

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

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 – Радиофизика

### **Актуальность темы исследования**

Исследования в области радиофизики традиционно являются основой для создания устройств с улучшенными или необычными физическими свойствами. Перспективным направлением, в этом отношении, является исследование нелинейных колебаний, как наиболее характерного процесса нелинейной динамики. Задача возбуждения гиперзвука, использующая классическую теорию нелинейного ферромагнитного резонанса, является хорошим примером таких исследований, как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения. Как известно, теоретически ее решение сводится к решению громоздкой системы нелинейных дифференциальных уравнений движения для компонент вектора намагниченности и упругого смещения. Как правило, решение можно получить только численно и для малых амплитуд возбуждающего поля. Поэтому вопрос создания приближенных моделей, обладающих основными свойствами рассматриваемых систем и дающих достаточно простые и в то же время наглядные решения, является актуальным. В задачах подобного рода для описания свойств системы обычно для простоты используют только слагаемые потенциала, отвечающие за квадратичную и кубическую нелинейность, оставляя вне рассмотрения нелинейность высших порядков. В то же время слагаемые потенциала со степенью выше третьей, способны существенным образом видоизменить характер колебаний, что позволит получить ранее неисследованные режимы. В этой связи, диссертационная работа А. П. Иванова, посвященная вопросам исследования нестационарных режимов нелинейных колебаний, в том числе колебаний намагниченности и упругого смещения в задаче возбуждения гиперзвука ферритовым магнитострикционным преобразователем в условиях ферромагнитного резонанса, является актуальной как с фундаментальной, так и прикладной точек зрения.

### **Структура и содержание диссертации**

Диссертация объемом 211 страниц состоит из введения и пяти глав, заключения, списка опубликованных автором работ по теме диссертации и списка цитированной литературы, содержащего 74 источника. Каждая глава описывает ряд интересных исследований, объединенных общей тематикой. Диссертация снабжена большим количеством графиков, рисунков, схем и таблиц.

Во введении раскрывается актуальность диссертационной работы, сформулированы ее цель и задачи, показаны научная новизна и практическая значимость работы, приведены положения, выносимые на защиту. В первой главе рассмотрены простейшие колебательные системы, приведен обзор важных понятий общей теории нелинейных колебаний, на которые опирается данное исследование. Во второй главе исследуется предложенная диссертантом приближенная модель динамики двух связанных осцилляторов, обладающая всеми характерными свойствами нелинейной системы и допускающая автоколебания.

Третья глава посвящена описанию применения модели связанных осцилляторов для решения задачи возбуждения гиперзвуковых колебаний магнестрикционным преобразователем СВЧ на частоте ферромагнитного резонанса. В четвертой главе, применительно к задаче возбуждения гиперзвуковых колебаний, рассмотрены уравнения движения вектора намагниченности и упругого смещения, в которых использовано квадратичное по намагниченности приближение. Пятая глава посвящена исследованию нелинейных вынужденных колебаний намагниченности и упругого смещения в нормально намагниченной ферритовой пластине при различных уровнях линейной и нелинейной связи. В заключении приведены основные результаты работы.

### **Основные результаты и их научная новизна**

Научная новизна полученных результатов не вызывает сомнения, так как большинство результатов получены автором впервые и опубликованы в авторитетных научных изданиях. Можно выделить следующие наиболее важные результаты, полученные диссертантом:

1. Предложена математическая модель двух связанных осцилляторов, один из которых обладает гиромангнитными свойствами. Динамика осцилляторов описывается двумя нелинейными дифференциальными уравнениями второго порядка. Показано, что динамические свойства такой системы могут быть описаны с помощью динамического потенциала, состоящего из суммы степенных функций от обобщенных координат вплоть до четвертого порядка.

2. На основании предложенной модели двух связанных осцилляторов найдены семь основных режимов колебаний, определяемых степенью возбуждения и соотношением параметров осцилляторов.

3. В рамках этой же модели рассмотрены магнитоупругие колебания в нормально намагниченной ферритовой пластине, возбуждаемые переменным магнитным полем. Предложена процедура преобразования исходной системы, позволяющая семь уравнений первого порядка и четыре граничных условия свести к системе из четырех уравнений первого порядка без граничных условий.

4. Для описания характеристик магнитоупругих колебаний получена укороченная система уравнений, связанных через слагаемые, содержащие производные по координатам. Для этой системы в режиме постоянной амплитуды приведены аналитические критерии смены режимов колебаний.

5. Выполнена классификация режимов колебаний, соответствующих разным уровням линейной и нелинейной связи осцилляторов. Для интерпретации наблюдаемых явлений введен динамический потенциал, отражающий воздействие осцилляторов друг на друга, результатом которого являются наблюдаемые режимы.

6. На основе предложенной модели связанных осцилляторов показана возможность кратного умножения частоты вынужденных колебаний. Установлено, что в этих условиях возбуждение колебаний второго осциллятора происходит с нестационарным запаздыванием во времени. Найдено, что важнейшим условием реализации эффекта запаздывания является значительное различие времен релаксации осцилляторов.

### **Достоверность полученных результатов**

Достоверность представленных в диссертационной работе теоретических результатов основана на использовании известных и проверенных современных методов исследования, на сравнении аналитических и расчетных данных. А. П. Ивановым изучены и проанализированы основные подходы к решению задачи возбуждения гиперзвука магнотриксционным преобразователем, а также известные методы решения систем нелинейных дифференциальных уравнений. Сделанные в диссертационной работе выводы и заключения достаточно физически обоснованы, сопоставлены с литературными данными. Полученные диссертантом результаты прошли широкую апробацию на профильных международных и российских конференциях, опубликованы в рецензируемых журналах и признаны научным сообществом.

### **Теоретическая и практическая значимость результатов работы**

Представленная диссертация содержит анализ сложной физической проблемы, новые, важные для радиофизики и теории колебаний выводы и результаты, полученные из решения системы нелинейных дифференциальных уравнений для связанных осцилляторов, построенной на модели потенциала, содержащего члены до четвертого порядка. Свойства такой системы позволяют интерпретировать характер вынужденных нелинейных колебаний намагниченности и упругого смещения в нормально намагниченной ферритовой пластине. Практическое применение результаты работы могут найти при построении магнотриксционных преобразователей с заданными свойствами для генерации гиперзвука, моделировании устройств аналоговой обработки сигналов, а также в разного рода нелинейных генераторах и преобразователях частоты. Значимость научных результатов диссертанта косвенно подтверждается финансовой поддержкой исследований в виде научных грантов.

### **Замечания по диссертационной работе**

Однако при ознакомлении с диссертацией, возникли некоторые вопросы и замечания, на которые хотелось бы получить пояснения:

1. В главе 2 на стр. 48 при введении обобщенного потенциала утверждается, что он должен содержать слагаемые вида  $x_1^m x_2^n$ , где  $m$  и  $n$  – целые числа от 0 до 9, однако аргументация такого утверждения в тексте диссертации отсутствует.
2. В параграфе 3.5 третьей главы диссертационной работы, посвященной линейному возбуждению гиперзвуковых колебаний, для частного случая свободных колебаний декларируется, что ищется аналитическое решение рассматриваемой системы, в то время как более корректно было бы сказать о получении аналитического критерия смены режимов колебаний и его графическом представлении.
3. На стр. 158 при рассмотрении режимов нестационарного запаздывания говорится, что режим перемежающихся скачков при увеличении амплитуды возбуждающего поля сменяется режимом плавного насыщения. Но это несколько не стыкуется с введенной классификацией режимов колебаний, т. к. режим плавного насыщения по уровню линейной связи находится ниже режима перемежающихся скачков.
4. В оригинальных главах диссертационной работы рассматривается случай изотропного ЖИГ, хотя известно, что, как правило, эти материалы обладают одноосной и кубической магнитной анизотропией. В тексте диссертации обоснование такого подхода есть только в главе 4 (стр. 98) «...примем следующие упрощающие предположения: анизотропия отсут-

ствуем». Хотелось бы получить разъяснение - почему можно в данном случае пренебречь магнитной анизотропией магнетика.

5. Наконец, мелкие замечания по тексту и оформлению диссертации. Работа не лишена некоторого количества опечаток, орфографических ошибок и неточностей в изложении. Встречаются неудачные выражения и обозначения. Например, стр. 103 «Для удобства будем называть ... систему (4.36), (4.40) – «квадрированной». Хотя чуть выше приведено понятное описание для этой «квадрированной» системы уравнения «Уравнения (4.36) и (4.40) составляют искомую систему уравнений для намагниченности и редуцированного упругого смещения в квадратичном приближении». На стр. 55 при обсуждении рисунка 2.1 вместо отсылки к рисункам 2в и 2г происходит отсылка к рисункам 5в и 5г, которые в работе не представлены. Кроме того, орфографические ошибки и опечатки присутствуют, например, на стр. 6 «один из которых в общем случае является нелинейнымми», на стр. 98 «...-плотность материалл пластины».

Указанные выше замечания не снижают общей ценности диссертационного исследования и не влияют на его главные результаты.

### **Рекомендации по использованию работы**

Результаты диссертационной работы представляют интерес для исследователей, специализирующихся в области нелинейной радиофизики и изучающих системы, связанные сильной нелинейной связью, и вопросы их практического применения. В работе есть рекомендации по выбору режимов работы ферритовых магнестрикционных преобразователей, работающих в условиях ферромагнитного резонанса. Можно рекомендовать результаты диссертационной работы для использования в организациях, занимающихся такими исследованиями. В частности, в их числе могут быть следующие научные организации: ИФМ имени М.Н. Михеева УрО РАН, ИФ им. Л.В. Киренского СО РАН - обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, ИОФ РАН, ФТИ имени А.Ф. Иоффе, ИФМК УФИЦ РАН; образовательные: МГУ, МФТИ (НИУ), УрФУ, СыктГУ, ЧелГУ и другие.

### **Общая характеристика диссертационной работы**

Характеризуя диссертационную работу в целом, следует отметить внутреннее единство ее структуры, логичность, связь результатов, выводов и положений, выносимых на защиту. Это делает диссертацию целостным, законченным исследованием, в котором решены поставленные задачи и достигнута намеченная цель исследования. Содержание диссертации соответствует заявленной научной специальности. Представленные в диссертации материалы опубликованы в 30 научных работах, из которых: 11 публикаций в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК и индексируемых в РИНЦ. В том числе, есть и 3 публикации в журналах, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования Scopus и Web of Science. Результаты диссертации прошли апробацию на всероссийских и международных научных конференциях, симпозиумах и семинарах, известны специалистам. Автореферат соответствует содержанию диссертации. Исходя из вышесказанного, считаю, что диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне. Актуальность и практическая значимость работы очевидны. Результаты могут быть востребованы как российскими, так и зарубежными исследователями в области нелинейной радиофизики и физики магнитных явлений. Представленная диссертация является самостоятельным и завершенным научным исследованием.

Диссертационное исследование А. П. Иванова удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, и требованиям ВАК, предусмотренным в пп. 9 и 10 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года (в редакции на 1 октября 2018 года), а Алексей Павлович Иванов заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – Радиофизика (п. 1 паспорта специальности).

Официальный оппонент

Екомасов Евгений Григорьевич

профессор кафедры теоретической физики,

Физико-технического института,

ФГБОУ ВО «Башкирский государственный университет»,

доктор физико-математических наук, профессор


Адрес: ФГБОУ ВО «Башкирский государственный университет»,

450076, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32

тел. +7(347)229-96-45,

e-mail: [ekomasoveg@gmail.com](mailto:ekomasoveg@gmail.com)

«30» мая 2019 г.

 Екомасов Е.Г.

Подпись Е. Г. Екомасов  
Заверяю: ученый секретарь Ученого совета  
Башкирского государственного университета  
С.Р. Баимова  
«20» мая 2019 г.

