

На правах рукописи

МИТРОФАНОВ Александр Александрович

СИНХРОНИЗАЦИЯ НЕИЗОХРОННЫХ АВТОГЕНЕРАТОРОВ

Специальность 05.12.04 -
Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2018

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Научный руководитель: **УДАЛОВ Николай Николаевич**
д. т. н., профессор НИУ «МЭИ»

Официальные оппоненты: **УСТИНОВ Алексей Борисович**
д.ф.-м.н., доцент кафедры физической электроники и технологии, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», в.н.с.

ЗВЕЗДИН Константин Анатольевич
к.ф.-м.н., федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, ст. научный сотрудник

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук

Защита состоится 13 декабря 2018 года в 13:00 на заседании диссертационного совета Д 219.001.04 при ордена Трудового Красного Знамени федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский Технический университет связи и информатики» по адресу: 111024, Москва, Авиамоторная ул., д 8а, МТУСИ, аудитория А – 448 (малый зал заседаний).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МТУСИ и на сайте <http://www.srd-mtuci.ru/images/Dis-Mitrofanov/dis-Mitrofanov.pdf>

Автореферат разослан «__» _____ 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 219.001.04

к. т. н., доцент

Терешонок Максим Валерьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В радиотехнических системах наиболее часто используется диапазон частот от сотен мегагерц до десятков гигагерц. В качестве источников колебаний в этом диапазоне применяются автогенераторы на сосредоточенных элементах (конденсаторах и индуктивностях), на линиях задержки и резонаторах на поверхностных акустических волнах (ПАВ), спин-волновые устройства, схемы на диэлектрических (в т.ч. керамических), волноводных и других резонаторах. Важной задачей в автогенераторах является управление частотой автоколебаний. В схемах со сосредоточенными элементами чаще всего она решается использованием варикапов. В спин-волновых устройствах используется зависимость частоты ферромагнитного резонанса от величины постоянного магнитного поля, которое легко может меняться под действием постоянного тока.

Последние годы особый интерес вызывает направление физики твердого тела, в котором исследуются наноразмерные спин-волновые устройства – устройства «спинтроники». В 2007 г. за работы в этом направлении А. Ферту была вручена Нобелевская премия по физике. Такими устройствами являются спин-трансферные наноосцилляторы (СТНО), представляющие собой многослойные наноструктуры, чаще всего в виде цилиндров, из чередующихся магнитных и немагнитных слоев¹. На данный момент, используя различные конфигурации нанослоев, удалось достичь частот генерации более 40 ГГц². Преимуществами СТНО перед другими известными автогенераторами

¹ A. Slavin and V. Tiberkevich. Nonlinear auto-oscillator theory of microwave generation by Spin-polarized current. IEEE Trans. Magn. 45, 1875 (2009).

² S. Bonetti, P. Muduli, F. Mancoff, and J. Akerman. Spin Torque oscillator frequency versus magnetic field angle: the prospect of operation beyond 65 GHz. Appl. Phys. Lett. 2009. Vol. 94, 102507.

являются: малые размеры, широкий диапазон частот: от сотен мегагерц до десятков гигагерц с относительной перестройкой частот более октавы, интегрируемость с технологическим процессом КМОП, малые рабочие напряжения и токи (менее 0,3 В), малое время переходного процесса (единицы наносекунд), протяженный участок линейной зависимости частоты от управляющего внешнего постоянного тока или внешнего магнитного поля. Уже сейчас предлагаются варианты использования СТНО в качестве детекторов СВЧ сигналов и в устройствах памяти. Активно исследуются возможности генерации излучения подобных структур в терагерцовом диапазоне.

Неотъемлемым свойством СТНО является неизохронность. Неизохронность колебаний – это физическое явление, заключающееся в зависимости частоты собственных колебаний колебательной системы от их амплитуды. Физический механизм неизохронности СТНО заключается в связи амплитуды прецессии намагниченности одного из слоев СТНО с частотой этой прецессии.

Также неизохронность проявляется в других перестраиваемых по частоте автогенераторах. В схемах с использованием варикапов неизохронность проявляется в случае работы на нелинейном участке вольт-фарадной характеристики варикапа, приводящей к зависимости среднего значения за период емкости колебательного контура от амплитуды колебаний. Обычно стараются работать на линейном участке вольт-фарадной характеристики, но это ограничивает возможный диапазон перестройки автогенераторов. Большинство известных на данный момент схемотехнических решений борьбы с неизохронностью при использовании варикапов приводит к уменьшению диапазона перестройки по частоте автогенератора или усложнению схемы.

Иной механизм возникновения неизохронности присутствует в спин-волновых устройствах. Там этот эффект обусловлен зависимостью частоты от

амплитуды прецессии намагниченности. На практике частотой управляют источником внешнего постоянного магнитного поля.

Также неизохронность может проявляться в перестраиваемых по частоте генераторах. В этом случае связь между амплитудой и частотой проявляется в переходном режиме установления колебаний. Обычно это связано с зависимостью управляющего сопротивления автогенератора от амплитуды и частоты и инерционными свойствами активного элемента. Примером такой автоколебательной системы является генератор на резонаторах на ПАВ.

Одной из главных характеристик любого автогенератора является уровень фазовых шумов. Низкий уровень фазовых шумов автогенератора является необходимым требованием при разработке множества радиолокационных и радиопередающих устройств. *Для СТНО это, наряду с низкой выходной мощностью, является главным недостатком, ограничивающим их практическое применение.* Одним из способов уменьшения уровня фазовых шумов является синхронизация «внешней силой» или взаимная синхронизация нескольких автогенераторов. В качестве внешней силы обычно выступает внешнее гармоническое воздействие (ВГВ) или ВГВ в сочетании с системой фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Целью синхронизации является навязывание стабильности эталонного перестраиваемого генератора перестраиваемому по частоте генератору.

Исследуемые в данной работе системы синхронизации применяются в технике связи, радиолокации и радионавигации, управлении, измерительных комплексах, в частности в синтезаторах сетки частот, синтезаторах сложных сигналов, демодуляторах сигналов с угловой модуляцией, в измерителях фазы и частоты сигналов, в устройствах слежения за несущими частотами принимаемых сигналов и в устройствах тактовой синхронизации.

Таким образом, разработка методик расчета динамических и шумовых характеристик синхронизированных неизохронных автогенераторов позволит

создать наноразмерные устройства генерирования и формирования сигналов в сверх и крайне высоких диапазонах частот, что в настоящее время является весьма актуальным.

Степень разработанности темы исследования. Значительный вклад в развитие теории СТНО внесли: А. Ферт, Дж. Слончевски, Л. Берже, А.Н. Славин, В.С. Тиберкевич, А.К. и К.А. Звездины, А.В. Хвальковский, Т. Силва, М. Келлер, В. Крос и Дж. Гройлер. Наиболее важные эксперименты по СТНО были проведены М. Цой, С. Ураждиным, В. Риппардом, М. Пуффалом, Дж. Кимом, У. Эбелс, С.И. Киселевым, И.Н. Криворотовым, Х. Кси, Дж. Сан, В.Е. Демидовым и С.О. Демокритовым. В России исследованием СТНО занимаются научные группы под руководством С.Г. Чigareва в ФИРЭ РАН им. В.А. Котельникова, С.А. Никитова в ИРЭ РАН им. В.А. Котельникова, А.К. Звездина в ИОФ РАН им. А.М. Прохорова, В.Д. Шалфеева и К.Г. Мишагина из Нижегородского Государственного университета им. Н.И. Лобачевского.

Методы, позволяющие значительно улучшить свойства генераторов на варикапах предложены, например, в работах М. П. Савченко, В.Н. Кулешова, С.М. Смольского, Г.М. Крылова и др.

Прикладными и фундаментальными исследованиями спин-волновых устройств уже более 50 лет занимаются в ЛЭТИ под руководством Б.А. Калиникоса и А.Б. Устинова³.

Подробная теория устройств на ПАВ, а также влияние неизохронности на характеристики генераторов была разработана А.А. Дворниковым, В.И. Огурцовым и Г.М. Уткиным⁴.

³ Калиникос Б.А., Устинов А.Б., Баруздин С.А. Спин-волновые устройства и эхо-процессоры. – М.: Радиотехника, 2013.

⁴ Дворников А.А., Огурцов В.И., Уткин Г.М. Стабильные генераторы с фильтрами на поверхностных акустических волнах. – М.: Радио и связь, 1983 - с.136

Существенный вклад в теорию шумов внесли Р.Л. Стратонович, С.М. Рытов, В.И. Тихонов, И.Л. Берштейн и В.Н. Кулешов.

Развитием теории систем внешней и взаимной синхронизации занимались С.И. Евтянов, А.А. Дворников, Г.М. Уткин, М.В. Капранов, Н.Н. Удалов, Б.И. Шахтарин, В.В. Шахгильдян, В. Линдсей, М.И. Жодзишский, И.И. Блехман, Д.И. Трубецков. Исследованию динамических процессов ансамблей СТНО посвящена диссертация А.Р. Сафина.

Однако задача исследования динамических процессов в синхронизированных ВГВ и цепью ФАПЧ неизохронных автогенераторах решена не была. Также не была решена задача определения уровня амплитудных и фазовых шумов неизохронных автогенераторов, синхронизированных ВГВ, цепью ФАПЧ и системы двух взаимно связанных неизохронных автогенераторов.

Цель работы. Разработка прикладных методов анализа процессов и шумовых характеристик в синхронизированных неизохронных автогенераторах, с целью создания стабильных миниатюрных перестраиваемых автогенераторов.

Основные задачи, решаемые в работе:

- разработка моделей неизохронного автогенератора, синхронизированного ВГВ, цепью ФАПЧ и взаимной синхронизации двух неизохронных автогенераторов;
- исследование динамических характеристик систем внешней синхронизации неизохронных автогенераторов;
- исследование шумовых характеристик систем внешней и взаимной синхронизации неизохронных автогенераторов;
- разработка методик расчета, моделирования и проектирования неизохронных автогенераторов на современной компонентной базе.

Научная новизна работы.

1. Построены математические модели неизохронного автогенератора в системах синхронизации ВГВ и цепью ФАПЧ с учетом влияния теплового белого гауссовского шума, особенностью которых является перестройка по частоте за счет неизохронности.

2. Показано, что в бесфильтровой системе ФАПЧ неизохронного автогенератора на основе модели Славина-Тиберкевича наблюдается эффект полосы захвата, что отличает эту систему от изохронных систем ФАПЧ, где полоса захвата существует только в системах с фильтром в цепи управления.

3. Показано, что полосы синхронизма при синхронизации с помощью цепи ФАПЧ и ВГВ являются несимметричными относительно знака частотной расстройки между эталонным и подстраиваемым генератором за счет нелинейности модуляционной характеристики.

4. Показано, что увеличивая значение коэффициента усиления сигнала ошибки в цепи обратной связи ФАПЧ можно увеличить значение полосы синхронизма, но при этом увеличится время вхождения в синхронизм. Так, увеличение значения относительной величины питающего тока от 10% до 30% приводит к увеличению полосы синхронизма в 3 раза, а среднего времени вхождения в синхронизм - в 2 раза.

5. Определено, что ключевым параметром, определяющим ширину полос синхронизма и захвата, а также область отстроек от несущей частоты, при которых удается получить выигрыш в уровне фазовых шумов для системы синхронизации ВГВ, является амплитуда внешнего гармонического сигнала, а для системы ФАПЧ – коэффициент усиления сигнала ошибки в цепи обратной связи.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что разработанная теория синхронизированных неизохронных автогенераторов позволяет

описывать динамические и шумовые свойства широкого класса устройств, независимо от их физической природы.

Практическая значимость работы состоит в том, что разработанные прикладные методы анализа процессов и шумовых характеристик в синхронизированных неизохронных автогенераторах позволяют создать стабильные миниатюрные перестраиваемые автогенераторы. Новые технические решения отражены в заявке на изобретение № 2018118058 от 16.05.2018.

Результаты диссертационной работы вошли в отчеты по научно-исследовательским работам по грантам РФФИ “Нанoeлектронные системы передачи, приема и обработки информации на основе устройств спинтроники и метаматериалов” №13-08-01278-13 и ФГБУ «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (Фонд содействия инновациям) №5998ГУ2/2015 от 11.06.2015 г. «Разработка универсального многофункционального синтезатора СВЧ на основе спиновых наногенераторов», а также используются в учебном процессе на радиотехническом факультете НИУ «МЭИ» в учебном курсе «Устройства формирования и генерирования сигналов. Также результаты диссертационной работы внедрены в компании ООО «Радиокомп», что подтверждается соответствующим актом.

Методология и методы исследования. В данной работе используются методы теории нелинейных колебаний, методы теории статистической радиотехники, численное моделирование на ПЭВМ, численное моделирование в САПР, экспериментальные исследования.

Положения, выносимые на защиту:

1. В качестве математических моделей синхронизированных неизохронных автогенераторов может быть использована модель Славина-Тиберкевича для СТНО с источниками белого гауссовского шума, дополненная

синхронизирующим низкочастотным источником тока для синхронизации цепью ФАПЧ, комплексной амплитудой спиновой волны для ВГВ и модель двух связанных уравнений Славина-Тиберкевича для взаимной синхронизации двух неизохронных автогенераторов.

2. Использование метода фазовой плоскости, дополненной координатой «амплитуда», позволяет аналитически определить и рассчитать такие динамические характеристики неизохронных автогенераторов в составе систем синхронизации цепью ФАПЧ и ВГВ, как полоса синхронизма, типы бифуркаций и виды особых точек в зависимости от параметров автогенераторов и систем синхронизации. Численное имитационное моделирование позволяет количественно определить такие характеристики систем, как полоса захвата и время вхождения в синхронизм.

3. Использование перехода к линеаризованным уравнениям для малых отклонений относительно стационарных значений амплитуды и фазы и использование спектрального метода позволяют определить частотные коэффициенты передачи для источника теплового шума внутри автогенератора и определить фазовые и амплитудные шумы синхронизированных неизохронных автогенераторов. Определенные таким образом фазовые шумы автономного СТНО на основе предложенной модели превышают шумы синхронизированного СТНО. Например, выигрыш в уровне фазовых шумов для синхронизированного цепью ФАПЧ СТНО на отстройке 10 МГц составляет 21 дБ.

4. Для уменьшения уровня фазовых шумов синхронизированных автогенераторов необходимо увеличивать коэффициент усиления сигнала ошибки в цепи обратной связи при синхронизации системой ФАПЧ, увеличивать амплитуду внешнего воздействия при синхронизации ВГВ и увеличивать коэффициент связи в системе взаимной синхронизации двух неизохронных автогенераторов. Ограничениями увеличения значений

параметров являются конструктивные и технологические возможности реализации систем синхронизации. Например, для взаимной синхронизации двух идентичных СТНО увеличение коэффициента связи в 10 раз приводит к уменьшению уровня фазовых шумов на отстройке 1 МГц на 17,7 дБ.

Соответствие паспорту специальности. Работа соответствует следующим областям исследования специальности 05.12.04 - Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения:

- исследование новых процессов и явлений в радиотехнике, позволяющих повысить эффективность радиотехнических устройств;
- разработка устройств генерирования, усиления, преобразования радиосигналов в радиосредствах различного назначения. Создание методик их расчета и основ проектирования.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов проведенных исследований обеспечивается использованием классических и современных методов теоретической физики и теории нелинейных колебаний, методами численного моделирования и экспериментально.

Основные результаты диссертационной работы обсуждались и получили одобрение на следующих научных конференциях: Международная конференция по встраиваемым вычислениям «Mediterranean Conference on Embedded Computing» «МЕСО – 2012» (Черногория, 2012 г.); Всероссийская межвузовская научно–техническая конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика–2013» (Москва, 2013 г.); 10–я международная школа–конференция «Хаотические автоколебания и образование структур» «ХАОС–2013» (Саратов, 2013 г.); Международный научно–технический семинар «СИНХРОИНФО» (Ярославль, Воронеж, Самара, Санкт–Петербург, Казань, Минск с 2013 г. по 2018 г.); IX Всероссийская научная конференция молодых ученых «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика в честь 60–

летия ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН» (Саратов, 2014 г.); 25–я международная конференция «СВЧ–техника и телекоммуникационные технологии» «Крымико-2015» (Севастополь, 2015 г.); Всероссийская научная школа–семинар «Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро– и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами» (Саратов, 2015 г.); Международный симпозиум International symposium «Spin Waves 2015» (Санкт-Петербург, 2015 г.); Научные школы «Нелинейные волны – 2016» и «Нелинейные волны–2018» (Нижний Новгород, 2016 г. и 2018 г.); Международная научно–техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, с 2012 по 2018 г.).

Личный вклад. Основные научные результаты, положения, выводы и рекомендации по теме диссертации получены автором лично и опубликованы в соавторстве с научным руководителем д.т.н., проф. Н.Н. Удаловым, консультантами к.т.н., доц. А.Р. Сафиним и к.т.н., проф. М.В. Капрановым. Во всех совместных работах соискатель занимался разработкой новых математических моделей, проведением математических выводов и расчетов, численным моделированием, моделированием в пакетах прикладных программ, экспериментальными исследованиями, проверкой и оценкой полученных результатов.

Публикации. По теме диссертации опубликованы 30 печатных работ, из них 7 научных статей (5 в изданиях, рекомендованных ВАК, из них 3 в изданиях, индексируемых в базах Scopus и Web of Science), 18 тезисов докладов и 5 текстов докладов в сборниках материалов международных конференций.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 116 наименований и шести приложений. Общий объем диссертации составляет 175 страниц, включая 66 иллюстраций.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, в общем виде сформулирована цель работы, а также проблемы и задачи, которые необходимо решить для разработки прикладных методов анализа процессов в синхронизированных неизохронных автогенераторах.

В первой главе проведен обзор литературы по неизохронным автогенераторам и системам их синхронизации.

Для автогенератора, управляемого частотой с помощью варикапа, показан физический механизм возникновения неизохронности. Также приведена универсальная математическая модель неизохронного автогенератора, предложенная Славиным и Тиберкевичем. Показаны основные допущения при выводе модели и следующие из этого ограничения её применения.

Далее проведен обзор теоретических работ по неизохронным автогенераторам на основе спин-волновых устройств. Таким образом показан изоморфизм неизохронных автоколебательных систем.

Проведен обзор литературы по новому перспективному классу СВЧ генераторов, так называемых СТНО. Дано общее описание, физические принципы и конструкции таких устройств. В работе обосновано применение универсальной математической модели Славина-Тиберкевича для описания СТНО. Также приведен обзор теоретических и экспериментальных работ по синхронизации СТНО.

По итогам первой главы обосновано применение универсальной математической модели неизохронного автогенератора Славина-Тиберкевича. Показано, что неизохронность – универсальное физическое свойство разных колебательных систем и является причиной ухудшения уровня фазовых шумов автогенератора. Сделан вывод о перспективах применения систем синхронизации для уменьшения уровня фазовых шумов неизохронных автогенераторов, в особенности СТНО. Поставлены задачи исследования.

Во второй главе получена математическая модель неизохронного автогенератора, синхронизированного цепью ФАПЧ методом медленно-меняющихся амплитуд. Получены укороченные уравнения для амплитуды U и разности фаз $\Delta\varphi$ эталонного $\varphi_{эм}$ и подстраиваемого φ автогенераторов:

$$\begin{cases} \frac{dU}{dt} = U\Gamma_G [(\zeta - 1 + \varepsilon \sin(\Delta\varphi)) - (\zeta + Q + \varepsilon \sin(\Delta\varphi))U^2]; \\ \frac{d\Delta\varphi}{dt} = \Delta\omega + NU^2, \end{cases} \quad (1)$$

где Γ_G - коэффициент спин-волновых потерь, ζ - запас по самовозбуждению, ε - коэффициент усиления сигнала ошибки в цепи обратной связи схемы ФАПЧ, Q - коэффициент нелинейного затухания, N - коэффициент неизохронности, ω_0 - составляющая частоты автогенератора, не зависящая от амплитуды, $\Delta\varphi = \varphi - \varphi_{эм}$, $\Delta\omega = \omega_0 - \omega_{эм}$, $\omega_{эм}$ - частота эталонного генератора.

Рассмотрена динамика этой системы, включая анализ устойчивых режимов и бифуркаций (рисунок 1 а-г). Получены аналитически полоса синхронизма и методом моделирования полоса захвата (рисунок 2, б), а также зависимости времени вхождения в синхронизм от параметров систем. Показано, что увеличение коэффициента усиления сигнала ошибки в цепи обратной связи приводит к увеличению ширины полос синхронизма и захвата, но при этом увеличивается время вхождения в синхронизм.

Рассчитаны амплитудные и фазовые шумы синхронизированного цепью ФАПЧ и автономного автогенераторов (рисунок 2,а). Показано, что неизохронность приводит к увеличению уровня фазовых шумов автогенератора. Получены зависимости дисперсии фазовых шумов от времени наблюдения. Определены значения максимальной отстройки частот, для которой возможно получить выигрыш в уровне фазовых шумов. Проведено численное

моделирование синхронизированного неизохронного автогенератора в присутствии шума.

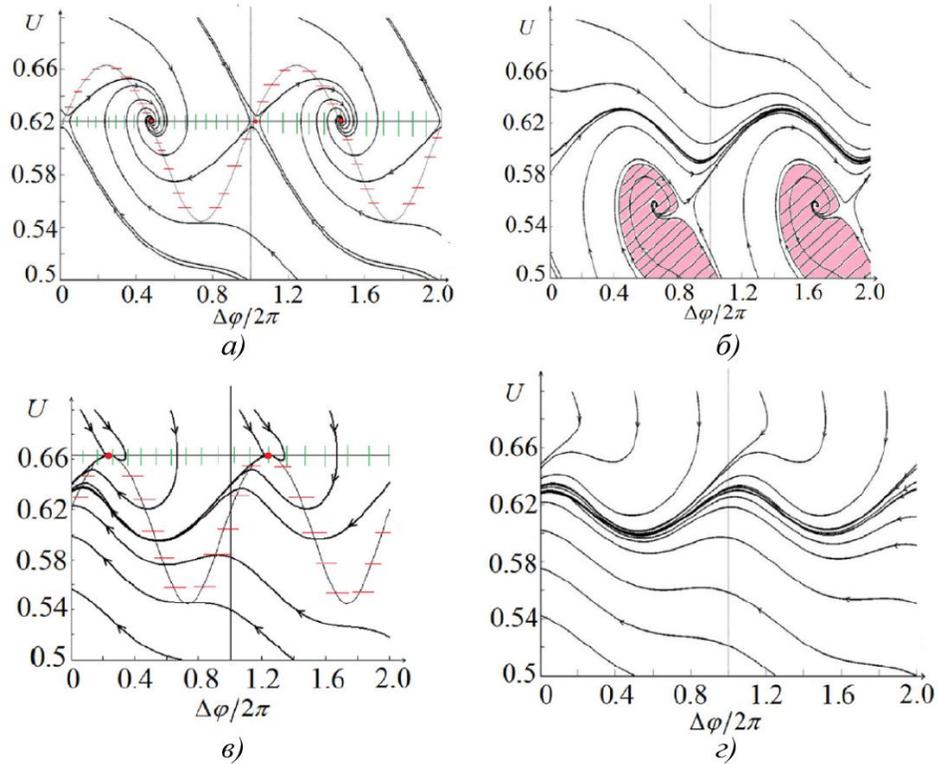


Рисунок 1 – Фазовые портреты системы (1) а) режим синхронизма, б) режим квазисинхронизма, в) седло-узловая бифуркация, г) режим биений.

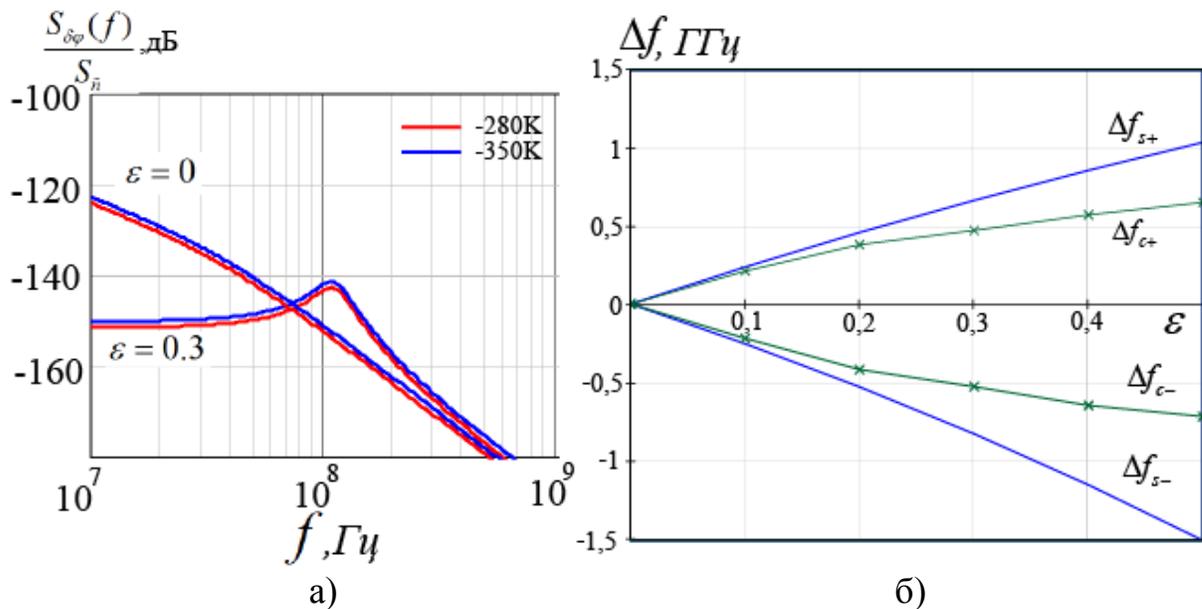


Рисунок 2 – а) Фазовые шумы автономного и синхронизированного цепью ФАПЧ автогенераторов б) Полоса синхронизма Δf_s и захвата Δf_c относительно параметра фазовой синхронизации ε

В третьей главе получена и исследована модель синхронизации неизохронного автогенератора ВГВ:

$$\begin{cases} \frac{dU}{dt} = \Lambda \cos \Delta\varphi + \Gamma_G U \cdot (a_0 - U^2); \\ \frac{d\Delta\varphi}{dt} = \Delta\omega + NU^2 - \frac{\Lambda}{U} \sin \Delta\varphi, \end{cases} \quad (2)$$

где Λ - нормированная амплитуда внешнего гармонического воздействия, a_0 - параметр, зависящий от запаса по самовозбуждению и затухания.

Построены резонансные и фазовые характеристики, проведен анализ динамики системы, получены фазовые портреты системы, определены границы зон синхронизма и проведено сравнение с системой ФАПЧ.

Показано, что синхронизированные цепью ФАПЧ и ВГВ неизохронные автогенераторы имеют более низкий уровень шумов, чем автономные неизохронные автогенераторы. Сравнение систем синхронизации цепью ФАПЧ и ВГВ показало, что лучший эффект достигается той или иной системой в зависимости от значения коэффициента усиления сигнала ошибки в цепи обратной связи или амплитуды внешнего воздействия для системы ФАПЧ или ВГВ, соответственно (рисунок 3).

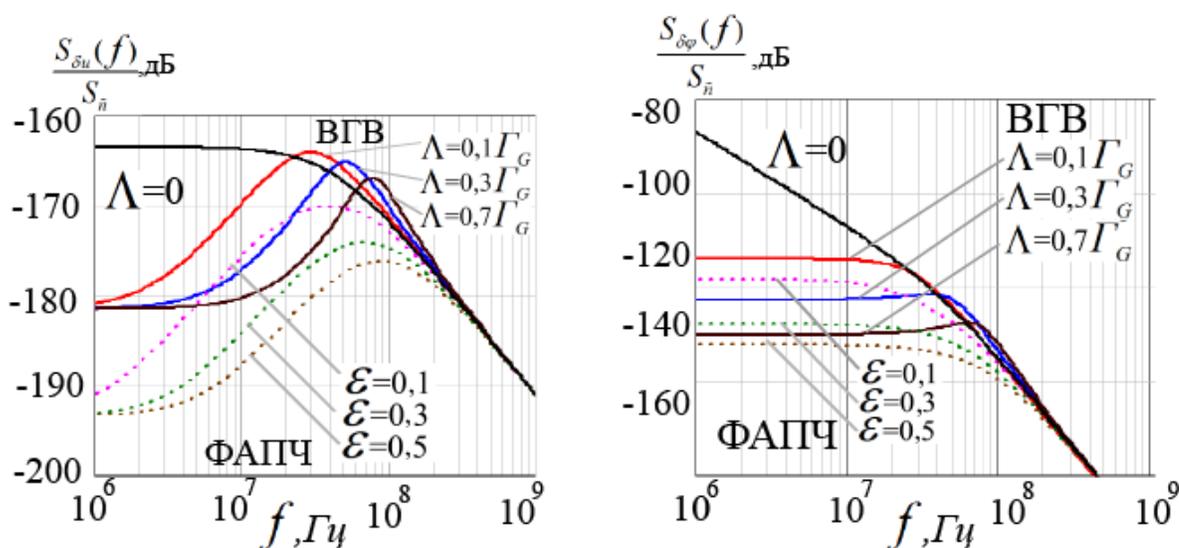


Рисунок 3 - Спектральная плотность амплитудных и фазовых шумов при различных параметрах систем синхронизации с помощью кольца ФАПЧ и ВГВ

В четвертой главе исследована модель взаимной синхронизации двух неизохронных автогенераторов. В главе получены аналитические выражения для амплитудных и фазовых флуктуаций каждого из генераторов при разных параметрах связи, частотной расстройке, фазовой задержки системы синхронизации, параметров затухания и запасов по самовозбуждению каждого из автогенераторов. Также исследовано влияние неидентичности параметров на шумовые свойства (рисунок 4).

Рассмотрены три варианта синхронизации автогенераторов: полностью идентичных СТНО; СТНО с разными частотами колебаний; неидентичных СТНО, отличающихся запасом по самовозбуждению, частотами и амплитудами колебаний.

Для идентичных СТНО удастся получить выигрыш в уровне амплитудных и фазовых шумов. При этом увеличение запаса по самовозбуждению приводит к уменьшению уровня фазовых и амплитудных шумов (рисунок 5). Неизохронность, в свою очередь, приводит к увеличению уровня амплитудных и фазовых шумов.

Для второго варианта удастся получить лучшее значение фазовых и амплитудных шумов. При этом для уменьшения уровня фазовых шумов необходимо увеличивать коэффициент связи двух СТНО и увеличивать частотную расстройку двух СТНО, при этом оставаясь в пределах полосы синхронизма системы. Это связано с тем, что в данной модели управляющее воздействие на СТНО зависит от разности частот генераторов. При равенстве частот такое воздействие является минимальным в соответствии с укороченными уравнениями.

Анализ коэффициентов ослабления для неидентичных СТНО показывает возможность улучшения шумовых свойств каждого из генераторов. При этом лучшее значение шумов получается для СТНО, обладающего большей стабильностью в автономном режиме.

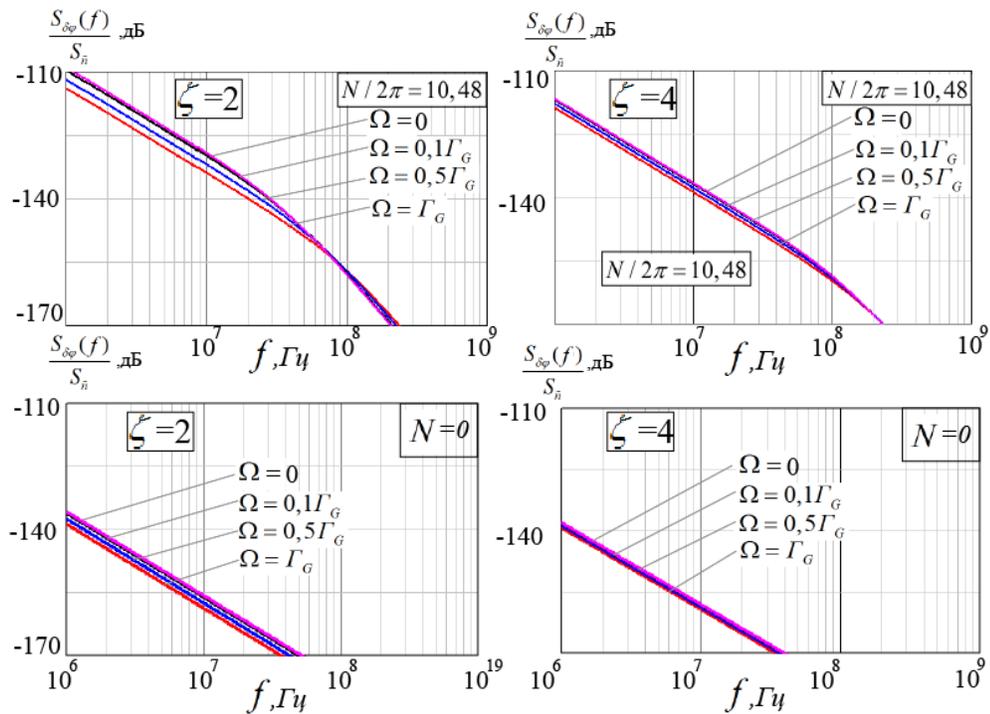


Рисунок 4 - Зависимость амплитудных и фазовых шумов идентичных автогенераторов при разных значениях коэффициента связи Ω , двух значениях запаса по самовозбуждению $\zeta = 2$ и $\zeta = 4$ и двух значениях коэффициента неизохронности $N = 0$ и $N / 2\pi = 10,48 ГГц$.

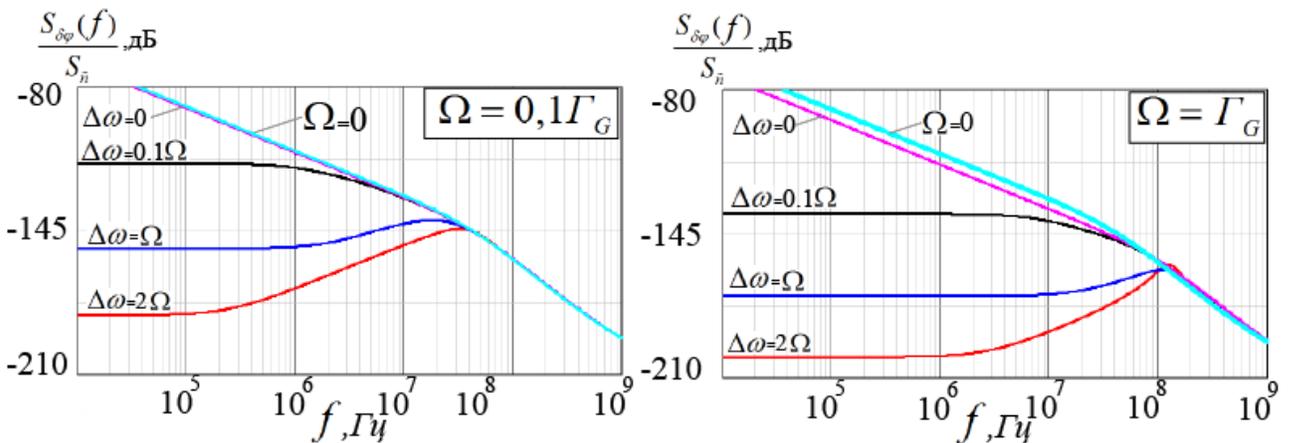


Рисунок 5 - Фазовые шумы двух СТНО при разной расстройке ($\Delta\omega = 0$, $\Delta\omega = 0,1\Omega$, $\Delta\omega = \Omega$, $\Delta\omega = 2\Omega$) для двух коэффициентов связи ($\Omega = 0,1\Gamma_G$, $\Omega = \Gamma_G$) и шумы автономного СТНО ($\Omega = 0$)

Полученные расчеты амплитудных и фазовых шумов позволяют спроектировать систему синхронизированных СТНО с минимальным уровнем фазовых и амплитудных шумов.

В пятой главе разработана методика расчета и моделирования автогенераторов помощью систем автоматического проектирования ADS и HFSS. Описана методика синхронизации неизохронных ГУН с применением современной компонентной базы.

На основании приведенных методик спроектирован автогенератор на керамическом резонаторе с частотой генерации 400 МГц (рисунок 6).

Проведен эксперимент по синхронизации автогенератора с помощью интегральной микросхемы ФАПЧ 1288ПЛ1У и разработанной специально для неё отладочной платы (рисунок 7), включающей в себя цепи питания и управления, опорный генератор, подстраиваемый генератор и элементы цепи обратной связи системы ФАПЧ.

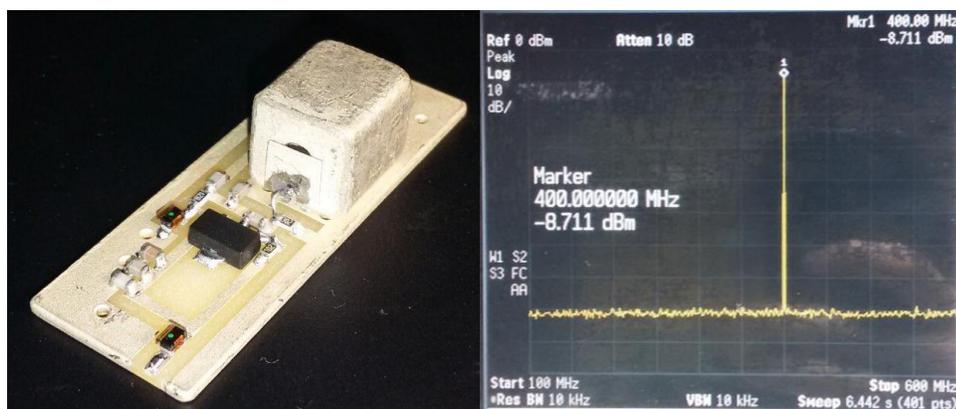


Рисунок 6 - Общий вид автогенератора и спектр его колебаний

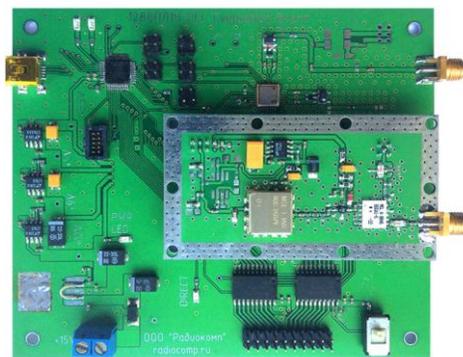


Рисунок 7 - Отладочная плата для микросхемы ФАПЧ 1288ПЛ1У⁵.

⁵ Разработано в ООО «Радиокомп»

Результаты эксперимента показали возможность уменьшения уровня фазовых шумов неизохронных автогенераторов при использовании системы синхронизации (рисунок 8).

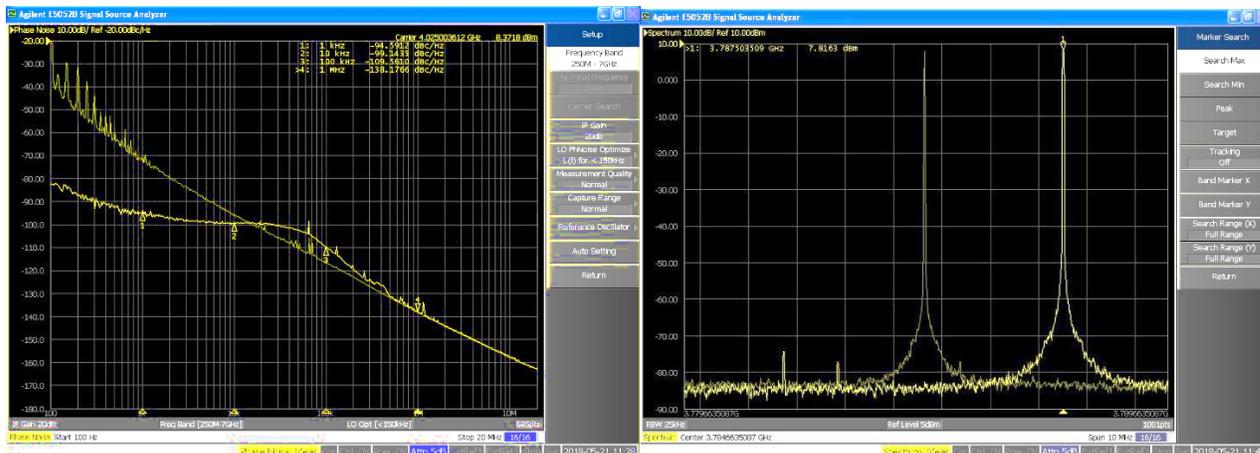


Рисунок 8 – Перестройка автогенератора по частоте и фазовые шумы синхронизированного и автономного генератора

В **Заключении** сформулированы основные итоги работы, которые заключаются в следующем:

- методом медленно-меняющихся амплитуд получены математические модели синхронизированных цепью ФАПЧ, ВГВ и двух связанных неизохронных автогенераторов - СТНО;
- получены расчетные соотношения для определения полосы синхронизма, позволяющие дать рекомендации по построению систем синхронизации неизохронных автогенераторов;
- показано, что для неизохронных автогенераторов существует полоса захвата при синхронизации бесфильтровой системой ФАПЧ;
- проведена количественная оценка влияния параметров генераторов на динамические и шумовые свойства синхронизированных автогенераторов;
- экспериментально показано, что система синхронизации с помощью кольца ФАПЧ позволяет улучшить шумовые свойства неизохронных автогенераторов.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Опубликованные статьи в журналах из перечня ВАК:

- 1) **Mitrofanov, A.A.** Phase Locked Loop of the Spin-Torque Nanooscillator / A.A. Mitrofanov, A.R. Safin, N.N. Udalov // Technical Physics Letters. – 2014. – Vol.40. – №7. (Митрофанов, А.А. Система фазовой синхронизации спин-трансферного наноосциллятора / А.А. Митрофанов, А.Р. Сафин, Н.Н. Удалов // Письма в ЖТФ. – 2014. – Т. 40. – Вып. 13. – С.66-72.) WoS, Scopus. DOI: 10.1134/S1063785014070074. Личный вклад соискателя – 80%.
- 2) **Mitrofanov, A.A.** Amplitude and phase noises of a spin-transfer nano-oscillator synchronized by a phase-lock loop / A.A. Mitrofanov, A.R. Safin, N.N. Udalov // Technical Physics Letters. – 2015. – Vol.41. – №8. (Митрофанов, А.А. Амплитудные и фазовые шумы спин-трансферного наноосциллятора, синхронизированного системой фазовой автоподстройки частоты / А.А. Митрофанов, А.Р. Сафин, Н.Н. Удалов // Письма в ЖТФ. – 2015. – Т. 41. – Вып.16. – С.29-35.) WoS, Scopus. DOI: 10.1134/S1063785015080271. Личный вклад – 80%.
- 3) **Митрофанов, А.А.** Синхронизация спин-трансферных наноосцилляторов / А.А. Митрофанов, А.Р. Сафин, Н.Н. Удалов, М.В. Капранов // Вестник МЭИ. – 2015. – №1. – С.96-100. Личный вклад – 70%.
- 4) **Митрофанов, А.А.** Полоса захвата системы фазовой автоподстройки частоты спин-трансферного наноосциллятора / А.А. Митрофанов, А.Р. Сафин, Н.Н. Удалов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2015. – Том. 9. – №3. – С. 28-31. Личный вклад – 80%.
- 5) **Mitrofanov, A.A.** Theory of spin torque nano-oscillator-based phase-locked loop (Теория фазовой автоподстройки частоты спин-трансферного наноосциллятора) / A.A. Mitrofanov, A.R. Safin, N.N. Udalov, M.V. Kapranov // Journal of applied physics. – 2017. – Vol.122,123903. WoS, Scopus. DOI: 10.1063/1.5004117. Личный вклад – 70%.

Опубликованные статьи в других изданиях:

- 6) **Митрофанов, А.А.** Время установления синхронного режима в системе фазовой автоподстройки спин-трансферного наноосциллятора / А.А. Митрофанов, А.Р. Сафин, Н.Н. Удалов // Радиотехнические тетради. – 2014. – № 52. – С.77-78. Личный вклад – 80%.
- 7) **Митрофанов, А.А.** Динамические процессы бесфильтровой системы ФАПЧ спин-трансферного наноосциллятора / А.А. Митрофанов, А.Р. Сафин, Н.Н. Удалов // Радиотехнические тетради. – 2013. – №50. – с.73-74. Личный вклад – 80%.

Тезисы и тексты докладов в материалах конференций:

- 8) Safin, A. Physical parameters computation of synchronized spin transfer nano-generator using phase locked loop / A. Safin, A. Mitrofanov // Mediterranean Conference on Embedded Computing MECO – 2012. Bar, Montenegro, June 19-21. – 2012. Proceedings, IEEE CAT.CFP1239T-ART, ISBN978-9940-9436-0-8. – P.254-257. Личный вклад – 80%.

- 9) Митрофанов, А. А. Динамические процессы бесфильтровой системы фазовой синхронизации спин-трансферного наноосциллятора / А.А. Митрофанов, А.Р. Сафин, Н.Н. Удалов // Материалы 10-й Международной школы-конференции «Хаотические автоколебания и образование структур» (ХАОС-2013) 7-12 октября 2013 г. Саратов. Личный вклад – 80%.
- 10) Митрофанов, А. А. Нелинейная динамика бесфильтровой системы ФАПЧ спин-трансферного наноосциллятора / А.А. Митрофанов, А.Р. Сафин, Н.Н. Удалов // Материалы международного научно-технического семинара СИНХРОИНФО-2013, г. Ярославль, с.48. Личный вклад – 80%.
- 11) Митрофанов, А. А. Полоса захвата системы фазовой автоподстройки частоты спин-трансферного наноосциллятора / А.А. Митрофанов, А.Р. Сафин, Н.Н. Удалов // Материалы международного научно-технического семинара СИНХРОИНФО-2014, г. Воронеж. Личный вклад – 80%.
- 12) Митрофанов, А. А. Ширина спектральной линии системы фазовой синхронизации спин-трансферного наноосциллятора / А.А. Митрофанов, А.Р. Сафин, Н.Н. Удалов // Тезисы докладов IX Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наноэлектроника, Нанопотоника и нелинейная физика» в честь 60-летия ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. г. Саратов 1-3 сентября 2014 г. Личный вклад – 80%.
- 13) Митрофанов, А. А. Особенности фазовой синхронизации спиновых наногенераторов / А.А. Митрофанов, А.Р. Сафин, Н.Н. Удалов // Тезисы докладов 20й Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика-2013», Москва, МИЭТ, 2013, с. 143. Личный вклад – 80%.
- 14) Митрофанов, А. А. Определение полосы захвата фазовой автоподстройки частоты спин-трансферного наноосциллятора / А.А. Митрофанов, А.Р. Сафин, Н.Н. Удалов // Материалы 18-й Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке» г. Харьков 14 – 16 апреля 2014 г. Личный вклад – 80%.
- 15) Митрофанов, А. А. Уменьшение фазовых шумов спин-трансферного наноосциллятора в системе фазовой автоподстройки частоты / А.А. Митрофанов, А.Р. Сафин, Н.Н. Удалов // Сборник трудов конференции «Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов в инфокоммуникациях» «СИНХРОИНФО 2015». г. Санкт-Петербург 28 июня-1 июля 2015 г. с. 113. Личный вклад –80%.
- 16) Митрофанов, А. А. Уменьшение фазовых шумов спин-трансферного наноосциллятора в системе фазовой автоподстройки частоты / А.А. Митрофанов, А.Р. Сафин, Н.Н. Удалов // Сборник трудов 25-й международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». «Крымико 2015». г. Севастополь, 6-12 сентября 2015 г. – С.771-772. Личный вклад – 80%.

- 17) Митрофанов, А. А. Ширина спектральной линии спин-трансферного наноосциллятора, синхронизированного фазовой автоподстройкой частоты / А.А. Митрофанов, А.Р. Сафин, Н.Н. Удалов // Тезисы докладов всероссийской научной школы-семинара «Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами» г. Саратов, 14-15 мая 2015 г. – С.150. Личный вклад – 80%.
- 18) Mitrofanov, A. A., Safin, A.R., Udalov, N. N. Amplitude and phase noise of the synchronized spin torque nanooscillator // Abstracts from International symposium «Spin Waves 2015». St. Petersburg, Russia, June 7-13. – 2015. Личный вклад – 80%.
- 19) Митрофанов, А. А. Сравнение шумовых характеристик систем синхронизации спин-трансферных наноосцилляторов / А.А. Митрофанов, А.Р. Сафин, Н.Н. Удалов // Тезисы научной школы «Нелинейные волны – 2016». 27 февраля – 4 марта 2016 г. – С.102. Личный вклад – 80%.
- 20) Митрофанов, А. А. Фазовые шумы спин-трансферного наноосциллятора при синхронизации системой фазовой автоподстройки частоты и внешним гармоническим сигналом / А.А. Митрофанов, А.Р. Сафин, Н.Н. Удалов // Тезисы докладов конференции «Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов в инфокоммуникациях» «СИНХРОИНФО 2016» г. Самара 2016. – С.85-87. Личный вклад – 80%.
- 21) Митрофанов, А. А. Фазовая автоподстройка частоты вихревого спин-трансферного наноосциллятора / А.А. Митрофанов, А.Р. Сафин // Тезисы докладов XVIII Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», Москва, НИУ МЭИ. – 2012 г. Личный вклад – 80%.
- 22) Митрофанов, А. А. Уменьшение ширины спектральной линии спин-трансферного наноосциллятора при использовании схемы ФАПЧ / А.А. Митрофанов, А.Р. Сафин // Тезисы докладов XIX Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», Москва, НИУ МЭИ, 2013г., – С.38. Личный вклад – 80%.
- 23) Митрофанов, А. А. Полоса синхронизма бесфильтровой схемы ФАПЧ спин-трансферного наноосциллятора / А.А. Митрофанов, А.Р. Сафин // Тезисы докладов XX Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». М., – НИУ МЭИ. – 2014г. Личный вклад – 80%.
- 24) Митрофанов, А. А. Амплитудные и фазовые шумы спин-трансферного наноосциллятора в системе фазовой автоподстройки частоты/ А.А. Митрофанов, А.Р. Сафин // Тезисы докладов XXI Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», М. – НИУ МЭИ. – 2015г. Личный вклад – 80%.

- 25) Павлов, Е.А. Амплитудные и фазовые шумы спин-трансферного наноосциллятора синхронизированного внешним воздействием / Е.А. Павлов, А.А. Митрофанов, А.Р. Сафин // Тезисы докладов XXII Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». – М. – НИУ МЭИ. – 2016. Личный вклад – 60%.
- 26) Балясов, Н.С. Резонансные свойства плёнок железо-иттриевого граната / Н.С. Балясов, А.А. Митрофанов, А.Р. Сафин // Тезисы докладов XXII Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» – М. – НИУ МЭИ. – 2016г. Личный вклад – 60%.
- 27) Митрофанов, А. А. Модель автогенератора с колебательной системой на основе линии задержки на спиновых волнах / А.А. Митрофанов, А.Р. Сафин, Н.Н. Удалов // Тезисы докладов конференции «Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов в инфокоммуникациях» «СИНХРОИНФО 2017» г. Казань. – 2017. – С.177-178. Личный вклад – 80%.
- 28) Балясов, Н.С. Генератор на поверхностных акустических волнах с перестройкой по частоте / Н.С. Балясов, А.А. Митрофанов, А.Р. Сафин, Н.Н. Удалов // Тезисы докладов XXIII Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» – М. – НИУ МЭИ. – 2017г. Личный вклад автора – 60%.
- 29) Митрофанов, А. А. Фазовые шумы синхронизированных неизохронных автогенераторов / А.А. Митрофанов, А.Р. Сафин, Н.Н. Удалов // Тезисы докладов XXIII Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» – М. – НИУ МЭИ. – 2018г. Личный вклад-80%.
- 30) Митрофанов, А. А. Сравнение шумовых характеристик систем синхронизации спин-трансферных наноосцилляторов / А.А. Митрофанов, А.Р. Сафин, Н.Н. Удалов // Тезисы научной школы «Нелинейные волны – 2018». 26 февраля – 3 марта 2018 г. – с.102. Личный вклад– 80%.