

На правах рукописи



САФИН Ансар Ризаевич

**АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ
НА ОСНОВЕ ВЗАИМОСИНХРОНИЗИРОВАННЫХ
СПИН-ТРАНСФЕРНЫХ НАНООСЦИЛЛЯТОРОВ**

Специальность **05.12.04** –
Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва–2014

**Работа выполнена на кафедре «Формирование колебаний и сигналов»
ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ»**

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
УДАЛОВ Николай Николаевич

Официальные оппоненты: **УСТИНОВ Алексей Борисович,**
д.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры
физической электроники и технологии
СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

КОЧЕМАСОВ Виктор Неофидович,
к.т.н., с.н.с., начальник научно-
исследовательского отдела МТУСИ

Ведущая организация: **Фрязинский филиал**
ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

Защита состоится 22 мая 2014 г. в 15.00 на заседании диссертационного совета Д 212.157.05 при ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ» по адресу: 111250, Москва, Красноказарменная ул., д 14, **аудитория А – 402.**

Отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: **111250, Москва, Красноказарменная ул., д. 14, Ученый совет ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ».**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ» www.mpei.ru.

Автореферат разослан “ ” марта 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.157.05
кандидат технических наук, доцент


2

Т. И. КУРОЧКИНА

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ¹

Актуальность темы. Традиционная микроэлектроника основана на переносе электрического заряда электронов (носителей электрического тока). Исследования физических процессов в ферромагнитных пленках и пленочных мультислойных структурах на основе ферромагнитных и антиферромагнитных пленок привели в конце 20 века к созданию нового направления СВЧ-электроники, получившего название «спин-волновая электроника». В таких устройствах используются не зарядовые свойства носителей, а их собственный магнитный момент – спин. На этой основе были реализованы различные линейные и нелинейные СВЧ-приборы – фильтры, генераторы, линии задержки, фазовращатели и т.д.².

В последние 20 лет в связи с бурным развитием нанотехнологий и возможностью создания пленок толщиной в десятки и единицы нанометров возникли новые перспективы использования спин-волновой электроники. Направление физики твердого тела, в котором исследуются наноразмерные спин-волновые устройства, получило название «спинтроника»³. Принцип работы новых генераторов, построенных на базе спинтроники (т.н. «спин-трансферных наноосцилляторов (СТНО)»), заключается в генерации высокочастотных колебаний при пропускании через образец, состоящий из чередующихся магнитных и немагнитных слоев, электрического тока высокой плотности. Генерация возникает за счет эффектов переноса крутильного момента и спиновой инжекции от одного слоя к другому. СТНО имеют ряд положительных качеств, отличающих их от современных СВЧ-

¹ Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг. (соглашения №14.В.37.21.1211, 14.132.21.1665), РФФИ (договор №13-08-01278-13), гранта Президента для молодых ученых и аспирантов (проект № СП-665.2012.3).

² Калинин Б.А., Устинов А.Б., Баруздин С.А. Спин-волновые устройства и эхо-процессоры. / Под ред. В.Н. Ушакова. –М.: Радиотехника, 2013.

³ Ферг А. Происхождение, развитие и перспективы спинтроники // Успехи физических наук. 2008. Т. 178. № 12. С. 1336—1348.

генераторов, управляемых напряжением (ГУН): широкий диапазон перестройки по току и магнитному полю (единицы гигагерц током и десятки гигагерц магнитным полем), миниатюрные размеры (теоретический предел составляет 6×6 нм для частот около 300 ГГц), малые питающие напряжения (менее 1 В), малое время переходных процессов (единицы наносекунд) и совместимость с технологическим циклом производства современных КМОП-структур. При этом технология создания СТНО с каждым годом совершенствуется, а структура слоев, из которых они составлены, становится все более сложной, чем достигают необходимых рабочих характеристик⁴.

Существенный вклад в развитие теории и приложений СТНО сделали A.Fert, J. Slonczewski, L. Berger, П.Е. Зильберман, Ю.В. Гуляев, А.Н. Славин, В.С. Тиберкевич, А.К. и К.А. Звездины, W. Rippard, M. Puffal, T. Silva, V. Cros, J. Grollier, В.Д. Шалфеев и К.Г. Мишагин.⁵ и др. В России можно выделить две основные научные группы физиков в области СТНО – из Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (под руководством д.ф.-м.н. П.Е. Зильбермана и акад. РАН Ю.В. Гуляева) и из Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН (под руководством д.ф.-м.н. А.К. Звездина). Фундаментальный вклад в теорию спин-волновых устройств внесли работы, выполненные в СПбГЭТУ «ЛЭТИ» под руководством д.ф.-м.н. Б.А. Калиникова².

Несмотря на ряд положительных качеств у СТНО имеются существенные недостатки, ограничивающие на данный момент их практическое использование. К главному недостатку СТНО относится низкий уровень выходной мощности единичных генераторов (в лучшем случае до 0,5 мкВт, а для более простых в технологическом исполнении до 5-10 нВт и даже пиковатт). В связи с этим

⁴ Гуляев Ю.В., Зильберман П.Е., Панас А.И. и др. Спинтроника: обменное переключение ферромагнитных металлических переходов при малой плотности тока. // Успехи физ. Наук. 2009. Т. 179. №4. С. 359-368.

⁵ Мишагин К.Г., Шалфеев В.Д. Синхронизация спинового наногенератора с использованием цепи фазовой автоподстройки. // Письма в ЖТФ. 2010. Т.36. №22. С.51-57.

исследователями были предложены различные механизмы связи между СТНО с целью сложения их мощностей^{6,7}. Наиболее перспективным является локальный (существенно зависящий от расстояния) механизм взаимодействия СТНО за счет спиновых волн, распространяющихся в общем ферромагнитном слое.

В силу технологических трудностей на данный момент производить СТНО, обладающие полностью одинаковыми физическими параметрами (в первую очередь размерами), невозможно. Генераторы, произведенные по одной и той же технологии в едином технологическом цикле, могут иметь существенный разброс параметров (например, диаметров образцов), что может негативно сказаться на синхронизации СТНО в ансамбле и сложении их мощностей. Для реальных технических приложений необходимо иметь рекомендации по объединению в ансамбль большого количества СТНО, их число в ряде случаев должно достигать нескольких сотен. С вычислительной точки зрения, даже при использовании современных суперкомпьютерных технологий, получить такие рекомендации чрезвычайно трудно и в ближайшем будущем решение этой задачи не представляется возможным. В то же время, теоретических работ, позволяющих приближенно исследовать процессы в большом ансамбле СТНО, не существует. Поэтому чрезвычайно актуальной задачей на данный момент является создание теоретических инженерных подходов к исследованию больших ансамблей СТНО с существенно неидентичными управляющими параметрами для достижения наилучших показателей по сложению их мощностей.

Задача о синхронизации большого числа связанных автоколебательных систем является фундаментальной в теории нелинейных колебаний, а исследования в этой области ведутся уже много десятилетий. Существенный

⁶ **Grollier J., Cros V., and Fert A.** “Synchronization of spin-transfer oscillators driven by stimulated microwave currents”. *Phys. Rev. B.* 2006. Vol. 73. P. 060409.

⁷ **Kaka S., Pufall M., Rippard W., et al** “Mutual phase-locking of microwave spin torque nanooscillators”. *Nature.* 2005. Vol. 437. P. 389–392.

научный вклад в развитие теории взаимодействующих автоколебательных систем внесли А.А. Андронов, Н.Н. Боголюбов, Б. Ван-дер-Поль, А.А. Витт, А.В. Гапонов-Грехов, Ю.Б. Кобзарев, Р.В. Хохлов, Н.М. Крылов, А.Г. Майер, А.Н. Малахов, Л.И. Мандельштам, Ю.А. Митропольский, Ю.И. Неймарк, Н.Д. Папалекси, С.Э. Хайкин, М.В. Капранов, И.И. Блехман, С.М. Смольский, Т. Endo, S. Mori, H. Aumann, D.Linkens, A. Scott и др. Построение инженерной теории взаимодействующих автогенераторов (в том числе в составе фазированных антенных решеток) для радиотехнических приложений велось в конце 20 века в научной школе профессора С.И. Евтянова группой Г.М. Уткина и А.А. Дворникова⁸. Отметим ряд фундаментальных работ, выполненных в последние 20 лет Саратовской научной школой нелинейной динамики под руководством А.П. Кузнецова⁹, а также Нижегородской научной школой под руководством В.Д. Шалфеева¹⁰. Несмотря на большое число работ в области синхронизации большого числа автоколебательных систем, на данный момент отсутствует инженерная теория, позволяющая исследовать процессы в ансамбле взаимосвязанных СТНО с учетом их неидентичности. Анализ работы системы существенно неидентичных СТНО на общую нагрузку, а также влияние неизохронности и задержки в распространении спиновых волн на синхронные свойства такой схемы в литературе практически не рассматривался.

В большинстве работ, посвященных объединению СТНО в ансамбли, рассматривается 2D-решеточная схема (либо 1D линейная цепочка), как единственно возможная. Однако такие схемы обладают рядом недостатков. К основному относится большое количество мод колебаний с разными частотами, которые могут существовать в такой системе, и сложности отбора мощности от

⁸ Дворников А.А., Уткин Г.М. Автогенераторы в радиотехнике. М.: Радио и связь. 1991.

⁹ Кузнецов А.П., Емельянова Ю.П., Сатаев И.Р., Тюрюкина Л.В. Синхронизация в задачах. Саратов: ООО Изд. центр «Наука». 2010.

¹⁰ Шалфеев В.Д., Матросов В.В. Нелинейная динамика систем фазовой синхронизации. – Нижний Новгород: Издательство Нижегородского государственного университета. 2013.

парциальных элементов ансамбля в общую нагрузку.

Исходя из проведенного обзора, сформулированы цели и задачи данной диссертационной работы.

Целью работы является разработка прикладных способов анализа процессов в небольших ансамблях спин-трансферных наноосцилляторов с различной геометрией связи и существенно неидентичными параметрами.

Основные задачи, решаемые в работе:

- Разработка инженерных математических моделей единичного СТНО и ансамблей с различной геометрией и типом связей;
- Исследование динамических режимов взаимной синхронизации ансамбля СТНО с небольшим количеством элементов с неидентичными параметрами;
- Анализ влияния задержки в распространении спиновых волн и неизохронности автоколебаний на полосу синхронизма;
- Поиск наилучшей геометрии связей между неидентичными СТНО, а также конструктивные методы борьбы с многомодовостью в ансамбле.

Методы исследования:

Для решения перечисленных задач в работе используются методы теории нелинейных колебаний, теории электрических цепей, имитационное моделирование и расчеты на ПЭВМ.

Положения, выносимые на защиту:

1. Базовые математические модели единичного и взаимодействующих СТНО в составе ансамблей с неидентичными параметрами и различной геометрией связи, их качественные и количественные характеристики;
2. Методика расчета основных характеристик ансамблей СТНО с учетом задержки в распространении спиновых волн и неизохронности для достижения оптимальных энергетических показателей;

3. Кольцевая структура ансамблей СТНО с введением дополнительных электрических связей, обеспечивающих устойчивость колебаний типа π ;
4. Результаты моделирования системы из двух связанных СТНО, сравненные с результатами экспериментальных данных.

Научная новизна работы :

В диссертации получены следующие новые научные и практические результаты:

1. Построены математические модели ансамблей локально связанных СТНО в виде систем укороченных уравнений для медленно-меняющихся амплитуд и фаз спиновых волн с учетом связи через общую нагрузку.
2. Доказано существование в единичном СТНО режима, оптимального по критерию максимума отдаваемой в нагрузку мощности, исследованы динамические и рабочие характеристики таких генераторов при изменении различных физических параметров СТНО.
3. Показано, что подбором неидентичности в размерах СТНО можно добиться снижения паразитного влияния задержки в распространении спиновых волн, уменьшающей полосу синхронизма системы.
4. При заданной неидентичности в размерах СТНО и расстоянии между контактами, можно подобрать такое соотношение между токами, пропускаемыми через образцы, при котором ширина зоны синхронизма будет максимальной.
5. Доказано, что для малых ансамблей неидентичных СТНО (3 и 4 элемента) кольцевая геометрия связей между элементами ансамбля имеет существенное преимущество по сравнению с цепочечной, состоящее в том, что замкнутость элементов в составе кольцевого ансамбля приводит к расширению динамического диапазона изменения параметров, в пределах которого существует синхронный режим.
6. Предложена структура кольцевого ансамбля СТНО с дополнительными электрическими связками через один элемент, в которой обеспечивается

расширение области существования устойчивой синхронной моды, аналогичной моде с колебаниями «типа π » в магнетроне, по сравнению с кольцевой структурой без связей.

7. Результаты сравнения экспериментальных данных с теоретическими, полученными с помощью построенных моделей, показали достаточно близкое соответствие результатов теории и эксперимента.

Практическая ценность работы и её реализация:

Результаты, полученные при выполнении настоящей диссертационной работы, могут быть использованы при разработке и изготовлении СТНО и их ансамблей, а также связанных неидентичных генераторов различной физической природы, например, актуальных на данный момент терагерцовых спин-инжекционных осцилляторов¹¹.

Результаты диссертационной работы вошли в материалы научно-исследовательской работы по грантам ФЦП: № 14.В.37.21.1211 “Наноэлектронные системы передачи, приема и обработки информации на основе устройств спинтроники и метаматериалов”, №14.132.21.1665 “Разработка микроволнового генератора на основе взаимодействующих спин-трансферных наноосцилляторов”, РФФИ (договор №13-08-01278-13), гранта Президента для молодых ученых и аспирантов (проект № СП-665.2012.3), НИР № 8.3991.2011, а также используются в учебном процессе РТФ НИУ «МЭИ» в учебных курсах «Теория колебаний» и при выполнении выпускных работ бакалавров, магистров и дипломников.

Апробация работы:

Материалы работы докладывались на международной конференции молодых ученых «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика», Саратов, 2011;

¹¹ Гуляев Ю.В., Зильберман П.Е., Михайлов Г.М. и др. Генерация терагерцовых волн током в магнитных переходах // Письма в ЖЭТФ. 2013. Т.98. Вып.11. С.837-847.

XII Всероссийской конференции «Физика и распространение микроволн» (ВОЛНЫ-2011), Москва, 2011; международном симпозиуме по магнетизму (МИСМ-2011), Москва, 2011; международных научно-технических конференциях студентов и аспирантов: «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» Москва, 2012, 2013; научно-техническом семинаре «Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов для связи и вещания», Ярославль, 2013; 20-ой Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика», Москва, 2013; международной конференции «Хаотические автоколебания и образование структур «ХАОС-2013», Саратов, 2013; Международной конференции по встраиваемым вычислениям, “Mediterranean conference of embedded computing – МЕСО-2012”, Черногория, 2012; 7^{ой} Международной конференции «Современные электромагнитные материалы в микроволновой технике и оптике», Франция, 2013; на семинаре в Институте электронных структур и лазеров в рамках научно-технической стажировки на о.Крит, Греция (2013 г.).

Публикации.

По теме диссертации опубликованы 23 печатные работы, из них 5 научных статей (3 статьи из списка, рекомендованного ВАК), 1 монография, 15 тезисов и 2 текста докладов в материалах международных конференций.

Объем и структура работы.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы из 153 наименований. Общий объём диссертации составляет 177 страниц, включая 42 иллюстрации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обосновывается актуальность выбранной темы, в общем виде формулируется цель работы, а также проблемы и задачи, которые необходимо решить для построения прикладной теории ансамблей СТНО.

В первой главе проводится обзор известных из литературы результатов по исследованию единичного СТНО и взаимосвязанных за счет различных механизмов связи ансамблей. Целью обзора являлось выявление таких конструкций СТНО и механизмов взаимодействия между ними, которые позволяют объединить их в малые ансамбли. Обсуждаются основные свойства и особенности таких объектов. Рассмотрены различные конструкции единичных СТНО (см. модельную схему на рис.1), их топология, физика работы, энергетические характеристики, математическая модель в виде уравнения Ландау-Лифшица-Гильберта (ЛЛГ) с введением дополнительного члена, характеризующего перенос крутильного момента электронов в решетку сенсора.

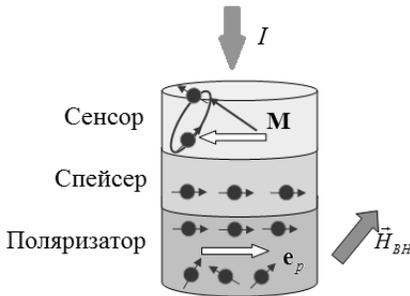


Рис.1. Модельная схема СТНО: $\vec{H}_{вн}$ - вектор напряженности внешнего магнитного поля, \mathbf{M} - вектор намагниченности сенсора, \mathbf{e}_p - единичный вектор, параллельный вектору намагниченности поляризатора, I – ток, пропускаемый через образец.

Математической моделью парциального СТНО является уравнение ЛЛГ вида

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = -\mu_0\gamma \left[\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{eff} \right] - \frac{\mu_0\gamma\alpha}{M_0} \left[\mathbf{M} \times \left[\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{eff} \right] \right] + \frac{\sigma I}{M_0} \left[\mathbf{M} \times \left[\mathbf{M} \times \mathbf{e}_p \right] \right], \quad (1)$$

где $\mathbf{M} = (M_x, M_y, M_z)$ - вектор намагниченности сенсора, \mathbf{H}_{eff} - вектор эффективного магнитного поля сенсора, $\mu_0, \gamma, \alpha, M_0, \sigma$ - физические параметры образца.

Модель (1) оперирует с неизмеряемой в инженерной практике величиной – намагниченностью \mathbf{M} , поэтому была поставлена задача о нахождении модели,

оперирующей измеряемыми величинами – напряжениями и токами. По итогам первой главы выявлены две конструкции СТНО (наноконтакт и наностолб), обеспечивающие возможности объединения в ансамбли, выявлена недостаточная проработанность в литературе анализа влияния нагрузки и различных физических параметров (изменения размеров, толщины слоев и т.д.) на работу одного генератора. Сформулированы основные трудности при построении ансамблей локально взаимосвязанных неидентичных СТНО, работающих на общую нагрузку. Поставлены задачи исследования.

Во второй главе на основе уравнения ЛЛГ (1) методом медленно меняющихся амплитуд получена упрощенная математическая модель единичного СТНО в форме укороченных уравнений для амплитуды $U(t)$ и фазы $\varphi(t)$ спиновой волны сенсора в следующем виде:

$$\begin{cases} \frac{dU}{dt} = \Gamma_G \cdot (\zeta + Q) \cdot U \cdot (a - U^2); \\ \frac{d\varphi}{dt} = N \cdot U^2, \end{cases} \quad (2)$$

где Γ_G – физический параметр, характеризующий Гильбертово затухание ферромагнетика сенсора, $\zeta = I/I_{KP}$ – фактор регенерации СТНО и I_{KP} – критический ток, при котором стартуют колебания, a – стационарная мощность, N – параметр неизохронности, Q – физическая константа.

На основе уравнений (2) исследованы динамические режимы, построены рабочие характеристики единичного СТНО. Показано существование оптимального (по критерию максимальной мощности в нагрузке) режима работы единичного генератора.

Проведено сравнение полученной из (2) зависимости частоты стационарных колебаний от пропускаемого через СТНО тока (рис.2) с экспериментом (*Rippard W.H., et al, Phys. Rev. Lett. 2004.*).

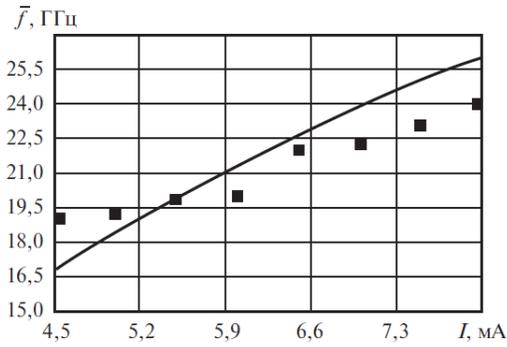


Рис.2. Теоретическая зависимость частоты стационарных колебаний СТНО (модель (2)), как функция тока, пропускаемого через контакт I , в сравнении с результатами эксперимента.

В третьей главе исследуется схема двух СТНО типа наноконтактов, связанных за счет спиновых волн (рис.3), с учетом влияния связи через общую нагрузку.

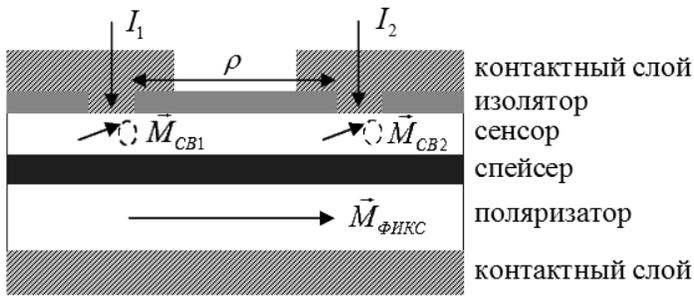


Рис.3. Схема взаимодействующих за счет спиновых волн двух СТНО типа наноконтактов, расположенных на расстоянии ρ друг от друга и запитываемых токами $I_{1,2}$, соответственно.

На основе применения метода медленно меняющихся амплитуд к связанным уравнениям ЛЛГ, записанным относительно намагниченностей $\mathbf{M}_{CB1,2}$ сенсоров, получена упрощенная модель в виде системы укороченных уравнений для амплитуд $U_{1,2}$ и разности фаз $\psi = \varphi_1 - \varphi_2$ спиновых волн следующего вида:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dU_1}{dt} = U_1 \Delta \Gamma_1(U_1) + \Omega_1 U_2 \cos(\psi + \Delta \beta); \\ \frac{dU_2}{dt} = U_2 \Delta \Gamma_2(U_2) + \Omega_2 U_1 \cos(\psi - \Delta \beta); \\ \frac{d\psi}{dt} = \Delta \omega(U_{1,2}) - \left(\Omega_1 \frac{U_2}{U_1} \sin(\psi + \Delta \beta) + \Omega_2 \frac{U_1}{U_2} \sin(\psi - \Delta \beta) \right), \end{array} \right. \quad (3)$$

где $\Delta \Gamma_{1,2}$ - регенеративные члены 1,2 СТНО, $\Omega_{1,2}$ - параметры связи, зависящие от расстояния ρ между наноконтактами, $\Delta \beta$ - средний фазовый сдвиг между колебаниями СТНО, $\Delta \omega(U_{1,2})$ - исходная разность частот синхронизируемых колебаний.

Найдены стационарные режимы модели (3) и проанализированы границы их устойчивости как в равноамплитудном режиме (при совпадающих параметрах), так и при существенной неидентичности при изменении ведущих параметров. Проанализирована динамика системы в 3D-фазовом пространстве (U_1, U_2, ψ) и выявлены особенности бифуркаций при подходе к границе зоны синхронизма (см. пример на рис.4). Исследовано негативное влияние задержки в распространении спиновых волн, а также неизохронности на режимы работы системы и предложены методы борьбы с ними путем подбора физических параметров (расстояния между контактами и величиной и направлением вектора подмагничивающего поля).

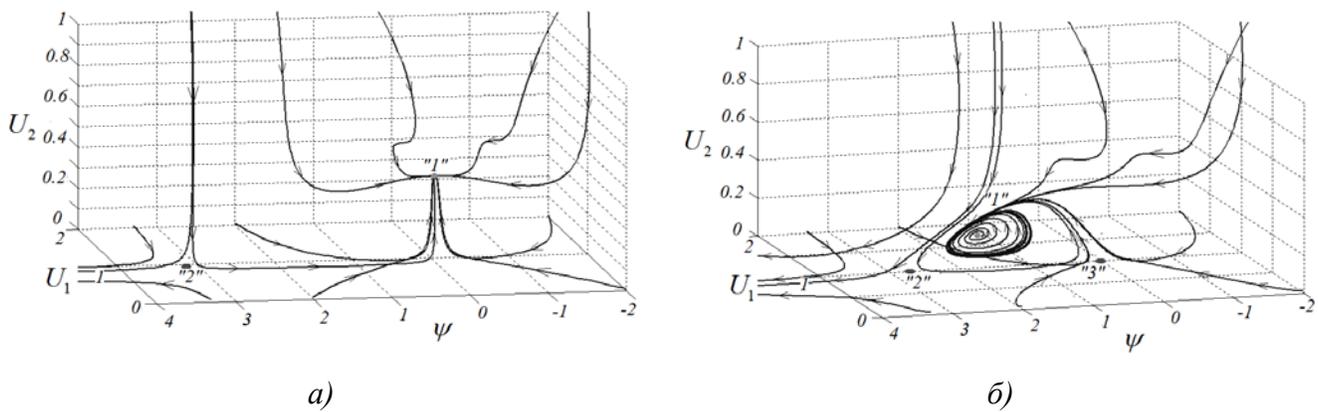


Рис.4. Фазовый портрет системы двух связанных СТНО в пространстве (U_1, U_2, ψ) в центре зоны синхронизма (а) и на ее границе (б)

Получены аналитические зависимости для определения границы зон синхронизма схемы с неидентичными параметрами и показано, какой уровень неидентичности в размерах контактов допустим для сохранения синхронизма при изменении основных параметров (см. пример на рис.5). Подробно рассмотрены вопросы сложения мощностей двух СТНО в общей нагрузке при изменении ведущих физических параметров, выявлены границы оптимального энергетического режима и обсуждено влияние отказа в работе одного из генераторов на работу схемы. В заключении проведено сравнение теоретических зависимостей с известными из литературы экспериментальными данными.

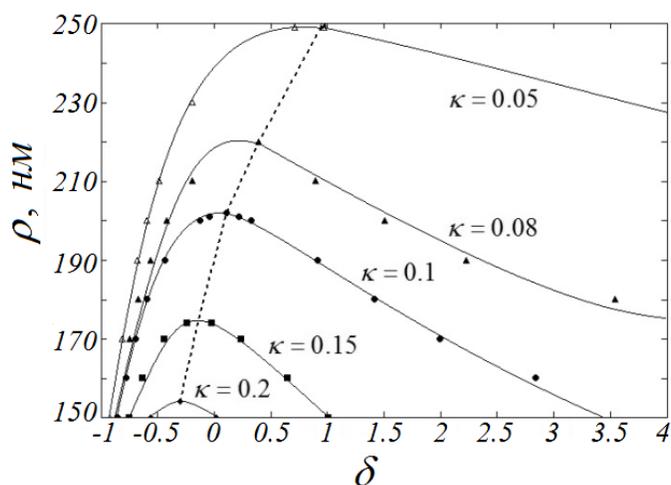


Рис.5. Границы областей синхронизации на плоскости параметров: ρ - расстояние между контактами, $\delta = (R_{c2} - R_{c1}) / R_{c1}$ - относительная разность радиусов контактов $\kappa = 1 - \zeta_2 / \zeta_1$, $\zeta_{1,2}$ - факторы регенерации СТНО.

В четвертой главе исследуется динамика работы малых ансамблей СТНО, анализируется две геометрии связей (линейная и кольцевая). Найдены частоты мод колебаний в таких системах и показано, что наилучшей по критерию максимума ширины зоны полной синхронизации является кольцевая геометрия (см. рис.6).

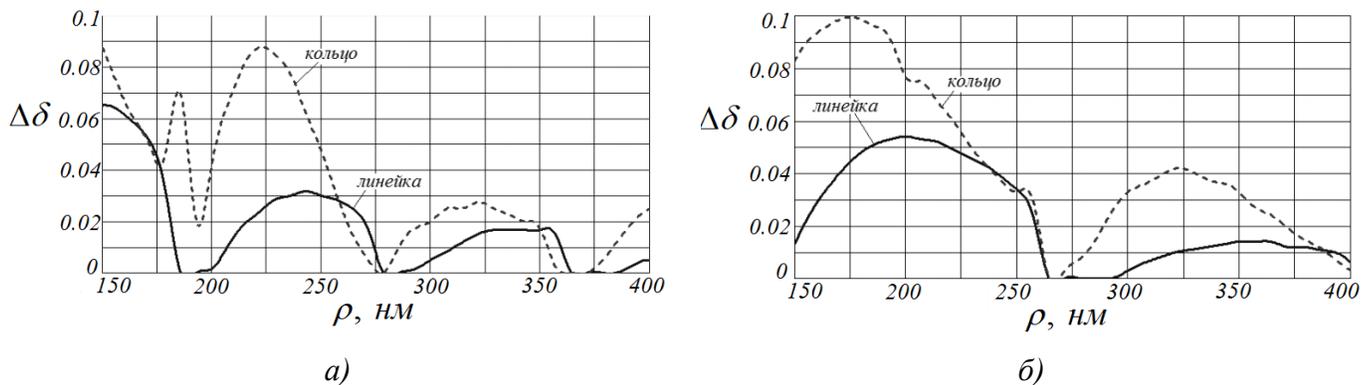


Рис.6. Зависимости ширины зоны синхронизма $\Delta\delta$ от расстояния ρ между СТНО для $R_c=50$ нм (а) и $R_c=80$ нм (б)

Исследована динамика малых ансамблей СТНО с существенно неидентичными параметрами (отличие радиусов контактов вдвое) и показано, что кольцевая геометрия является наилучшей и по критерию максимума зон частичной синхронизации в отличие от линейной схемы.

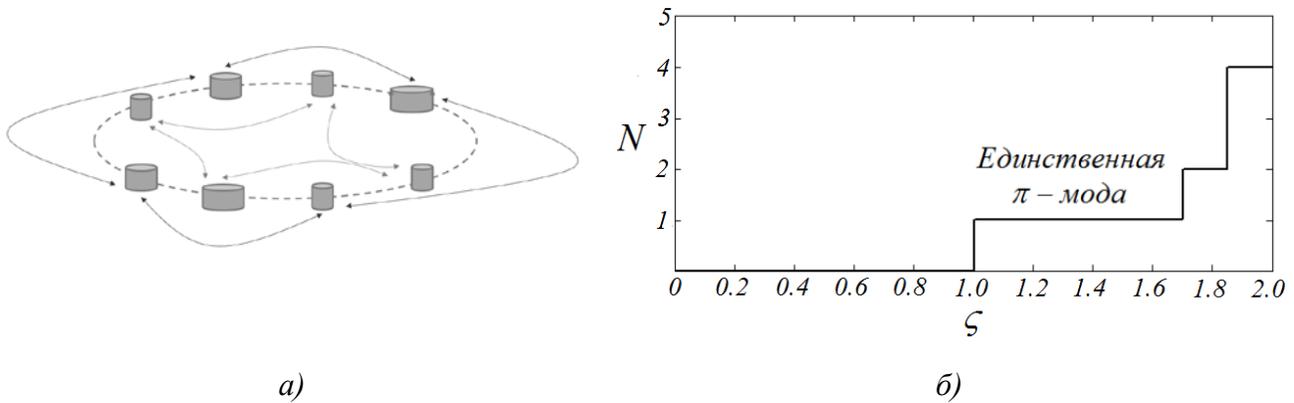


Рис.7. Геометрия кольцевой связи СТНО с введением дополнительных связей через один (а) и зависимость числа мод N в такой структуре от фактора регенерации ζ (б).

В конце главы 4 обсуждаются вопросы построения больших ансамблей СТНО. В качестве альтернативы 2D-решеточной схемы, предлагаемой в большинстве литературы по СТНО, как наилучшей схемы объединения в большие ансамбли, предлагается схема кольцевого генератора (рис.7а) с введением дополнительных короткозамыкающих электрических связей через один, позволяющих выделить только одну устойчивую синхронную моду (типа π). Рассчитаны зависимости (см. пример на рис.7б) числа мод колебаний в схеме 8 связанных СТНО от фактора регенерации. Установлено существование моды «типа π » в широких пределах при изменении фактора регенерации системы.

В Заключение сформулированы основные итоги работы, которые заключаются в следующем:

- проведен обзор предшествующих исследований в области объединения СТНО в ансамбли и выявлены две основные конструкции таких генераторов, позволяющие объединять их в ансамбли с локальным типом взаимодействия;
- впервые путём применения метода медленно меняющихся амплитуд к уравнению Ландау-Лифшица-Гильберта, дающему полное и строгое описание работы СТНО, получены инженерные математические модели единичного и малых ансамблей СТНО, использование которых позволяет проводить анализ их режимов;

- получены расчетные соотношения для полосы синхронизма системы связанных СТНО, позволяющие дать рекомендации по выбору расстояния между контактами, при котором возможна устойчивая синхронная работа;
- проведена количественная оценка влияния различных физических параметров (неидентичности, неизохронности) на динамику системы связанных СТНО;
- показано, что кольцевая геометрия связи между элементами малых ансамблей СТНО является более предпочтительной, чем линейная;
- для борьбы с многомодовостью предложена кольцевая система СТНО с введением дополнительных короткозамыкающих связей через один элемент, обеспечивающих существование единственной моды типа π в широких пределах перестроек параметров.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Опубликованные статьи из перечня журналов, рекомендованных ВАК РФ:

1. **А.Р. Сафин, Н.Н. Удалов, М.В. Капранов. Сложение мощностей взаимодействующих спин-трансферных наноосцилляторов // Вестник МЭИ. 2012. №2. С. 136-142.**
2. **А.Р. Сафин, Н.Н. Удалов, М.В. Капранов. Синхронизация связанных спин-трансферных наноосцилляторов с учетом запаздывания // Вестник МЭИ. 2013. №5. С. 123-128.**
3. **А.Р. Сафин, М.В. Капранов, Н.Н. Удалов. Особенности взаимной синхронизации неидентичных спин-трансферных наноосцилляторов // Радиотехника. 2013. №10. С. 43-47.**

Опубликованные статьи в рецензируемых журналах:

4. **А.Р. Сафин, Н.Н. Удалов, М.В. Капранов. Особенности синхронизации двух спин-трансферных наноосцилляторов // Радиотехнические тетради. №50. 2013. С. 69-72.**

5. Н.Н. Удалов, А.А. Митрофанов, А.Р. Сафин. Динамические процессы бесфильтровой системы ФАПЧ спин-трансферного наноосциллятора // Радиотехнические тетради. 2013. №50. С. 73-74.

Монография:

6. А.Р. Сафин. Элементы теории систем фазовой синхронизации с выборками. Исследование для задач синтеза частот. Глава 4 - Синхронизация вихревых спин-трансферных наноосцилляторов. LAP Lambert academic publishing. Germany. ISBN: 978-3-8473-2637-3, 2012.

Тезисы и тексты докладов в материалах конференций:

7. A.R. Safin, N.N. Udalov, M.V. Kapranov. The calculation of power increasing of coupled spin torque generators // Book of abstracts “Mediterranean conference of embedded computing”. 2012. P. 258-261.
8. A.R. Safin, A.A. Mitrofanov. Physical parameters computation of synchronized spin transfer nano-generators using phase locked loop // Book of abstracts “Mediterranean conference of embedded computing”. 2012. P. 254-257.
9. A.R. Safin, F.B. Kovalev, A.A. Basharin. Calculation characteristics of nano-oscillators loaded by metamaterials // Book of abstracts “Mediterranean conference of embedded computing”. 2012. P. 258-261.
10. A.R. Safin, N.N. Udalov. Mode Analysis of a Large Number of Mutually Coupled Ferromagnetic Metamaterial Based on Spin Torque Oscillators // 7th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics – Metamaterials 2013 Bordeaux, France, 16-21 September 2013, abstract.
11. K. Petrov, A.R. Safin. Terahertz nanoantenna based on spin torque oscillator and polaritonic metamaterials. 7th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics – Metamaterials 2013 Bordeaux, France, 16-21 September 2013, abstract.
12. A.R. Safin, A.A. Basharin, K.A. Petrov. Terahertz nanoantenna based on spin torque nanooscillators and polaritonic metamaterials // Тезисы Международной конференции Хаотические автоколебания и образование структур, «ХАОС-2013». Саратов. С. 89.

13. А.Р. Сафин, Н.Н. Удалов, М.В. Капранов. Особенности взаимной синхронизации неидентичных вихревых спин-трансферных наноосцилляторов // Тезисы Международной конференции Хаотические автоколебания и образование структур, «ХАОС-2013». Саратов. С. 123.
14. А.А. Митрофанов, А.Р. Сафин, Н.Н. Удалов. Динамические процессы бесфильтровой системы фазовой синхронизации спин-трансферного наноосциллятора // Тезисы Международной конференции Хаотические автоколебания и образование структур, «ХАОС-2013». Саратов. С. 120.
15. А.А. Митрофанов, А.Р. Сафин, Н.Н. Удалов. Особенности фазовой синхронизации спиновых наногенераторов // 20-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов, Микроэлектроника и информатика, 2013, М.: МИЭТ. С. 143.
16. А.А. Митрофанов, А.Р. Сафин, Н.Н. Удалов. Уменьшение ширины спектральной линии спин-трансферного наноосциллятора при использовании схемы ФАПЧ // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Девятнадцатая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: Тез. докл. В 4-х т. - М.: Издательство МЭИ. 2013. Т.1. С. 38.
17. А.А. Романов, А.Р. Сафин, Н.Н. Удалов. Расчет технических характеристик спин-трансферных наноосцилляторов // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Девятнадцатая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: Тез. докл. В 4-х т. - М.: Издательство МЭИ, 2013. Т.1. С. 41.
18. А.Р. Сафин, Н.Н. Удалов, М.В. Капранов. Особенности синхронизации спин-трансферных наноосцилляторов // Материалы Международного научно-технического семинара «Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов в инфокоммуникациях», 30 июня-3 июля 2013 г., Ярославль. Под ред. д.т.н., проф. А.В. Пестрякова. –М.: ООО «Брис-М» оперативная полиграфия и дизайн студия. С. 51-53.
19. А.А. Митрофанов, А.Р. Сафин, Н.Н. Удалов. Нелинейная динамика бесфильтровой системы ФАПЧ спин-трансферного наноосциллятора // Материалы Международного научно-технического семинара «Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов в

- инфокоммуникациях», 30 июня-3 июля 2013 г., Ярославль. Под ред. д.т.н., проф. А.В. Пестрякова. –М.: ООО «Брис-М» оперативная полиграфия и дизайн студия. С. 48-50.
20. К.А.Звездин, А.Р. Сафин, А.В.Крашенинников и др. Синхронизация вихревых наноосцилляторов // Тез. Докл. XII Всероссийской конференции «Физика и распространение микроволн» (ВОЛНЫ-2011). Москва. МГУ. 2011. С. 19-23.
21. K. Zvezdin, A. Safin, A. Krasheninnikov, et al. Magnetostatic mechanism of phase-locking of spin-transfer nano-oscillators // Book of Abstracts, Moscow International Symposium on Magnetism (MISM), 21-25 August 2011. Moscow. pp. 705-706.
22. К.А. Звездин, А.Р. Сафин. Математическая модель взаимодействующих спин-трансферных наноосцилляторов // Тезисы докладов 2 конференции молодых ученых «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика», Саратов, 13-15 сентября, 2011. С. 21-22.
23. А.Р. Сафин, Н.Н. Удалов, М.В. Капранов. Взаимная синхронизация двух вихревых спин-трансферных наноосцилляторов // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Восемнадцатая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: Тез. докл. В 4-х т. – М.: Издательство МЭИ, 2012. Т.1. С. 40.