

## ОТЗЫВ

**на автореферат докторской диссертации Сафина Ансара Ризаевича «Нелинейные динамические процессы в автоколебательных структурах антиферромагнитной спинтроники», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.12 – «Физика магнитных явлений»**

Благодаря появлению технологий создания пленок толщиной в несколько нанометров и дальнейшему развитию нанотехнологий возникли новые перспективы использования наноразмерных спинтронных устройств. В частности, спинтронные осцилляторы (СО) рассматриваются в настоящее время как одно из наиболее перспективных приложений спинтроники как в гигагерцовом, так и в терагерцовом диапазонах частот. Характеристики СО, такие как частота генерации, узкая спектральная линия, хорошая частотная перестраиваемость — привлекают внимание специалистов, особенно в области телекоммуникаций. Однако, низкий уровень выходной мощности генерируемых колебаний (единицы и доли микроватт) препятствует их практическому внедрению. Одним из способов решения этой проблемы является взаимная синхронизация большого числа СО и сложение их мощностей в общей нагрузке. В связи с этим исследования режимов работы, внешней и взаимной синхронизации неидентичных СО в составе ансамбля и сложения их мощностей, проведенные в диссертации А.Р. Сафина, являются весьма актуальными. Эти задачи чрезвычайно важны с фундаментальной точки зрения как для спинтроники, так и для теории нелинейных колебаний. С практической точки зрения, решение этих задач станет еще одним важным шагом на пути создания спинтронных генераторов ГГц и ТГц диапазонов частот нового поколения. Диссертация А.Р. Сафина посвящена разработке теории, позволяющей исследовать нелинейные динамические процессы в автоколебательных структурах спинтроники, содержащих антиферро- и ферримагнетики: осцилляторах и детекторах терагерцевых сигналов, характеристиками которых можно управлять посредством внешних воздействий (магнитных и электрических полей, спин-поляризованного тока, температуры), а также разработка сетевого подхода при объединении базовых элементов в большие ансамбли, позволяющего решать задачи взаимной синхронизации, устранения многомодовости, нейроморфных вычислений.

Необходимо отметить, что в диссертационной работе проведены как теоретические исследования, так и имитационное моделирование, а также проведено сравнение с экспериментальными данными, опубликованными в открытой печати. К наиболее важным теоретическим результатам следует отнести предложенные и обоснованные методики расчета, способы оптимизации параметров и перестройки спинтронных осцилляторов, детекторов, эмиттеров и устройств ГГц и ТГц частотных диапазонов на их основе. В диссертационной работе продемонстрирована возможность разработки нового класса процессоров для задач нейросетевой обработки информации на основе массивов перестраиваемых по частоте спин-поляризованным током антиферромагнитных наноосцилляторов, а также исследованы различные нелинейные явления в спинтронных осцилляторах, в частности, гистерезисный эффект при возникновении автоколебаний и бистабильность при переходе осцилляторов из режима синхронизации в асинхронный режим, наличие которых является паразитным эффектом для задачи возбуждения стабильных колебаний.

Из полученных автором результатов численного моделирования особый интерес представляет результат исследования динамики малых ансамблей СО с существенно неидентичными параметрами (отличие радиусов контактов вдвое), в котором автор показал, что кольцевая геометрия является наилучшей по критерию максимума зон частичной синхронизации в отличие от линейной схемы. Кроме того, автором предложена структура кольцевого ансамбля СО с дополнительными электрическими связями через один элемент, в которой обеспечивается расширение области существования устойчивой

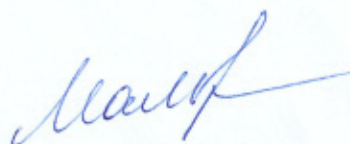
синхронной моды по сравнению с кольцевой структурой без связей. Полученные результаты позволяют автору предложить конструктивные методы борьбы с многомодовостью в ансамбле.

Предложенные автором диссертации подходы могут послужить импульсом для новых исследований явления синхронизации ансамблей связанных неидентичных осцилляторов различной физической природы, например, в нейронных сетях, распределительных электрических сетях, Джозефсоновских контактах.

Анализ автореферата свидетельствует о том, что поставленная цель исследования выполнена в полном объеме. Данная диссертационная работа представляет собой многолетнее исследование, расширяющее и углубляющее научные представления на стыке радиофизики, физики нелинейных процессов и спинтроники. Полученные в диссертации новые научные результаты в совокупности можно охарактеризовать как важное научное достижение, которое может привести к реализации в ближайшем будущем миниатюрных устройств функциональной электроники ТГц диапазона частот, работающих при комнатных температурах.

Считаю, что диссертация Сафина Ансара Ризаевича является законченным научно-квалификационным исследованием и удовлетворяет всем требованиям ВАК к докторским диссертациям. Соискатель достоин присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.12 — «Физика магнитных явлений».

Доктор физико-математических наук,  
Ведущий научный сотрудник  
Института космических исследований  
Российской Академии наук (ИКИ РАН)



Малова Х.В.

Подпись Х.В. Маловой, заверяю:  
Ученый секретарь ИКИ РАН,  
к.ф.-м.н.



Садовский А.М.

02.06.2023г.

Малова Хельми Витальевна  
адрес: 117997, Москва, Профсоюзная ул., д.84/32, ИКИ РАН  
телефон: 8 (495) 3335122  
e-mail: [hmalova@yandex.ru](mailto:hmalova@yandex.ru)