

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор
Московского государственного
университета
имени М.В. Ломоносова



профессор А.А. Федянин

« 15 » мая 2019 г.

ОТЗЫВ

Ведущей организации на диссертационную работу ИВАНОВА Алексея Павловича «МОДЕЛЬ СВЯЗАННЫХ ОСЦИЛЛЯТОРОВ КАК ИНСТРУМЕНТ АНАЛИЗА НЕЛИНЕЙНЫХ КОЛЕБАНИЙ В МАГНИТОУПРУГОЙ СИСТЕМЕ», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиоп физика.

Диссертационная работа Иванова А.П. посвящена исследованию нелинейных колебаний в магнитоупругих системах на основе модели связанных осцилляторов. Тема работа актуальна по целому ряду причин, имеющих как научное, так и прикладное значение. Исследование нелинейных колебаний является востребованной задачей нелинейной динамики множества систем. В частности, решение задачи нелинейных колебаний требуется для описания процессов возбуждения гиперзвука в устройствах обработки информации на поверхностных акустических волнах при использовании ферритовых магнитострикционных преобразователей, работающих в условиях ферромагнитного резонанса. Тем не менее, свойства системы связанных осцилляторов, представляющих магнитную и упругую подсистемы, ещё не достаточно исследованы. Расчет свойств таких систем требует решения сложных систем дифференциальных уравнений с наложенными связями и в большинстве случаев может быть реализован только в рамках определенных упрощений и ограничений порядка нелинейности. Более высокие же порядки нелинейности могут привести к нереализуемым ранее режимам колебаний связанных магнитной и упругой систем.

Диссертация представлена на 211 страницах и состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы, содержащего 74 наименования. Работа включает 60 рисунков и 4 таблицы.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы основные цели и задачи работы, кратко изложены научная новизна и содержание работы. Изложены положения, выносимые на защиту, приводятся сведения об апробации полученных результатов.

В **первой главе** дан обзор литературы. Рассматривается общая теория нелинейных колебаний в простейших системах, а также теория нелинейного ферромагнитного резонанса и нелинейных динамических явлений в связанных

колебательных системах. Приводятся современные результаты исследований прецессионного движения магнитного момента в условиях ферромагнитного резонанса. Отмечается, что решение уравнения движения намагниченности в случае больших углов прецессии магнитного момента может быть найдено только при наложении ограничений.

Во *второй главе* вводится упрощенная модель двух связанных осцилляторов, обладающая свойствами нелинейной системы. Для интерпретации этой пороговой смены режимов колебаний и определения роли параметров затухания и нелинейности осцилляторов и их связи используется обобщенный потенциал. Определены основные режимы колебаний в зависимости от соотношения параметров осцилляторов, приводятся частотные характеристики колебаний асинхронного режима.

В *третьей главе* описывается применение модели связанных осцилляторов в задаче возбуждения гиперзвуковых колебаний магнитострикционным преобразователем СВЧ на частоте ферромагнитного резонанса. Приводится описание геометрии задачи и ее постановка в виде уравнений движения вектора намагниченности и упругого смещения с граничными условиями. Отмечается сложность полученной системы семи дифференциальных уравнений с граничными условиями, обоснована необходимость введения упрощений. Рассмотрена линеаризованная система уравнений, позволяющая свести эту задачу к решению двух дифференциальных уравнений второго порядка без граничных условий. На основе параметров реальных образцов монокристаллов ЖИГ проведено упрощение коэффициентов системы уравнений. Рассмотрены частные случаи, допускающие аналитическое решение упрощенной системы. Показано, что в зависимости от величины параметров связи осцилляторов возможны два режима вынужденных колебаний, разделенные точкой бифуркации. Результаты исследования упрощенной системы сопоставлены с реальным случаем возбуждения колебаний в пластине из ЖИГ.

В *четвертой главе* рассматриваются уравнения движения вектора намагниченности и упругого смещения в квадратичном приближении по намагниченности. Для системы на основе параметров и геометрии задачи приведены эквивалентные параметры. Определена полная система уравнений для квадратичного приближения, соответствующая модельной системе двух связанных осцилляторов, нелинейность в которых описывается слагаемыми третьего порядка. Выполнен анализ точности приближения по сравнению с решением исходной нелинейной системы.

В *пятой главе* рассмотрена роль смешанной нелинейности, первого и второго осцилляторов, описываемой членами четвертого порядка, по намагниченности, упругому смещению и их производных. Исследовано явление нестационарного запаздывания в системах осцилляторов с кратными частотами. Предложена модель механизма задержки колебаний на основе динамического потенциала, определены его особенности. Выявлены основные особенности запаздывания. Исследованы различные режимы колебаний при вариации параметра нелинейной связи.

Выполнена классификация наблюдаемых режимов по величине амплитуды возбуждаемых колебаний.

В *заключении* сформулированы основные выводы по диссертации.

Новизну работы определяют несколько факторов. Во-первых, предложена модель системы связанных сильной нелинейной связью осцилляторов, упрощающая решение задачи колебаний в связанных нелинейных системах, а также возможность ее решения с помощью модели динамического потенциала. Достигнуто упрощение полной системы из семи уравнений первого порядка с граничными условиями до системы из двух уравнений второго порядка без граничных условий. Во-вторых, рассматриваемые системы уравнений включают в себя члены более высокого порядка по намагниченности и упругому смещению, чем используемые на данный момент приближения. В-третьих, получена классификация режимов колебаний и определены условия их смены зависимости от нелинейности системы и величины связи. Определены критерии возникновения нестационарного запаздывания колебаний.

В отзыве невозможно подробно обсудить все многочисленные новые и полезные результаты, полученные в работе, поэтому остановимся только на некоторых из них, представляющих, на наш взгляд, наиболее наибольший интерес:

1. Предложена модель системы из двух связанных осцилляторов, описываемая двумя нелинейными дифференциальными уравнениями второго порядка. Показано, что свойства системы могут быть описаны с помощью динамического потенциала. Найдены основные режимы колебаний, определяемых степенью возбуждения и соотношением параметров осцилляторов.

2. Для характеристики магнитоупругих колебаний получена упрощенная система уравнений. Найдено аналитическое решение системы в режиме постоянной амплитуды и приведены критерии смены режимов. Получены оценки точности приближения на основе численного расчета полной системы уравнений магнитоупругости для монокристалла ЖИГ.

3. Получена классификация режимов колебаний, соответствующих разным уровням линейной и нелинейной связи осцилляторов. Взаимодействие осцилляторов интерпретировано на основе модели динамического потенциала и механизма положительной обратной связи.

4. Показана возможность кратного умножения частоты вынужденных колебаний. Выявлено, что возбуждение колебаний второго осциллятора происходит с нестационарным запаздыванием во времени при условии значительного различия времен релаксации осцилляторов.

При рассмотрении материалов диссертации возник ряд замечаний:

1. При описании предложенной модели двух осцилляторов недостаточно внимания уделено анализу соответствия параметров этой модели параметрам уравнения Ландау-Лифшица и микроскопическим параметрам.

2. В работе практически отсутствует сравнение развитой теории с конкретным экспериментом. Было бы полезным привести и рекомендации экспериментаторам для обнаружения предсказанных закономерностей

3. При анализе результатов следовало бы более подробно давать физическую интерпретацию. В частности, это относится к обнаруженному новому эффекту запаздывания возбуждения гиперзвука

4. Выносимые на защиту положения сформулированы в виде основных результатов.

5. В работе содержится небольшое количество опечаток, пунктуационных и стилистических ошибок (например, «двухпериодический» на стр. 72, «оба его ветви» на стр. 137, «приеденных» на стр. 184).

Сделанные выше замечания не изменяют общего положительного впечатления о работе А.П. Иванова и ни в коей мере не влияют на ее выводы. Используя современные симуляционные методы в сочетании с детальным анализом получаемых результатов, диссертант получил значимые результаты в области радиофизики.

Достоверность результатов работы обеспечена использованием широко известных и часто применяемых в подобных задачах методов численного решения задачи Коши (метод Рунге-Кутты 4 порядка) и моделирования, а также сопоставлением результатов с известными данными из работ других авторов.

Результаты диссертационной работы А.П. Иванова опубликованы в журналах высокого международного уровня и многократно представлялись на международных и всероссийских конференциях. По материалам диссертации опубликовано 30 работ, из которых: 11 публикаций в ведущих рецензируемых научных журналах, определенных ВАК при Минобрнауки России и индексируемых в РИНЦ, в том числе 3 публикации в журналах, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования Scopus и Web of Science, и 19 тезисов докладов на российских и международных конференциях и научных семинарах. Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации.

Практическая значимость работы заключена в возможности использования результатов решения значительно упрощенной системы уравнений колебаний магнитной и упругой систем в построении устройств обработки информации на поверхностных акустических волнах, а именно в конструировании магнитострикционных преобразователей, а также в различных нелинейных генераторах и преобразователях частоты.

Результаты и выводы, полученные в диссертации, могут быть рекомендованы к использованию в Московском государственном университете, Уральском, Сибирском и Северо-Кавказском федеральных университетах, Институте физики микроструктур РАН, Институте механики сплошных сред УрО РАН, Институте физики им. Киренского СО РАН.

Оценивая диссертацию в целом, можно утверждать, что она представляет собой законченную научно-квалификационную работу, результаты которой вносят важный вклад в понимание процессов нелинейных колебаний в связанных системах с магнитоупругим взаимодействием.

Выполненная А.П. Ивановым диссертационная работа по своему научному уровню, значению и достоверности новых результатов полностью соответствует требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 01.04.03 – Радиофизика, а ее автор, А.П. Иванов, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Отзыв рассмотрен и утвержден на заседании научного семинара Кафедры магнетизма физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова 13 мая 2019 г. (протокол № 10, присутствовало 18 человек, за - 18).

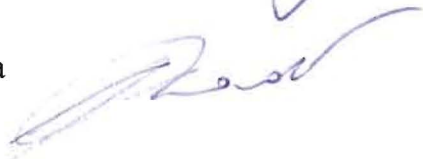
119991 Москва ГСП-1 Ленинские горы МГУ
д.1 стр.2, физический факультет, кафедра магнетизма
тел.495-939-1847, E-mail:kaf-magn@physics.msu.ru

Зав.кафедрой магнетизма
д.ф.-м.н. профессор



Перов
Николай Сергеевич

Профессор
кафедры магнетизма
д. ф.-м. н.



Грановский
Александр Борисович



Сведения о ведущей организации по диссертации ИВАНОВА Алексея Павловича «МОДЕЛЬ СВЯЗАННЫХ ОСЦИЛЛЯТОРОВ КАК ИНСТРУМЕНТ АНАЛИЗА НЕЛИНЕЙНЫХ КОЛЕБАНИЙ В МАГНИТОУПРУГОЙ СИСТЕМЕ», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиопизика.

Организация:

Полное название: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»

Сокращённое название: Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»

Контактные данные:

Юридический адрес: 119991, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д. 1, Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова

Телефон: (495) 939-10-00 Факс: (495) 939-01-26

Адрес официального сайта в сети Интернет: <http://www.msu.ru>

Адрес электронной почты: info@rector.msu.ru

Ректор: академик Виктор Антонович Садовничий

Список научных трудов работников организации по специальности диссертации за 2015-2019 годы:

1. Andrianov T., Vedyayev A., Dieny B. Magnetic modulation of inverse spin hall effect in lateral spin-valves // Journal of Physics D. — 2018. — Vol. 51, no. 20. — P. 205003.
2. A. Vedyayev, N. Ryzhanova, N. Strelkov, T. Andrianov, A. Lobachev, and B. Dieny, "Nonlocal signal and noise in t-shaped lateral spin-valve structures," Physical Review Applied, vol. 10, no. 6, p. 064047, 2018.
3. Matsko A. B., Vyatchanin S. P. Electromagnetic-continuum-induced nonlinearity // Physical Review A - Atomic, Molecular, and Optical Physics. — 2018. — Vol. 97. — P. 053824–1–053824–7.
4. A. O. Shiryayev, S. Y. Bobrovskii, A. B. Granovsky, A. V. Osipov, A. S. Naboko, E. Lahderanta, A. N. Lagarkov, K. N. Rozanov, and P. A. Zezyulina, "Coaxial measurements of microwave permeability of thin supermalloy films under magnetic bias 10.1016/j.jmmm.2019.01.055," Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 477, pp. 329–333, 2019.
5. O. S. Tarasova, Y. E. Kalinin, A. V. Sitnikov, Y. G. Pasternak, A. B. Granovskiy, A. D. Mishin, K. N. Rozanov, and V. I. Chuguyevskiy, "Creation of broadband radio-absorbing structures based on frequency-selective gratings with distributed losses" AIP Conference Proceedings, vol. 2015, p. 0201101, 2018.
6. Demchenko Y. A., Bilenko I. A., Gorodetsky M. L. Optimisation of prism coupling with optical whispering-gallery type microresonators // Quantum Electronics. — 2017. — Vol. 47, no. 8. — P. 743–747.

7. A. O. Shiryaev, K. N. Rozanov, S. A. Vyzulin, A. L. Kevraletin, N. E. Syriev, E. S. Vyzulin, E. Lahderanta, S. A. Maklakov, and A. B. Granovsky, "Magnetic resonances and microwave permeability in thin fe films on flexible polymer substrates," Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 461, pp. 76–81, 2018.
8. A. M. Pikalov, A. V. Dorofeenko, A. B. Granovsky, and Y. E. Lozovik, "Plasmons in chains of spherical nanoparticles with the account of all pairwise interactions," Journal of Communications Technology and Electronics, vol. 63, no. 3, pp. 189–197, 2018.
9. M. Chshiev, A. Manchon, A. Kalitsov, N. Ryzhanova, A. Vedyayev, N. Strelkov, W. H. Butler, and B. Dieny, "Analytical description of ballistic spin currents and torques in magnetic tunnel junctions," Physical Review B, vol. 92, no. 10, p. 104422, 2015.
10. О. С. Тарасова, А. В. Ситников, Ю. Е. Калинин, Ю. Г. Пастернак, А. Д. Мишин, К. Н. Розанов, А. Б. Грановский, and В. И. Чугуевский, "Высокочастотные магнитные свойства стеклотекстолита с нанокпозиционным функциональным тонкопленочным покрытием (co40fe40b20)60(sio2)40," Материаловедение, vol. 10, pp. 18–22, 2018.
11. А.М. Пикалов, А. В. Дорофеев, А. Б. Грановский, and Ю. Е. Лозовик, "ПЛАЗМОНЫ В ЦЕПОЧКАХ СФЕРИЧЕСКИХ НАНОЧАСТИЦ С УЧЕТОМ ВСЕХ ПАРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ," Радиотехника и электроника, vol. 63, no. 3, pp. 211–219, 2018.
12. K. Naoki, G. Taichi, S. Koji, A. B. Granovsky, C. A. Ross, T. Hiroyuki, N. Yuichi, U. Hironaga, and I. Mitsuteru, "The role of snell's law for a magnonic majority gate," Scientific reports, vol. 7, p. 7898, 2017.

Проректор
Московского
государственного
университета имени
М.В.Ломоносова
профессор



А.А. Федянин

Зав.кафедрой магнетизма
д.ф.-м.н. профессор



Н.С.Перов