

3.4. Заявленные цели Проекта на период, на который предоставлен грант

Общая цель исследования согласно заявке состоит в разработке электронных устройств – генераторов грубого хаоса, характеризующегося малой чувствительностью к вариации параметров и помехам, с достаточно высокими рабочими частотами. В 2017 году предполагалось представить результаты численного моделирования систем, способных к генерации гиперболического и псевдогиперболического, исследовать зависимость динамики от параметров. Планировалась разработка схем получения грубого хаоса и построения соответствующих математических моделей на основе обыкновенных дифференциальных уравнений, уравнений с запаздыванием, уравнений с частными производными, а также проведение численного моделирования с исследованием зависимости динамики от параметров и выявлением сценариев рождения грубого хаоса. Планировалось исследование возможности получения грубого хаоса при воздействии слабого сигнала от задающего генератора гиперболического хаоса на системы с негиперболической динамикой. Предполагалось представить схемы, реализующие грубый хаос на основе параметрического возбуждения и взаимодействия мод при наличии модуляции параметров системы. Должны были быть проведены сравнительный анализ динамики, наблюдаемой при численном и схмотехническом моделировании и выбор перспективных схем генераторов грубого хаоса для реализации в виде лабораторных макетов на заключительном этапе проекта. Предполагалось представить результаты экспериментальных исследований прототипа высокочастотного генератора гиперболического хаоса в области до 10 МГц. Предполагалось рассмотреть и апробировать схмотехнические решения для систем, предложенных в ходе предшествующих исследований, с заменой низкочастотных аналоговых элементов элементами, способными обеспечить функционирование в высокочастотном диапазоне.

3.5. Полученные за период, на который предоставлен грант, результаты с описанием методов и подходов, использованных в ходе выполнения проекта (описать, уделив особое внимание степени оригинальности и новизны)

Схемы с хаотической динамикой

Выполнено исследование динамики в рамках численного и схмотехнического моделирования предложенной на предыдущем этапе проекта электронной схемы, где на аттракторе системы воспроизводится динамика Аносова на поверхности отрицательной кривизны [4]. В качестве элементов электронной схемы, являющихся аналогами ротаторов в механике, у которых состояние характеризуется определенной по модулю 2π переменной и ее производной, использованы цепочки фазовой автоподстройки, где в качестве угловой переменной выступает фаза управляемых напряжением генераторов относительно опорного сигнала фиксированной частоты. Проведен сравнительный анализ динамического поведения моделей, доставляющих разную степень точности описания.

Разработаны схемы попеременно возбуждающихся колебательных элементов на основе полевых транзисторов (лямбда-диод) и туннельных диодов, для которых, как ожидается, можно будет подобрать параметры, обеспечивающие гиперболическую динамику.

Предложена новая простая схема генератора хаоса, реализующая псевдогиперболический аттрактор типа Лоренца, и продемонстрировано ее функционирование посредством моделирования в среде Multisim (рис.1). Схема основана на эквивалентном представлении уравнений Лоренца в виде нелинейного осциллятора с помощью замены Юдовича (Кузнецов С.П., Динамический хаос, М.: 2001):

$$\ddot{x} + (\sigma + 1)\dot{x} + [-\sigma(r - 1) + \frac{1}{2}x^2 + (\sigma - \frac{1}{2})u]x = 0, \quad \dot{u} = -bu + x^2.$$

На рис.1 показана схема генератора хаоса (а), фазовый портрет аттрактора в двумерной проекции (б) и спектр генерируемого сигнала. В текущем варианте схема использует операционный усилитель и два аналоговых умножителя, но их, по-видимому, можно будет в дальнейшем заменить воспроизводящими их свойства элементами на транзисторах.

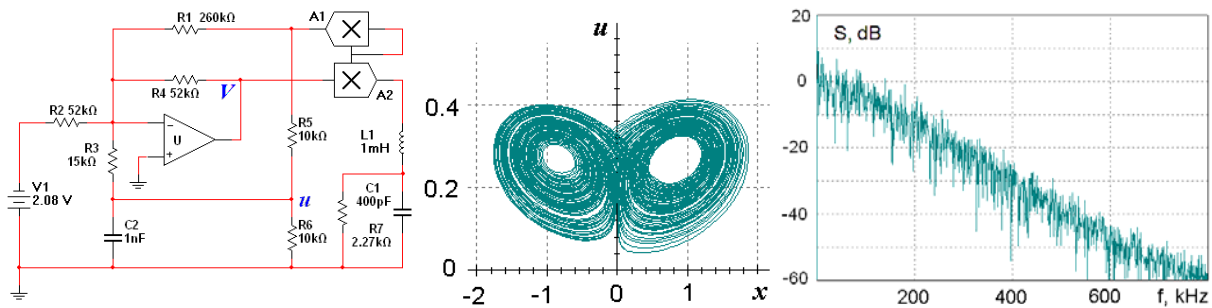


Рис. 1. Схема генератора псевдогиперболического хаоса (а), портрет аттрактора Лоренца (б) и спектр генерируемого хаотического сигнала (в).

Составлена библиографическая подборка по электронным генераторам хаоса. В среде Multisim воспроизведены схемы и выполнено моделирование хаотической динамики с получением реализаций фазовых портретов и спектров для ряда описанных в литературе генераторов хаоса. (Tamaševičius A. et al., IJBC, 17, 2007, 3657; Kengne J. et al., IJBC, 26, 2016, 1650081; Anishchenko V. S. et al., New J. of Physics, 7(1), 2005, 76; Piper J. R., Sprott J. C., IEEE Trans. on Circuits and Systems II, 57, 2010, 730), в том числе использующих элементную базу, пригодную в диапазоне высоких частот. (Kennedy M.P., IEEE Trans. on Circuits and Systems I, 41, 1994, 771; Дмитриев А.С. и др., Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 1 (1-2), 2009, 6; Mykolaitis G., et al., Electronics Letters, 40(2), 2004, 91; Tchitnga R. et al., Chaos, Solitons & Fractals, 45(3), 2012, 306-313; <http://www.instructables.com/id/A-Simple-Chaos-Generator/>.) Эти результаты предполагается использовать как задел для построения модифицированных вариантов схем, обеспечивающих генерацию грубого хаоса.

Рассмотрены ансамбли из трех и четырех элементов в виде осцилляторов с нелинейностью синуса, которые могут быть реализованы, в частности, на основе неидентичных контактов Джозефсона. Проведено численное моделирование динамики, выявлены области различного поведения в пространстве параметров, включая квазипериодическую динамику на торах разной размерности и хаос [13].

Как схемы, перспективные для реализации сложной динамики, проанализированы система в виде пяти связанных в кольцо осцилляторов ван дер Поля [5] и пространственно-развитая сеть звездообразного типа, составленная из осцилляторов ван дер Поля [3]. Для первой системы изучены варианты с различными типами связи: диссипативной, активной, а также диссипативной и активной с инверсией знака связи. Рассмотрены бифуркации, наблюдаемые при переходе от пятичастотного тора к четырехчастотному тору. Обнаружена возможность квазипериодической бифуркации Хопфа. Для второй системы выявлены и описаны нетривиальные сценарии возникновения и развития кластерной синхронизации при изменении параметров.

Проверка гиперболичности

На основе метода, опирающегося на проверку трансверсальности пересечения многообразий траекторий на хаотическом аттракторе (критерий углов), подтверждена гиперболическая природа хаотической динамики нескольких предложенных ранее систем с запаздыванием, допускающих реализацию в виде электронных устройств. (Kuznetsov S.P. and Pikovsky A.S., EPL, 84, 2008, 10013; Баранов С.В., Кузнецов С.П., Пономаренко В.И., Изв. вузов - ПНД, 18, 2010, №1, 11-23; Аржанужина Д.С., Кузнецов С.П., Изв. вузов - ПНД, 22, 2014, №2, 36-49.) Результаты проверки иллюстрируются гистограммами распределения углов пересечения, которые, как можно видеть, отделены от нуля, что свидетельствует об отсутствии касаний многообразий (рис.2).

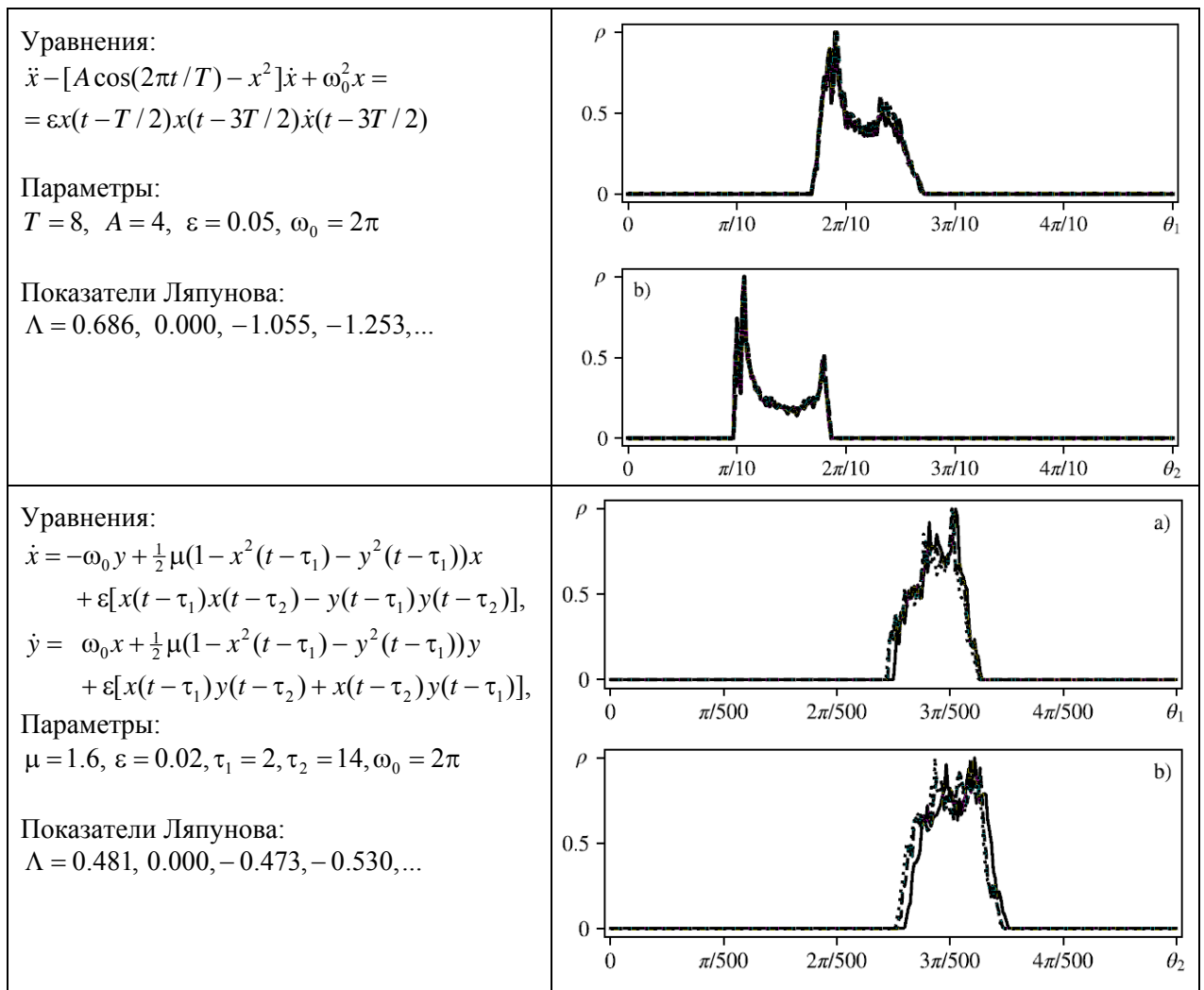


Рис.2. Гистограммы углов между подпространствами векторов возмущений для модельных чистем с двумя запаздываниями, уравнения и параметры которых приведены слева. Диаграммы (а) иллюстрируют отсутствие касаний между растягивающим подпространством и прямой суммой нейтрального и сжимающего подпространств, а диаграммы (b) – отсутствие касаний между прямой суммой растягивающего и нейтрального подпространств и сжимающим подпространством, о чем говорит отсутствие углов, близких к нулю.

Для обобщенной модели с бифуркацией, связанной с катастрофой голубого неба, на основе критерия углов подтверждена гиперболичность аттракторов, возникающих при значениях индекса, отвечающего за угол перекручивания пучка траекторий при возврате в сечение Пуанкаре, больших или равных 2 [2].

На основе критерия углов для схемы с аттрактором Лоренца проведена проверка свойства псевдогиперболичности, которое состоит в том, что для векторов возмущения траекторий на аттракторе одно инвариантное подпространство сжимающее, а другое характеризуется экспоненциальным растяжением объема, ассоциирующегося с этим подпространством, во времени (рис.3). Известно, что это свойство обеспечивает робастность хаоса (Гонченко А.С. и др., Известия вузов – ПНД, 25, 2017, №2, 4–36).

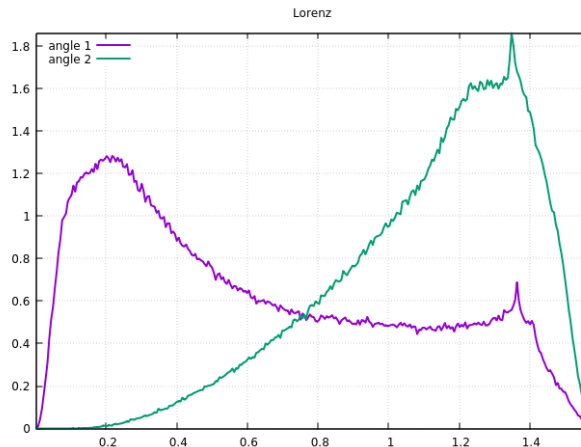


Рис.3. Гистограммы углов между подпространствами векторов возмущений для аттрактора Лоренца: кривая 1 отвечает углам между растягивающим подпространством и прямой суммой нейтрального и сжимающего подпространств, а кривая 2 – углам между сжимающим подпространством и прямой суммой растягивающего и нейтрального подпространств. Поведение кривой 2 в области малых углов свидетельствует о псевдогиперболической природе аттрактора.

Методы обработки данных

Рассмотрены динамические характеристики сигнала, производимого СВЧ генераторами хаоса в виде гироклистрона и гиро–ЛБВ на основе винтового гофрированного волновода с запаздывающей обратной связью и гиротрона. Показано, что в режиме большой надкритичности возможна генерация в миллиметровом диапазоне длин волн хаотических колебаний относящихся к категории гиперхаоса, т.е. характеризуемых наличием двух и более положительных показателей Ляпунова, причем спектр имеет относительную ширину до 10%,

Развиты и апробированы методики распознавания типов динамического поведения, в том числе позволяющие отличить странный нехаотический аттрактор от квазипериодических и хаотических колебаний [7].

Коммуникация

Рассмотрены схемы коммуникации, основанные на использовании генераторов грубого (гиперболического) хаоса, продемонстрировано их функционирование в рамках численного моделирования [14,15]. Также в этих схемах предложен новый, энергетически эффективный и помехоустойчивый способ нелинейного подмешивания информации на основе фазовой модуляции несущего хаотического сигнала. Работоспособность схем демонстрируется на примерах трех базовых систем, генерирующих грубый хаос. Первая система использует в качестве приемника и передатчика пару связанных осцилляторов ван дер Поля с модулируемыми в противофазе параметрами возбуждения и с удвоением фазы колебаний за период модуляции параметра (Kuznetsov S.P., PRL, 95, 2005, 144101), так что индивидуальная базовая система обладает однородно-гиперболическим аттрактором Смейла-Вильямса. Вторая система, представляющаяся наиболее перспективной, использует автономные генераторы грубого хаоса с аттрактором Смейла-Вильямса согласно работе (Kuznetsov S.P., Pikovsky A., Physica D, 232, 2007, 87). Третья схема основана на системе, воспроизводящей в фазовой динамике консервативное отображение “кот Арнольда” (Isaeva O.B., Jalnine A.Yu., Kuznetsov S.P., Phys. Rev. E, 74, 2006, 046207). Указаны преимущества в сравнении с описанными в литературе методами скрытой коммуникации на основе хаотических сигналов. Для всех этих систем указаны способы, как добиться полной хаотической синхронизации передатчика и приемника, и рассчитаны характеристики синхронных хаотических режимов, существенные для передачи информации (полные спектры показателей Ляпунова, коэффициенты диффузии фазы). Проведено численное моделирование передачи информационного сигнала, представляющего сложный квазипериодический сигнал с широким спектром. Показано, что применение описанных процедур фазовой модуляции и детектирования позволяет передать и извлечь информацию точно, без искажений.

Экспериментальные результаты

Проведено экспериментальное исследование неавтономной системы, где в низкочастотном диапазоне наблюдался гиперболический хаос, а также квазипериодические колебания,

отвечающие двумерному тору в фазовом пространстве, и переход от квазипериодической динамики к гиперболическому хаосу [10].

Сконструирован и реализован в виде лабораторного макета генератор гиперболического хаоса в диапазоне высоких частот. Схема содержит два генератора на двухзатворных полевых транзисторах. Схемы генераторов идентичны и отличаются только частотой генерации: для первого 6 МГц, а для второго 12 МГц. Первый генератор оказывал воздействие на второй, а сигнал второго генератора смешивался с сигналом опорного генератора с последующим воздействием на первый. Управление возбуждением генераторов осуществлялось сигналом делителя частоты, на вход которого подавался сигнал опорного генератора и инвертирующими усилителями, которые обеспечивали возбуждение и гашение автоколебаний генераторов попеременно. Взаимодействие генераторов осуществлялось с помощью операционных усилителей, с выхода которых сигналы через регуляторы, резисторы и диоды поступали в цепи истоков соответствующих транзисторов. Для увеличения уровня комбинационных гармоник и обеспечения условия передачи фазы автоколебаний от одного генератора другому и обратно в схеме используются полупроводниковые диоды. На рис.4 показаны графики временных реализаций сигнала напряжения и его производной с выхода делителя частоты, проекция фазового портрета на плоскость, и спектр мощности колебаний в первом генераторе, в режиме хаотических автоколебаний, достигаемом в результате подбора режима управления возбуждением и воздействия автогенераторов друг на друга.

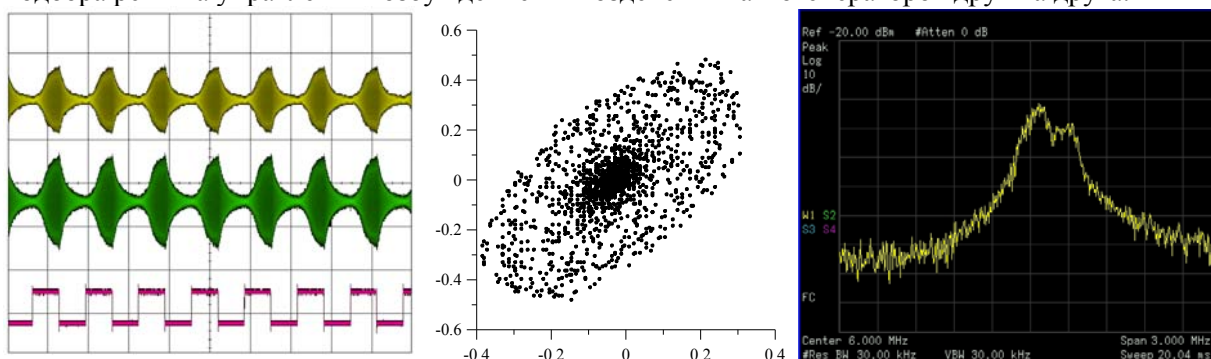


Рис.4. Реализации сигнала (а), портрет аттрактора (б) и спектр генерации (в), полученные в эксперименте.

3.7. Участие в научных мероприятиях по тематике Проекта за период, на который предоставлен грант (каждое мероприятие с новой строки, указать названия мероприятий и тип доклада)

- Международный симпозиум «Прогресс в электромагнитных исследованиях» (PIERS 2017). Санкт-Петербург, 22-25 мая 2017.
Isaeva O.B., Savin D.V., Seleznev E.P., and Stankevich N.V., Hyperbolic chaos and quasiperiodic dynamics in experimental nonautonomous systems of coupled oscillators (устный доклад).
Isaeva O.B., Jalnine A.Yu., and Kuznetsov S.P. Chaotic communication with robust hyperbolic transmitter and receiver (устный доклад).
- Международный научный семинар «Последние достижения в гамильтоновой и неголомомной динамике», Москва, Долгопрудный, 15-18 июня 2017 г.
Kuptsov P.V., Kuznetsov S.P. Hyperbolic chaos in system with multiple delays: numerical test via angle criterion (приглашенный доклад).
- Международный симпозиум «Актуальные проблемы нелинейной волновой физики» (Москва – Санкт-Петербург, Россия, 22-28 июля 2017 г.).
Kuznetsov S.P. Design principles and illustrations of hyperbolic chaos in mechanical and electronic systems (приглашенный доклад).
- XII Всероссийская конференция молодых ученых «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика», Саратов, 5-7 сентября 2017.
Купцов П.В., Кузнецов С.П. Ляпуновский анализ гиперболического хаоса в системах с несколькими запаздываниями (приглашенный доклад).
Ерофеев В.С., Кузнецов С.П., Селезнев Е. П. ВЧ генератор гиперболического хаоса (стендовый доклад).

Жалнин А.Ю., Исаева О.Б., С.П. Кузнецов. Коммуникация на основе генераторов грубого хаоса (стендовый доклад).

Кузнецов А.П., Сатаев И.Р., Седова Ю.В. Динамика маломерных ансамблей связанных контактов Джозефсона (стендовый доклад).

3.8. Участие в экспедициях по тематике Проекта, за период, на который предоставлен грант (указать номера проектов)

Экспедиций не было.

3.10. Адреса (полностью) ресурсов в Интернете, подготовленных авторами по данному проекту

<http://www.sgtnd.narod.ru/science/grant/RFBE.htm>

<http://www.sgtnd.narod.ru/science/grant/RFBR.htm>

3.11. Библиографический список всех публикаций по Проекту, опубликованных за период, на который предоставлен грант, в порядке значимости: монографии, статьи в научных изданиях, тезисы докладов и материалы съездов, конференций и т.д.

- [1] Kuptsov P.V., Kuznetsov S.P. Numerical test for hyperbolicity in chaotic systems with multiple time delays. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, **56**, 2018, 227-239.
- [2] Kuptsov P.V., Kuznetsov S.P., Stankevich N.V. A Family of Models with Blue Sky Catastrophes of Different Classes. *Regular and Chaotic Dynamics*, **22**, 2017, No. 5, 551–565.
- [3] Kuptsov P.V., Kuptsova A.V. Radial and circular synchronization clusters in extended starlike network of van der Pol oscillators. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, **50**, 2017, 115-127.
- [4] Kuznetsov S.P. Chaos in three coupled rotators: From Anosov dynamics to hyperbolic attractors. *Indian Academy of Sciences Conference Series*, **1**, 2017, No 1, 117-132.
- [5] Станкевич Н.В., Кузнецов А.П., Селезнев Е.П. Квазипериодические бифуркации четырехчастотных торов в кольце пяти связанных осцилляторов ван дер Поля с различными видами диссипативной связи. *ЖТФ*, **87**, №6, 2017, 952-955.
- [6] Розенталь Р.М., Гинзбург Н.С., Зотова И.В., Исаева О.Б., Рожнёв А.Г., Сергеев А.С. Режимы развитого хаоса в гиротронах и гироусилителях с запаздывающей обратной связью. *Ученые записки физического факультета Московского университета*, 2017, №6, 1760102.
- [7] Жалнин А.Ю., Кузнецов С.П. Странные нехаотические автоколебания в системе механических ротаторов, *Нелинейная динамика*, **13**, 2017, № 2, 257-275.
- [8] В.С. Ерофеев, С.П. Кузнецов, Е. П. Селезнев. ВЧ генератор гиперболического хаоса. Тезисы докладов XII Всероссийской конференции молодых ученых. Саратов, 5-7 сентября 2017 г. Саратов, изд-во «Техно-Декор», 2017. С. 57-58.
- [9] Kuznetsov S.P. Design principles and illustrations of hyperbolic chaos in mechanical and electronic systems. *Proceedings of the International Symposium "Topical Problems of Nonlinear Wave Physics" (Moscow – St. Petersburg, Russia, 22 – 28 July, 2017)*. Russian Academy of Sciences Institute of Applied Physics of RAS, Nizhny Novgorod, 2017. P.44.
- [10] Isaeva O.B., Savin D.V., Seleznev E.P., and Stankevich N.V. Hyperbolic Chaos and Quasiperiodic Dynamics in Experimental Nonautonomous Systems of Coupled Oscillators. *Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2017). Abstracts. 22-25 May 2017. St Petersburg, Russia. The Electromagnetics Academy, 2017.*
- [11] P.V. Kuptsov, S.P. Kuznetsov. Hyperbolic chaos in system with multiple delays: numerical test via angle criterion. *The International Scientific Workshop "Recent Advances in Hamiltonian and Nonholonomic Dynamics" (Moscow, Dolgoprudny, Russia, 15-18 June 2017)*. Book of Abstracts. Moscow – Izhevsk: Publishing Center "Institute of Computer Sciences", 2017.
- [12] П.В. Купцов, С.П. Кузнецов. Ляпуновский анализ гиперболического хаоса в системах с несколькими запаздываниями. Тезисы докладов XII Всероссийской конференции молодых ученых. Саратов, 5-7 сентября 2017 г. Саратов, изд-во «Техно-Декор», 2017. С. 147-148.
- [13] А.П. Кузнецов, И.Р. Сатаев, Ю.В. Седова. Динамика маломерных ансамблей связанных контактов Джозефсона. Тезисы докладов XII Всероссийской конференции молодых ученых. Саратов, 5-7 сентября 2017 г. Саратов, изд-во «Техно-Декор», 2017. С. 241-242.
- [14] А.Ю. Жалнин, О.Б. Исаева, С.П. Кузнецов. Коммуникация на основе генераторов грубого хаоса. Тезисы докладов XII Всероссийской конференции молодых ученых. Саратов, 5-7 сентября 2017 г. Саратов, изд-во «Техно-Декор», 2017. С. 59-60.
- [15] Isaeva O.B., Jalnine A.Yu., Kuznetsov S.P. Chaotic Communication with Robust Hyperbolic Transmitter and Receiver. Preprint arXiv: 1708.02871 [nlin.CD], pp. 1-8.