевского



В.В. Матросов

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

Почтовый адрес: 603950, Н. Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. 1, к. 435  
E-mail: matrosov@rf.unn.ru

Диссертация заслушана, и отзыв утвержден на заседании научного семинара кафедры теории колебаний и автоматического регулирования ННГУ им. Н.И. Лобачевского, протокол № 7 от 27 декабря 2017 г.

Секретарь семинара



Баженова Г.А.