

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента на диссертацию  
Иванова Алексея Павловича

**«Модель связанных осцилляторов как инструмент анализа  
нелинейных колебаний в магнитоупругой системе»**,  
представленную на соискание учёной степени кандидата физико-  
математических наук по специальности 01.04.03 – «Радиофизика»

### **Актуальность темы выполненной работы**

Диссертационная работа А.П.Иванова посвящена исследованию нелинейных колебаний ферромагнетка, возникающих в ситуации ферромагнитного резонанса (ФМР). Тема работы является чрезвычайно актуальной, особенно в связи с использованием ФМР для генерации гиперзвуковых электромагнитных или упругих колебаний. Имеется большое количество исследований по этой тематике. Известно, что полная модель, описывающая взаимодействие магнитной и упругой подсистем является достаточно сложной и описывается системой как минимум семи нелинейных уравнений первого порядка. Такая сложность задачи не позволяет провести качественный анализ и предполагает ее исследование лишь численными методами. Одним из центральных результатов диссертации состоит в сведении данной задачи к системе двух связанных нелинейных осцилляторов. Опираясь на такое приближение, автором были классифицированы различные режимы автоколебаний, возникающих в данной системе. Таким образом, полагаю, что данная диссертация является *успешным исследованием по актуальной тематике.*

## **Общая методология и методика исследования**

В своей работе автор использует классические математические модели ФМР и оперирует с ними, используя общепринятый математический аппарат. Таким образом, общая методология и методика исследования являются традиционными для задач теоретической физики.

## **Степень обоснованности и достоверности**

Физические модели, исследуемые в работе, являются традиционными и не вызывают сомнений. Все физические параметры автором детально описываются (см. напр., параграфы 4.5 и 4.6, содержащие детальные таблицы задействованных величин). В том числе, автором указаны те параметры, малость которых позволяет упростить те или иные выражения. Кроме того, в работе содержится сравнение результатов, полученных с использованием упрощенной модели, с результатами, полученными в рамках более общей модели (см. напр., Рис. 3.5, Рис. 4.1 и 4.2). Представленное соответствие весьма убедительно.

Положения, выносимые на защиту, прошли апробацию на многочисленных российских и международных конференциях и опубликованы в 11 печатных работах в ведущих журналах, входящих в перечень ВАК.

## **Научная новизна полученных результатов**

В работе впервые представлено описание взаимодействия магнитной и упругой подсистем ферромагнетика в рамках систем двух связанных нелинейных осцилляторов. На основе этих систем дано качественное описание различных режимов возбуждения автоколебаний. Обнаружены новые физические явления, в частности, явление запаздывания возбуждения автоколебаний. Это явление в диссертации детально описано, классифицированы режимы, характерные для такого запаздывания и дано его качественное объяснение.



## Значимость результатов для науки и практики

В силу универсальности рассмотренной автором математической модели связанных нелинейных осцилляторов, работа вносит вклад в целом в теорию нелинейных волн. С этой точки зрения, она может быть интересна специалистам в различных областях радиофизики. Отмечу, что обнаруженное автором явление «взрывной» генерации автоколебаний с запаздыванием интересно не только с практической, но и с чисто математической точек зрения, так как строго математической теории этого явления, насколько мне известно, не построено.

Что касается непосредственно «магнитных» приложений, полагаю, что представленная автором классификация режимов автоколебаний представляет интерес как для проектирования магнитострикционных генераторов гиперзвуковых волн, так и в более общем контексте, нелинейных генераторов и преобразователей частоты.

## Внутреннее единство работы и ее структура

Работа (общим объемом 211 страниц) состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы.

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертации, излагаются цели и задачи исследования, формулируется научная новизна работы, и ее значимость. Далее излагаются основные положения, выносимые на защиту, обосновывается достоверность результатов и указывается личный вклад автора.

**Глава 1** посвящена рассмотрению простейших колебательных систем. В ней приводится обзор основных моделей теории колебаний (гармонический осциллятор, осциллятор Дюффинга, уравнения типа Ван дер Поля, простейшие двухчастотные линейные и нелинейные системы). Глава заканчивается изложением классической теории ферромагнитного резонанса.

**Глава 2** носит общий характер. Она содержит изложение результатов для системы связанных линейного и нелинейного осцилляторов. При этом амплитуда колебаний второго осциллятора входит в первое из уравнений

квадратично, а амплитуда первого осциллятора входит во второе уравнение линейно. Указаны шесть режимов автоколебаний такой системы. Для каждого из режимов указаны характерные области параметров.

В **главе 3** описывается вывод модели связанных линейных осцилляторов из уравнений ФМР. Все приближения и переходы тщательно описаны и обоснованы. В полученной системе уравнения связаны «перекрестно»: в первое уравнение входят амплитуда и ее производная второго осциллятора, а во второе – амплитуда и ее производная первого осциллятора. В этой же главе приведено сравнение динамики, описываемой данной (укороченной) и более общей моделями ФМР.

В **главе 4** полная система, содержащая семь уравнений первого порядка вновь сводится к системе связанных осцилляторов. В этом случае используется квадратичное приближение по намагниченности. Полученную систему удастся еще несколько упростить, сохранив только наибольшие по величине слагаемые. Результатом является система двух осцилляторов, которые оба нелинейны. Нелинейность имеет довольно сложный вид и включает как кубические члены, так и произведения производных амплитуд. Показано, что линейная система, полученная в главе 3, является вырожденным случаем данной системы. Проведено сравнение динамики общей модели ФМР с динамикой полученных систем, оценена точность рассматриваемой модели.

**Глава 5** является наибольшей по объему. В ней подробно описывается явление запаздывания магнитоупругих колебаний связанной системы осцилляторов. Это явление состоит в том, что при некоторых условиях генерация автоколебаний системы из главы 4 происходит скачком, с некоторым запаздыванием относительно включения вынуждающего периодического поля. Выявлены характерные режимы, соответствующие различным диапазонам параметра нелинейной связи и приведены эмпирические формулы, позволяющие оценить время «включения» автоколебаний. Предложено качественное описание данного явления на языке пары потенциалов, описывающих первый и второй осцилляторы. Глава содержит много важных деталей, характеризующих, в частности, различные уровни линейной связи, высокоамплитудные и малоамплитудные режимы колебаний.

В **заключении** автор перечисляет основные полученные результаты. Завершает работу **список литературы**. Он насчитывает 74 наименования



цитированной литературы и 30 работ автора по данной тематике. Отдельно указаны 11 работ автора, опубликованных в журналах из списка ВАК.

Работа представляется цельной, ее главы логически связаны между собой. Изложение подчинено единой задаче *качественного* исследования модели ФМР в рамках теории нелинейных колебаний.

### **Общее впечатление от работы**

Диссертация оставляет благоприятное впечатление. В целом она написана грамотным русским языком, что существенно облегчает чтение. Нет сомнения, что автором проделана очень большая работа. Он хорошо знает литературу по рассматриваемому кругу задач, не боится сложных аналитических расчетов, способен проводить необходимые численные исследования. Вводная часть работы (введение и глава 1) написаны подробно и толково, с уважением к читателю. Стиль изложения материала (особенно Главы 3 и 4, содержащие описание большого числа физических параметров) указывает на пунктуальность и аккуратность автора.

### **Замечания по диссертационной работе**

Приведенные ниже замечания носят рекомендательный характер, не меняют значимости и никак не влияют на положительную оценку качества работы Иванова А.П., выполненной на высоком научном уровне.

1. В Главе 2 представлено содержательное исследование связанной системы линейного и нелинейного осцилляторов. Вместе с тем, как мне кажется, автору стоило бы *точнее указать связь этого исследования с остальными разделами диссертации*. Возможно, стоило бы пояснить, в каких ситуациях система (2.1)-(2.2) является применимой с точки зрения теории ФМР.

2. Насколько я смог понять из текста работы, при изучении автоколебаний автор практически не использовал *анализ спектров* возникающих осцилляций. Как мне кажется, использование Фурье-анализа колебаний могло бы существенно упростить некоторые моменты исследования и облегчить их визуализацию. Например, в разделе 2.6 автор обосновывает генерацию второй гармоники автоколебаний путем построения «похожего» фазового портрета для системы с двумя гармониками. Однако, на мой взгляд, достаточно было привести спектр полученных осцилляций, имеющий пик на второй гармонике. Вообще, приведение спектров автоколебаний параллельно с их развертками и фазовыми диаграммами, могло бы существенно облегчить описание многочастотных колебаний, см. Рис. 2.2, 2.3, 2.5, 3.2, 5.6 и др.

3. Разбиение работы на главы, как мне кажется, не является оптимальным. В частности, объем пятой главы (70 страниц) практически равен объему второй, третьей и четвертой глав (72 страницы). Из этой главы, как мне кажется, можно было бы выделить материал отвечающий ее названию («*Нестационарное запаздывание...*»), а остальной материал скомпоновать по-другому. Например, насколько я понял, режимы «перемежающихся скачков» и «малоамплитудной релаксации» не имеют к заявленной теме главы прямого отношения. Также, по моим представлениям, прямого отношения к нестационарному запаздыванию не имеют разделы 5.7-5.9 данной главы. Соответственно, вторая половина главы читается трудно (по крайней мере, так было в моем случае).

4. В тексте имеется некоторое количество описок и опечаток, неизбежных для такого объемного труда. В ряде случаев встречаются выражения, относящиеся, скорее, к «жаргонным». Приведу некоторые, примеры.

- стр. 16: «*сужающиеся и расширяющиеся фазовые траектории*» (как понимать этот термин?)

- стр.17: ссылка на (1.60) перед формулой (1.16) неверна;

-стр. 19: в формуле (1.28) имеются не описанные параметры альфа и бета;



- стр. 24: «Выражение (1.4) было предложено ...» видимо, имеется в виду выражение (1.58);

- стр. 49: «...система устремляется на минус бесконечность, по спадающей ветви кубической параболы, перегиб которой приходится на нуль...» - трудное для восприятия утверждение.

- стр. 49 и далее: под «расходимостью» автор, видимо, понимает стремление функции к бесконечности. Насколько мне известно, такой термин не является общепринятым.

- стр. 57: «... эта четность, преобладая над нечетностью...»- трудное для восприятия выражение.

- стр 69: выражение «расщепление колебаний» (и даже «расщепление синусоиды») представляется некорректным. В данном случае, насколько я понимаю, речь идет о генерации второй гармоники.

-стр. 69: в формулах (2.20)-(2.21), по-видимому, пропущены какие-то параметры.

- стр. 89: «... представляет собой параболу четвертого порядка...» - некорректное выражение.

Также, на мой взгляд, спорным с терминологической точки зрения является использование выражения «взаимный потенциал» (напр стр 138), когда речь идет об использовании для каждого из уравнений своего потенциала, зависящего от амплитуды, описывающейся другим уравнением.

### Заключение

Диссертация Иванова Алексея Павловича «Модель связанных осцилляторов как инструмент анализа нелинейных колебаний в магнитоупругой системе» является законченным научным исследованием. Она посвящена актуальным вопросам теории нелинейных волн в магнетиках и выполнена на высоком научном уровне. Научная новизна основных результатов значительная. Содержание диссертации полностью соответствует паспорту специальности 01.04.03 – радиофизика. Автореферат правильно отражает содержание диссертации. Таким образом,

представляется, что рецензируемая диссертационная работа полностью удовлетворяет требованиям пункта 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г., предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук. Ее автор, **Иванов Алексей Павлович**, заслуживает **присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – «Радиофизика».**

*Официальный оппонент,*  
доктор физ.-мат. наук, доцент,  
профессор кафедры «Высшая математика -1»

Г. Л. Алфимов

Национального исследовательского  
университета «МИЭТ»  
специальность 01.01.02 - Дифференциальные уравнения,  
динамические системы и оптимальное управление,  
124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1;  
тел +7(916) 947 10 01  
e-mail: [galfimov@yahoo.com](mailto:galfimov@yahoo.com)

16.05.2019

*Подпись Г. Л. Алфимова удостоверяю*

Ученый секретарь НИУ «МИЭТ»  
кандидат техн. наук, профессор



Н. М. Ларионов