Национальный исследовательский университет
«МЭИ»

МАТЕРИАЛЫ:
XXXI МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ И МАТЕРИАЛЫ
(ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ)»

PROCEEDINGS:
XXXI INTERNATIONAL CONFERENCE
«ELECTROMAGNETIC FIELD AND MATERIALS
(FUNDAMENTAL PHYSICAL RESEARCHES)»

Посвящается 120-летию со дня рождения К.М. Поливанова

Москва
Издательство МЭИ
2024

УДК 621.3
ББК 22.313
Э 455

Э 455 Электромагнитное поле и материалы (фундаментальные физические исследования). XXXI Международная конференция: материалы. – М.: Издательство МЭИ, 2024. – 202 с.

ISBN 978-5-7046-3125-5

В сборнике приведены доклады, представленные на XXXI Международной конференции «Электромагнитное поле и материалы (фундаментальные физические исследования)», посвященной текущим достижениям и фундаментальным исследованиям в области теории электромагнитного поля, ядерной физики, физики элементарных частиц, физики плазмы и астрофизики. В материалах конференции также рассмотрены вопросы физических и математических основ спиновой электроники, физики сложных систем, исследования электромагнитных явлений в электротехнических и радиоэлектронных устройствах и агрегациях, проблемы создания и повышения эффективности ферритовых и резистивных материалов для радиопоглощающих покрытий различного применения.

УДК 621.3
ББК 22.313

Материал издается в авторской редакции

ISBN 978-5-7046-3125-5

© Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2024

ОРГАНИЗАТОРЫ КОНФЕРЕНЦИИ

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ XXXI МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

«ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ И МАТЕРИАЛЫ (ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ)»

Сопредседатели:

Бутырин П.А., д.т.н., чл.-корр. РАН, НИУ «МЭИ» (Россия)
Серебрянников С.В., д.т.н., проф., НИУ «МЭИ» (Россия)

Члены организационного комитета:

Абдулкеримов С.А., к.т.н., доцент, Филиал НИУ «МЭИ» в г. Душанбе (Таджикистан)
Горбацевич А.А., д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН, ФИАН (Россия)
Гуличева Е.Г., к.э.н., директор по международному сотрудничеству НИУ «МЭИ» (Россия)
Карпунина М.В., ст. преп., НИУ «МЭИ» (Россия)
Ковалёв Д.И., к.т.н., доц., НИУ «МЭИ» (Россия)
Козьмина И.С., к.т.н., доц., НИУ «МЭИ» (Россия)
Комаров А.А., к.т.н., доц., НИУ «МЭИ» (Россия)
Крутских В.В., к.т.н., доц., НИУ «МЭИ» (Россия)
Локк Э.Г., д.ф.-м.н., г.н.с., ИРЭ РАН (Россия)
Михеев Д.В., к.т.н., к.э.н., доц., НИУ «МЭИ» (Россия)
Осипова М.С., ассистент, заместитель директора по международному сотрудничеству НИУ «МЭИ» (Россия) – ***зам. ученого секретаря***
Погребисский М.Я., к.т.н., доц., НИУ «МЭИ» (Россия)
Поляков П.А., д.ф.-м.н., проф., МГУ (Россия)
Сафин А.Р., д.ф.-м.н., проф., НИУ МЭИ (Россия)
Силаев М.А., к.т.н., доц., НИУ «МЭИ» (Россия)
Фланден В.С., ст. преп., НИУ «МЭИ» *(*Россия) **–** ***ученый секретарь***
Шакирзянов Ф.Н., к.т.н., проф. (Россия)

Организаторы:

- Национальный исследовательский университет «МЭИ»
- Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова
- Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
- Академия Электротехнических Наук РФ
- Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
- Институт электрофизики и электроэнергетики РАН

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ
XXXI МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

«ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ И МАТЕРИАЛЫ
(ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ)»

Председатель – *Серебрянников С.В.*, д.т.н., профессор, НИУ «МЭИ» (Россия)

Заместитель председателя – *Поляков П.А.*, д.ф.-м.н., профессор, МГУ (Россия)

Члены Программного комитета:
Алексейчик Л.В., д.т.н., профессор, НИУ «МЭИ» (Россия)
Анненков А.Ю., к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, ИРЭ РАН (Россия)
Банков С.Е., д.т.н., г.н.с., ИРЭ РАН (Россия)
Безъязыкова Т.Г., к.т.н., доцент, СПбГУТ (Россия)
Бержанский В.Н., д.т.н., профессор, Крымский Федеральный Университет им. В.И. Вернадского (Россия)
Бутырин П.А., д.т.н., чл.-корр. РАН, НИУ «МЭИ» (Россия)
Горбацевич А.А., д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН, ФИАН (Россия)
Далькаров О.Д., д.ф.-м.н., профессор, ФИАН (Россия)
Демирчян К.С., д.т.н., академик РАН, НИУ «МЭИ» (Россия)
Демидович В.Б., д.т.н., профессор, СПбЭУ (ЛЭТИ) (Россия)
Дуйшеналиев Т.Б., д.ф.-м.н., профессор, (Киргизская Республика)
Коровкин Н.В., д.т.н., профессор, СПбГПУ (Россия)
Локк Э.Г., д.ф.-м.н., главный научный сотрудник, ИРЭ РАН (Россия)
Михеев Д.В., к.т.н., к.э.н., доцент, НИУ «МЭИ» (Россия)
Нгуен Куок Ши, д.т.н., профессор, НИУ «МЭИ» (Россия)
Садовников Б.И., д.ф.-м.н., профессор, МГУ (Россия)
Сигов А.С., д.ф.-м.н., академик РАН, МГТУ МИРЭА (Россия)
Степович М.А., д.ф.-м.н., профессор, КГУ им. К.Э. Циолковского (Россия)
Тарасов А.Е., к.т.н., доцент, проректор НИУ «МЭИ» (Россия)
Темников А.Г., к.т.н., доцент, заведующий кафедрой НИУ «МЭИ» (Россия)
Хомич В.Ю., д.ф.-м.н., академик РАН, ИЭЭ РАН (Россия)
Черникин Д.В., зам. начальника НИО АО «НИИП им. В.В. Тихомирова» (Россия)
Фланден В.С., ст. преп., НИУ «МЭИ» (Россия) – ***ученый секретарь***
Шакирзянов Ф.Н., к.т.н., профессор (Россия)
Bao-Jun, prof. (China)

ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ

Сопредседатели:
д.т.н., чл.-корр. РАН П.А. Бутырин *(НИУ «МЭИ»)*,
д.т.н., проф. С.В. Серебрянников *(НИУ «МЭИ»)*

ТЕПЛОЕМКОСТЬ В КОНДЕНСИРОВАННЫХ СОСТОЯНИЯХ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

П.Н. Николаев
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет
имени М.В.Ломоносова», физический факультет, Москва, Россия
E-mail: physphak@mail.ru

ПОЛИВАНОВ КОНСТАНТИН МИХАЙЛОВИЧ

(К 120-летию со дня рождения)

Герб рода Поливановых

120 лет прошло со дня рождения Константина Михайловича Поливанова, выдающегося учёного, сыгравшего важную роль развитии электротехники, электрофизики, электротехнического образования. Родился он 13 декабря 1904 года в Москве в семье инженера, профессора М. К. Поливанова, представителя московской ветви одного из самых крупных российских родов.

Поливановы – дворянский род, происходящий, по сказаниям древних родословцев, от татарина Кочевы, в крещении Онисифора, приехавшему из Орды к великому князю Дмитрию Донскому. Правнук его, Михаил Глебович, по прозванию Поливан, был родоначальником **Поливановых**. Его сын Константин Дмитриевич **Поливанов** был полковым воеводою в Мценске (1568) и наместником в Карачеве (1583), Тимофей Григорьевич - воеводою в Дедилове (1626), Тимофей Владимирович – воеводою в Брянске (1630), стольник Иван

Андреевич – судьею земского приказа (1682). Многие **Поливановы** служили в XVII веке стольниками и стряпчими. Генерал-поручик Иван Игнатьевич **Поливанов** был (1781) правителем саратовского наместничества. Род **Поливановых** внесён в VI часть **родословных книг** Владимирской, Московской, Калужской, Костромской, Симбирской и Тверской губерний (Гербовник, III, 22). К началу XXI века наиболее мощными ветвями рода были питерская и московская. Питерцы дали в историю России крупных военноначальников, а московская ветвь – философов, математиков, физиков, инженеров, преподавателей…

В родословных книгах в колене XVII рода Поливановых есть запись об отце Константина Михайловича:

256/215. Михаил Константинович (1875–1927). Известный русский электротехник. В 1897 окончил Императорское московское техническое училище. Учился в Льеже (инженер-электрик). В 1901 инженер-механик. Живет в Николопесковском пер. на Пречистенке, дом князя Голицына. Электрифицировал многие текстильные предприятия, в том числе, первую в России электростанцию с паровыми турбинами на Морозовской Никольской мануфактуре в Орехово-Зуеве. Руководил созданием трамвайной сети в Москве и во многих городах России. Создал проект метро в Москве. В 1918 – Председатель Правления АО «Электросталь». Один из разработчиков ГОЭЛРО, Днепрогэса и других электростанций.

Колено XVIII

295а/256. Константин Михайлович (13.12.1904 - 17.09.1983), ученый-электротехник. Окончил МВТУ в 1930. Работал в ВЭИ, затем в магнитной лаборатории секции электросвязи АН СССР. Зав. кафедрой ТОЭ в МЭИ, затем профессор на каф. радиотехники. Автор многих учебников и пособий. [Моск. пром газета. №6 (325) 17–23 февраля 2005].

Приведём и запись о сыне Константина Михайловича.

Колено XIX

301/295а. Поливанов Михаил Константинович (19.09.1930– 23.01.1992). Внук известного философа Г.Г. Шпета (по линии матери), математик и выдающийся физик (квантовая теория поля), заведующий отделом Математического института им. В.А. Стеклова, автор ряда работ по истории русской литературы и философии.

Тестем К.М. Поливанова был Густав Густавович Шпет — русский философ, психолог, теоретик искусства, переводчик философской и художественной литературы, педагог. Полиглот, знавший 17 языков. Действительный член (1921) и вице-президент (1923—1929) Государственной академии художественных наук. 27 октября 1937 года был арестован, обвинён в участии в антисоветской организации и 16 ноября расстрелян. Первая жена Шпета Г.Г.— Мария Александровна Крестовоздвиженская (на сцене Крестовская). Их дочь Маргарита Густавовна стала женой Константина Михайловича Поливанова. Нельзя не назвать вторую жену Г.Г. Шпета — Наталью Константиновну Гучкову, дочь К. И. Гучкова. В этом браке родилась Татьяна Густавовна (3 сентября 1914–30 сентября 2011) — журналист. Она

вышла замуж за инженера Сергея Александровича Максимова (1912—1961). В этом браке родилась Максимова Екатерина Сергеевна — выдающаяся артистка балета, актриса, её муж Васильев Владимир Викторович — выдающийся артист балета, балетмейстер, хореограф, театральный и ТВ режиссёр, актёр. Константин Поливанов был дядей Екатерины Максимовой, их связывали тёплые, добрые отношения.

В 1930 году К. М. Поливанов окончил электротехнический факультет МВТУ, который в этом же году вошёл в состав МЭИ, где Константин Михайлович и начал свою научную и педагогическую деятельность на кафедре Теоретических основ электротехники МЭИ. С 1934 года он начинает также вести научно-исследовательскую работу, сначала во Всесоюзном электротехническом институту (ВЭИ) под руководством Л.И. Сиротинского, а потом в магнитной лаборатории секции электросвязи Академии Наук СССР под руководством акад. В.Ф. Миткевича и чл.-корр. АН СССР В.К. Аркадьева, что определило одно из основных направлений его научной деятельности - физической теории электромагнитного поля и ее технических приложений.

В 1942 году он защитил докторскую диссертацию «Влияние доменной структуры на поверхностный эффект в ферромагнетиках», где дал расчёты смещения границ доменов в магнитном поле высокой частоты (метод Поливанова). Основные ее результаты были опубликованы в 1943 и в 1946 г. В 1943 году был избран профессором, с этого времени он сосредоточил свою научную и педагогическую деятельность на кафедре ТОЭ МЭИ, будучи заместителем заведующего кафедрой члена-корреспондента АН СССР К.А. Круга. После смерти К.А. Круга, с 1952 г., К.М. Поливанов стал заведывать кафедрой ТОЭ МЭИ и фактически возглавил Московскую научную электротехническую школу. Его научные работы того времени относились к исследованию актуальных и тогда, и сегодня проблем таких, как электродинамика вещественных сред, магнитных свойств ферритов. гиромагнитных явлений и параметрических эффектов, динамики процессов перемагничивания, явлений в диэлектриках с учетом их проводимости и вязкости (инерционности) поляризации.

К. М. Поливанов всегда очень быстро включался сам и вовлекал своих учеников в новые направления физических исследований в области статического и низкочастотного магнетизма и сверхвысокочастотного гиромагнетизма. Так, после создания в 1948 г. новых магнитных материалов — ферритов Константин Михайлович, его сотрудники и ученики немедленно приступили к разностороннему теоретическому и экспериментальному исследованию их статических и электродинамических свойств, вначале только как бикомплексных сред (по терминологии В. К. Аркадьева), а затем и как гиромагнитных (тензорных) сред. В 1953 г. К. М. Поливановым в числе первых исследователей был выявлен резонансный характер поведения магнитной проницаемости, связанный с размерами образца ферромагнетика (объемный резонанс), а также впервые предсказана зависимость поглощения от направления распространения волн в прямоугольном волноводе с ферритом

при поперечном подмагничивании. Плодотворная научная и организационная деятельность К. М. Поливанова по исследованию статических и динамических магнитных свойств ферро- и ферримагнетиков привела к созданию в МЭИ к середине 50-х годов активно работающей группы исследователей - школы К. М. Поливанова, всегда считавшего, в свою очередь, себя учеником школы П. Н. Лебедева — В. К. Аркадьева. Уместно отметить, что К. М. Поливанов определил направления научных исследований многим своим ученикам и сотрудникам. К числу этих направлений следует отнести исследование связи между вещественными и мнимыми составляющими проницаемости в применении к магнитной среде с позиции В. К. Аркадьева и более общего подхода Крамерса — Кронига, разработку первых в стране методов измерения магнитной и диэлектрической проницаемостей ферритов и магнтодиэлектриков; исследование гиромагнитных явлений в «изотропных» и магнитно-одноосных ферритах; анализ процесса намагничивания ферритов; исследование эффекта Фарадея в дисперсных системах с фазой из магнетитовых и ферритовых частиц; применение объемного резонанса типа полости для исследования в области ферромагнитного резонанса характера изменения длины необыкновенной волны, возникающей в поперечно намагниченном ферритовом цилиндре, и ряд других. Кроме того, К. М. Поливанов, его ученики и сотрудники успешно занимались исследованием эффекта Мёссбауэра, электродинамических свойств тонких магнитных пленок, статических и резонансных характеристик ферритов с одноосной анизотропией.

Константин Михайлович любил своих учеников и не уставал им напоминать, что на выходе всякого научного исследования обязательно должны присутствовать «точки честности (добросовестно зафиксированные научные данные) и кривые ума, догадливости». Константин Михайлович в своей научной деятельности тесно примыкал к советской школе физиков-магнитологов, участвовал активно во всех всесоюзных магнитных конференциях, на которых он и его ученики докладывали свои основные научные результаты. Он был постоянным и активным членом Научного совета АН СССР по проблеме «Физика магнитных явлений». Научная деятельность К. М. Поливанова была широко известна не только в Союзе, но и за пределами нашей Родины. Он имел научные и дружеские контакты с учеными Чехословакии, Польши, Болгарии, Франции других стран. Многие молодые ученые социалистических стран становились учениками К. М. Поливанова. Так, например, после стажировки у К. М. Поливанова по теме «Импульсное перемагничивание феррита и тонких пленок» молодой доцент Олдрих Бенда (впоследствии – вице-президент Словацкой Академии наук, иностранный член АН СССР) в конце 50-х годов создал по совету К. М. Поливанова в Словацком техническом университете в Братиславе группу прикладного магнетизма, которая успешно исследовала процессы перемагничивания электротехнических сталей. Книга К. М. Поливанова «Ферромагнетики» была рекомендована и использовалась в Словацкой высшей школе техники в качестве учебного, пособия по специальности «Физика и технология ферромагнетиков». Результатом деятельности К. М. Поливанова в должности председателя

временной комиссии по ферритам при ГКНТ СССР в 1956—1957 гг. было создание крупного отраслевого НИИ, а также Отраслевой проблемной лаборатории ферритов в МЭИ. Он был инициатором организации и проведения Международных конференций п гиромагнитной электронике и электродинамике, которая продолжает свою работу под названием Международная конференция Электромагнитное поле и материалы (фундаментальные физические исследования). На кафедре ТОЭ под руководством профессора Поливанова велась методическая работа по улучшению структуры курса ТОЭ и методов его
изложения. Особенно это заметно в третьей части курса (теории поля), когда был предложен индуктивный метод изложения – сначала постулировались уравнения Максвелла, а потом из них получались частные случаи полей.

Особо следует сказать об учебниках и учебных пособиях, написанных К.М. Поливановым для средних и высших учебных заведений. Первые книги, написанные Константин Михайлович сначала совместно с Н.Ф. Пшениным (1933 г.), а потом с В.Ю. Ломоносовым (1936 г.) были пособия по техминимуму для изучения электротехники средним техническим персоналом. Наибольшую известность получил учебник для курсов техминимума, сочетавший высокий научный уровень с популярным изложением основных понятий электротехники. Первое издание книги вышло в 1936 г. под редакцией чл.-корр. АН СССР Я.Н. Шпильрейна, одного из основателей МЭИ. Книга выдержала более 10 изданий. Она была издана на украинском, болгарском, китайском языках.

Одновременно К.М. Поливанов начал работать над учебной литературой для студентов ВУЗов. В 1937 году вышел курс Теоретической электротехники, написанный десятью авторами. Глава, относящаяся к магнитному полю и электромагнетизму в этой книге написана К.М. Поливановым. Он же был редактором издательства по этой книге. В последующие годы им написаны выдержавшие несколько изданий учебники по теории линейных цепей и теории поля.

Следует отметить ряд работ по истории учения об электричестве и электротехнике: очерк по развитию теоретических основ электротехники, вошедший в трехтомную монографию "История энергетической техники в СССР", серию статей о великих физиках: Оме, Максвелле, Эйнштейне, Н.А. Умове, ряд публикаций об его современниках - учителях и коллегах: В.К. Аркадьеве, К.А. Круге, В.Ю. Ломоносове, В.В. Мешкове. Всего же перу К.М. Поливанова принадлежит более 120 научных статей, 2 монографии.

В 1971 г. профессор К. М. Поливанов оставляет заведование кафедрой ТОЭ и переходит на должность профессора-консультанта кафедры основ радиотехники, возглавлявшейся в то время академиком В. А. Котельниковым. В последние годы своей жизни Константин Михайлович много и плодотворно работал в области электродинамики движущихся тел. По этой теме им опубликовано большое число научных статей, а монография «Электродинамика движущихся тел» завершила эти исследования. Его учебники и учебные пособия для вузов и техникумов завоевали широкую известность и выдержали по нескольку изданий, а его учебник по теории электромагнитного поля, над

новой редакцией которого он много работал в конце жизни, вышел на английском языке в издательстве «Мир» уже после его смерти.

Высоко оценена деятельность К.М. Поливанова: он награждён орденами Ленина, Трудового Красного Знамени и многими медалями. Константин Михайлович Поливанов был прекрасным человеком и руководителем, ученым с необычайно широкой эрудицией, обладавшим поистине энциклопедическими знаниями, высокой общей культурой и безгранично преданным науке.

С.А.Абдулкеримов, П.А. Бутырин, С.В. Серебрянников, Ф.Н. Шакирзянов

СЕКЦИЯ 1: ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В СОВРЕМЕННОЙ ФИЗИКЕ

Сопредседатели: ***д.ф.-м.н., проф. О.Д. Далькаров*** *(ФИАН),*
д.ф.-м.н., проф. М.А. Степович *(КГУ им. К.Э. Циолковского)*

УДК 621.311

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В КОАКСИАЛЬНОМ КАБЕЛЕ НА РАЗНЫХ ЧАСТОТАХ ТОКА

А.Р. Лепешкин, М.А. Федин, А.Б. Кувалдин, М.А. Булатенко,
М.С. Осипова, М.Л. Зотов, А.А. Ушаков
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», Москва, Россия
E-mail: lepeshkin.ar@gmal.com

Приведены результаты моделирования и исследований параметров электромагнитного поля в коаксиальном кабеле на разных частотах тока при передаче электроэнергии повышенной частоты. Получены параметры электромагнитного поля и распределения плотности тока в коаксиальном кабеле. Проведен анализ распределений плотности тока и напряженности магнитного поля в поверхностных слоях внутреннего проводника и внешней оболочки кабеля в условиях электромагнитного поля на разных частотах тока.
Ключевые слова: электромагнитное поле, частота тока, плотность тока, напряженность магнитного поля, распределения, коаксиальный кабель.

Введение

Актуальная проблема современной малой электроэнергетики – это передача электроэнергии по линиям электропередачи (ЛЭП) на небольшие расстояния для энергосбережения и обеспечения электроснабжения малых электропотребителей. Для передачи электроэнергии на указанные расстояния применяется обычно трёхфазная система передачи электрической энергии на промышленной частоте. У предоставленного метода есть много недостатков: крупные потери электроэнергии в проводах, частые короткие замыкания проводов, большое потребление цветных металлов. С целью решения данной проблемы возможно использовать однопроводную систему передачи электроэнергии, что позволит снизить материальные затраты на электротехническое оборудование, ЛЭП и трансформаторы (значительно уменьшаются их габариты). В данной работе приводятся результаты моделирования и исследований параметров электромагнитного поля в коаксиальной кабельной линии на разных частотах тока при передаче электроэнергии.

Результаты исследований

Электромагнитное поле в коаксиальной линии заключено в пространстве между внутренним, т.е. центральным проводником, и наружным проводником,

который называют ещё внешним проводником или оболочкой. При передаче по коаксиальной линии высокочастотной энергии по проводникам её текут токи, которые благодаря поверхностному эффекту сосредоточены в проводниках неравномерно. Благодаря этому свойству коаксиальная линия является полностью экранированной линией передачи электромагнитных волн.

Геометрическими параметрами коаксиальной линии, которые определяют её электрические свойства, являются: диаметр внутреннего проводника, внутренний диаметр оболочки и длина проводника. Внутренний проводник отделен от оболочки слоем диэлектрика с некоторой толщиной. В качестве диэлектрика обычно применяется полиэтилен или фторопласт.

Способность коаксиальной линии (пары) пропускать широкий спектр частот конструктивно обеспечивается коаксиальным расположением внутреннего и внешнего проводников. Особенности распространения электромагнитной энергии по коаксиальной паре обусловлено возможностью уплотнения в широком спектре частот и ставят высокочастотные связи в преимущественное положение по сравнению с низкочастотными. Взаимодействие электромагнитных полей внутреннего и внешнего проводников коаксиальной пары таково, что внешнее поле почти равно нулю.

Высокая вычислительная сложность учета скин-эффекта аналитическим методом проявляется даже в простейших случаях [1-4]. Например, даже простейший случай цельного цилиндрического провода требует вычисления специальной функции Бесселя от комплексного аргумента [1-3]. Но насколько оправданы игнорирование и использование только простейших формул его учета. На этот вопрос могли бы ответить численные расчеты, но исследователи почему-то игнорируют такую возможность [5-8]. Однако данная тематика с использованием численных методов разрабатывалась и использовалась в специализированных работах [9-18]. Следует отметить, что указанный скин-эффект выражен более сильно в области высоких частот. В области низких частот скин-эффект и распределения плотности тока исследовались с помощью численных методов в сталеалюминиевых проводах (повивах) на промышленной частоте в работах [9].

В работах [19, 20] не рассматривались количественные распределения плотности тока и другие параметры электромагнитного поля по толщине центрального проводника и оплетки коаксиального кабеля.

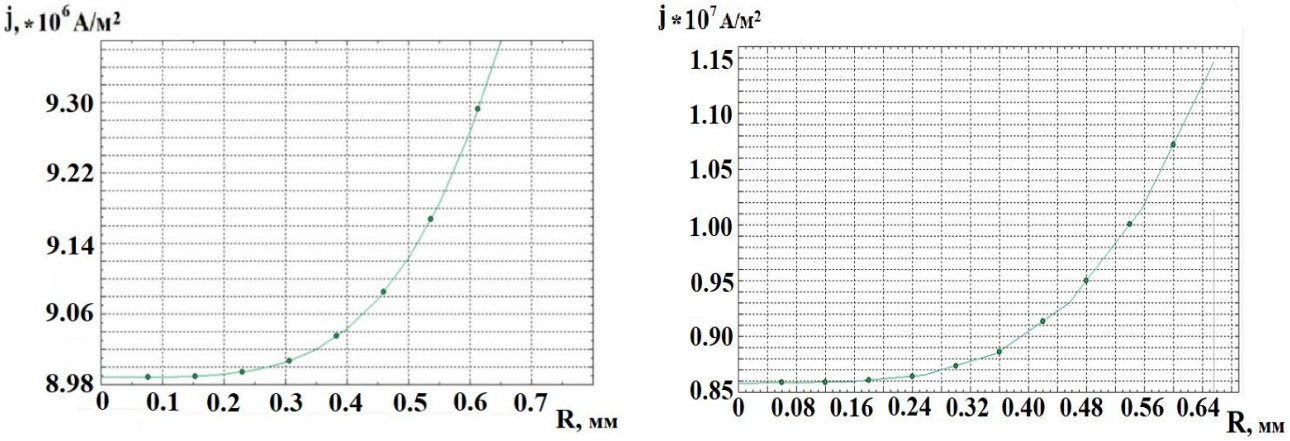
В данной работе исходными данными в пакете программ Elcut для расчета параметров электромагнитного поля повышенной частоты в коаксиальном кабеле РК-75-7 с изоляцией из фторопласта являются: диаметр внутреннего проводника кабеля 1.3 мм, наружный диаметр кабеля 8.6 мм, длина коаксиальной кабельной линии 2.5 км, в начале коаксиальной линии напряжение 1100 В и ток 12 А.

Разработаны модель и алгоритм решения электромагнитной задачи с учетом геометрии коаксиального кабеля в пакете программ Elcut с использованием метода конечных элементов.

С использованием математического моделирования в пакете программ Elcut получены распределения плотности тока во внутреннем проводнике (рис.

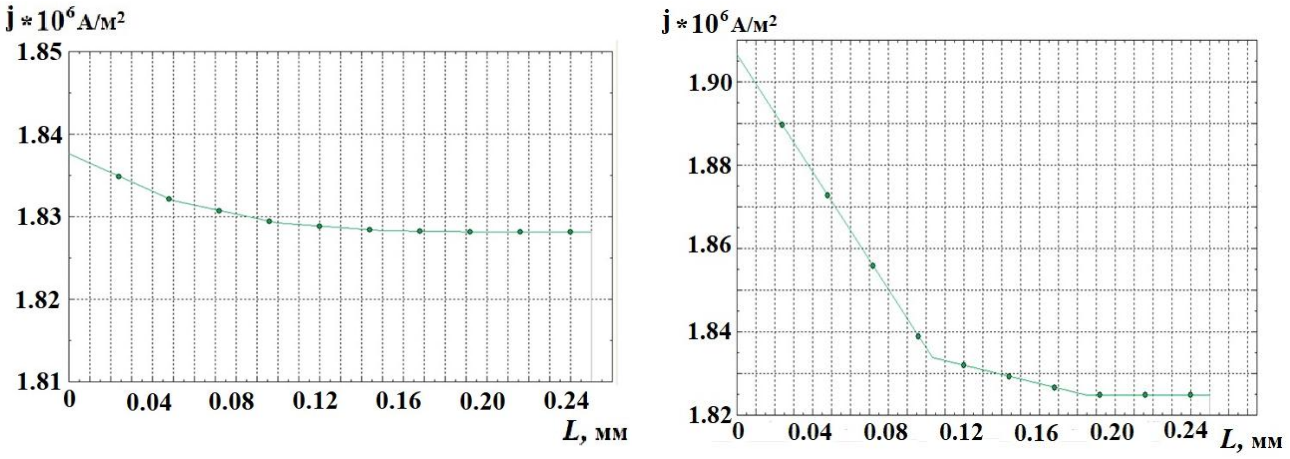
1) и во внешней оболочке (рис. 2) коаксиального кабеля РК-75-7 и напряженности магнитного поля (рис. 3) и плотности тока в коаксиальном кабеле (рис. 4) на разных частотах тока.

Анализ полученных результатов показывает, что при увеличении частоты тока скин-эффект увеличивается и, соответственно, увеличивается плотность тока и изменяются распределения плотности тока в жиле и оболочке коаксиального кабеля.



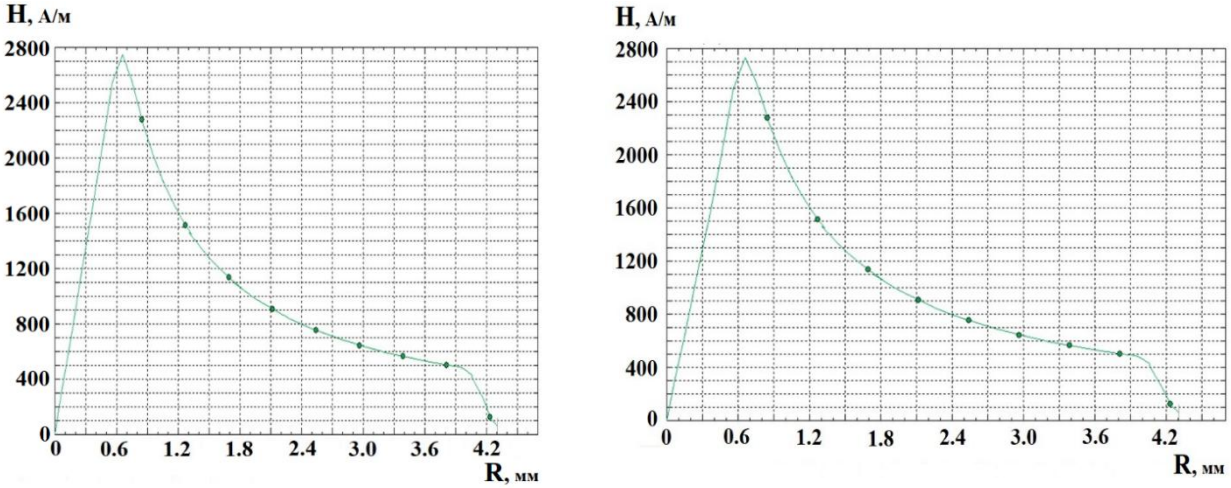
а) *б*)

Рисунок 1 – Распределение плотности тока по радиусу внутреннего проводника коаксиального кабеля: *а* – 10 кГц, *б* – 30 кГц



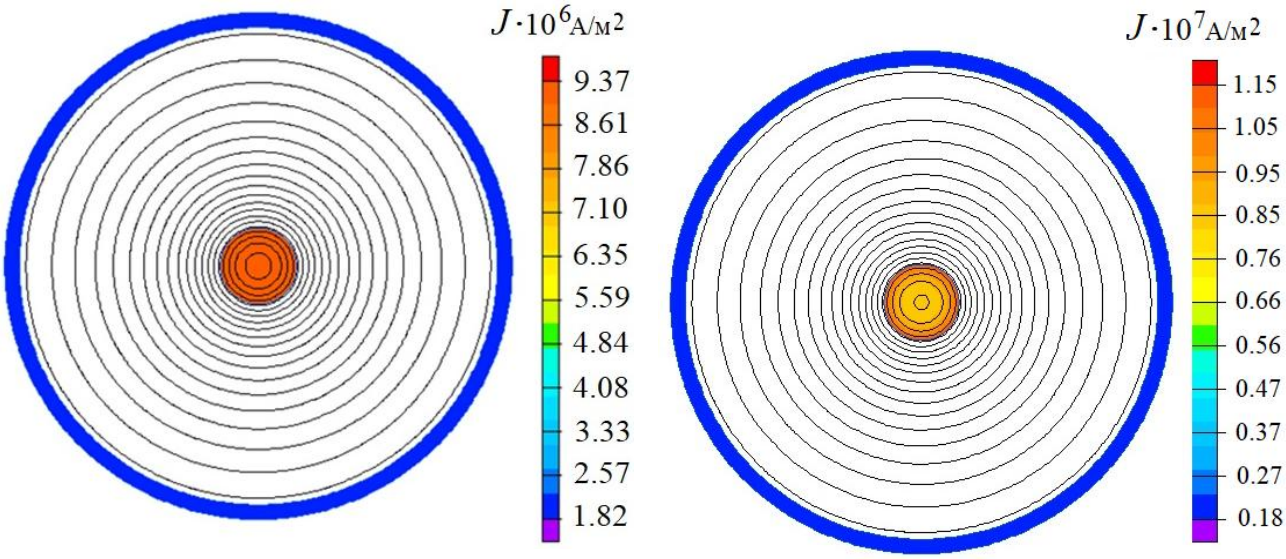
а) *б*)

Рисунок 2 – Распределение плотности тока по толщине оболочки коаксиального кабеля: *а* – 10 кГц, *б* – 30 кГц



а) *б*)

Рисунок 3 – Распределение напряженности магнитного поля в коаксиальном кабеле:
а – 10 кГц, *б* – 30 кГц



а) *б*)

Рисунок 4 – Распределение плотности тока в коаксиальном кабеле:
а – 10 кГц, *б* – 30 кГц

Заключение

Разработаны модель и алгоритм решения электромагнитной задачи с учетом геометрии коаксиального кабеля в пакете программ Elcut с использованием метода конечных элементов. Представлены результаты моделирования и исследований параметров электромагнитного поля в коаксиальном кабеле на разных частотах тока при передаче электроэнергии повышенной частоты. Получены результаты исследований параметров электромагнитного поля: распределения плотности тока и напряженности магнитного поля в коаксиальном кабеле. Проведен анализ распределений плотности тока и напряженности магнитного поля в слоях внутреннего проводника и внешней оболочки коаксиального кабеля на разных частотах тока.

Список литературы

1. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники: В 3-х т. Учебник для вузов. Т. 3. 4-е изд. СПб.: Питер, 2004. 377 с.
2. Демирчян К.С., Кузнецов И.Ф., Боронин В.Н. Поверхностный эффект в электроэнергетических устройствах. - Ленинград : Наука : Ленингр. отд-ние, 1983. - 280 с.
3. Измайлов С.В. Курс электродинамики. Учебник для физико-математических факультетов педагогических институтов. М. 1962. 439 с.
4. Мищенко, Е. Н. Скин-эффект в обмотках индукторов силовых устройств / Е. Н. Мищенко, В. Ф. Лопатин // Инновационные технологии в машиностроении, образовании и экономике. 2018. №4-1(10). С. 5-13.
5. Liu G., Li Y., Qi K., Yu J., Cai Y. Sag calculation difference caused by temperature difference between the steel core and outer surface of overhead transmission lines // Proceedings of the 2016 Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC-2016. 2016. pp. 1-5.
6. Chavez O., Godinez F., Mendez F., Aguilar A. Prediction of temperature profiles and ampacity for a monometallic conductor considering the skin effect and temperature-dependent resistivity // Applied Thermal Engineering. 2016. № 109. pp. 401-412.
7. Girshin S.S., Bigun A. Ya., Kropotin O. V., Shepelev A. O., Tkachenko V.A., Petrova E. V., Goryunov V.N. Comparison approximate analytical solution of the nonlinear differential equation of heating with numerical //Journal of Physics: Conference Series. 2019. № 1260. pp. 1-7.
8. Bigun A.Ya., Sidorov O.A., Osipov D. S., Girshin S.S., Goryunov V.N., Petrova E.V. Mode and climatic factors effect on energy losses in transient heat modes of transmission lines // Journal of Physics: Conference Series. 2018. № 944. pp. 1-5.
9. Сухичев М.И., Скочко Е.М. К вопросу о необходимости учета скин-эффекта для сталеалюминиевых проводов // Промышленная энергетика. 2023. № 1. С. 2-8.
10. Ying Z., Du Z., Feng K., Liu Y., Wu J. Radial thermal circuit model and parameter calculation method for high voltage overhead transmission line // Diangong Jishu Xuebao / Transactions of China Electrotechnical Society. 2016. № 4. pp. 13-21.
11. Liu G., Guo D., Li Y., Wang Y., Chen Y. Calculation of Current Distribution and Analysis of Current Carrying Capacity for Overhead Transmission Line // Huanan Ligong Daxue Xuebao / Journal of South China University of Technology (Natural Science). 2018. № 4. pp. 91-97.
12. Liu G., Li Y., Chen Y., Dong X. Calculation and experiment verification on temperature distribution and radial temperature of overhead transmission line based on electromagnetic-thermal coupling fields // Dianli Xitong Baohuyu Kongzhi / Power System Protection and Control. 2018. № 7. pp. 7-13.
13. Сухичев М.И. Коронный разряд и электростатический коэффициент гладкости провода // Электричество. 2019. № 3. С. 31-35.
14. Kuvaldin A.B., Lepeshkin A.R., Ilyinskaya O.I., Fedin M.A., Kuleshov A.O. Simulation of thermal state of parts with ceramic coatings in a high frequency electromagnetic field // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 12. pp. 1507-1509.
15. Fedin M.A., Kuvaldin A.B., Lepeshkin A.R., Kondrashov S.S., Fedina S.A., Zhmurko I.E. An integrated approach to the mathematical description of induction heating installations using information technologies // 6th International conference on information technologies in engineering education, Inforino 2022 – proceedings. 6. 2022.
16. Лепешкин А.Р., Ильинская О.И., Кувалдин А.Б., Лепешкин С.А. Исследование нагрева вращающихся дисков турбин в электромагнитном поле, созданном с использованием специальных индукторов и сильных постоянных магнитов // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2020. № 2. С. 112-122.
17. Lepeshkin A.R., Ilinskaya O.I., Kuvaldin A.B., Lepeshkin C.A., Nazarov V.V., Guanghua Z. Method for modeling the modes of induction heating of turbine blades // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Сер. "Advanced Problems of Electrotechnology" 2020. С. 012022.
18. Kuvaldin A.B., Lepeshkin A.R. A high-speed induction heating of metal cylindrical blanks taking into account thermal stress and elasticity and plasticity properties // Elektrichestvo. 2002. №

6. С. 30-36.
19. Фридман Б. Э., Медведев М. В. Поверхностный эффект в коаксиальных кабелях импульсных установок // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2019. № 5, С. 66–79.
20. Nahman N.S., Holt D.R. Transient Analysis of Coaxial Cables Using the Skin Effect Approximation // IEEE Trans. Circuit Theory, 1972, vol. 19, No. 5, pp. 443–451.

STUDY OF ELECTROMAGNETIC FIELD PARAMETERS IN A COAXIAL CABLE AT DIFFERENT CURRENT FREQUENCIES

A.R. Lepeshkin, M.A. Fedin, A.B. Kuvaldin, M.A. Bulatenko,
M.S. Osipova, M.L. Zotov, A.A. Ushakov
National Research University «MPEI», Moscow, Russia
E-mail: lepeshkin.ar@gmal.com

The results of modeling and research of the electromagnetic field parameters in a coaxial cable at different current frequencies during transmission of high-frequency electric power are presented. The parameters of the electromagnetic field and the distribution of the current density in the coaxial cable are obtained. The analysis of the distributions of the current density and the magnetic field strength in the surface layers of the inner conductor and the outer sheath of the cable under the conditions of an electromagnetic field at different current frequencies is carried out.
Key words: electromagnetic field, current frequency, current density, magnetic field strength, distribution, coaxial cable.

УДК 621.365.5-539.4

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ИНДУКТОРОВ ПРИ НАГРЕВЕ ДИСКОВ ТУРБИН

А.Р. Лепешкин[1], М.А. Федин[1], А.Б. Кувалдин[1], А.В. Данченко[1], Ц. Ху[1], Ч. Гуанхуа[2]
[1]ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», Москва, Россия
[2]Северо-Западный политехнический университет, Сиань, КНР
E-mail: lepeshkin.ar@gmal.com

Моделирование теплового состояния вращающихся дисков турбин газотурбинных установок с использованием системы многозонного индукционного нагрева при термоциклических испытаниях на разгонных стендах является актуальной задачей. В многозонной системе индукционного нагрева необходимо учитывать взаимное влияние электромагнитных полей индукторов при нагреве дисков турбин, которое обусловлено наличием магнитной связи между контурами. Разработана методика моделирования индукционного нагрева и теплового состояния дисков турбин и приведены результаты исследований магнитной связи между контурами, содержащих индукторы, подключенных к источникам переменной частоты – тиристорным преобразователям частоты. Приведены рекомендации по выбору частот тока в индукторах с учетом магнитной связи для обеспечения режимов работы системы индукционного нагрева и теплового состояния вращающихся дисков турбин при испытаниях на разгонном стенде.

Ключевые слова: электромагнитное поле, индукционный нагрев, диск турбины, магнитная связь, тепловое состояние, частота тока.

Введение

Исследованиям индукционного нагрева вращающихся дисков и других вращающихся деталей и изделий посвящены работы [1-10].

Использование средней частоты тока 2000-2500 Гц (глубинного нагрева) при моделировании эксплуатационных тепловых режимов дисков турбин газотурбинных установок на стендах приводит к значительному снижению точности моделирования термонапряженного состояния дисков [2, 4-6]. Поэтому в некоторых зонах диска (обод, полотно) требуется повышение частоты тока до 6-10 кГц.

В процессе испытаний необходимо управлять мощностью нагрева, поступающей в нагреваемое изделие. В качестве источников тока повышенной частоты применяются электромашинные или тиристорные преобразователи частоты (ТПЧ). Система нагрева с питанием от электромашинного преобразователя обладает рядом недостатков, одним из которых является невозможность раздельного управления мощностью в индукторах.

Некоторыми направлениями улучшения работы нагревательного электрооборудования на разгонных стендах для обеспечения скоростных режимов нагрева изделий, по¬вышения точности моделирования термонапряженного состояния являются повышение частоты тока, применение источников питания переменной частоты (ТПЧ и др.) и системы управления нагревом дисков.

Технологический процесс моделирования термонагружения диска при термоциклических испытаниях на разгонном стенде заключается в разгоне диска до заданной максимальной частоты вращения с одновременным его нагревом, в выдержке на максимальной частоте вращения при заданном температурном поле, в торможении до заданной минимальной частоты вращения с одновременным охлаждением диска, в выдержке на минимальной частоте вращения при минимальной заданной температуре, в повторении указанных операций заданное число раз – циклов.

Для реализации указанных эксплуатационных скоростных режимов нагрева и термонагружения дисков турбин с учетом проведенного анализа испытательного оборудования разработана методика разгонных и термоциклических испытаний и усовершенствован разгонный стенд с использованием индукционного нагрева.

В данной работе приведены исследования системы индукционного нагрева дисков с источниками питания переменной частоты на основе ТПЧ, работающих на частоте 2000 10000 Гц. Представлен сравнительный анализ электрических характеристик указанной системы с ТПЧ при термоциклических испытаниях дисков турбин авиационных ГТД на разгонном стенде. Рассматриваются также вопросы по расчету и выбору режимов индукционного нагрева с учетом взаимного влияния электромагнитных полей индукторов и параметров источников питания переменной частоты и этому посвящена данная работа.

Объект исследования представляет собой сложную систему, состоящую из осесимметричного диска переменной толщины с конкретными механическими, теплофизическими и электрическими свойствами его материала, по радиусу которого размещаются индукторы с разными зазорами (рис. 1).

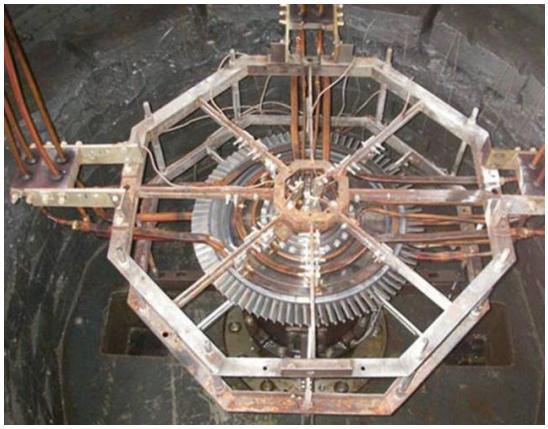
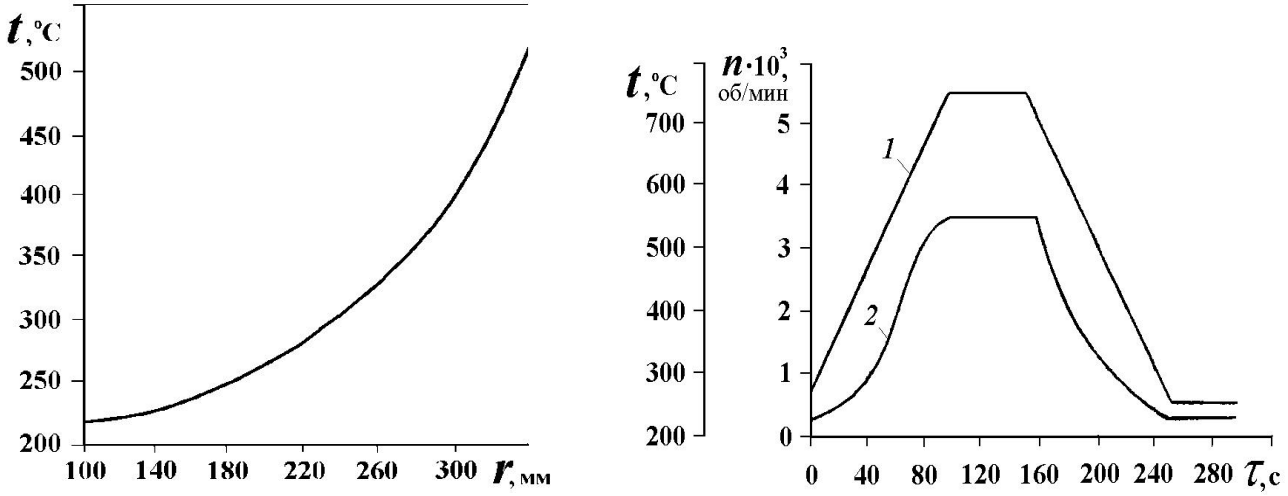


Рисунок 1 – Диск турбины с лопатками и система индукторов, установленные в испытательной камере разгонного стенда

При моделировании теплового и термонапряженного состояния изделий на максимальных режимах необходимо получить температурное поле диска путем нагрева его отдельных зон с помощью указанных индукторов, питаемых токами повышенной частоты (рис. 2).

На рис. 3 показана циклограмма нагружения диска турбины по частоте вращения и изменения температуры обода диска внутри испытательного термоцикла в соответствии с заданным техническим заданием.



а) *б)*

Рисунок 2. Заданное распределение температуры по радиусу диска турбины (*а*) и изменение частоты вращения и температуры обода диска турбины (*б*)

Исследование скоростных режимов индукционного нагрева и процесса регулирования температурного поля изделий требует экспериментальных исследований электромагнитных процессов в системе индуктор – нагреваемое изделие с определением эквивалентных параметров и энергетических соотношений в нагревательном устройстве. В частности, необходим сравнительный анализ мероприятий по повышению эффективности системы многозонного индукционного нагрева с источниками переменной частоты - ТПЧ и исследования механизма взаимного влияния электромагнитных полей индукторов (магнитных связей) на перераспределение мощности между каналами управления мощностью нагрева при регулировании температурного поля изделий и дисков. Система многозонного индукционного нагрева предназначена для создания и регулирования температурного поля сложной конфигурации в металлическом изделии.

Результаты исследований

На данном разгонном стенде были внедрены источники питания переменной частоты – три тиристорных преобразователя с рабочей частотой 2 ÷ 10 кГц, каждый мощностью по 100 кВт, собранных по схеме последовательного резонансного инвертора. Для увеличения числа каналов управления применен частотно-импульсный способ регулирования мощности, при котором нагрузкой каждого преобразователя служат два последовательно соединенных колебательных контура; перевод мощности из одного контура в другой достигается изменением рабочей частоты инвертора. Каждый нагрузочный контур образован согласующими трансформаторами ТЗ-800 с подключенными ко вторичной обмотке индукторами и батареей компенсирующих емкостей. На рис. 3,*а* показаны, установленные трансформаторы ТЗ-800 на крышке испытательной камеры разгонного стенда и

соединительные водоохлаждаемые кабели (от ТПЧ), подключенные к указанным трансформаторам. На рис. 3,*б* представлена пультовая разгонная стенда с компьютерными системами измерений и управления.

а) *б*)

Рисунок 3 – Трансформаторы ТЗ-800, к которым подключены индукторы и соединительные водоохлаждаемые кабели (*а*), электротехнологическая пультовая разгонного стенда (*б*)

Контроль температуры осуществляется с помощью термопар, зачеканенных в материал изделия (диска), или бесконтактных средств измерений (фотодиодных пирометров). При автономном режиме работы электротермической индукционной установки информация о температуре поступает в компьютер, где сравнивается с заданной. Управление преобразователем осуществляется изменением его рабочей частоты с выбором одной из двух фиксированных частот. Температурное поле создается путем нагрева отдельных зон изделия с помощью индукторов, питаемых токами повышенной частоты. Однако процесс воспроизведения температурного поля изделия при индукционном нагреве осложняется из-за взаимного влияния электромагнитных полей - магнитной связи между индукторами соседних зон.

Действие магнитной связи заключается во взаимном переносе энергии между контурами, что нарушает регулирование мощности нагрева и ухудшает режим работы источников питания. Для ТПЧ связь с соседними индукторами равносильна появлению в нагрузочной цепи источников ЭДС с амплитудой, пропорциональной величине магнитной связи, что обнаруживается при возникновении биений токов и напряжения. Магнитная связь искажает энергетические характеристики нагрузочных контуров, и это необходимо учитывать при выборе рабочих частот источников питания.

По результатам проведенных расчетов определены коэффициенты распределения мощности α_p и магнитной связи k_{cb} в контурах ТПЧ.

Можно оценить эффективность регулирования мощности в исследуемых контурах. На рис. 4 приведены зависимости собственных резонансных частот контуров от коэффициента магнитной связи.

Получены зависимости (рис. 5) коэффициента распределения мощности от отношения рабочих частот при различных значениях коэффициента магнитной связи. Зависимости приведены для худшего случая передачи энергии из контура низшей частоты.

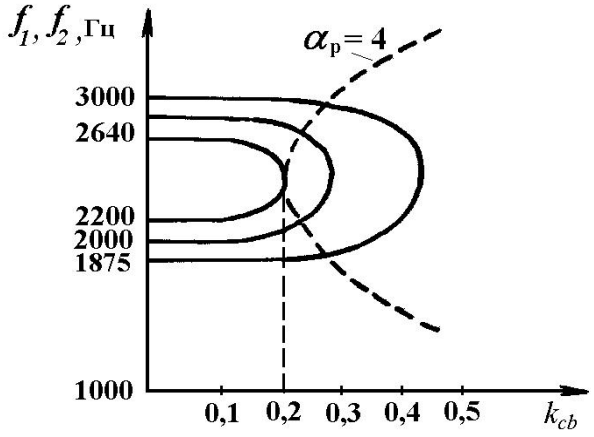


Рисунок 4 – Зависимости резонансных частот контуров от коэффициента магнитной связи

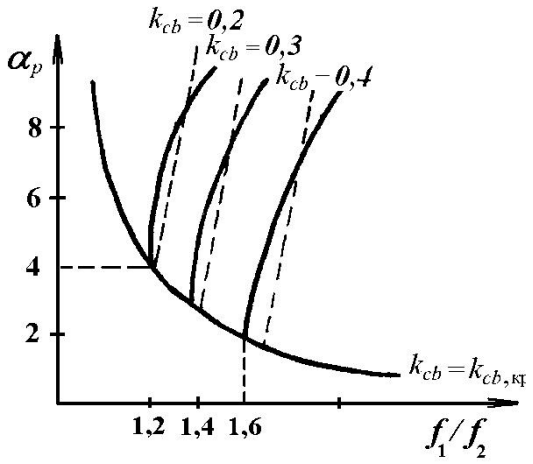


Рисунок 5 – Зависимости коэффициента распределения мощности от отношения рабочих частот при различных значениях коэффициента магнитной связи

Здесь же дана кривая зависимости α_p от $\frac{f_1}{f_2}$ при критических значениях коэффициента связи. Получено, что эффективное регулирование мощности возможно при определенных значениях коэффициента распределения α_p. При полученном минимальном значении $\alpha_p = 4$ кривая ограничения резонансных частот в зависимости от коэффициента связи k_{cb} приведена на рис. 4. На основе проведенных расчетов было получено расчетное распределение частоты тока по радиусу диска (рис. 6), которое было использовано при скоростном индукционном нагреве с ТПЧ при термоциклических испытаниях.

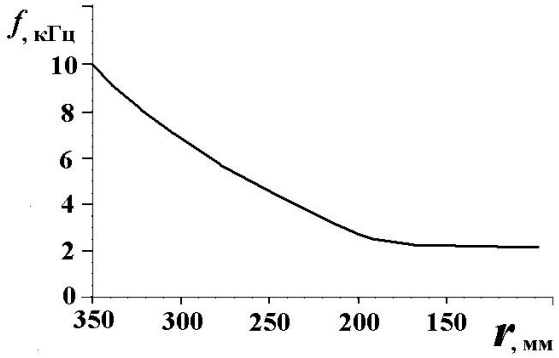


Рисунок 6 – Расчетное распределение частоты тока по радиусу диска

Для проверки расчетной эффективности регулирования мощности в контурах была экспериментально исследовала зависимость коэффициента распределения мощности от отношения рабочих частот при коэффициенте магнитной связи k_{cb} = 0,3, коэффициента затухания k_z = 0,2 на частотах 2÷10 кГц. Результаты эксперимента согласуются с результатами расчетов.

Анализ полученных зависимостей позволяет сделать следующие выводы:

- при $k_{cb} < 0,10 \div 0,15$ обеспечивается эффективное регулирование мощности при любых частотах; выбор частот и параметров элементов контуров производится при условии получения резонансов в системе;

- при $k_{cb} > 0{,}2$ настройка системы определяется необходимостью получения минимального коэффициента распределения мощности. Максимально допустимое значение $k_{cb,max} = 0{,}4$ ограничивается возможностями перестройки применяемых ТПЧ.

Заключение

Разработана методика испытаний дисков на разгонном стенде с использованием источников питания переменной частоты. При повышении скорости нагрева и изменения частоты вращения на разгонном стенде затраты на электроэнергию снижаются в 2-3 раза и сокращаются сроки испытаний дисков турбин. Предложены схемы подключения источников питания переменной частоты к нагрузке. Внедрены мероприятия для повышения эффективности и улучшения характеристик системы многозонного индукционного нагрева вращающихся дисков турбин на разгонном стенде с учетом взаимного влияния электромагнитных полей (магнитной связи) индукторов. Получены рекомендации по эффективному регулированию мощности источников питания переменной частоты.

Список литературы

1. Лепешкин А.Р., Ильинская О.И., Кувалдин А.Б., Лепешкин С.А. Исследование нагрева вращающихся дисков турбин в электромагнитном поле, создаваемом с помощью специальных индукторов и сильных постоянных магнитов // Известия РАН. Энергия. 2020. № 2. С. 112-122.
2. Кувалдин А.Б., Лепешкин А.Р. Выбор режимов индукционного нагрева и индукторов для моделирования термонапряженного состояния дисков турбин // Электротехника. 1998. № 5. - С. 39-46.
3. A.R. Lepeshkin, A.B. Kuvaldin and M.A. Fedin et. al. Modeling the heating of rotating disks in an electromagnetic field with the use of permanent magnets // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2021. Vol. 85. No 11. pp. 1195-1197.
4. Маннанов Э.Р., Галунин С.А., Никаноров А.Н., Наке Б., Козулина Т.П. Разработка индукционных систем для нагрева дисков // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2019. Т. 12. № 2. С. 23-31.
5. E.R. Mannanov, A.A. Muratov and S.A. Galunin. Numerical modeling in heating systems by rotation // Electro. Electrical engineering, power industry, electrical industry. 2016. No. 1, pp. 20-22.
6. E. Mannanov, A. Muratov and S. Galunin. Numerical investigation of spatial control tools of temperature distribution in the heating systems by rotation // Research and Development of Young Scientists: The Collected Reports of the 6th International Youth Scientific and Practical Conference, Novosibirsk, 16.10.2015. 2015. pp. 71-75.
7. Mannanov E., Galunin S., Nikanorov A., Nacke B. Simulation algorithm for induction heating of rotated workpieces with complex shape // XVIII International UIE - Congress “Electrotechnologies for Material Processing”, Hannover (Germany), June 6-9, 2017, 2017. pp. 491-496.
8. Mannanov E.R., Muratov A.A., Galunin S.A. Numerical modeling in heating systems by rotation // Electro. Electrical engineering, power industry, electrical industry. 2016. No. 1, pp. 20-22.
9. Zgraja J. Simplified simulation technique of rotating, induction heated, cylinder rolls for study of temperature field control // Open Phys. 2018. Vol. 16. pp. 326–331.
10. Fraczyk A. and Kucharski J. Surface temperature control of a rotating cylinder heated by moving inductors // App. Therm. Eng., 2017. Vol. 125, pp. 767-779.

STUDY OF THE MUTUAL INFLUENCE OF ELECTROMAGNETIC FIELDS OF INDUCTORS DURING HEATING OF TURBINE DISKS

A.R. Lepeshkin[1], M.A. Fedin[1], A.B. Kuvaldin[1], A.V. Danchenko[1], Q. Hu[1], C. Guanghua[2]

[1]National Research University «MPEI», Moscow, Russia

[2]Northwestern Polytechnical University, Xi'an, China

E-mail: lepeshkin.ar@gmal.com

Modeling the thermal state of rotating turbine disks of gas turbine units using a multi-zone induction heating system during thermal cycling tests on acceleration rigs is an urgent task. In a multi-zone induction heating system, it is necessary to take into account the mutual influence of electromagnetic fields of inductors during heating of the turbine disks, which is due to the presence of magnetic coupling between the circuits. A technique for modeling induction heating and the thermal state of turbine disks has been developed and the results of studies of the magnetic coupling between circuits containing inductors connected to variable frequency sources - thyristor frequency converters - are presented. The recommendations are given for selecting current frequencies in inductors taking into account the magnetic coupling to ensure the operating modes of the induction heating system and the thermal state of rotating turbine disks during tests on an acceleration rig.

Key words: electromagnetic field, induction heating, turbine disk, magnetic coupling, thermal state, current frequency.

УДК 621.3

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ И ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧИСЛА ФАЗ ДЛЯ ОДНОФАЗНЫХ ИНДУКЦИОННО-РЕЗИСТИВНЫХ НАГРЕВАТЕЛЕЙ

М.А. Федин, А.Р. Лепешкин, Е.В. Качалина,
С.А. Федина, Д.А. Жгутов, М.Ф. Тупеков
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», Москва, Россия
E-mail: KachalinaYV@mpei.ru

Настоящая работа посвящена разработке и моделированию электромагнитных полей в электромагнитном преобразователе числа фаз, применяемых для питания однофазных индукционно-резистивных нагревателей. Разработана численная математическая модель электромагнитного поля и получены дифференциальные результаты расчета лабораторного электромагнитного преобразователя числа фаз. Предложено схемотехническое решение и конструкция лабораторного электромагнитного преобразователя числа фаз для электропитания физической модели индуктивно-резистивной системы в составе экспериментального стенда.

Ключевые слова: электромагнитное поле, индукционно-резистивная система нагрева, промышленные трубопроводы, моделирование, магнитопровод.

Введение

На сегодняшний день индукционно-резистивные системы нагрева, основанные на использовании поверхностного эффекта в электрических проводниках переменного тока, наиболее оптимизированы под задачи электрообогрева протяженных трубопроводов. Они находят широкое применения для электрообогрева протяженных промышленных трубопроводов для нефти, природного газа, мазута, серы и др. Использование таких систем способствует существенному повышению энергоэффективности систем промышленного электрообогрева.

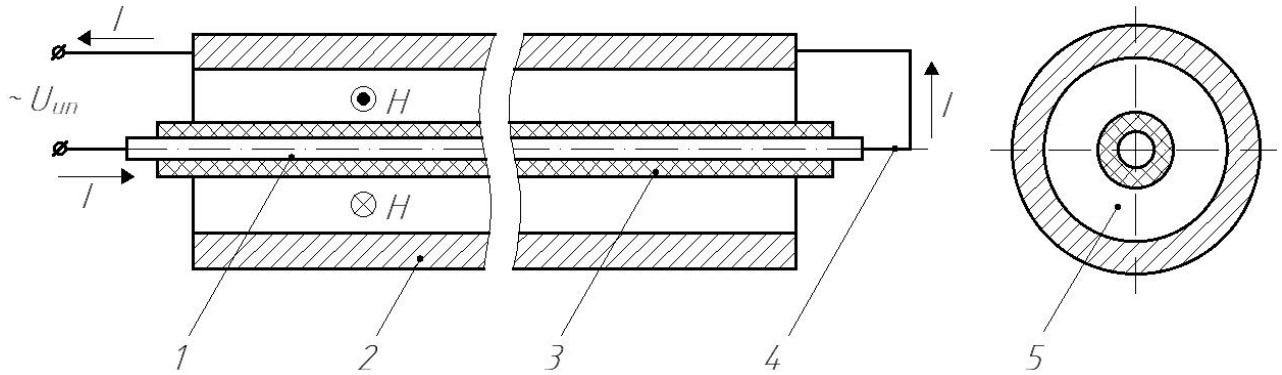


Рисунок 1 – Индукционно-резистивная система нагрева:
1– проводник; 2– стальная труба; 3 – электрическая изоляция; 4 – электрическое соединение; 5 – зазор между проводником и трубой

Принцип работы индукционно-резистивной системы нагрева (ИРСН) подробно рассмотрен в статье [1].

ИРСН являются достаточно мощными однофазными нагрузками, что обуславливает необходимость использования специальных симметрирующих трансформаторов – преобразователей числа фаз [2].

1. Электромагнитный преобразователь числа фаз

Вариантом решения задачи симметрирования ИРСН является использование в схеме электроснабжения специального трансформатора, соединенного с использованием схемы трансформатора Скотта (рис. 2). В современной электротехнике и электроэнергетике система трансформаторов Скотта (Т-схема) применяется при питании мощных однофазных или двухфазных потребителей, или группы потребителей от трехфазной сети для минимизации, возникающей при этом токовой несимметрии.

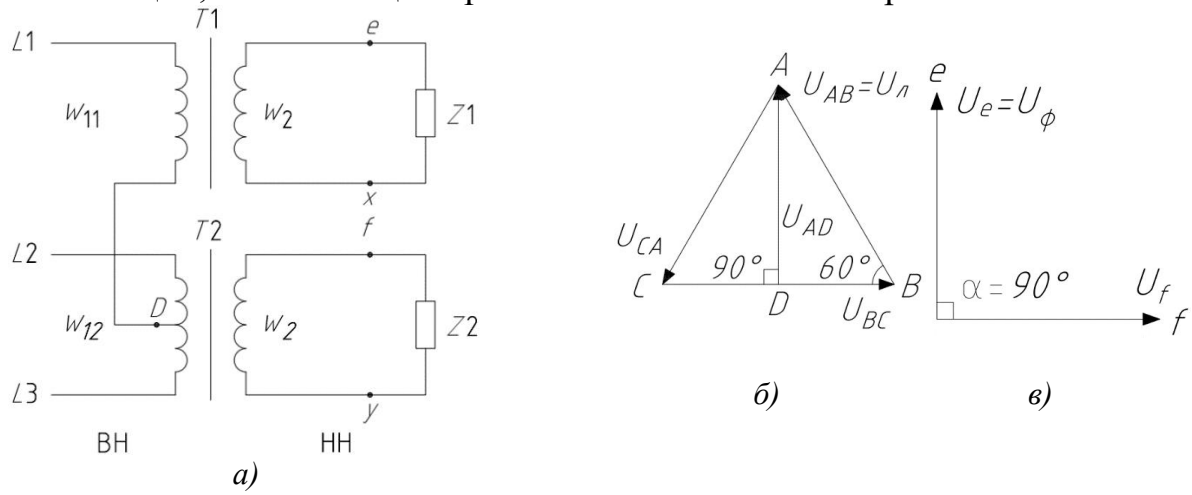


Рисунок 2 – Схема трансформатора Скотта

Трансформаторы – базовый Т1 и высотный Т2 – однофазные с одинаковой мощностью. В середине первичной обмотки трансформатора Т1 изготавливается ответвление, предназначенное для соединения с концом первичной обмотки трансформатора Т2. Принцип действия трансформатора Скотта рассмотрен подробно в учебном пособии [3].

Преимуществом применения трансформаторной схемы Скотта является то, что она позволяет применять стандартные преобразователи энергии с количеством фаз, кратным трем, для уменьшения токовой несимметрии в трехфазной сети при резко переменных нагрузках [4].

2. Конечно-элементное моделирование электромагнитных полей трансформатора в программе COMSOL

В работе проведено конечно-элементное моделирование электромагнитных полей трансформатора в программе COMSOL [5].

Для расчета электромагнитного преобразователя частоты, входящего в состав электрооборудования экспериментального стенда, с использованием разработанной авторами программы [6] был проведен расчет электрической

нагрузки – ИРСН со следующими характеристиками: ток индуктора –150 А, ИРН – труба 32 х 3 из горячедеформированной стали 20 (в соответствии с ГОСТ 8732-78) длиной 7,72 м, температура трубы – 29,8°С. Результаты расчета такой физической модели ИРСН: напряжение питания – 5 В, суммарная активная мощность – 695 Вт, напряжение на поверхности 0,15 В, $cos\varphi$ = 0,886.

Тогда исходные данные для моделирования: мощность электромагнитного преобразователя числа фаз (симметрирующего трансформатора) – 750 ВА; напряжение обмотки ВН – 190 В; ток нагрузки – 150 А ; число витков ВН/НН – 338/9; сечение проводов ВН/НН – 1,32/2,5 мм^2; кривая намагничивания для электротехнической стали.

Представленные данные являются исходными данными для проектирования источника питания физической модели ИРСН в составе экспериментального стенда, построенного по модернизированной схеме Скотта и представляющий из себя конструкцию из двух трансформаторов: базового и высотного.

В качестве материалов заданы: сталь для магнитопровода, медь для катушек, воздух для расчетной области. В качестве характеристики стали была задана основная кривая намагничивания стали NV30S-120.

В качестве уравнений математической модели для расчетной области и магнитопровода были использованы уравнения 1 – 4 , для катушек использовались уравнения инициализации катушек (формулы 6 – 7). Также для вычисления векторного потенциала электромагнитного поля использовалась Кулоновская калибровка векторного магнитного потенциала (формула 5). На поверхностях куба задано граничное условие – магнитная изоляция, а также были заданы начальные условия.

Выбранная конструкция трансформатора обусловлена трудностью в подборе необходимого магнитопровода, а разделение вторичной обмотки на несколько параллельно соединенных колец связано с большим током в обмотке и малым сечением провода (для обеспечения нужной плотности тока).

Для расчета была выбрана форма сетки в виде тетраэдра. Сетка имеет следующие параметры: максимальный размер элементов – 60 мм, минимальный размер элементов – 7,5 мм, количество элементов сетки – 114682.

В качестве первого решателя используется Coil Geometry Analysis, с его помощью определяются параметры катушки, которые используется в общем расчете. В качестве второго решателя используется Frequency Domain.

Математическое описание задачи представлено следующей системой дифференциальных уравнений:

$$E = -j\omega A, \text{ В/м} \quad (1)$$

$$\nabla \times H = J, \text{ А/м}^2 \quad (2)$$

$$B = \nabla \times A, \text{ Тл} \quad (3)$$

$$J = \sigma E + j\omega D, \text{ А/м}^2. \quad (4)$$

Кулоновская калибровка векторного магнитного потенциала:

$$\nabla \times A = 0 \tag{5}$$

Плотность тока в катушке трансформатора:

$$J_e = \frac{N(V_{coil}+V_{ind})}{A \cdot R_{coil}} \cdot e_{coil}, \text{А/м}^2 \tag{6}$$

$$J_e = \frac{NI_{coil}}{A} \cdot e_{coil}, \text{А/м}^2, \tag{7}$$

где E – напряженность электрического поля; ω – угловая частота вращения поля; A – векторный потенциал электромагнитного поля; ∇ – дифференциальный оператор набла; H – напряженность магнитного поля; J – плотность тока ; D – электрическая индукция; B – магнитная индукция; σ – удельная проводимость среды; $J_в$ – плотность тока в катушке; N – количество витков; V_{coil} – напряжение катушки; R_{coil} – сопротивление катушки; I_{coil} – ток катушки.

На рис. 5 представлена упрощенная модель трансформатора для электромагнитного расчета. Обмотки заменены сплошными цилиндрами.

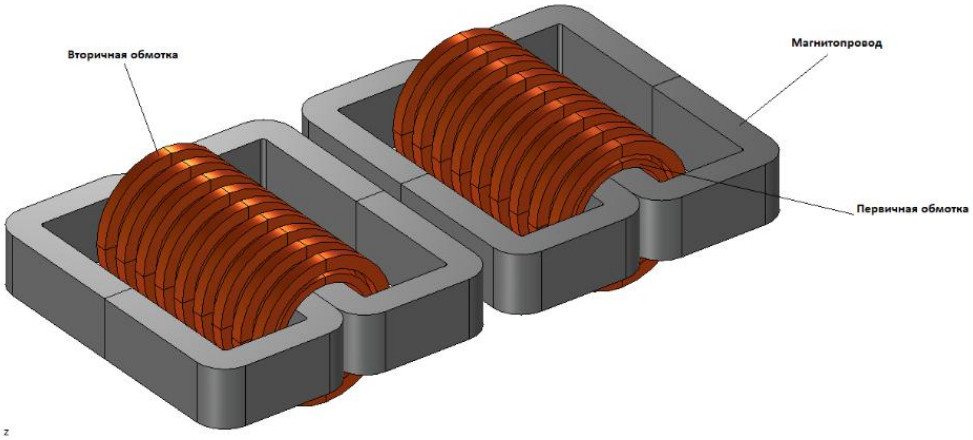


Рисунок 5 – Упрощенная модель трансформатора

На рис. 6 показана картина распределения плотности магнитного потока в сердечнике высотного трансформатора. Рис. 6 позволяет увидеть распределение индукции в магнитопроводе.

Рис.7 показывает осциллограммы токов обмотки высшего и низшего напряжений.

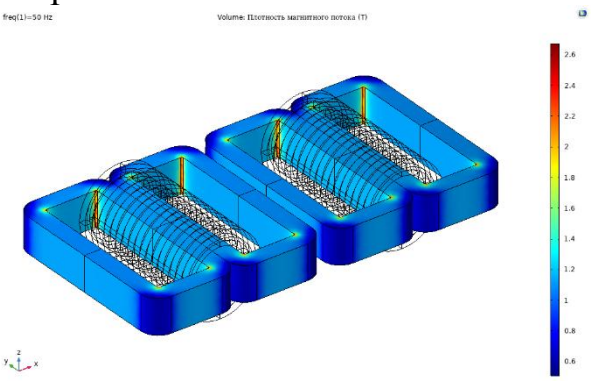


Рисунок 6 – Распределение плотности магнитного потока

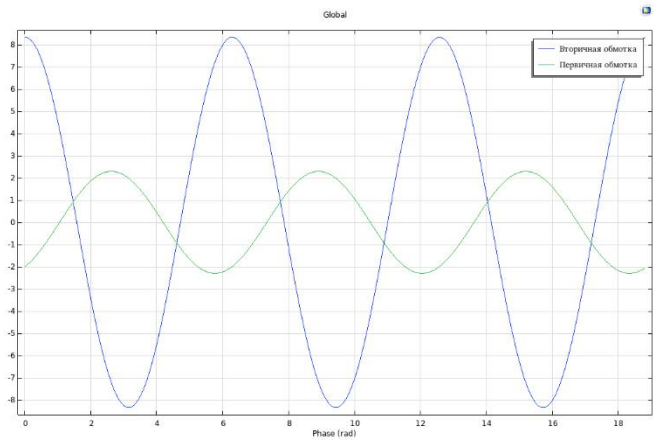


Рисунок 7 – Осциллограммы токов обмоток

Авторами статьи разработан и реализован универсальный экспериментальный стенд для физического моделирования индукционно-резистивных систем нагрева (ИРСН) различных типов, в состав которого вошел рассчитанный симметрирующий трансформатор.

Базовый трансформатор спроектирован в виде однофазного трансформатора (рис. 8) мощностью 750 ВА, работающем на промышленной частоте, напряжение первичной обмотки – 220 В, напряжение и ток вторичной обмотки – 5 В и 150 А соответственно. Первичная обмотка базового трансформатора разделена на две одинаковые катушки, которые, в свою очередь, разделены на полукатушки с числом витков, равным 195. Полукатушки соединяются последовательно, а сами катушки соединяются между собой параллельно. Средние точки катушек соединены вместе, и в этой точке сделана отпайка для соединения с первичной обмоткой высотного трансформатора.

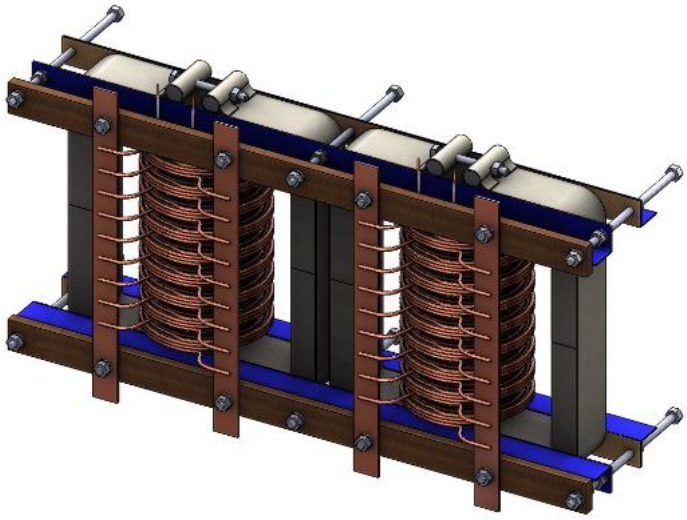


Рисунок 8 – Трехмерная модель высотного и базового трансформаторов

Высотный трансформатор также спроектирован в виде однофазного трансформатора (рис. 8) мощностью 750 ВА, работающем на промышленной частоте, напряжение первичной обмотки – 190 В, напряжение и ток вторичной обмотки – 5 В и 150 А соответственно. Первичная обмотка высотного трансформатора состоит из двух соединенных между собой параллельно катушек с числом витков, равным 338. Соотношение чисел витков первичных обмоток высотного и базового трансформатора составляет 0,866 (в соответствии со схемой Скотта).

Вторичные обмотки трансформаторов конструктивно не отличаются друг от друга и состоят из двух соединенных между собой параллельно катушек с числом витков, равным 9. Габаритные размеры высотного и базового трансформаторов совпадают и имеют следующие значения: длина 475 мм, ширина 229 мм, высота 140 мм, размеры окна составляют 60х176 мм.

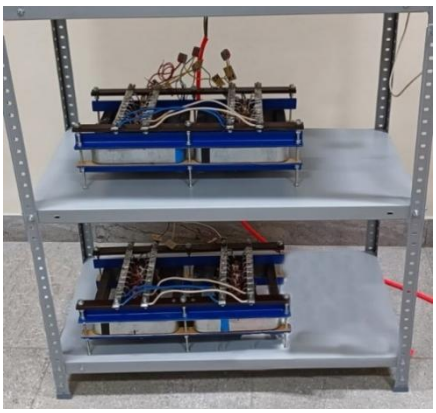


Рисунок 9 – Фотография симметрирующего трансформатора

Заключение

1. Предложено схемотехническое решение и конструкция симметрирующего трансформатора для совместной работы с ИРСН в составе экспериментального стенда.
2. Разработана математическая модель симметрирующего трансформатора, позволяющая моделировать электромагнитные процессы с помощью пакета программ, которые используют метод конечных элементов.
3. С использованием численной модели получены электрические, энергетические и конструктивные характеристики симметрирующего трансформатора мощностью 750 ВА для лабораторных исследований.
4. В НИУ "МЭИ" разработан экспериментальный стенд для исследования электромагнитных процессов в системе "симметрирующий трансформатор - ИРСН".

Список литературы

1. Струпинский М.Л., Хренков Н.Н., Кувалдин А.Б. Проектирование и эксплуатация систем электрического обогрева в нефтегазовой отрасли. – 2-е изд. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. – 524 с.
2. Разработка математической модели электромагнитного поля и схемы замещения индукционно-резистивной системы нагрева для промышленных трубопроводов / М.А. Федин, Е.В. Качалина, А.В. Молостова, С.А. Федина, А.И. Василенко, М.Л. Зотов, Ю.А. Демидов // Промышленная энергетика. 2023. № 12. С. 2 – 9.
3. Преобразователи числа фаз в электротехнологии: учебное пособие / Назаров С.Л., Удинцев В.Н., Бычков С.А. [и др.]; Мин-во науки и высш. образования. – Екатеринбург: Изд-во Урал. Ун-та, 2019. – 196 с.
4. Разработка и моделирование специального симметрирующего трансформатора для питания индукционно-резистивной системы нагрева / Федин М.А., Качалина Е.В., Молостова А.В., Федина С.А., Зотов М.Л., Жгутов Д.А., Василенко А.И., Кошкин Д.П. // Промышленная энергетика. 2024. № 2. С. 2 – 13.
5. Система автоматизированных расчетов Comsol [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Е. Н. Буркова, А. Н. Кондрашов, К. А. Рыбкин; Перм. гос. нац. исслед. ун-т. – Электрон. дан. – Пермь, 2019. – 9,88 Мб; 133 с.
6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023619476 «Программа для расчёта индукционно-резистивной системы нагрева IRSN PRO» / А.Б. Кувалдин, М.А. Федин, С.А. Федина, А.В. Молостова, А.И. Василенко, М.Л. Зотов. Зарегистрировано в реестре 11.05.2023

FINITE ELEMENT MODELING OF ELECTROMAGNETIC FIELDS AND PRACTICAL IMPLEMENTATION OF AN ELECTROMAGNETIC PHASE NUMBER CONVERTER FOR SINGLE-PHASE INDUCTION-RESISTIVE HEATERS

M.A. Fedin, A.R. Lepeshkin, E.V. Kachalina,
S.A. Fedina, D.A. Zhgutov, M.F. Tupekov
National Research University «MPEI», Moscow, Russia
E-mail: KachalinaYV@mpei.ru

This work is devoted to the development and modeling of electromagnetic fields in an electromagnetic phase number converter used to power single-phase induction-resistive heaters. A numerical mathematical model of the electro-magnetic field has been developed and differential calculation results of a laboratory electro-magnetic phase number converter have been obtained. A circuit design and design of a laboratory electromagnetic phase number converter for power supply of a physical model of an inductive-resistive system as part of an experimental stand are proposed.
Key words: electromagnetic field, induction-resistive heating system, industrial pipelines, modeling, magnetic circuit.

УДК 537.63:537.621:53.098

О ВЛИЯНИИ МАГНИТОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ НА ДОМЕННУЮ СТРУКТУРУ ФОЛЬГ ИЗ АМОРФНОГО СПЛАВА $Fe_{73}(SiBNb)_{27}$ С ДОБАВКОЙ 1% МЕДИ

Т.П. Каминская[1], П.А. Поляков[1], М.А. Степович[2], М.Н. Шипко[3], А.В. Стулов[4], Е.С. Савченко[5]

[1]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

[2]Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского, Калуга, Россия

[3]Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, Иваново, Россия

[4]ООО «Научно-производственный комплекс «Автоприбор», Владимир, Россия

[5]Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва, Россия

E-mail: ktp53@mail.ru

Изучено влиянии магнитоимпульсной обработки на магнитную структуру фольги из аморфного сплава $Fe_{73}(SiBNb)_{27}$ с добавкой 1% меди. Фольга получена методом сверхбыстрого охлаждения при распылении расплава на быстро вращающемся медном барабане. Обнаружено, что в результате воздействия импульсами слабого магнитного поля в исследуемом материале возникает доменная структура. Характер доменной структуры и магнитные характеристики фольги зависят от параметров магнитоимпульсной обработки.

Ключевые слова: ленточные аморфные сплавы, магнитоимпульсная обработка, магнитные домены.

Введение

Повышение эксплуатационных параметров электротехнических материалов в промышленном производстве может быть обеспечено различными способами [1-3]. Пожалуй, одним из наиболее энергетически низкозатратных методов является обработка материалов импульсами слабого магнитного поля [4-7]. Среди аморфных электротехнических сплавов значительный интерес представляют сплавы Fe-Si-B-Nb, полученные методом сверхбыстрого охлаждения при распылении расплава на быстро вращающемся медном барабане.

Широко известно, что ферромагнетизм может проявляться не только в кристаллах, но и в жидкостях и аморфных твердых телах. Аморфные ферромагнетики обладают магнитной упорядоченностью в ориентации нескомпенсированных спинов, но при этом не имеют кристаллической решетки (отсутствует дальний порядок в расположении атомов). Одним из способов их получения является скоростная закалка расплава. Эта методика получила широкое распространение при изготовлении подобных материалов в виде лент. Высокий уровень магнитных свойств электротехнических сплавов, их динамические характеристики, уровень удельных магнитных потерь во многом

зависят от вида доменной структуры, ширины доменов, типа доменных границ, намагниченности насыщения. Процессы намагничивания и перемагничивания определяются свойствами доменной структуры. Однако до сих пор отсутствует полное понимание взаимосвязи доменной структуры с высокочастотными свойствами аморфных сплавов. В силу того, что доменная структура аморфных сплавов, полученных методом спиннингования, определяется их локальной структурой, в том числе структурой их поверхности, использование сканирующей зондовой микроскопии в сочетании с изучением магнитных свойств этих материалов является весьма перспективным направлением исследований.

Материалы и методы

Образцы аморфной электротехнической стали (фольги) представляли собой ленту толщиной около 100 мкм, шириной 45 мм и были получены методом сверхбыстрого охлаждения при распылении расплава на вращающемся медном барабане. Исследовались неотожжёные аморфные сплавы состава $Fe_{73}(SiBNb)_{27}$ и такие же сплавы с добавкой 1 % Cu, влияющей на процесс кластеризации в процессе последующего термического отжига [8].

Для магнитоимпульсной обработки (МИО) использовались импульсы слабого магнитного поля (10…100 кА/м) низкой частоты (10…20 Гц). При проведении исследования на фольгу воздействовали 10, 20, 30, 40 импульсами.

Топология поверхности фольг была исследована по стандартной двухпроходной методике с использованием сканирующего зондового микроскопа [9, 10] SMENA-A, платформа «Solver» (NT-MDT, РФ, Зеленоград, Москва). Топология свободной стороны фольги, не прилегающей к барабану, позволила провести исследования доменной структуры методом магнитно-силовой микроскопии (МСМ).

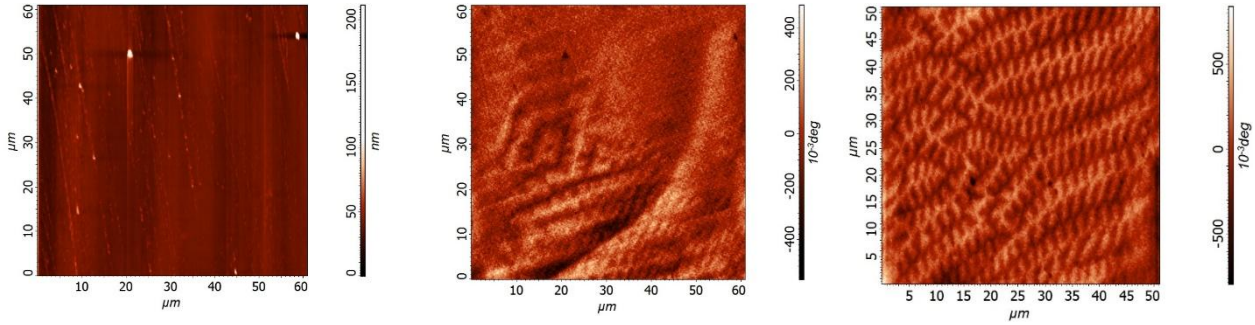
Результаты исследований и их обсуждение

Магнитный контраст в результате МИО был выявлен на свободной поверхности фольги $Fe_{73}(SiBNb)_{27}$ с добавкой 1 % Cu.

При воздействии 10 импульсами на фольгу в разных местах фольги были выявлены чёткие фингерпринтные домены, либо частично наложенные на гораздо более крупные изогнутые полукруглые домены шириной 10-30 мкм, показанные на рис. 1б, либо полностью закрывающие поверхность фольги – рис. 1в.

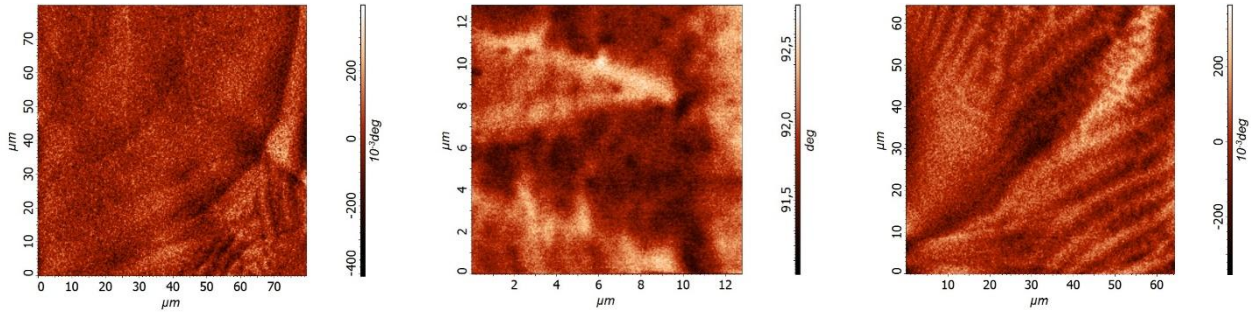
При воздействии 20 импульсами магнитного поля чёткой доменной структуры выявлено не было.

При воздействии 30 импульсами магнитного поля были выявлены преимущественно крупные полукруглые домены шириной 20-30 мкм, которые могут быть частью динамических концентрических кольцевых доменов, с частично наложенными на них фингерпринтными, либо спиральными доменами (рис. 2а).



а б в

Рисунок 1 - Участок свободной поверхности ленточного аморфного сплава Fe-B-Si-Nb, полученный: а – в амплитудном контрасте; б, в – в фазовом контрасте.
Показано: а – поверхность участка фольги, б - доменная структура этого же участка фольги, в - доменная структура другого участка фольги



а б в

Рисунок 2 - Участки свободной поверхности различных участков ленточного аморфного сплава Fe-B-Si-Nb, полученные в фазовом контрасте в результате МИО:
а – 30 импульсами, б, в – 40 импульсами.

МСМ-исследования фольг, подвергнутых магнитоимпульсной обработке 40 импульсами магнитного поля, позволило выявить два совершенно различных типа доменов. Микромагнитный анализ динамической магнитной структуры позволил визуализировать клинообразные доменные стенки размерами 1-2 мкм с рябью намагниченности между ними (рис. 3б). Эта структура по модельным представлениям представляет собой замыкающие призматические домены модели Л.Д. Ландау-Е.М. Лифшица, наблюдаемые в доменной структуре монокристаллов железа. Хорошо видна также и рябь намагниченности, приводящая к дроблению доменов. Дробление доменной структуры приводит к уменьшению мощности электромагнитных потерь. Наблюдалось также дробление (расхождение) концентрических доменов на фингерпринтные в некоторых местах поверхности фольги (рис. 2в).

Обнаруженные особенности в изменении доменной структуры аморфных сплавов после их МИО коррелируют с изменением их магнитных свойств. Наиболее заметные изменения наблюдались для магнитных параметров, связанных с магнитной анизотропией сплавов: коэрцитивной силой, коэффициентом прямоугольности петли магнитного гистерезиса и ее площадью. В частности, изменение анизотропии упорядочения атомов сопровождалось уменьшением коэффициента прямоугольности. Это находится в соответствии с

результатами исследований сплавов $Fe_{73}(SiB)_{27}$ с добавкой 1% Cu. Результаты электронно-микроскопических исследований показывают, что добавка меди вносит определенный вклад в развитие химической и топологической неоднородности сплава. А на изображениях, полученных в сканирующем зондовом микроскопе, отчетливо проявляется упорядоченное распределение областей сжатия, обеспечивающихся особенностями локализации атомов меди. В результате доменная структура демонстрирует магнитную анизотропию, что приводит к затруднению движения доменных границ, проявляющихся на кривой намагничивания. Однако МИО сплава способствует снижению анизотропии, связанной с уменьшением внутренних напряжений и напряжений, обусловленных состоянием поверхности. В результате после МИО сплава наблюдается значительное (до 17%) уменьшение коэрцитивной силы и появление (при малых длительностях обработки) специфической доменной структуры, напоминающей структуру фингенпринтов – см. рис. 1в. Наличие такой доменной структуры усложняет процесс намагничивания, а увеличение длительности МИО сплава способствует снятию напряжений.

Заключение

Добавка 1% меди в аморфный сплав $Fe_{73}(SiBNb)_{27}$ вносит определенный вклад в развитие химической и топологической неоднородности сплава. На изображениях, полученных в сканирующем зондовом микроскопе, отчетливо проявляется упорядоченное распределение областей сжатия, обеспечивающихся особенностями локализации атомов меди. В результате доменная структура демонстрирует магнитную анизотропию, что приводит к затруднению движения доменных границ. МИО такого сплава способствует снижению анизотропии, связанной с уменьшением внутренних напряжений и напряжений, обусловленных состоянием поверхности. В результате после МИО сплава при малых длительностях обработки наблюдается появление специфической доменной структуры, напоминающей структуру фингенпринтов. Предполагается, что наличие такой доменной структуры усложняет процесс намагничивания, а увеличение длительности МИО сплава способствует снятию напряжений.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и Правительства Калужской области № 23-21-10069, https://rscf.ru/project/23-21-10069/, https://rscf.ru/en/project/23-21-10069/.

Список литературы

1. Глезер А.М., Молотилов Б.В. Структура и механические свойства аморфных сплавов. М.: Металлургия, 1992, 207 с.
2. Стародубцев Ю.Н. Магнитные свойства аморфных и нанокристаллических сплавов / Ю.Н. Стародубцев, В.Я. Белозеров – Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2002. – 376 с.
3. Стогней О.В. Физика аморфных металлических сплавов. Учебное пособие / О.В. Стогней – Воронеж: 2007. – 139 с.

4. Альшиц В.И. Магнитопластический эффект: основные свойства и физические механизмы / В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, М.В. Колдаева, Е.А. Петржик // Кристаллография. – 2003. – Т. 48, № 5. – С. 826-854.
5. Шипко М.Н. Влияние магнитоимпульсной обработки на эмиссионные и магнитные свойства поверхностного слоя аморфных сплавов, используемых в электротехнике / М.Н. Шипко, А.Л. Сибирев, М.А. Степович, А.И. Тихонов, Е.С. Савченко // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2021. – № 9. – С. 80-85. DOI: 10.31857/S1028096021090193
6. Шипко М.Н., Степович М.А., Сибирев А.Л., Тихонов А.И., Савченко Е.В., Каминская Т.П. Влияние магнитоимпульсной обработки на состояние поверхности, эмиссионные и магнитные свойства аморфных магнитных сплавов / М.Н. Шипко, М.А. Степович, А.Л. Сибирев, А.И. Тихонов, Е.С. Савченко, Т.П. Каминская // Известия РАН. Серия физическая. – 2021. – Т. 85, № 11. – С. 1528-1531. DOI: 10.31857/S0367676521110351
7. Шипко М.Н., Каминская Т.П., Степович М.А., Вирюс А.А., Тихонов А.И. О влиянии магнитоимпульсной обработки на структуру поверхности и магнитные свойства ленточных аморфных сплавов Fe(Ni, Cu)(SiB) // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2023. № 2. С. 17-22. DOI: 10.31857/S1028096023020103, EDN: DSUDDZ
8. Gupta, P., Gupta A., Shukla A., Ganguli Tapas, Sinha A.K., Principi G., Maddalena A. // J. Appl. Phys. 2011. V. 110. Issue 3. Art. No. 033537. https://doi.org/10.1063/1.3622325.
9. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. Учебное пособие для студентов старших курсов высших учебных заведений / В.Л. Миронов. – Нижний Новгород: Институт физики микроструктур РАН, 2004. – 114 с.
10. Meyer Ernst. Scanning Probe Microscopy. The Lab on a Tip / Ernst Meyer, Josef Hug Hans, Roland Bennewitz. – Springer, Berlin, Heidelberg: 2004. – 210 p.

ON THE INFLUENCE OF MAGNETIC PULSED TREATMENT ON THE DOMAIN STRUCTURE OF FOILS FROM AMORPHOUS ALLOY $Fe_{73}(SiBNb)_{27}$ WITH 1% COPPER ADDITION

T.P. Kaminskaya[1], P.A. Polyakov[1], M.A. Stepovich[2], M.N. Shipko[3], A.V. Stulov[4], E.S. Savchenko[5]
[1]Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
[2]Tsiolkovsky Kaluga State University, Kaluga, Russia
[3]Lenin Ivanovo State University of Power Engineering, Ivanovo, Russia
[4]LLC “Research and Production Complex “Avtopribor”, Vladimir, Russia
[5]National Research Technological University "MISA", Moscow, Russia
E-mail: ktp53@mail.ru

The effect of magnetic pulse treatment on the magnetic structure of foil made of amorphous alloy $Fe_{73}(SiBNb)_{27}$ with the addition of 1% copper was studied. The foil was obtained by the method of ultra-fast cooling during melt spraying on a rapidly rotating copper drum. It was found that as a result of the action of pulses of a weak magnetic field, a domain structure appears in the material under study. The nature of the domain structure and the magnetic characteristics of the foil depend on the parameters of magnetic pulse treatment.
Keywords: tape amorphous alloys, magnetic pulse treatment, magnetic domains.

УДК 537.528:53.097:546.05:539.26:537.6.8

РЕНТГЕНОДИФРАКИОННЫЕ И МЁССБАУЭРОВСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МОДИФИКАЦИИ СВОЙСТВ БЕНТОНИТА НАНОЧАСТИЦАМИ ОКСИДОВ ЖЕЛЕЗА

А.В. Носков[1], О.В. Алексеева[1], Д.Н. Яшкова[1], А.В. Агафонов[1], М.Н. Шипко[2], М.А. Степович[3], В.Г. Костишин[4], Е.С. Савченко[4]

[1] Институт химии растворов им. Г.А. Крестова РАН, Иваново, Россия

[2] Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, Иваново, Россия

[3] Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского, Калуга, Россия

[4] Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва, Россия

E-mail: avn@isc-ras.ru

Методом химического соосаждения из водных растворов солей железа синтезированы смешанный твердый раствор магнетит/маггемит и композиционный материал бентонит/оксиды железа. Установлено, что композит бентонит/оксиды железа характеризуется значительно меньшей остаточной намагниченностью и большей коэрцитивной силой по сравнению с порошком Fe_3O_4/γ-Fe_2O_3. На основании данных рентгеновской дифракции и мёссбауэровской спектроскопии сделан вывод о влиянии бентонита на структурные особенности магнетит/маггемита в композите.

Ключевые слова: магнетит, маггемит, бентонит, рентгенофазовый анализ, дефектность, эффект Мёссбауэра.

Введение

В настоящее время большое внимание уделяется композиционным материалам на основе глинистых минералов (таких как бентонит и монтмориллонит) и наночастиц оксидов металлов. Среди оксидных наночастиц наиболее востребованным для практических применений являются оксиды железа в различных модификациях (магнетит Fe_3O_4, маггемит γ-Fe_2O_3 и гематит α-Fe_2O_3) [1-5]. В случае железосодержащих бентонитов их свойства определяются содержанием и валентным состоянием ионов железа, локализованных в структуре бентонитов, а также составом включений железосодержащих соединений, которые локализуются преимущественно на поверхности частиц бентонита и в микропорах. Среди физических методов исследования композитов на основе железосодержащих бентонитов и смеси ферромагнитных частиц (γ-Fe_2O_3 и Fe_3O_4) можно выделить мёссбауэровскую спектроскопию. Этот метод в сочетании с данными магнитных измерений и рентгеновской дифракции позволяет получить информацию о структурных особенностях таких материалов, их фазовом составе, магнитной анизотропии, размере областей магнитного упорядочения и др. В связи с этим цель настоящей работы состояла в получении композиционных материалов,

состоящих из бентонита и оксида железа, и изучении их структуры и свойств с использованием вышеперечисленных физико-химических методов.

Экспериментальная часть

В качестве объекта исследования был использован композит на основе бентонита Даш-Салахнинского месторождения (Азербайджан) и оксидов железа Fe_3O_4 и γ-Fe_2O_3, которые были получены методом химического соосаждения солей железа $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ и $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ в порах и на поверхности частиц бентонита. Кристаллическую структуру порошков оксида железа и композита бентонит/оксид железа исследовали методом рентгенофазового анализа (РФА) в интервале углов от 5 до 70 градусов на дифрактометре D_2 PHASER (Германия) (излучение CuK_α, λ=0,154 нм). Магнитные свойства частиц измеряли на вибрационном магнитометре VSM 250 в магнитном поле напряженностью 20 кЭ. Мёссбауэровские исследования синтезированных материалов были выполнены при комнатной температуре на спектрометре MS-104 Emc с автоматической обработкой спектров по программе Univem Ms. Изомерный сдвиг спектров определяли относительно α-Fe.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведены полученные методом РФА дифрактограммы синтезированных оксида железа и композита бентонит/оксид железа. Согласно [6], положения дифракционных пиков практически совпадают для магнетита и маггемита. В то же время в определенных местах кристаллической решетки маггемита (в отличие от магнетита) имеются точечные дефекты (вакансии), что отражается, в частности, на магнитных характеристиках оксидов. По мнению авторов работы [6], при синтезе методом соосаждения монофазные магнетит и маггемит не образуются, а полученный порошок оксида железа представляет собой твердый раствор магнетит/маггемитового ряда. Химическая формула твердого раствора может быть записана в виде $Fe_{3-\delta}O_4$, где $\delta \leq 1/3$, а величина $3-\delta$ характеризует дефектность исследуемого оксида железа [7].

В настоящем исследовании дифрактограммы порошка Fe_3O_4/γ-Fe_2O_3 и композита были проанализированы методом, который был развит в работах [6, 7]. Было установлено, что в случае Fe_3O_4/γ-Fe_2O_3 синтезированный материал представляет собой смесь магнетит/маггемит с химической формулой $Fe_{2,793}O_4$. С другой стороны, Fe_3O_4/γ-Fe_2O_3 в составе композита с бентонитом характеризуется меньшей средней дефектностью ($<3-\delta>$=2,833) по сравнению с синтезированным $Fe_{2,793}O_4$. Это свидетельствует в пользу предположения, что бентонит тормозит окисление ионов Fe^{2+} в магнетите и тем самым способствует формированию структуры с меньшей концентрацией ионов Fe^{3+}.

В табл. 1 приведены параметры петель магнитного гистерезиса смеси оксидов железа и композита бентонит-смесь оксидов железа. Намагниченность насыщения смеси оксидов указывает на присутствие в смеси ферромагнитных частиц γ-Fe_2O_3, Fe_3O_4, а также на наличие значительных по объему поверхностных слоев с пониженными значениями магнитных моментов ионов

железа. При формировании композита его остаточная намагниченность уменьшается более чем в 6 раз по отношению к смеси оксидов Fe_3O_4/γ-Fe_2O_3. При этом повышаются магнитные параметры, определяемые кристаллографической анизотропией и анизотропией формы частиц.

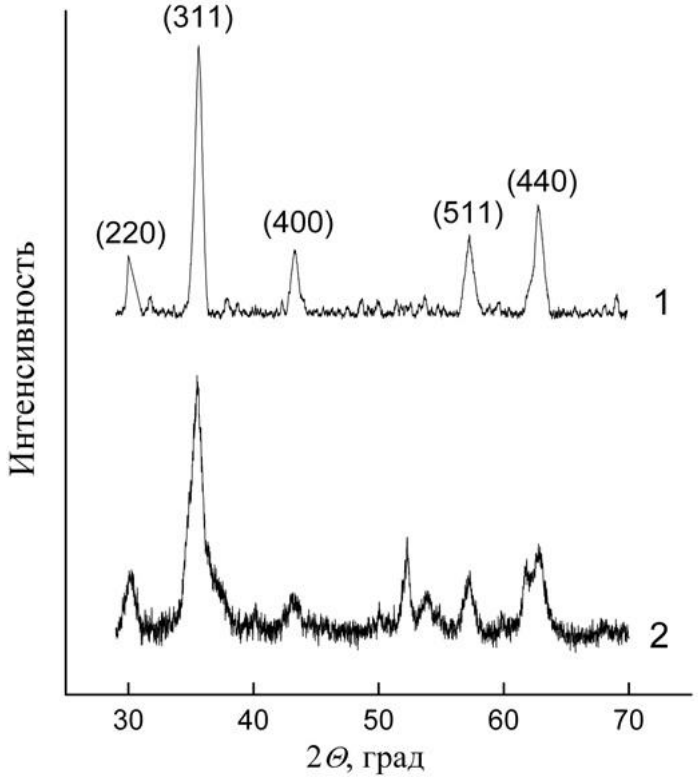


Рисунок 1 – Дифрактограммы образцов: 1 – смесь оксидов железа;
2 – композит бентонит/оксиды железа

Таблица 1 – Параметры петель магнитного гистерезиса

Намагниченность насыщения, $А·м^2/кг$	Остаточная намагниченность, $А·м^2/кг$	Коэрцитивная сила, А/м	Напряжённость поля анизотропии, А/м	Коэффициент прямоугольности	Площадь петли, $А^2·м/кг$
Магнетит/маггемит					
72,86	6,47	5,71	2338	0,089	3,3
Композит бентонит/оксиды железа					
18,95	0,98	8,5	3510	0,052	7,25

Для выяснения механизмов существенного понижения намагниченности образцов композита и повышения его коэрцитивной силы по сравнению с

порошком $Fe_3O_4/\gamma\text{-}Fe_2O_3$ были выполнены мёссбауэровские исследования – см. рис. 2.

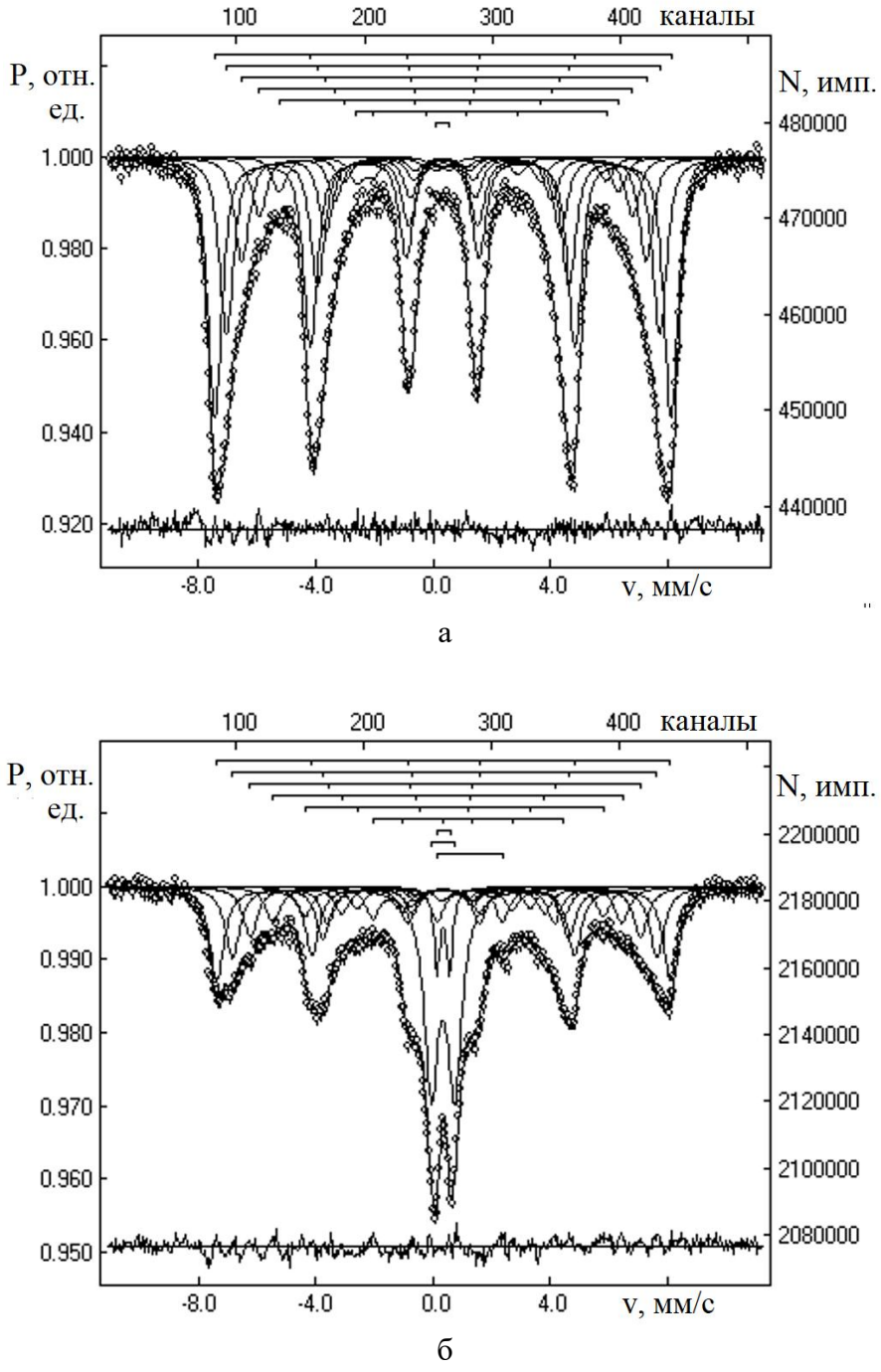


Рисунок 2 – Мёссбауэровские спектры:
а – смесь оксидов железа; б – композит бентонит/смесь оксидов железа

Мёссбауэровский спектр оксидов железа (рис. 2а) представляет собой суперпозицию 6-ти секстиплетов и дублета от ядер ионов железа, расположенных в неэквивалентных положениях различных оксидов. Параметры секстиплета C_1 характерны для оксида железа $\gamma\text{-}Fe_2O_3$, секстиплеты C_2 и C_3 связаны с ядрами ионов железа в окта- и тетраэдрических позициях

магнетита Fe_3O_4, а секстиплеты C_4 и C_5 могут быть связаны с ядрами ионов железа, расположенных в приповерхностных слоях частиц γ-Fe_2O_3 и Fe_3O_4. Интерпретация мёссбауэровских спектров композита (рис. 2б) связана с особенностями кристаллической структуры бентонита, согласно которой ионы железа могут занимать октаэдрические позиции 2-х типов, одна из которых, M_1, характеризуется симметричным расположением гидроксильных групп OH относительно железа, а вторая, M_2, – асимметричным расположением групп OH. В результате мёссбауэровский спектр композита представляет собой суперпозицию 6-ти секстиплетов и 3-х дублетов. Параметры секстиплетов (магнитное поле на ядрах Fe^{57}, изомерный сдвиг и квадрупольное расщепление) близки к таковым для синтезированного порошка Fe_3O_4/γ-Fe_2O_3. Это указывает на то, что оксиды железа локализованы преимущественно на поверхности частиц бентонита и в его порах.

Уменьшение полей на ядрах Fe^{57} для магнетита и маггемита в композите указывает на изменение магнитного состояния ионов железа при их соосаждении на бентонит и связанного с этим изменением размеров частиц оксидов вследствие изменения скорости процесса их формирования в композите.

Таким образом, данные мёссбауэровской спектроскопии и рентгенофазового анализа позволяют сделать вывод о влиянии бентонита на структурные особенности магнетит/маггемита в композите бентонит/оксиды железа.

Заключение

Изучены свойства твердых растворов магнетит/маггемит и железосодержащих бентонитов, синтезированных методом химического соосаждения из водных растворов солей железа. Установлено, что при переходе от порошка смеси оксидов к композиту значения остаточной намагниченности и намагниченности насыщения значительно уменьшаются, тогда как для магнитных параметров, определяемых кристаллографической анизотропией и анизотропией формы частиц, наблюдается противоположная тенденция. Показано, что магнитные свойства композитов зависят от характера локализации оксидов железа, соотношения их концентраций.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и Правительства Калужской области № 23-21-10069, https://rscf.ru/project/23-21-10069/, https://rscf.ru/en/project/23-21-10069/.

Список литературы

1. Yan L., Li S., Yu H., Shan R., Du B., Liu T. Facile solvothermal synthesis of Fe_3O_4/bentonite for efficient removal of heavy metals from aqueous solution // Powder Technology. 2016. V. 301. P. 632-640.

2. Шлапакова Л.Е., Прядко А.С., Мухортова Ю.Р., Вагнер Д.В., Сурменева М.А., Сурменев Р.А. Структура, физико-механические свойства и пьезоэлектрический отклик скэффолдов на основе полиоксибутирата с композитным наполнителем магнетит/восстановленный оксид графена // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2023. Т. 87. № 6. С. 766-772.

3. Кафеева Д.А., Куршанов Д.А., Дубовик А.Ю. Получение и исследование свойств магнитно-люминесцентных гибридных структур на основе оксида железа (Fe_3O_4) с полупроводниковыми оболочками // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2023. Т. 87. № 6. С. 801-806.
4. Магомедов К.Э., Омельянчик А.С., Воронцов С.А., Чижмар Э., Родионова В.В., Левада Е.В. Магнитные наночастицы Fe_3O_4, модифицированные додецилсульфатом натрия для удаления метиленового синего из воды // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2023. Т. 87. № 6. С. 819-827.
5. Шипко М.Н., Степович М.А., Носков А.В., Алексеева О.В., Смирнова Д.Н. Особенности анизотропии свойств композита на основе нанотрубок галлуазита и аморфного магнетита // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2022. Т. 86. № 9. С. 1222-1225.
6. Шилова О.А., Николаев А.М., Коваленко А.С., Синельников А.А., Копица Г.П., Баранчиков А.Е. Синтез магнитных нанопорошков оксида железа-магнетита и маггемита // Журнал неорганической химии. 2020. Т. 65. № 3. С. 398-402.
7. Cervellino A., Frison R., Cernuto G., Guagliardi A., Masciocchi N. Lattice parameters and site occupancy factors of magnetite–maghemite core–shell nanoparticles. A critical study // Journal of Applied Crystallography. 2014. V. 47. P. 1755-1761.

X-RAY DIFFRACTION AND MÖSSBAUER STUDIES OF MODIFICATION OF BENTONITE PROPERTIES BY IRON OXIDE NANOPARTICLES

A.V. Noskov[1], O.V. Alekseeva[1], D.N. Yashkova[1], A.V. Agafonov[1], M.N. Shipko[2], M.A. Stepovich[3], V.G. Kostishin[4], E.S. Savchenko[4]

[1]G.A. Krestov Institute of Solution Chemistry, Russian Academy of Sciences, Ivanovo, Russia

[2]Lenin Ivanovo State University of Power Engineering, Ivanovo, Russia

[3]Tsiolkovsky Kaluga State University, Kaluga, Russia

[4]National University of Science and Technology “MISA”, Moscow, Russia

E-mail: avn@isc-ras.ru

A mixed solid solution of magnetite/maghemite and a composite material of bentonite/iron oxides were synthesized by chemical coprecipitation from aqueous solutions of iron salts. It was found that the bentonite/iron oxides composite is characterized by a significantly lower residual magnetization and a higher coercive force compared to the Fe3O4/γ-Fe2O3 powder. Based on X-ray diffraction and Mössbauer spectroscopy data, a conclusion was made about the influence of bentonite on the structural features of magnetite/maghemite in the composite.

Keywords: magnetite, maghemite, bentonite, X-ray phase analysis, defects, Mössbauer effect

УДК 537.528:53.097:546.05:537.6.8

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА И ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ НАНОКОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ФЕРРИТОВ $CoFe_2O_4$, $NiFe_2O_4$, $CuFe_2O_4$, ПОЛУЧЕННЫХ В УСЛОВИЯХ ПОДВОДНОЙ ПЛАЗМЫ

М.Н. Шипко[1], М.А. Степович[2], А.В. Хлюстова[3], А.В. Агафонов[3], Н.А. Сироткин[3], Е.С. Савченко[4]

[1]Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, Иваново, Россия

[2]Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского, Калуга, Россия

[3]Институт химии растворов им. Г.А. Крестова РАН, Иваново, Россия

[4]Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

E-mail: michael-1946@mail.ru

В работе представлены исследования кристаллической структуры, морфологии и магнитных свойств порошков нанокомпозитов на основе переходных металлов Ni, Co, Cu, Fe, впервые синтезированных в условиях подводной плазмы. Полученные результаты указывают на возможность синтеза нанокомпозитов с заданным содержанием ферритов $NiFe_2O_4$, $CoFe_2O_4$, $Ni_{1-x}Cu_xFe_2O_4$, обеспечивающих низкие значения ширины линии ферромагнитного резонанса, а также ε-Fe_2O_3, проявляющего высокочастотный резонанс в миллиметровом диапазоне электромагнитного излучения.

Ключевые слова: подводная плазма, синтез наночастиц ферритов, кристаллическая структура, магнитные свойства.

Введение

Исследования низкотемпературной плазмы в контакте с жидкостью [1] представляют большой интерес из-за возможностей применения образующихся материалов в биомедицине, очистке воды от органических и неорганических загрязнений, синтезе наноструктур. Последнее имеет широкие перспективы для получения композитов, в том числе углеродных, металл-полимерных, биметаллических, оксидных. Композиты синтезируются при воздействии подводной плазмы, возбуждаемой между металлическими электродами в объеме дистиллированной воды. Образовавшийся после действия плазмы раствор с осадком из синтезированных структур после центрифугирования и фильтрации осадка высушивается, после чего проводятся его исследования.

Методы синтеза наночастиц

В работе синтез структур проводился с использованием двух- и трёхэлектродных систем. В двухэлектродной системе подводный импульсный разряд постоянного тока инициировался между двумя металлическими электродами диаметром 1 мм, погруженными в дистиллированную воду. Электроды помещались в керамическую трубку диаметром 7 мм, что позволяло установить постоянное межэлектродное расстояние 1,5 мм. Для возбуждения

разряда использовался источник постоянного тока с выходным напряжением до 5 кВ и балластный резистор 0,5 кОм. Средние значения тока разряда составляли 0,25 и 0,5 А. Все эксперименты проводились в ячейке с фиксированным объемом раствора 200 мл. В качестве электродов использовались стержни из Fe и Co, (ООО «Цветметсплав», Россия, чистота 99,99%). Полярность материалов электродов варьировалась.

В трёхэлектродной системе двойной подводный разряд зажигался между тремя металлическими стержнями, помещенными в керамическую трубку диаметром 9 мм. В качестве электродов в экспериментах использовались стержни из железа, меди и никеля диаметром 1,0 мм и чистотой 99,99%. Электроды располагались в вершинах равностороннего треугольника. Общий катод из Ni расположен в вершине треугольника, а два анода из Cu и Fe – в основаниях. Расстояние между анодами составляло 7 мм, между анодом и катодом – 4 мм. Для возбуждения двойного разряда использовались два независимых оригинальных источника питания постоянного тока с выходным напряжением до 5 кВ и балластными резисторами сопротивлением 500 Ом. Значения падения напряжения между двумя парами анод – общий катод регистрировались с помощью многоканального цифрового осциллографа Hantek-4104B (Hantek, Китай) и затем обрабатывались на компьютере. Схема измерения напряжения включала в себя два делителя напряжения ДНВ-80 (ООО «Электропром», Россия) с коэффициентом деления 1:1000, которые использовались для измерения падения напряжения. Осциллограммы тока на общем катоде также измерялись с помощью осциллографа. Полный ток двойного разряда составлял 0,5 А, при этом ток между никелевым катодом и железным анодом 0,35 А, а между медным анодом и общим никелевым катодом – 0,15 А.

Методы исследований синтезированных наночастиц

Распределение наночастиц $CoFe_2O_4$, $NiFe_2O_4$, $CuNiFe_2O_4$ по размерам изучалось методами растровой электронной микроскопии и динамического рассеяния света. Кристаллическая структура и фазовый состав композитов изучались методами дифракции рентгеновских лучей и мёссбауэровской спектроскопии. Параметры петель магнитного гистерезиса определены при T=300 К в магнитном поле напряженностью до 20 кЭ.

Результаты исследований синтезированных наночастиц

В результате рентгеноструктурных исследований установлено, что в синтезированных порошках присутствуют наночастицы оксидов α -Fe_2O_3, γ-Fe_2O_3, ε-Fe_2O_3, Fe_3O_4, ферриты со структурой шпинели $NiFe_2O_4$, $CoFe_2O_4$, $Ni_{1-x}Cu_xFe_2O_4$ – см. рис. 1. Морфология синтезированных наночастиц существенно зависит от условий синтеза. В качестве примера на рис. 2 приведены микрофотографии наночастиц, полученные в растровом электронном микроскопе, при различных условиях синтеза.

По данным рентгеноструктурного анализа и мёссбауэровской спектроскопии, частицы ферритов имеют нестехиометрический состав. Степень

нестехиометрии ферритов, их содержание в композите зависят от силы тока разряда. Это отчетливо сказывается на параметрах решетки синтезированных ферритов и распределении частиц по размерам (табл. 1, рис. 3).

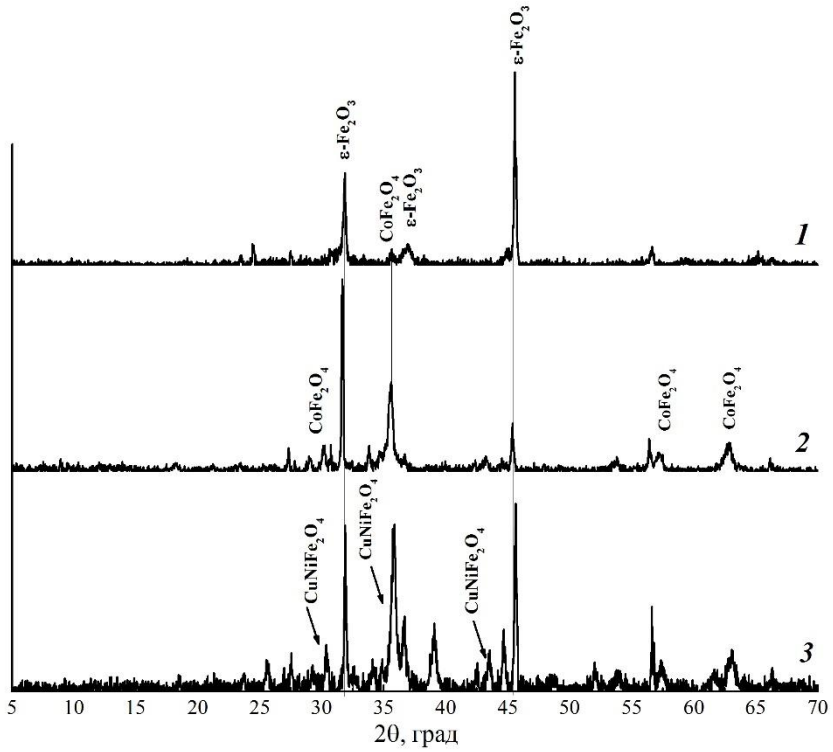


Рисунок 1 – Рентгенограммы полученных структур:
1 – Fe анод, Co катод; 2 – Co анод, Fe катод; 3 – Ni катод, Fe, Cu аноды

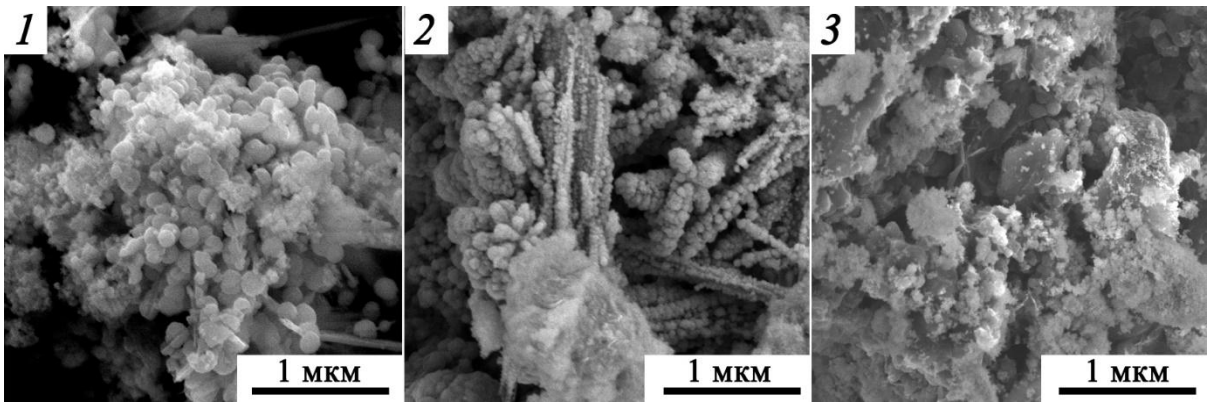


Рисунок 2 – Микрофотографии наночастиц, полученных при различных условиях их синтеза: 1 – Fe анод, Co катод, ток разряда 0,25 А; 2 – Co анод, Fe катод, ток разряда 0,25 А; 3 – трехэлектродная система: Fe и Cu аноды, Ni катод, ток разряда 0,25 А

Таблица 1 – Значения параметров кристаллической решетки *a* и размеры *D* нанокристаллитов ферритов $CoFe_2O_4$, $NiFe_2O_4$, $Ni_{1-x}Cu_xFe_2O_4$ в композитах, синтезированных при силе тока разряда 0,25 А и различных полярностях электродов

Феррит	$CoFe_2O_4$, Fe-анод	$CoFe_2O_4$, Fe-катод	$NiFe_2O_4$, Fe-анод	$NiFe_2O_4$, Fe-катод	$Ni_{1-x}Cu_xFe_2O_4$, Ni-катод
a, Å	8,36	8,35	8,42	8,49	8,32
D, нм	68,79	25,47	56,38	30,64	21,98

Наблюдаемые изменения в фазовом составе нанокомпозитов и размерах кристаллитов сказываются на их магнитных параметрах: напряжённости поля анизотропии H_a, намагниченности насыщения M_s, остаточной намагниченности M_r, коэрцитивной силе H_c, прямоугольности петли магнитного гистерезиса M_r/M_s. В табл. 2 приведены в качестве примера наиболее информативные параметры петель магнитного гистерезиса для композитов на основе наночастиц феррита $NiFe_2O_4$.

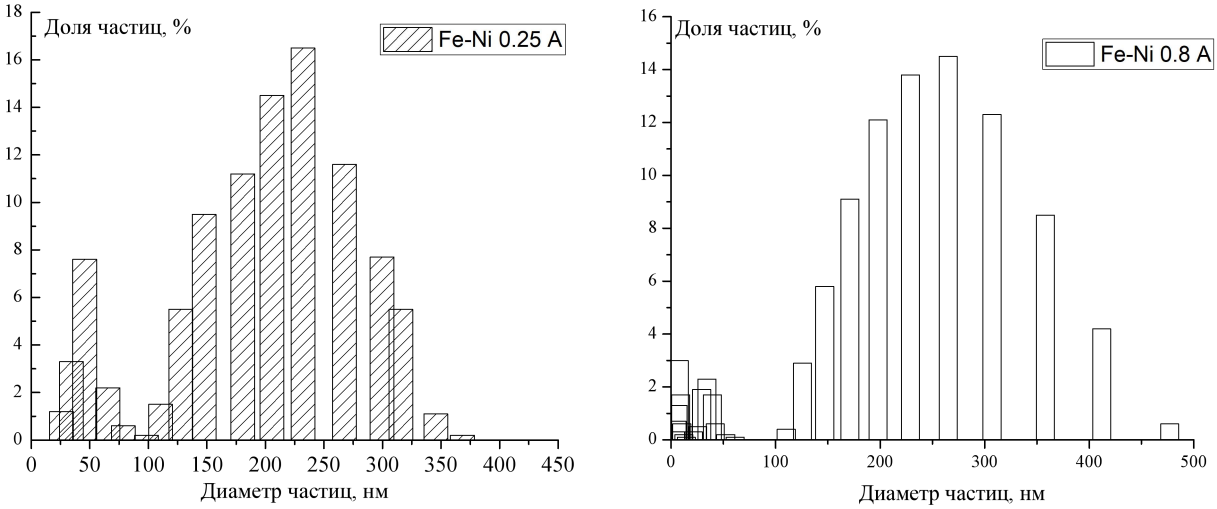


Рисунок 3 – Распределения частиц по размерам в анодной фазе нанокомпозита, содержащего $NiFe_2O_4$, полученные методом динамического рассеяния света:
левый рисунок – сила тока разряда 0,25 А; правый рисунок – сила тока разряда 0,8 А

Таблица 2 – Параметры петель магнитного гистерезиса для нанокомпозитов, содержащих наночастицы феррита $NiFe_2O_4$, синтезированных в условиях подводной плазмы при различных значениях тока разряда и полярности электродов

№ опыта	Материал катода	Сила тока разряда, А	Напряжённость поля анизотропии H_a, А/м	Удельная намагниченность насыщения M_s, А м^2/кг	Коэрцитивная сила H_c, кА/м	Коэффициент прямоугольности M_r/M_s
1	Fe	0,25	7987	1,21	22,0	0,092
2	Fe	0,8	2220	9,67	8,7	0,127
3	Ni	0,25	3405	12,61	9,2	0,076
4	Ni	0,8	2792	1,87	14,5	0,067

Видно, что все композиты характеризуются низкими значениями намагниченности насыщения ввиду проявления суперпарамагнетизма, малых размеров частиц и присутствия наночастиц оксидов железа α-Fe_2O_3, ε-Fe_2O_3 [2].

Вместе с тем присутствие большого количества наночастиц оксида ε-Fe_2O_3 в композите (опыт 1) обеспечивает относительно высокие значения напряженности поля анизотропии H_A и коэрцитивной силы [3]. При этом значения M_z/M_s, которые изменяются в пределах 0,067-0,127, существенно меньше ожидаемых значений для однодоменных изолированных частиц [4]. Более того, магнитные свойства композитов существенно зависят от силы тока

разряда, определяющей содержание ферритов в композите. Следовательно, при одном и том же способе синтеза сила тока разряда и, как следствие, температура плазмы, оказывают влияние на скорость миграции ионов Ni, Co и Cu в координационные полиэдры оксидов железа, а также на скорость роста частиц, их морфологию.

Заключение

Полученные результаты указывают на возможность синтеза нанокомпозитов с заданным содержанием ферритов $NiFe_2O_4$, $CoFe_2O_4$, $Ni_{1-x}Cu_xFe_2O_4$, обеспечивающих низкие значения ширины линии ферромагнитного резонанса, а также ε-Fe_2O_3, проявляющего высокочастотный резонанс в миллиметровом диапазоне электромагнитного излучения [5], используемого в качестве рабочей среды наномагнитных логических устройств [3].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и Правительства Калужской области № 23-21-10069, https://rscf.ru/project/23-21-10069/, https://rscf.ru/en/project/23-21-10069/.

Список литературы

1. Хлюстова А.В., Шипко М.Н., Сироткин Н.А., Агафонов А.В., Степович М.А. Об использовании низкотемпературной плазмы в контакте с жидкостью для получения наноструктурированных оксидов железа // Известия РАН. Серия физическая. 2022. Т. 86. № 5. С. 614-620.

2. Duque J.G.S., Souza E.A. Meneses C., Kubota L.T. Magnetic properties of $NiFe_2O_4$ nanoparticles produced by a new chemical method // Physica B. Condensed Matter. 2007. Vol. 398. No. 2. P. 287-290. DOI: 10.1061/j.physb.2007.04.030

3. Дмитриев А.И. Наночастицы экзотического эпсилон-оксида железа (III) как рабочая среда наномагнитных логических устройств // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 5. С. 805-811. DOI: 10.17586/2226-1494-2017-17-5-805-811

4. Федосюк В.М., Миргород Д.А. Исследование структуры и магнитных свойств феррита кобальта, никеля и марганца, синтезированных в системе прямых мицелл додецилсульфата натрия // Весці нацыянальнай Акадэміі навук Беларусі. Серыя Фізіка-тэхнічных навук. 2016. № 1. С. 93-98.

5. Mazaleyrat F., Varga L.K. Ferromagnetic nanocomposites // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2000. Vol. 215. P. 253-259.

MAGNETIC PROPERTIES AND STRUCTURE FEATURES OF NANOCOMPOSITES BASED ON FERRITES $CoFe_2O_4$, $NiFe_2O_4$, $CuFe_2O_4$ OBTAINED UNDER UNDERWATER PLASMA CONDITIONS

M.N. Shipko[1], M.A. Stepovich[2], A.V. Khlustova[3], A.V. Agafonov[3], N.A. Sirotkin[3], E.S. Savchenko[4]

[1]Lenin Ivanovo State University of Power Engineering, Ivanovo, Russia

[2]Tsiolkovsky Kaluga State University, Kaluga, Russia

[3]Krestov Institute of Solution Chemistry, Russian Academy of Sciences, Ivanovo, Russia

[4]National Research Technological University "MISA", Moscow, Russia

E-mail: michael-1946@mail.ru

The paper presents studies of the crystal structure, morphology and magnetic properties of nanocomposite powders based on transition metals Ni, Co, Cu, Fe, first synthesized under underwater plasma conditions. The results obtained indicate the possibility of synthesizing nanocomposites with a given content of ferrites $NiFe_2O_4$, $CoFe_2O_4$,
$Ni_{1-x}Cu_xFe_2O_4$, which provide low values of the ferromagnetic resonance linewidth, as well as ε-Fe_2O_3, which exhibits high-frequency resonance in the millimeter range of electromagnetic radiation.
Keywords: underwater plasma, synthesis of ferrite nanoparticles, crystal structure, magnetic properties.

УДК 537.8

НАПРЯЖЕННОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ РАЗРЯДЕ В ЖИДКОСТИ

Ю.А. Жукова, Д.Н. Герасимов
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», Москва, Россия,
Москва, Российская Федерация
E-mail: ZhukovaYulA@mpei.ru

В работе исследуется электрический разряд в индустриальном масле И-40А. Спектр излучения разряда содержит расщепленную линию H , что позволяет определить напряженность электрического поля в разряде. Полученное значение характерно для электрического пробоя газа и может свидетельствовать о том, что разряд происходит в газовой фазе.
Ключевые слова: напряженность электрического поля, эффект Штарка, электрический пробой жидкости, эксперимент, спектроскопия.

Введение

Может казаться странным, но причинно-следственная связь процессов при электрическом пробое жидкости неясна [1]: является ли образование газовой фазы следствием электрического разряда, или оно предшествует электрическому пробою? С одной стороны, в простейших теоретических моделях для описания размножения электронов используются представления о низкой плотности среды, в которой происходит электрический разряд. С другой стороны, если образование газовой фазы предшествует разряду, то термодинамические параметры должны оказывать заметное влияние на него: условия однофазной, двухфазной или сверхкритической среды должны влиять на характеристики электрического разряда. Однако сколь-либо существенное влияние термодинамических условий на электрический разряд отсутствует [2].

Данная работа направлена на выяснение локальных характеристик электрического разряда, что, как можно ожидать, в конечном итоге поможет определить условия возникновения электрического разряда в жидкости. Измерение напряженности электрического поля внутри разрядной области может быть лишь приблизительно реализовано путем «макроскопических» измерений, т.е. с помощью измерения разности потенциалов между электродами и геометрических параметров. Гораздо более интересную информацию можно извлечь из спектра излучения электрического разряда.

1. Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки изображена на рис. 1. Исследуется электрический разряд в индустриальном масле И-40А. Весьма сложный, состав масла подробно описан в [3]. Генератор поддерживает напряжение до 30 кВ при токе до 200 мкА. Медные электроды, покрытые ZnCl, помещены в емкость с маслом на расстоянии 1 мм друг от друга.

Для диагностики использовались спектрометры AvaSpec-2048: для получения обзорного спектра – спектрометр с разрешением 2.4 нм, для детального спектра – с разрешением 0.26 нм.

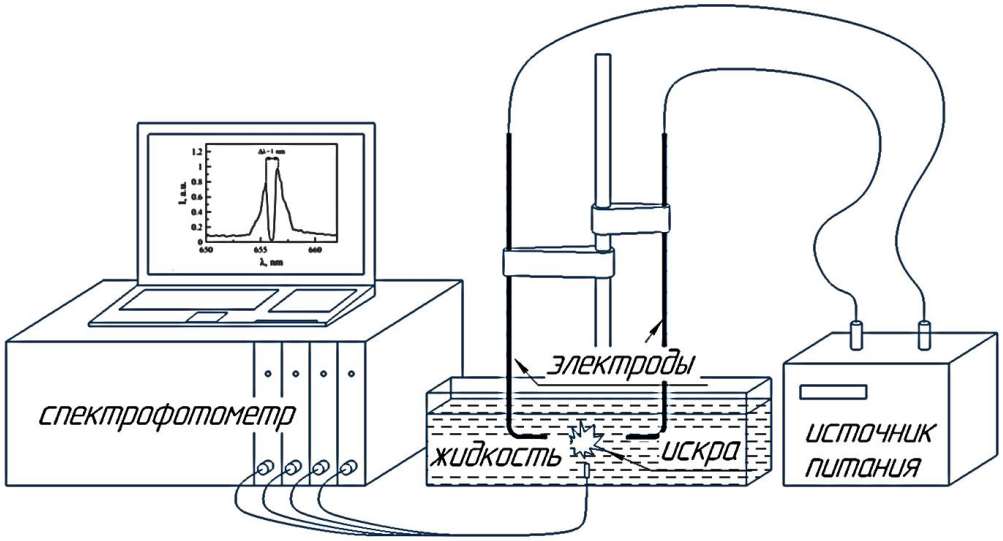


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

2. Спектр излучения электрического разряда

Общий спектр излучения разряда показан на рис. 2. Природа линий Zn и Cl очевидна: это следствие взаимодействия разрядной плазмы с электродами.

Наблюдаемая линия водорода H_α на самом деле имеет штарковское расщепление (рис. 3).

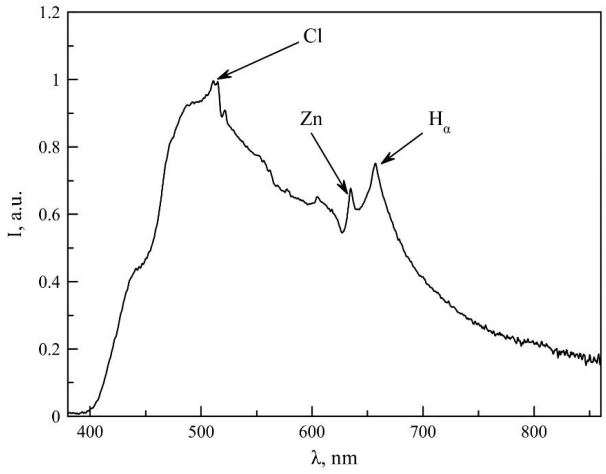


Рисунок 2 – Спектр излучения электрического разряда

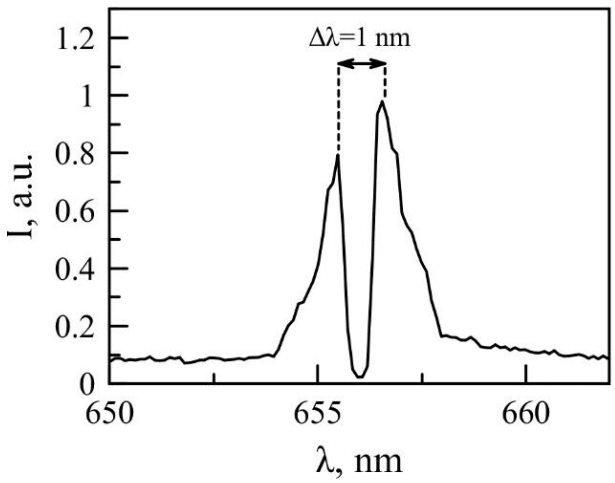


Рисунок 3 – Линия H_α, зарегистрированная спектрометром с разрешением 0.26 нм

3. Определение напряженности электрического поля

В электрическом поле напряженностью E уровень водорода с главным квантовым числом n расщепляется на подуровни, характеризуемые параболическими числами $\tilde{n}_1$ и $\tilde{n}_2$ [4]:

$$\varepsilon = \frac{3}{2} eEa_H n(\tilde{n}_1 - \tilde{n}_2), \qquad (1)$$

где $a_H = 0.529\ 10^{-10}$ м – боровский радиус. Для линии H_α, соответствующей переходу $3 \to 2$, формула (1) дает значения 15 энергий перехода, отклонение

которых от ε_0 – энергии перехода при отсутствии электрического поля – может быть выражено в общем виде как [5]

$$\Delta\varepsilon = \Delta k \frac{E[\text{кВ/см}]}{15620} \ [\text{см}^{-1}], \qquad (2)$$

где значения $\Delta k = 0,\pm1,\pm5,\pm6$ соответствуют излучению с поляризацией перпендикулярно направлению электрического поля (σ-компонента), значения $\Delta k = \pm2,\pm3,\pm4,\pm8$ – излучению с поляризацией параллельно направлению поля (π-компонента).

Как следует из рис. 3, в данном случае σ-компонента практически отсутствует, и все излучение поляризовано параллельно полю. Расчетный спектр π-компоненты для статической и динамической вероятности переходов [5] для спектрометра с разрешением 0.26 нм показан на рис. 4. Как видно, в обоих случаях получаются похожие результаты.

Максимальные значения интенсивности расчетного спектра π-компоненты соответствуют $\Delta k = \pm3$, что с помощью (2) при малом расщеплении линии $\Delta\lambda$ приводит к формуле для напряженности поля

$$E = 2600 \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \varepsilon_0 . \qquad (3)$$

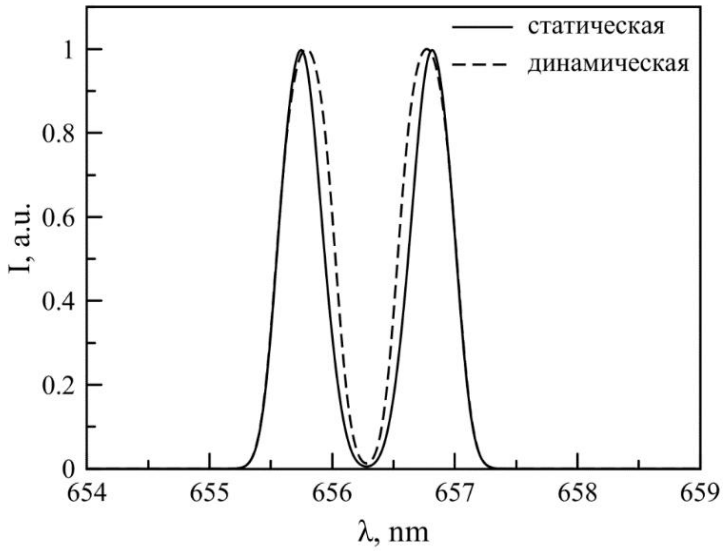


Рисунок 4 – Расчетный спектр π-компоненты излучения H_α

Для $\Delta\lambda = 1$ нм (см. рис. 3) получаем $E = 60$ кВ/см.

Данное значение напряженности электрического поля характерно, вообще говоря, для газов. Отсюда можно было бы сделать вывод о том, что развитие электрического разряда происходит уже в газовой фазе, образование которой предшествует пробою. Вместе с тем, окончательное заключение делать преждевременно, так как протекание тока в конденсированной среде может и не сопровождаться излучением: возможно, процесс электрического пробоя жидкости состоит из нескольких стадий, не все из которых сопровождаются свечением среды.

Заключение

Полученное нами значение напряженности поля 60 кВ/см можно интерпретировать как признак того, что исследуемый разряд протекает в газовой фазе. Однако является ли эта стадия разряда единственной при электрическом пробое жидкости, неясно.

Список литературы

1. Vanraes P., Bogaerts A. Plasma physics of liquids – a focused review// Applied Physics Reviews. V. 5 (2018). 031103.
2. Торшин Ю.В. Физические процессы формирования электрического пробоя конденсированных диэлектриков. М.: Энергоатомиздат, 2008. 212 с.
3. Ермолаева Н.В., Голубков Ю.В. Определение молекулярного состава индустриального масла И-40А// Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2011. №3. С. 49-53.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая механика (нерелятивистская теория). М.: Наука, 1989. 768 с.
5. Бете Г., Солпитер Э. Квантовая механика атомов с одним и двумя электронами. М.: Гос. изд. физ.-мат. лит., 1960. 563 с.

ELECTRIC FIELD STRENGTH DURING ELECTRIC DISCHARGE IN A LIQUID

Y.A. Zhukova, D.N. Gerasimov
National Research University "MPEI", Moscow, Russian Federation
ZhukovaYulA@mpei.ru

The paper examines the electric discharge in industrial oil I-40A. The discharge radiation spectrum contains a split line H_α, which makes it possible to determine the electric field strength in the discharge. The obtained value is typical for an electrical breakdown of gas and may indicate that the discharge occurs in the gas phase.
Key words: electric field strength, Stark effect, electric breakdown of liquid, experiment, spectroscopy.

СЕКЦИЯ 2: ФИЗИЧЕСКИЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СПИНОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Сопредседатели: ***д.ф.-м.н. Э.Г. Локк*** *(ИРЭ РАН),*
к.ф.-м.н. А.Ю. Анненков *(ИРЭ РАН)*

УДК 530.182;537.622, 537.86

ФОРМИРОВАНИЕ СВЕТЛЫХ СОЛИТОНОВ ОГИБАЮЩЕЙ В ДВАЖДЫ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ БИГИРОТРОПНЫХ СРЕДАХ НА ОСНОВЕ ФЕРРО- И АНТИФЕРРОМАГНИТНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

А.В. Жабова, С.В. Гришин
Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия
E-mail: aleksis_bogomolova@mail.ru

В работе приводятся теоретические результаты, показывающие возможность формирования периодических последовательностей светлых солитонов огибающей на обратных электромагнитных волнах (ОЭМВ), существующих в дважды отрицательных бигиротропных средах на основе поперечно намагниченных пленок ферромагнитного (ФМ) и антиферромагнитного (АФМ) полупроводника (ПП). Показано, что длительность таких импульсов уменьшается с увеличением концентрации электронов как в ФМ, так и в АФМ ПП.

Ключевые слова: дважды отрицательные среды, магнитные полупроводники, солитоны

Введение

Солитоны являются одним из фундаментальных явлений теории нелинейных волн [1]. Они представляют собой нелинейные волновые импульсы или пучки, существующие в средах, в которых дисперсионные эффекты компенсируются нелинейностью. Солитоны огибающей были обнаружены в диэлектрических пленках железо-иттриевого граната (ЖИГ). Здесь были получены как «светлые», так и «темные» солитоны огибающей с длительностями порядка десятков наносекунд. Светлые солитоны огибающей формировались на обратных объемных магнитостатических спиновых волнах (МСВ) при продольном намагничивании, а темные солитоны огибающей – на поверхностной МСВ (ПМСВ) при поперечном намагничивании. В [2] было исследовано влияние свободных носителей заряда, существующих в полупроводниковом (ПП) слое, контактирующем с поперечно намагниченной пленкой ЖИГ, на солитонные режимы. Установлено, что при определенных концентрациях электронов и толщинах ПП могут формироваться светлые солитоны огибающей на ПМСВ.

Дважды отрицательные (или «левые») среды являются одной из разновидностей метаматериалов, у которых диэлектрическая ε и магнитная μ проницаемости являются одновременно отрицательными величинами [3]. В

таких средах возможно распространение обратной электромагнитной волны (ОЭМВ). В [4] экспериментально демонстрировалась стабильная генерация солитонных импульсов в нелинейных активных метаматериалах. Последние были выполнены в виде активного кольцевого резонатора, содержащего микроволновый усилитель и линию передачи с левой средой. Была продемонстрирована генерация временных солитонов огибающей, которую возможно было осуществить только на ОЭМВ.

Одними из разновидностей левых сред являются бигиротропные среды [5], например, в виде ферро- и антиферромагнитных (ФМ и АФМ) ПП. В [6] было показано, что намагниченностью в ФМ и АФМ ПП и, как следствие этого, электродинамическими характеристиками ОЭМВ можно управлять, меняя концентрацию электронов в твердотельной плазме. При этом, в отличие от медленных МСВ, существующих в обычных пленках ФМ и АФМ, медленные ОЭМВ, существующие в пленках ФМ ПП и АФМ ПП, являются значительно более широкополосными, что должно приводить к формированию на этих волнах солитонов огибающей меньшей длительности.

В настоящей работе мы демонстрируем возможность формирования светлых солитонов огибающей нано- и субнаносекундной длительности в дважды отрицательных бигиротропных средах с параметрами ФМ или АФМ ПП.

1. Линейная аналитическая модель поперечно намагниченной бигиротропной среды

На первом этапе были проведены расчеты дисперсионных характеристик (ДХ) ОЭМВ, существующих в поперечно намагниченном слое бигиротропной среды. Анализируемая структура представляет собой ограниченный в одном направлении (по толщине d) слой бигиротропной среды, касательно к поверхности которого приложено внешнее постоянное магнитное поле $\vec{H}_0$ (см. рис. 1). Рассматривается случай поперечного намагничивания, когда внешнее магнитное поле $\vec{H}_0$ ортогонально волновому вектору $\vec{\mathrm{k}}$ ($\vec{H}_0 \perp \vec{\mathrm{k}}$). Дисперсионное уравнение для неоднородных плоских ЭМВ, существующих в поперечно намагниченной бигиротропной среде в отсутствие потерь, имеет следующий вид [5]:

$$k_x^2 + k^2 = k_0^2 \varepsilon_{eff\perp} \mu_{eff\perp}^{ФМ,АФМ}, \tag{1}$$

где

$$\varepsilon_{eff\perp} = \varepsilon_r \eta,$$
$$\mu_{eff\perp}^{ФМ,АФМ} = (\mu^2 - \mu_a^2)/\mu, \tag{2}$$

$\eta = 1 - \omega_{pe}^2/\omega^2$, ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость среды, $\omega_{pe} = \sqrt{4\pi N e^2/m_e}$ – плазменная частота электронов, $\omega_{ce} = |eB_0|/(m_e c)$ – циклотронная частота электронов, $\omega = 2\pi f$ – круговая частота, f – линейная частота, N – концентрация электронов в плазме, e/m_e – удельный заряд электрона, B_0 – постоянная магнитная индукция. Для ФМ: $\mu =$

$[\omega_H(\omega_H+\omega_M)-\omega^2]/(\omega_H^2-\omega^2)$, $\mu_a = \omega_M\,\omega/(\omega_H^2-\omega^2)$, $\omega_H = \gamma H_0$ – частота ФМ резонанса, которая в случае бигиротропной среды равна циклотронной частоте электронов ($\omega_H = \omega_{ce}$ - гирочастота), $\omega_M = 4\pi\gamma M_0$, $4\pi M_0$ – намагниченность насыщения, γ – гиромагнитное отношение. Для АФМ: $\mu = 1 + 8\pi\gamma_s^2 M_s H_A \frac{\omega_+\omega_- - \omega^2}{(\omega_+^2-\omega^2)(\omega_-^2-\omega^2)}$, $\mu_a = 8\pi\gamma_s^2 M_s H_A \frac{\omega(\omega_- - \omega_+)}{[(\omega_+ + j\alpha\omega)^2-\omega^2][(\omega_- + j\alpha\omega)^2-\omega^2]}$, где γ_s – усредненный g-фактор, M_s – усредненная статическая намагниченность подрешеток, H_A – поле анизотропии, $\omega_+ = \gamma_s(H_C + H_0)$, $\omega_- = \gamma_s(H_C - H_0)$ – резонансные частоты, $H_C = \sqrt{H_A(2H_E + H_A)}$ – поле «опрокидывания» подрешеток, H_E – поле однородного обменного взаимодействия между подрешетками.

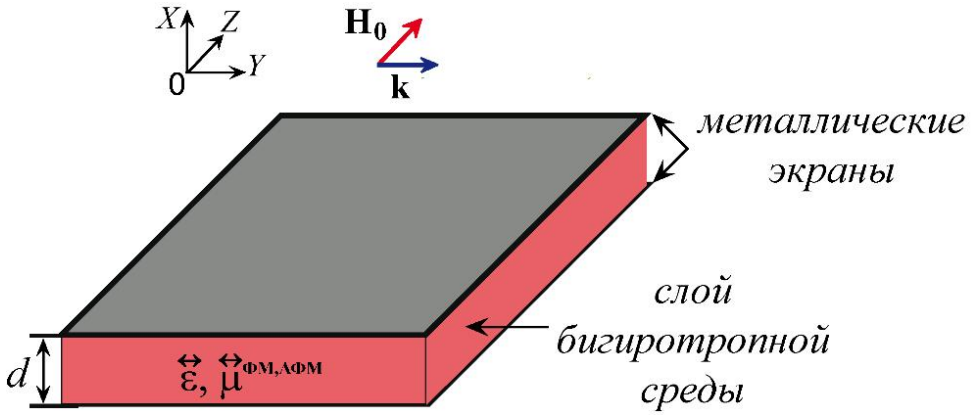
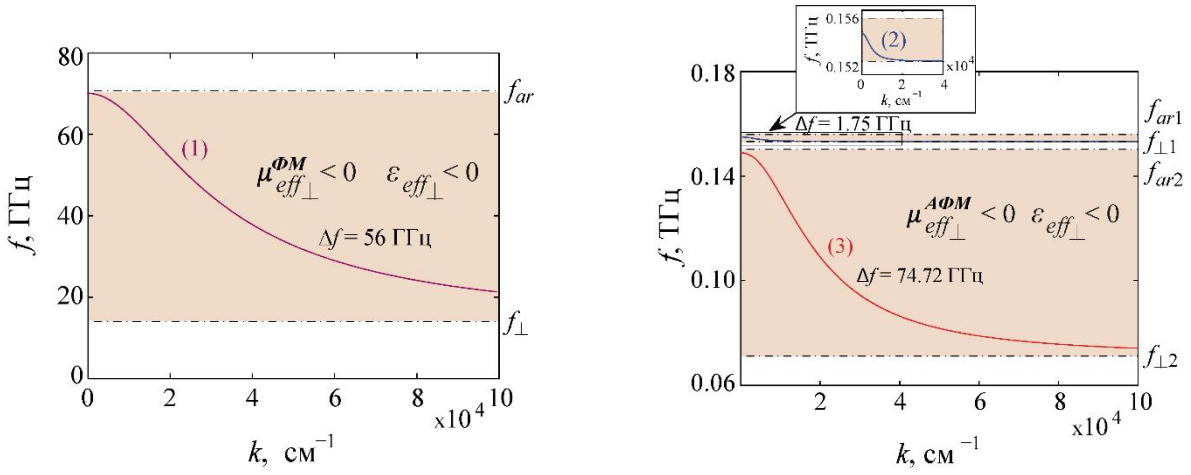


Рисунок 1 – Схематическое изображение металлизированного с обеих сторон бигиротропного слоя при поперечном намагничивании

На рис. 2 приведены дисперсионные характеристики (ДХ) ОЭМВ, существующих в поперечно намагниченной и металлизированной с обеих сторон бигиротропной пленке с параметрами ФМ ПП и АФМ ПП. Видно, что в ФМ ПП (см. рис. 2а) существует одна ОЭМВ (частотный диапазон Δf = 56 ГГц) на частотах микроволнового диапазона, где эффективные материальные параметры среды (2) отрицательны.



(а) (б)

Рисунок 2 – Дисперсионные характеристики обратных ЭМВ, существующих в поперечно намагниченном тонкопленочном ФМ ПП (а) и АФМ ПП (б).

Расчеты выполнены для (а) пленки монооксида европия при N=10^{19} см$^{-3}$, H_0=1 кЭ, $4\pi M_0$=24300 Гс, ε_r=16, d=10 мкм и (б) пленки теллурида европия при N=10^{19} см$^{-3}$, H_0=1 кЭ, H_E=36000 Э, H_A=8000 Э, M_s=11600 Гс, ε_r=6.9 и d=10 мкм

В случае АФМ ПП (см. рис. 2б), возможно существование двух ОЭМВ, одна из которых имеет очень узкий диапазон частот (Δf = 1.75 ГГц) и является более высокочастотной, а вторая является широкополосной (Δf = 74.72 ГГц), но находится ниже по частоте. Обе ОЭМВ существуют в диапазонах частот, где эффективные материальные параметры среды (2) отрицательны.

2. Нелинейная аналитическая модель поперечно намагниченной бигиротропной среды

На втором этапе для поперечно намагниченной бигиротропной среды с параметрами ФМ или АФМ ПП решалось нелинейное уравнения Шредингера (НУШ), записанное в следующем виде:

$$j\frac{\partial\varphi}{\partial t} + jV_g\frac{\partial\varphi}{\partial y} + \frac{\beta}{2}\frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2} - \chi|\varphi|^2\varphi = 0, \quad (3)$$

где V_g - групповая скорость волны, $\beta = \partial^2\omega/\partial k^2$ - коэффициент дисперсии, а $\chi = \partial\omega/\partial|\varphi|^2$ - коэффициент нелинейности, φ - медленно меняющаяся амплитуда.

Следует отметить, что при построении нелинейной модели бигиротропной среды учитывалась нелинейность только магнитной подсистемы. В случае ФМ ПП предполагается, что продольная составляющая вектора намагниченности ФМ зависит от квадрата амплитуды переменной намагниченности m, и эта зависимость имеет следующий вид:

$$M_z \approx M_0(1 - a|m|^2), \quad (4)$$

где M_z – продольная компонента вектора намагниченности, $a = \left(1 + \omega_H^2/\omega_\perp^2\right)/2$, где $\omega_\perp^2 = \sqrt{\omega_H(\omega_H + \omega_M)}$.

В случае АФМ ПП предполагается, что $H_C \gg H_0$ и $\omega_+ \cong \omega_- = \omega_{Hc}$, а от квадрата амплитуды переменной намагниченности m зависит усредненная статическая намагниченность подрешеток M_s АФМ ПП

$$M_z \approx M_s(1 - a|m|^2), \quad (5)$$

где $a = \left(1 + \omega_{Hc}^2/\omega_{\perp c}^2\right)/2$, $\omega_{\perp c}^2 = \sqrt{\omega_{Hc}(\omega_{Hc} + \omega_{Ms})}$ и $\omega_{Ms} = 4\pi\gamma M_s$.

Развитие в среде модуляционной неустойчивости относительно продольных возмущений, которая может привести к формированию светлого солитона огибающей (в случае импульсного возбуждения), возможно при выполнении критерия Лайтхилла:

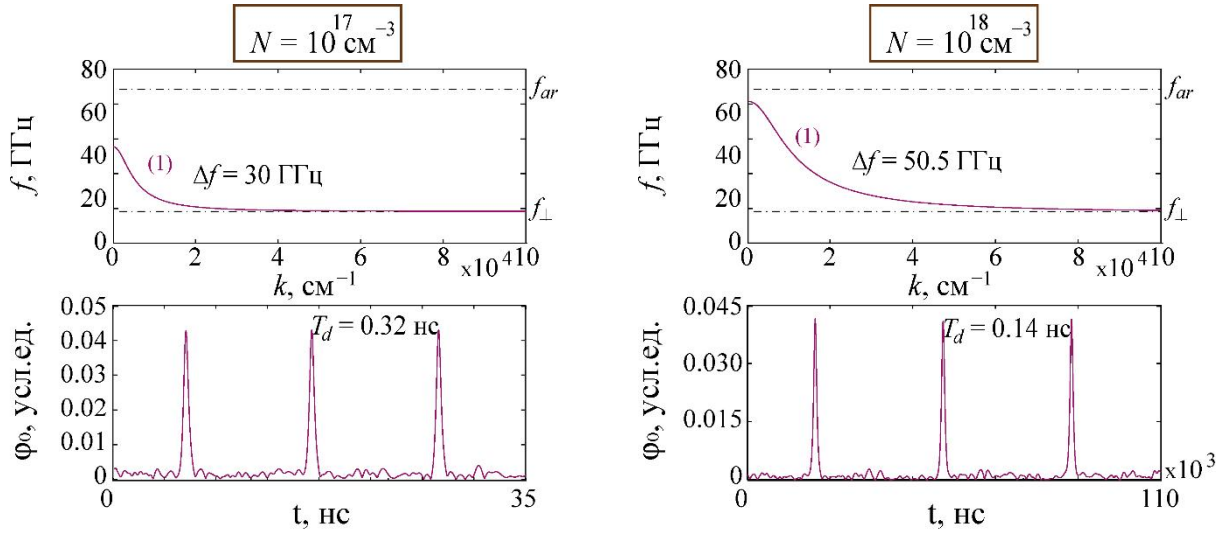
$$\chi\beta < 0. \quad (6)$$

Для каждого солитонного решения проводилась оценка порогового значения амплитуды входного сигнала, необходимого для возникновения модуляционной неустойчивости относительно продольных возмущений, которая выполнялась с использованием следующего выражения:

$$\left|\varphi_0^{пор}\right|^2 = \frac{\pi^2\beta}{2V_g^2 T_{имп}^2 \chi}, \qquad (7)$$

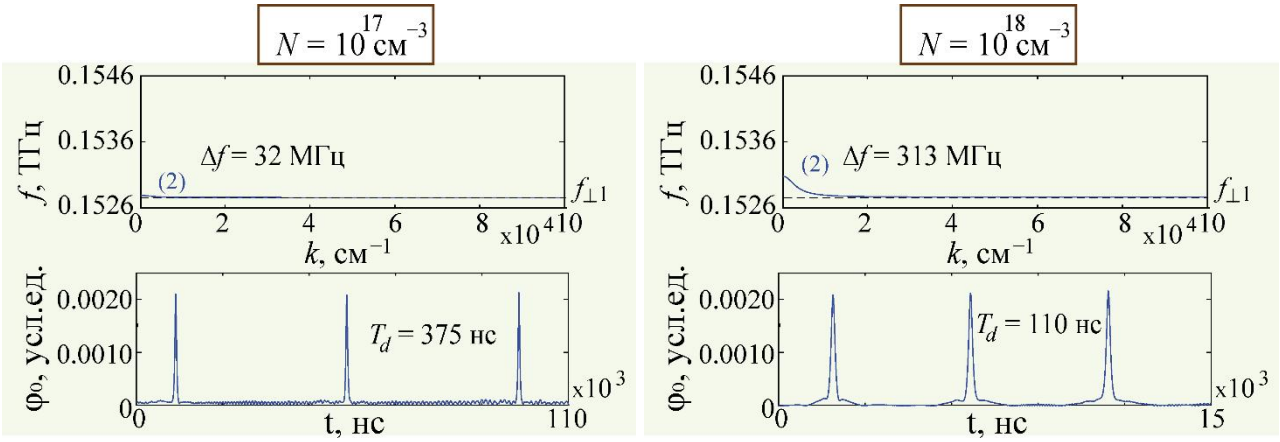
где $T_{имп}$ - длительность входного импульса.

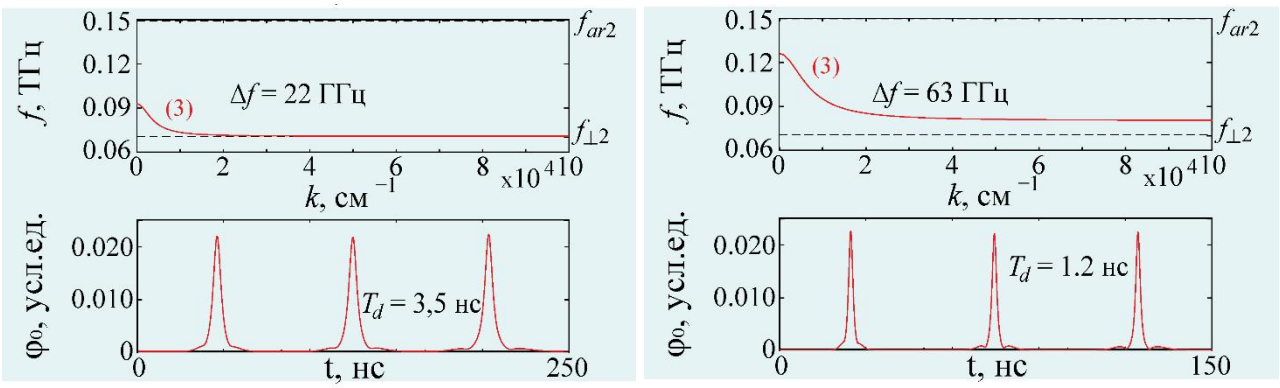
На рис. 3 и рис. 4 приведены ДХ ОЭМВ (верхние рисунки), полученные в результате решения ДУ (1) и соответствующие им периодические последовательности импульсов светлых солитонов огибающих (нижние рисунки), полученные в результате численного решения НУШ (5) с периодическими граничными условиями.



(а) (б)

Рисунок 3 – Периодические последовательности светлых солитонов огибающей на обратной ЭМВ, существующей в пленке ФМ ПП с параметрами монооксида европия для $N = 10^{17}$ см$^{-3}$(а) и $N = 10^{18}$ см$^{-3}$(б)





(а) (б)

Рисунок 4 - Периодические последовательности светлых солитонов огибающей на двух обратных ЭМВ, существующих в пленке АФМ ПП с параметрами теллурида европия для $N = 10^{17}$ см$^{-3}$(а) и $N = 10^{18}$ см$^{-3}$(б)

Параметры НУШ (групповая скорость и коэффициенты дисперсии и нелинейности) соответствовали ОЭМВ, существующей в тонкой пленке монооксида европия (см. рисунок 3) и теллурида европия (см. рисунок 4). Результаты получены для двух значений концентрации электронов в плазме: N=10^{17} см$^{-3}$(а) и N=10^{18} см$^{-3}$(б).

В заключении отметим, что полученные результаты представляют интерес для разработки источников коротких импульсов работающих как в микроволновом, так и в терагерцовом диапазоне частот.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-79-20121, https://rscf.ru/project/19-79-20121/.

Список литературы

1. Рабинович М.И., Трубецков Д.И. Введение в теорию колебаний и волн. НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». 2000. 560 с.

2. Киндяк А.С., Киндяк В.В. Солитонные режимы распространения поверхностных магнитостатических волн в структуре магнетик-полупроводник // ФТТ. – 1999. – Т. 41 – №7. – С. 1272-1275.

3. Веселаго В.Г. Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями ε и μ // УФН. – 1967. – Т. 92. – №3. – С. 517–526.

4. Kozyrev A.B. et al. Soliton generation in active nonlinear metamaterials// Appl. Phys. Lett. – 2014. – V. 104. – No 8. – P. 084105.

5. Локк Э. Г., Герус С.В., Анненков А. Ю. Взаимная ориентация вектора Пойнтинга и вектора групповой скорости электромагнитных волн в бигиротропной среде // Известия РАН. Серия физическая. – 2020. - Т. 84. - № 5. - С. 714-715.

6. Bogomolova A.V. et al. Magnetic bias field driven ferro- and antiferromagnetic semiconductors as double negative media for microwave and terahertz ranges// JMMM – 2023. – V. 587. – P. 171278.

BRIGHT ENVELOPE SOLITON FORMATION IN DOUBLE NEGATIVE BIGYROTROPIC MEDIA BASED ON FERRO- AND ANTIFERROMAGNETIC SEMICONDUCTORS

A.V. Bogomolova, S.V. Grishin

Saratov State University, Saratov, Russia
E-mail: aleksis_bogomolova@mail.ru

The paper presents the theoretical results showing the possibility of formation periodic sequences of bright envelope solitons on backward electromagnetic waves (BEMWs) existing in a double negative bigyrotropic medium based on transversely magnetized films of ferromagnetic (FM) and antiferromagnetic (AFM) semiconductor (SC). The duration of such nonlinear pulses decreases with increasing electron concentration in both FM and AFM SC.
Keywords: double negative media, magnetic semiconductors, solitons.

УДК 528.8, 551.594, 550.380.12

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАННЫХ ГЕОСТАЦИОНАРНОГО ДЕТЕКТОРА МОЛНИЙ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ГИРОТРОПНЫХ ЯВЛЕНИЙ В ВОЛНОВОДЕ ЗЕМЛЯ – ИОНОСФЕРА

А.Л. Филатов

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова (Фрязинский филиал), Российская академия наук, Фрязино, Россия

E-mail: a.filatov@fireras.su

Проанализированы искусственные источники электромагнитного излучения в диапазонах крайне низких и сверхнизких частот 3 - 300 Гц. Изучены современные технические возможности введенных в эксплуатацию геостационарных детекторов молний, данные которых могут быть задействованные для получения электромагнитного спектра одиночной вспышки. Рассмотрена возможность исследований гиротропных свойств волновода Земля – ионосфера с использованием данных о электромагнитном спектре излучения одиночной молнии на базе развитых ранее методов исследования гиротропных свойств ферритовых пленок.

Ключевые слова: геостационарный детектор молний, гиротропная среда, волновод Земля – ионосфера, ферритовые пленки, скоростная видеосъёмка.

Введение

Предложенная Лайманом Спитцером в 1950 году концепция [1] создания специализированного устройства (stellarator) для удержания нагретой плазмы, стимулировала развитие теории распространения электромагнитных волн в гиротропной магнитоактивной плазме (ГМП) [2-6]. Созданный теоретический задел был развит в теории бигиротропной среды, в которой диэлектрическая и магнитная проницаемости имеют матричное представление с ненулевыми недиагональными коэффициентами [7]. Теория бигиротропной среды была экспериментально проверена на примере спиновых волн в ферритовых структурах [8]. В волноводе Земля - ионосфера, который согласно классической теории [9] заполнен ГМП, до сих пор не проводились измерения гиротропных явлений. Одной из возможных причин отсутствия таких измерений является сложность создания мощного источника электромагнитного излучения в диапазонах крайне низких и сверхнизких частот (КНЧ/СНЧ) от 3 до 300 Гц.

После начала эксплуатации в 2018 г. размещенного на спутнике GOES-16 геостационарного картографа молний (Geostationary Lightning Mapper GLM), предназначенного для получения информации об опасной погоде [10], была проанализирована возможность использования данных этого нового научного прибора для исследования ионосферных явлений [11]. Кроме того, была выдвинута и обоснована гипотеза, что электромагнитный спектр молний в этом диапазоне частот может быть получен из Фурье анализа скоростной киносъемки оптического излучения вспышки [12]. В предложенном докладе рассмотрено возможность применения радиоизлучения молнии в КНЧ/СНЧ диапазоне для изучения ГМП в волноводе Земля – ионосфера.

1. Искусственные источники КНЧ/СНЧ радиоволн.

Первая длинноволновая радиостанция «Der Goliath», работающая в частотном диапазоне 15 - 60 кГц, была создана в 1943 для связи с подводными лодками и эксплуатировалась до капитуляции Германии [13]. В обнародованном ВМС США в 1968 году проекте «Sanguine», который был реализован в 1989 г. как проект «Seafarer», была создана радиостанция, вещающая на основной частоте 76 Гц (длина волны около 3947 км). Длина четырех основных передающих антенн в штатах Висконсина и Мичигана составляла около 14 миль (примерно 22.5 км) [14]. В 1990 году была обнародована информация о советской системе «ЗЕВС», которая работала на частоте 82 Гц (длина волны около 3656 км). В этом проекте были использованы смонтированные в области с низкой эффективной проводимостью грунта две глубоко заземленные на концах параллельные антенны, длина которых была около 60 км [15]. Были предложены технические решения, использующие горизонтальные антенны, выполненные по типу линий электропередач на напряжение 110 кВ. Длина антенн составляет 60 км, а расстояние между ними – 10 км [16]. Промышленные линии электропередач (ЛЭП) длиной 200 км временно отключаются во время проведения научных экспериментов [17, 18].

В 1974 было предложено не требующее длинных антенн альтернативное решение – облучение ионосферы модулированным на низких частотах коротковолновым радиоизлучением [19]. В 1981 был создан многофункциональный комплекс для исследования околоземного и космического пространства (нагревательный стенд СУРА), основу которого составляют три коротковолновых радиовещательных радиопередатчика мощностью 250 кВт каждый (диапазон частот передатчиков 4-25 МГц) и 144-элементная фазированная антенная решетка размером ~300х300 м^2 с полосой рабочих частот 4.3-9.5 МГц [20].

2. Технические возможности ГДМ

В GLM установлена камера с ПЗС-сенсором 1372×1300 пикселей и быстродействием 500 к/с [21]. В разрабатываемом АО «РКЦ «Прогресс» — НПП «ОПТЭКС» геостационарном детекторе молний (ГДМ) предполагается использовать КМОП-сенсор 1102×1102 пикселей с максимальным для такого разрешения быстродействием 1000 к/с [22]. Имеющиеся в свободной продаже скоростные камеры с переключаемыми параметрами ПЗС-сенсором имеют режим 1280 х 800 пикселей и 4000 к/с [23].

3. Обсуждение и выводы

В исследовании волн в бигиротропной среде на примере ферритовых пленок, которые предполагается использовать в качестве прототипа при изучении гиротропных свойств волновод Земля – ионосфера, изучались структуры толщиной 10 – 20 мкм на частотах 2-4 ГГц, для которой длина спиновых электромагнитных волн в среде составляла 0.1 – 2 мм [24]. Для оценки характерных частот электромагнитного излучения, необходимого при исследовании волновода Земля – ионосфера, рассмотрим зависимость

электронной концентрации от расстояния до поверхности Земли, которое показано на рис. 1 [25].

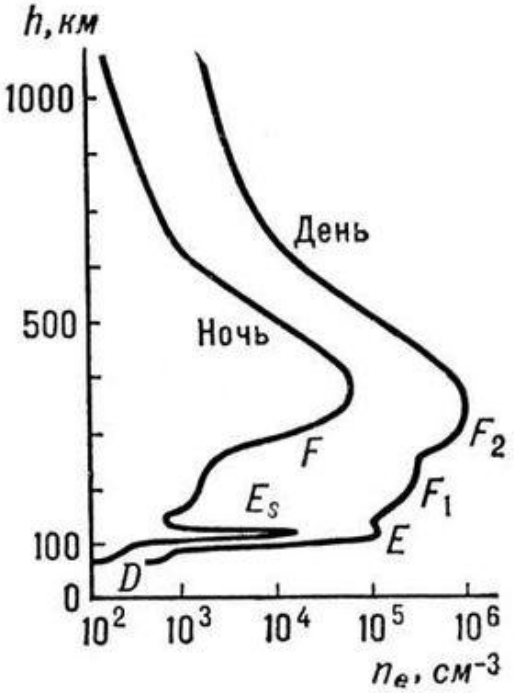


Рисунок 1 – Типичное распределение по вертикали электронной концентрации n_e в ионосфере. Буквами отмечено положение различных областей

Видно, что поперечные размеры волновода можно принять равными 300 км, что, с учетом описанных выше двух порядков превышения длины волны над поперечными размерами, соответствует частоте электромагнитного излучения 10 Гц. Нагревательные стенды технически позволяют создавать мощные КНЧ/СНЧ радиоволны, однако, как было экспериментально зарегистрировано [26], их применение приводит к образованию искусственной ионосферной турбулентности. Согласно теореме Котельникова, дискретность кадров, необходимая для восстановления характеристик временного хода явлений, должна быть не меньше удвоенной характерной частоты. Технические возможности скоростных видеокамер, установленных на современных ГДМ, дают возможность получить необходимый электромагнитный спектр единичного молниевого разряда. Аппаратура приёмников КНЧ/СНЧ радиоволн хорошо разработана и давно применяется на многочисленных станциях наземного мониторинга электромагнитных вол на частотах резонанса Шумана [27] и на специализированных спутниках [28].

На базе представленного в докладе материала можно сделать вывод, что полученный из данных скоростной видеокамеры ГДМ электромагнитный спектр излучения одиночной молнии может использоваться для изучения гиротропных явлений в волноводе Земля – ионосфера.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

Список литературы

1. Спитцер Л. Физика полностью ионизованного газа / М. Изд-во иностранной литературы. 1957г. с. 112
2. Эпштейн П. Теория распространения электромагнитных волн в гиротропной среде. УФН, 1958, т.65, № 2, с.283-311
3. Гершман Б Н, Гинзбург В Л, Денисов Н Г Распространение электромагнитных волн в плазме (ионосфере) УФН 1957 61 Т.61 В 4 с 561 DOI: 10.3367/UFNr.0061.195704d.0561
4. Бирюлин И.А К вопросу о распространении электромагнитных волн в однородной гиротропной среде Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон. 1964. № 4. С. 29
5. Магнитно-ионная теория и ее приложения к ионосфере / Ратклифф Дж. А. ; пер. с англ. А. А. Корчака ; под ред. С. И. Сыроватского. - Москва : Изд-во иностранной литературы, 1962. - 248 с.
6. Гинзбург, Виталий Лазаревич. Распространение электромагнитных волн в плазме - 2-е изд., перераб - Москва : Наука, 1967. - 683 с.
7. Локк Э. Г., Герус С. В., Анненков А. Ю. Взаимная ориентация вектора пойнтинга и вектора групповой скорости электромагнитных волн в бигиротропной среде // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2020. Т. 84. № 5. С. 714-715.
8. Локк Э.Г. Магнитостатические волны в ферритовых пленках и структурах на их основе – Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. М. ИРЭ РАН. 2007
9. Физика медленных МГД-волн в ионосферной плазме / В. М. Сорокин, Г. В. Федорович. - Москва : Энергоиздат, 1982. - 135 с
10. https://www.nasa.gov/missions/goes/flashy-first-images-arrive-from-noaas-goes-16-lightning-mapper/ (дата обращения 10 сентября 2024 г.).
11. Филатов А.Л. О возможности использования данных геостационарного детектора молний для исследования плазменных явлений // Солнечно-земная физика. 2022. Т. 8. № 3 с. 82-85 DOI: 10.12737/szf-83202212
12. Филатов А.Л., Луканина Л.А. Электромагнитный спектр молний из анализа космической скоростной киносъемки для изучения резонанса Шумана // Известия РАН. Серия физическая, 2023, Т. 87, № 10, С. 1503-1506
13. https://bstudy.net/912941/tehnika/perspektivy_razvitiya_radioliniy_diapazona (дата обращения 10 сентября 2024 г.)
14. https://www.hep.wisc.edu/~prepost/ELF.pdf (дата обращения 10 сентября 2024 г.)
15. http://www.vlf.it/zevs/zevs.htm (дата обращения 10 сентября 2024 г.)
16. Волосевич В. С., Коваленко Н.Г., Нероба Г. С. и др. Передающая радиостанция диапазона сверхнизких частот // Патент RU 2272355 C1 2006 Бюл. № 8 https://www.fips.ru/cdfi/fips.dll?ty=49&docid=2272355&lb=1
17. https://www.ikir.ru/export/sites/ikir/ru/News/downloads/107_Fenics2019.pdf (дата обращения 10 сентября 2024 г.)
18. Пилипенко В.А., Мазур Н.Г., Федоров Е.Н., Шевцов А.Н. О возможности экспериментов по возбуждению искусственных УНЧ излучений в ионосфере установкой FENICS на Кольском полуострове // Изв. РАН, серия физическая.— 2024 —88 — №3
19. Getmantsev, G.G., Zuikov, N.A., Kotik, D.S., Mironenko, L.F., Mityakov, N.A., Rapoport, V.O., Sazonov, Yu.A., Trakhtengerts, V.Yu., Eidman, V.Ya., 1974. Combination frequencies in the interaction between high-power short-wave radiation and ionospheric plasma. JETP Letters 20, 101102.
20. http://www.nirfi.unn.ru/stend-sura/ (дата обращения 10 сентября 2024 г.)
21. https://www.nasa.gov/feature/goddard/2017/flashy-firstimages-arrive-from-noaa-s-goes-16-lightning-mapper
22. Квитка В.Е., Дюльдин Р.С., Клюшников М.В., Прасолов В.О. Геостационарный детектор молний. 17-я Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: Труды.

Москва, ИКИ РАН. 2019. С. 140
23. https://evercam.ru/produktsiya/8/942 (дата обращения 10 сентября 2024 г.)
24. Lock E. H., Gerus S. V. Electromagnetic Waves Propagation along Tangentially Magnetised Bihyrotropic Layer (with Example of Spin Waves in Ferrite Plate) // Library of Cornell University http://arxiv.org/abs/2303.08800
25. Виноградова М. Б. Ионосфера / Большая советская энциклопедия. в 30-ти т. – 3-е изд.. – М. : Совет. энцикл., 1969 – 1986
26. Васьков В. В., Беляев П. П., Будько Н. И., и др. Формирование ОНЧ-каналов при воздействии мощной радиоволны на F-слой ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия 1993 33. No 6. с. 91.
27. https://ru.wikipedia.org/wiki/Резонанс_Шумана (дата обращения 10 сентября 2024 г.)
28. Гдалевич Г. Л., Клос З., Михайлов Ю. М. Возбуждение КНЧ-ОНЧ-электрических полей в ионосферной плазме в активных экспериментах (данные Исз «Интеркосмос-24») // Геомагнетизм и аэрономия. 2003. т. 43. No 5. с. 645
.

POSSIBILITY OF USING GEOSTATIONARY LIGHTNING DETECTOR DATA TO STUDY GYROTROPIC GYROTROPIC PHENOMENA IN THE EARTH - IONOSPHERE WAVEGUIDE

A. L. Filatov
Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics
of Russian Academy of Sciences (Fryazino branch), Fryazino, Russia
E-mail: a.filatov@fireras.su

Artificial sources of electromagnetic radiation in extremely low and ultra-low frequency ranges of 3 - 300 Hz are analyzed. Modern technical capabilities of geostationary lightning detectors are studied, the data from which can be used to obtain the electromagnetic spectrum of a single flash.
The possibility of studying the gyrotropic properties of the Earth-ionosphere waveguide using data on the electromagnetic spectrum of radiation of a single lightning strike is considered based on previously developed methods for studying the gyrotropic properties of ferrite films.
Key words: geostationary lightning mapper, gyrotropic properties, Earth-ionosphere waveguide, ferrite films, high-speed video shooting.

УДК 537.624;537.632

МОДУЛЬ И ОРИЕНТАЦИЯ ВЕКТОРА ПОЙНТИНГА ПОВЕРХНОСТНОЙ СПИНОВОЙ ВОЛНЫ В КАСАТЕЛЬНО НАМАГНИЧЕННОЙ ФЕРРИТОВОЙ ПЛАСТИНЕ

Э. Г. Локк, С. В. Герус
Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова (Фрязинский филиал), Российская академия наук, Фрязино, Россия
E-mail: edwin@ms.ire.rssi.ru

Теоретически исследовано изменение модуля P и ориентации ψ_P вектора Пойнтинга в поперечном сечении касательно намагниченной ферритовой пластины для произвольной спиновой поверхностно-поверхностной волны (распределение которой характеризуют два волновых числа). Обнаружено, что как модуль P, так и ориентация ψ_P вектора Пойнтинга меняются скачком на поверхностях пластины (границах раздела сред). Найдено, что изменение величины ψ_P по толщине пластины может быть весьма значительным, а модуль P вектора Пойнтинга принимает максимальные значения на обеих поверхностях пластины, причем наибольшая часть энергии волны локализована вблизи той поверхности, у которой величина P принимает наибольшее значение.
Ключевые слова: ферритовая пластина, спиновая волна, ориентация и модуль вектора Пойнтинга.

Как известно, СВ с волновыми числами $0 < k < 10^4$ см$^{-1}$, обычно описывают в магнитостатическом приближении (МСП) [1], полагая, что волновое число СВ $k >> k_0 \equiv \omega/c$ (здесь ω – циклическая частота СВ, а c – скорость света в вакууме) и, следовательно, в уравнениях Максвелла можно пренебречь членами, содержащими множители ω/c. Однако, в ряде работ [2 – 10], в которых МСП не использовалось, было обнаружено, что некоторые характеристики СВ принципиально отличаются от аналогичных характеристик, рассчитанных с использованием МСП. В частности, в [9] аналитически, решена задача о распространении электромагнитных волн в произвольном направлении вдоль касательно намагниченного бигиротропного слоя. Найдено, что распределение волны по толщине такого анизотропного слоя описывают два разных по величине волновых числа k_{x21} и k_{x22}, которые могут принимать действительные или мнимые значения. Показано, что в ферритовой пластине, являющейся частным случаем бигиротропного слоя, может возникать три типа распределения спиновых волн внутри феррита – поверхностно-поверхностное (k_{x21} и k_{x22} действительные числа), объемно-поверхностное (k_{x21} мнимое число, а k_{x22} – действительное) и объемно-объемное (k_{x21} и k_{x22} мнимые числа), что принципиально отличает полученное описание от описания спиновых волн в магнитостатическом приближении. В этой же работе [9] было получено дисперсионное уравнение и рассчитаны различные характеристики поверхностно-поверхностной спиновой волны (далее будем называть ее кратко *SS*-волной), частоты которой лежат выше частоты ферромагнитного резонанса пластины, а распределение z-компоненты СВЧ электрического поля волны по толщине ферритового слоя описывает выражение

$$e_{z2} = A\exp(k_{x21}x) + B\exp(-k_{x21}x) + C\exp(k_{x22}x) + D\exp(-k_{x22}x), \qquad (1)$$

где A, B, C и D – произвольные коэффициенты (см. формулу (26) в [9]).

Продолжая исследования, представленные в [9], ниже будут рассчитаны изменение модуля и ориентации вектора Пойнтинга поверхностной спиновой *SS*-волны в поперечном сечении касательно намагниченной ферритовой пластины (см. рис. 1).

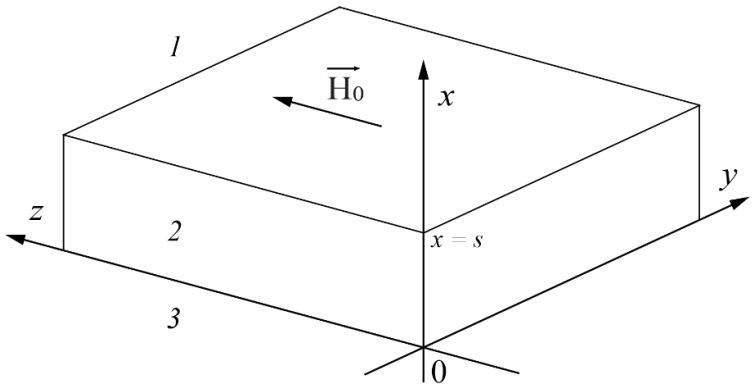


Рисунок 1 – Геометрия задачи: *1* и *3* – полупространства изотропного диэлектрика (или вакуум), *2* – бигиротропный слой (в частном случае – ферритовая пластина) толщиной *s*

Как известно, вектор Пойнтинга $\vec{P}$ в общем случае вычисляется по формуле

$$\vec{P} = \frac{c}{8\pi}\mathrm{Re}\ \vec{E}\vec{H}^{*} \qquad (2)$$

Поскольку внутри ферритовой пластины вектор Пойнтинга $\vec{P}$ зависит от координаты x, то удобно записать вектор Пойнтинга $\vec{P}$ в следующем виде:

$$\vec{P} = P_x\vec{x}_0 + P_y\vec{y}_0 + P_z\vec{z}_0 = \sum_{j=1}^{3}\left(P_{xj}\vec{x}_0 + P_{yj}\vec{y}_0 + P_{zj}\vec{z}_0\right), \qquad (3)$$

где компоненты вектора Пойнтинга в средах $j = 1$, 2 и 3 в соответствии с формулой (2) будут определять выражения

$$P_{xj} = \frac{c}{8\pi}\mathrm{Re}\left(E_{yj}H_{zj}^{*} - E_{zj}H_{yj}^{*}\right), \qquad (4)$$

$$P_{yj} = \frac{c}{8\pi}\mathrm{Re}\left(E_{zj}H_{xj}^{*} - E_{xj}H_{zj}^{*}\right), \qquad (5)$$

$$P_{zj} = \frac{c}{8\pi}\mathrm{Re}\left(E_{xj}H_{yj}^{*} - E_{yj}H_{xj}^{*}\right). \qquad (6)$$

Так как в данной геометрии x-компоненты P_{xj} вектора $\vec{P}$ во всех трех средах равны нулю (в чем несложно убедиться, подставляя формулы для соответствующих компонент E и H из работы [9] в выражение (4)), поэтому вектор $\vec{P}$ будет иметь лишь y- и z-компоненты.

Чтобы наше изложение было более понятным, рассчитаем вначале изочастотные зависимости СВ в ферритовый пластине, для различных частот (см. рис. 2). Кривые *1 – 4* рассчитаны на основе представленного в [9] описания

СВ, а кривые *1′ – 4′* – рассчитаны с использованием МСП. Расчёты характеристик проводились при следующих параметрах: H_0 = 300 Э, $4\pi M_0$ = 1750 Гс, s = 40 мкм. Как видно из рис. 2, изочастотные кривые *1 – 4* и соответствующие кривые *1′ – 4′* отличаются друг от друга заметно лишь при малых значениях волнового числа k на частотах, близких к величине $f_\perp = \omega_\perp / 2\pi = \sqrt{\omega_H^2 + \omega_H \omega_M} / 2\pi = 2197{,}7$ МГц.

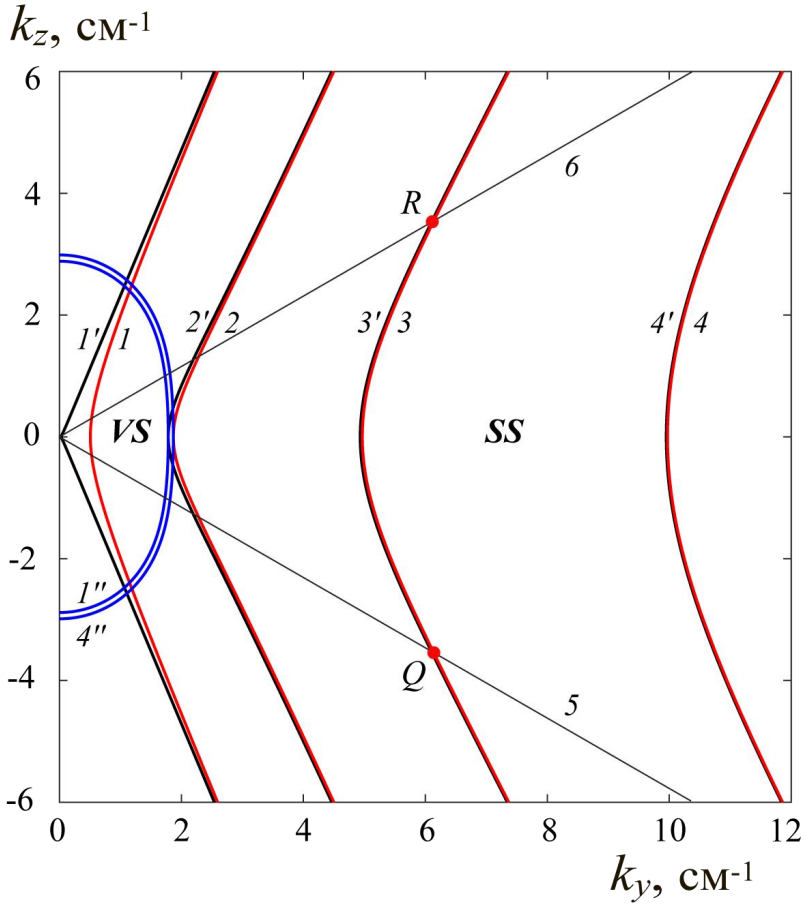


Рисунок 2 – Изочастотные зависимости СВ в касательно намагниченной ферритовой пластине для частот 2198 (*1* и *1′*), 2216.5 (*2* и *2′*), 2250 (*3* и *3′*) и 2300 МГц (*4* и *4′*) (показана полуплоскость $k_y > 0$). Кривые *1′ – 4′* (чёрные) рассчитаны с использованием МСП, кривые *1 – 4* (красные) – без него. Кривая *1″* отделяет на кривой *1* участки с *SS*-волной и участок с *VS*-волной (имеющей объёмно-поверхностное распределение). *5* и *6* – прямые φ = -30° и φ = 30°

Рассчитаем теперь, в качестве примера, как меняются модуль, ориентация и амплитуды компонент P_y и P_z вектора Пойнтинга для спиновой *SS*-волны в поперечном сечении ферритовой пластины для произвольно выбранных точек *Q* и *R* (показанных на рис. 2), которым соответствует частота f = 2300 МГц и ориентации волнового вектора $\vec{k}$ под углами φ = -30° и φ = 30° соответственно.

Зависимости $P_y(x)$ и $P_z(x)$ вектора Пойнтинга представлены на рис. 3, а зависимости его модуля P и его ориентации ψ_P – на рис. 4 (а и б).

Как видно из рис. 3, обе зависимости $P_y(x)$ и $P_z(x)$ претерпевают разрыв на границах раздела сред x = 0 и x = s, причем зависимости $P_y(x)$ во всех трех средах совпадают для точек *Q* и *R* (то есть, для спиновых *SS*-волн, которые имеют одинаковый модуль волнового вектора k и разные его ориентации φ = -

30° и при φ = 30°), тогда как аналогичные зависимости $P_z(x)$ во всех трех средах отличаются знаком. В то же время, величина P_z никогда не бывает равна нулю, тогда как величина P_y принимает нулевое значение внутри ферритовой пластины примерно при x = 13 мкм (для параметров волны, соответствующих обеим точкам Q и R). Из-за этого модуль вектора Пойнтинга P имеет минимум при том же значении x = 13 мкм (см. рис. 4а).

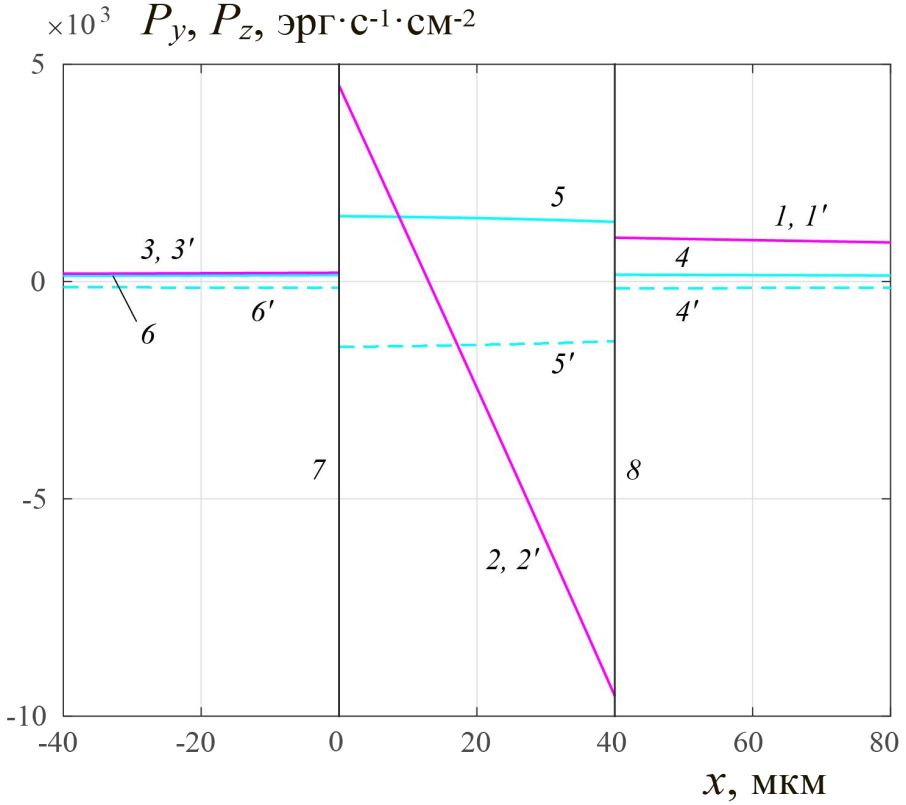


Рисунок 3 – Зависимости амплитуд компонент P_y (кривые *1* и *1′*, *2* и *2′*, *3* и *3′*) и P_z (кривые *4* и *4′*, *5* и *5′*, *6* и *6′*) вектора Пойнтинга спиновой *SS*-волны с частотой f = 2300 МГц в поперечном сечении ферритовой пластины при φ = -30° (кривые *1* – *6*) и при φ = 30° (кривые *1′* – *6′*); прямые *7* и *8* соответствуют поверхностям пластины x = 0 и $x = s$ = 40 мкм

Кроме того величина P имеет наибольший максимум у поверхности $x = s$, что определяет локализацию наибольшей части энергии СВ вблизи этой поверхности.

Как видно из рис. 4б, обе зависимости $\psi_P(x)$ претерпевают разрыв на границах раздела сред x = 0 и $x = s$, причем значения ψ_P, соответствующие точкам Q и R при одинаковых x, всегда одинаковы по величине, но имеют разные знаки. На рис. 4б отрицательному углу φ волнового вектора $\vec{k}$ всегда соответствуют положительные значения ориентации ψ_P вектора Пойнтинга во всех трех средах, а положительному углу φ – отрицательные значения угла ψ_P. Кроме того, величина ψ_P остается неизменной в полупространствах *1* и *3*, тогда как внутри ферритовой пластины величина ψ_P изменяется на довольно большой угол – около 153°.

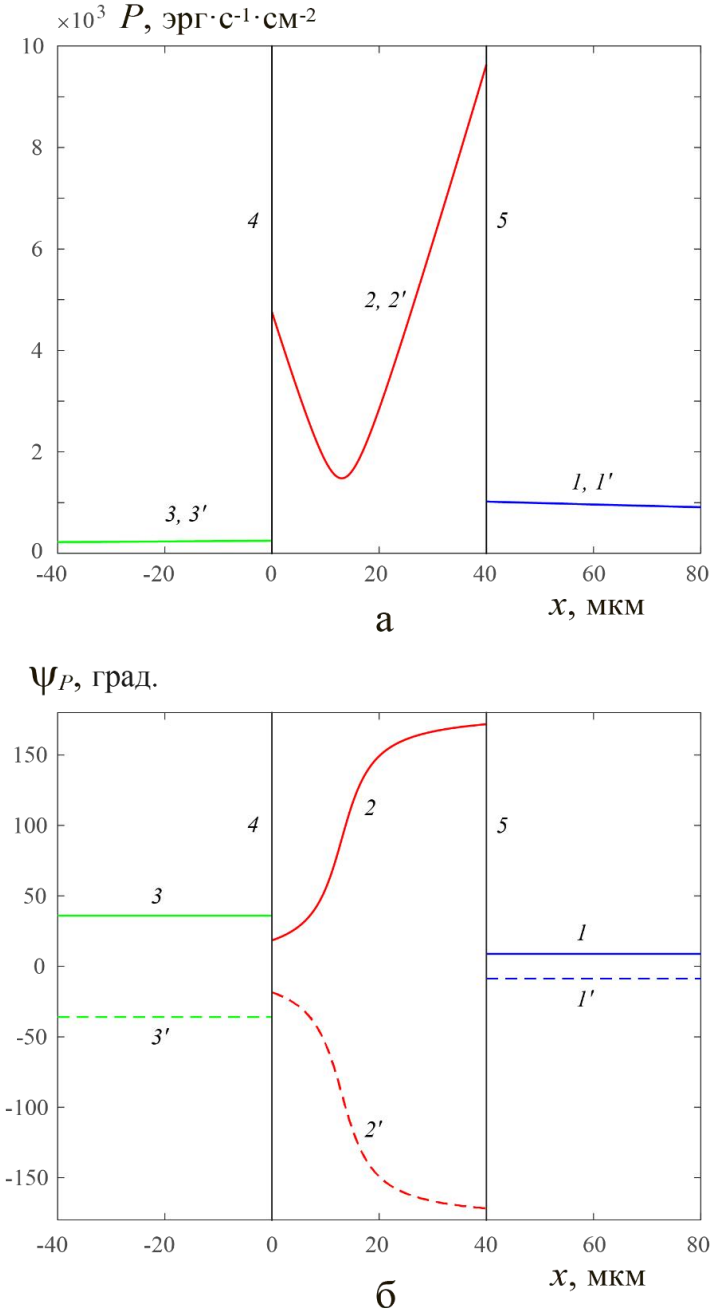


Рисунок 4 – Зависимости модуля P (а) и угла ψ_P, определяющего ориентацию вектора Пойнтинга (б), в поперечном сечении ферритовой пластины для спиновой *SS*-волны с частотой f = 2300 МГц при φ = -30° (кривые *1* – *3*) и при φ = 30° (кривые *1′* – *3′*); прямые *4* и *5* соответствуют поверхностям пластины $x = 0$ и $x = s = 40$ мкм

Отметим также, что для определения направления переноса энергии волны необходимо найти поток энергии $\vec{\Pi}$, который вычисляется как интеграл от вектора Пойнтинга волны. Вычисление этого интеграла представлено в [11].

Работа выполнена в рамках государственного задания Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

Список литературы

1. Damon R. W., Eshbach J. R. Magnetostatic Modes of a Ferromagnetic Slab // J. Phys. Chem. Sol. 1961. V.19. №3/4. P. 308-320.

2. Вашковский А. В., Локк Э. Г. Влияние диэлектрической подложки и магнитных потерь на дисперсию и свойства поверхностной магнитостатической волны // Радиотехника и электроника. 2001. Т. 46. № 6. С. 729-738.
3. Вашковский А. В., Локк Э. Г. Поверхностные магнитостатические волны в структуре феррит-диэлектрик, окруженной полупространствами с отрицательной диэлектрической проницаемостью // Радиотехника и электроника. 2002. Т. 47. № 1. С. 97-102.
4. Вашковский А. В., Локк Э. Г. О взаимосвязи энергетических и дисперсионных характеристик магнитостатических волн в ферритовых структурах // Успехи физических наук. 2011. Т. 181. № 3. С. 293-304.
5. Вашковский А.В., Локк Э. Г. О физических свойствах обратной магнитостатической волны при ее описании на основе уравнений Максвелла // Радиотехника и электроника. 2012. Т. 57. № 5. С. 541-549.
6. Локк Э. Г. Спиновые волны в структуре диэлектрик-феррит-диэлектрик, граничащей с «магнитными стенками» или идеальными проводниками (на основе уравнений Максвелла) // Радиотехника и электроника. 2014. Т. 59. №7. С. 711- 721.
7. Локк Э. Г. Структура высокочастотных полей поверхностной спиновой волны в касательно намагниченной ферритовой пластине // Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61. № 1. С. 35-44.
8. Локк Э. Г., Вашковский А.В. Влияние металлического экрана и магнитной стенки на картины векторных линий высокочастотного поля поверхностной спиновой волны // Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61. № 8. С. 746-756.
9. Lock E. H., Gerus S. V. Electromagnetic Waves Propagation along Tangentially Magnetised Bihyrotropic Layer (with Example of Spin Waves in Ferrite Plate) // Library of Cornell University http://arxiv.org/abs/2303.08800
10. Локк Э. Г., Герус С. В. Электромагнитные волны в односторонне металлизированном касательно намагниченном бигиротропном слое (с примером расчета характеристик спиновых волн) // Радиотехника и электроника. 2023. Т. 68. № 9. С. 884-892.
11. Локк Э. Г., Герус С. В. Направление потока энергии поверхностной спиновой волны в касательно намагниченной ферритовой пластине // XXXI Международная конференция «Электромагнитное поле и материалы (фундаментальные физические исследования)». 22-23 ноября 2024 г., Москва, Россия, НИУ «МЭИ». Сборник трудов конференции.

MODULUS AND ORIENTATION OF THE POYNTING VECTOR OF A SURFACE SPIN WAVE IN A TANGENTIALLY MAGNETISED FERRITE PLATE

E. H. Lock, S. V. Gerus
Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics
of Russian Academy of Sciences (Fryazino branch), Fryazino, Russia
E-mail: edwin@ms.ire.rssi.ru

The change of the modulus P and orientation ψ_P of the Poynting vector over the thickness of a tangentially magnetized ferrite plate for an arbitrary surface-surface spin wave (whose distribution is characterized by two wave numbers) is theoretically investigated. It is found that both the modulus P and the orientation ψ_P of the Poynting vector change by jumps on the plate surfaces (interfaces). It is found that the change in the value of ψ_P over the plate thickness can be quite significant, and the P modulus of the Poynting vector takes maximum values on both surfaces of the plate, and the largest part of the wave energy is localized near the surface on which the value of P takes the highest value.
Key words: ferrite plate, spin wave, modulus and orientation of the Poynting vector.

УДК 537.624;537.632

ВОЗБУЖДЕНИЕ ОБЪЁМНЫМИ СПИНОВЫМИ ВОЛНАМИ ЛОКАЛЬНЫХ МОД НА КРУГЛОМ ОТВЕРСТИИ В ФЕРРИТОВОЙ ПЛЁНКЕ

С. В. Герус, Э. Г. Локк
Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова (Фрязинский филиал), Российская академия наук, Фрязино, Россия
E-mail: svg318@ire216.msk.su

Экспериментально исследовано взаимодействие обратных объёмных спиновых волн с неоднородностью в виде сквозного отверстия в ферритовой плёнке, в которой распространяется волна. В качестве инструмента исследования использовался сверхнаправленный луч обратных объёмных спиновых волн, имеющий практически нулевую дифракционную расходимость. Обнаружено, что помимо рассеяния волны на этом препятствии на нём возбуждаются локальные колебания – собственные спиновые моды в области намагниченной ферритовой среды, окружающей круглое отверстие.
Ключевые слова: ферритовая плёнка, отверстие, спиновая волна, распределение амплитуды, сверхнаправленный луч, локальная мода.

В серии предыдущих публикаций были представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований дифракции спиновых волн (СВ) на различного рода неоднородностях. В качестве таких препятствий изучались образования типа магнонного кристалла (см. например [1]), а также сквозные отверстия в ферритовой плёнке, по которой распространялась спиновая волна. Исследовалась дифракция как поверхностных [2, 3] так и объёмных СВ [4] при различных конфигурациях лучей СВ. Так в работе [2] рассматривалась ситуация, когда фазовая и групповая скорости СВ параллельны, а в работах [1, 3, 4] исследовался случай дифракции так называемого сверхнаправленного луча, то есть луча у которого дифракционная расходимость практически отсутствует, при этом векторы фазовой и групповой скоростей СВ направлены в разные стороны.

Ниже представлено экспериментальное исследование взаимодействия сверхнаправленного луча обратных объёмных СВ (ООСВ) со сквозным отверстием диаметром d = 250 мкм в ферритовой пленке ЖИГ (толщина s = 16.56 мкм и намагниченность насыщения $4\pi M_0$ = 1853 Гс, пленка была касательно намагничена однородным магнитным полем величиной H_0 = 468 Э). Возбуждающий преобразователь длиной 5 мм был ориентирован относительно вектора магнитного поля $\mathbf{H_0}$ под углом $\varphi_{пр}$= 67.9° и возбуждал обратные волны, у которых волновой вектор $\mathbf{k}$ направлен под углом $\varphi_{s2} = \varphi_{пр} - 90^o = -22.1°$. Поскольку экспериментальные измерения проводились методом зондирования одновременно в интервале частот 2777 МГц < f < 2900 МГц, то угол ψ_{s2} (определяющий ориентацию вектора групповой скорости $\mathbf{V}_{s2}$) для разных частот немного менялся в интервале значений $-119° < \psi_{s2} < -114°$ и, например, для на частоты 2864 МГц величина этого угла составляла $\psi_{s2} = -117.29^o$.

Об относительной ориентации возбуждающего преобразователя по отношению к вектору $\mathbf{H_0}$ можно судить также из рис. 1 и 2, где представлено визуализированное распределение амплитуды A сверхнаправленного луча ООСВ в плоскости плёнки ЖИГ для различных частот.

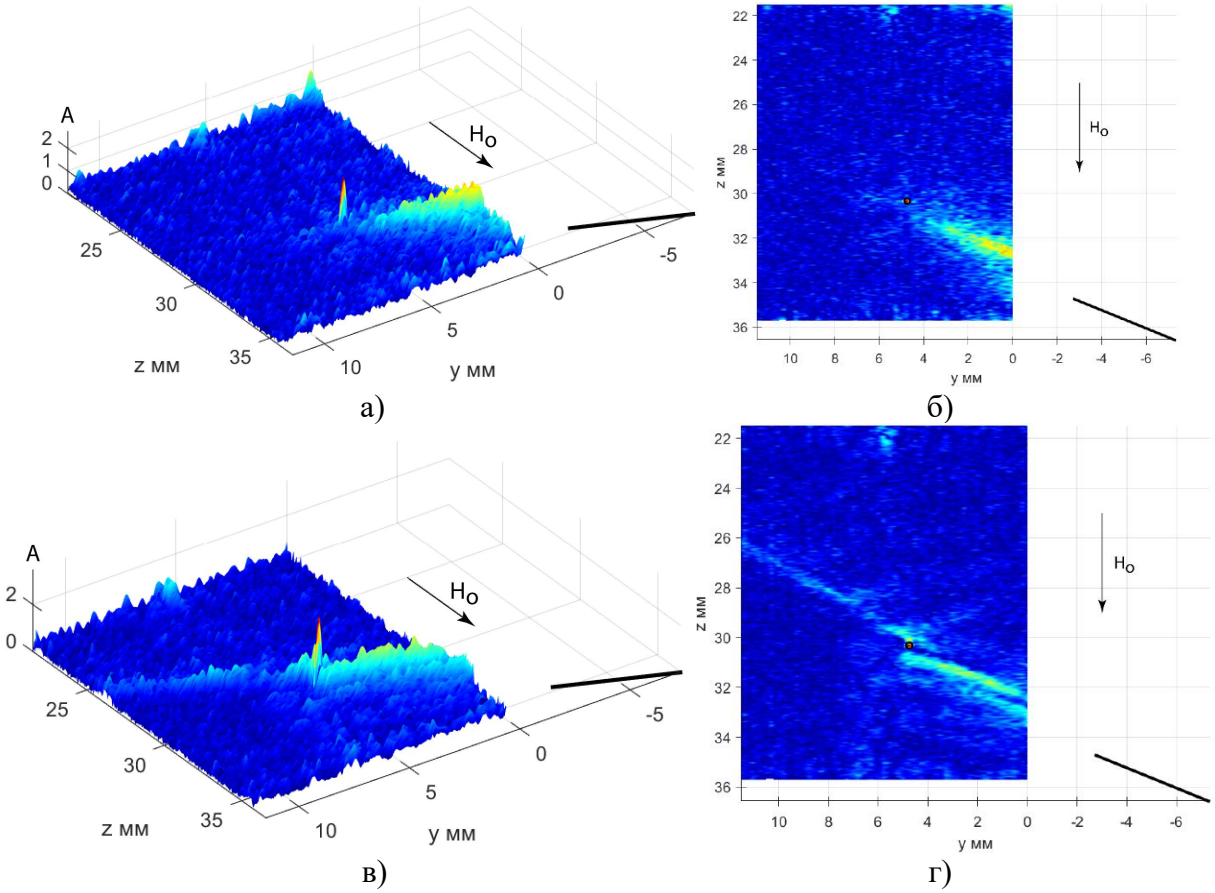


Рисунок 1 – Экспериментальные картины распределения амплитуды A сверхнаправленного луча ООСВ в плёнке ЖИГ на частотах 2790 МГц (а, б) и 2840 МГц (в, г). Диаграммы (б) и (г) показывают вид сверху на 3-D диаграммы (а) и (в) соответственно. В правой части каждой диаграммы прямой линией показан возбуждающий преобразователь, стрелкой показано направление поля подмагничивания $\mathbf{H}_0$.
На диаграммах (б) и (г) место отверстия обозначено чёрным кружочком.

В поставленных экспериментах предполагалось исследовать дифракцию сверхнаправленного луча ООСВ (или луча имеющего малую дифракционную расходимость) на сквозном отверстии, однако, после построения экспериментальных дифракционных картин было обнаружено, что в результате падения луча ООСВ на отверстие возникает новое физическое явление – на отверстии возникает возбуждение локальных спиновых мод или колебаний (рис. 1 и 2). Так, на рис. 1 виден луч ООСВ, распространяющийся от возбуждающего преобразователя к отверстию. Поскольку на частоте 2790 МГц (Рис. 1а и 1б) волновое число ООСВ достаточно велико, то луч заметно затухает по мере приближения к отверстию. Несмотря на это, в области отверстия наблюдается высокий пик амплитуды спиновых колебаний, локализованных на отверстии. То есть, даже слабый поток энергии луча ООСВ, достигший отверстия, способен весьма эффективно возбудить эти локальные колебания на отверстии.

Если преобразователь, возбуждающий ООСВ, сдвигали в сторону, так, чтобы луч ООСВ не попадал на отверстие, то локальные колебания на отверстии не наблюдались.

ООСВ характерны тем, что с возрастанием частоты волновое число k уменьшается и вместе с тем падает и затухание волны, и которая, достигая отверстия, меньше затухает. На частоте 2840 МГц луч, распространяясь и пересекая зону, где расположено отверстие, также весьма эффективно возбуждает локальные спиновые колебания на отверстии (рис. 1в и 1г). Отметим, что для этой частоты амплитуда самого исходного луча ООСВ изменяется не монотонно вдоль траектории луча (как это имело место в более толстой пленке в [5]), а имеет минимумы и максимумы (заметные на рис. 1г как полосы, пересекающие траекторию луча), что, возможно, связано с возбуждением наряду с первой модой и высших мод ООСВ.

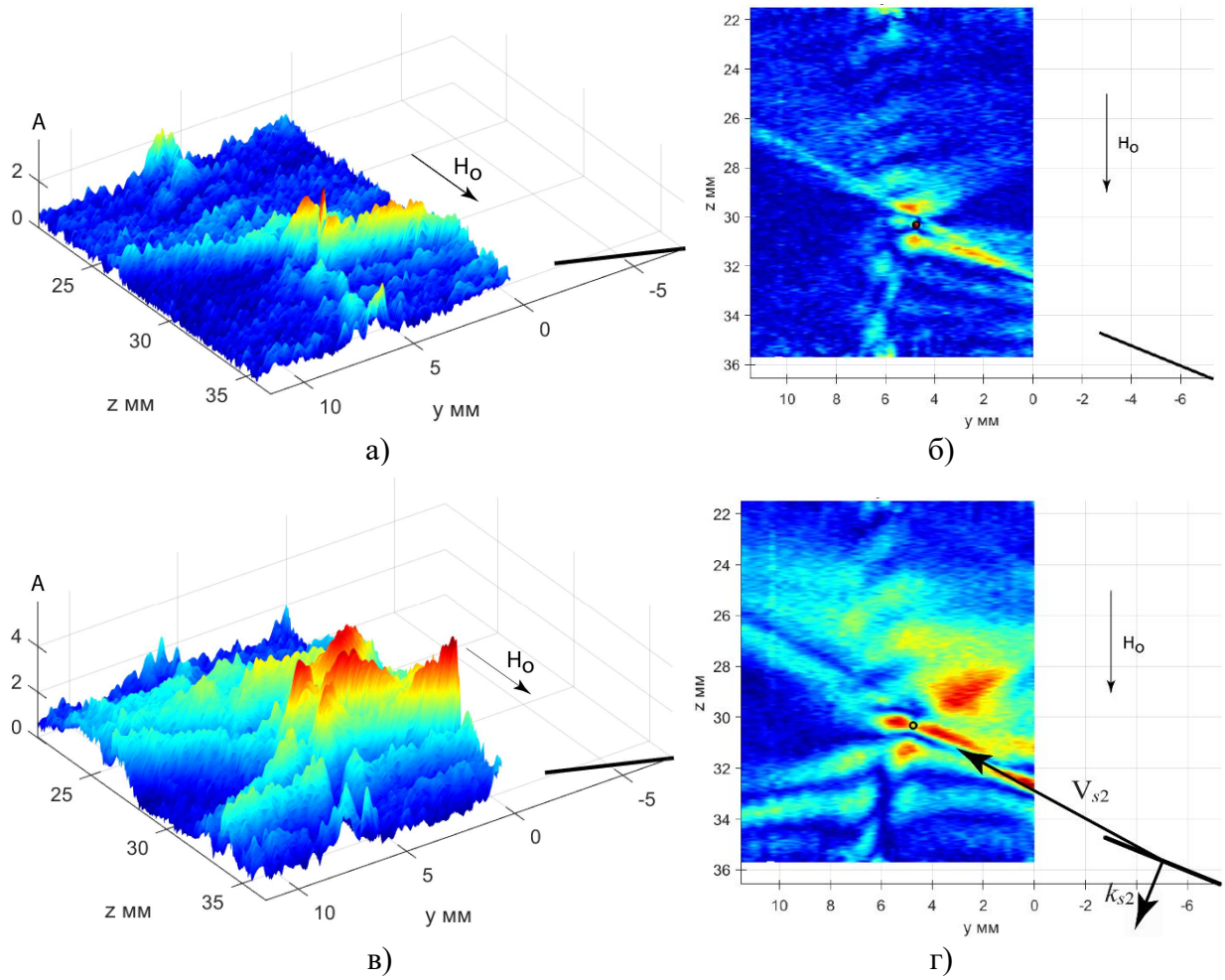


Рисунок 2 – Экспериментальные картины распределения амплитуды A сверхнаправленного луча ООСВ в плёнке ЖИГ на частотах 2850 МГц (а, б) и 2864 МГц (в, г). Диаграммы (б) и (г) показывают вид сверху на 3-D диаграммы (а) и (в) соответственно. В правой части каждой диаграммы прямой линией показан возбуждающий преобразователь, стрелкой показано направление поля подмагничивания $\mathbf{H}_o$. На диаграммах (б) и (г) место отверстия обозначено чёрным кружочком. На рис. (г) показаны волновой вектор $\mathbf{k}_{s2}$ и вектор групповой скорости $\mathbf{V}_{s2}$ исходной ООСВ.

На более высокой частоте 2850 МГц (рис. 2а и 2в) волна, подходя к

отверстию, затухает еще меньше, но на фоне большой амплитуды самого исходного луча все еще хорошо различим пик эффективно возбуждающихся спиновых колебаний, локализованных на отверстии. Кроме того, на этой частоте возникает заметное отражение энергии исходного луча от отверстия (параллельно оси *z* и под углом 115° к оси *z*.

Отметим, при дифракции ООСВ с частотами 2790 МГц, 2850 МГц и 2850 МГц (рис. 1 и 2 а, б) дифракционная тень от отверстия в направлении вектора групповой скорости ООСВ практически не возникала.

Однако, на частоте 2864 МГц (рис. 2 в, г) в результате дифракции на отверстии сверхнаправленного луча ООСВ в направлении вектора групповой скорости $\mathbf{V}_{s2}$ наблюдается нерасширяющаяся тень от отверстия на расстоянии ~ 9 мм. Спиновые колебания, локализованные на отверстии, на этой частоте уже были практически не заметны из-за большой амплитуды исходного основного луча, и из-за того, что значительная часть энергии исходного луча рассеивается в разных направлениях, отражаясь от отверстия.

Таким образом, в экспериментах по дифракции на круглом сквозном отверстии луча обратной объемной спиновой волны с малой дифракционной расходимостью наблюдалось новое физическое явление – эффективное возбуждение локализованных на отверстии спиновых мод. Эти локальные колебания являются собственными спиновыми модами в той области намагниченной ферритовой среды, которая окружает круглое отверстие.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

Список литературы

1. Хутиева А.Б., Садовников А.В., Анненков А.Ю., Герус С.В., Локк Э.Г. Дифракция сверхнаправленного луча поверхностной спиновой волны на слабоконтрастном магнонном кристалле. // Известия РАН. Серия физическая. 2021. Т. 85. № 11. С. 1542–1545.

2. Хутиева А.Б., Садовников А.В., Анненков А.Ю., Герус С.В., Локк Э.Г., Луговской А.В. Дифракция поверхностной спиновой волны с коллинеарной ориентацией групповой и фазовой скоростей на сквозном отверстии в ферритовой пластине // XXVIII Международная конференция «Электромагнитное поле и материалы (фундаментальные физические исследования)». 27 ноября 2020 г., Москва, Россия, НИУ «МЭИ». Сборник трудов конференции, с. 83-93. М: Издательство МЭИ, 2020 г. – 500с. ISBN 978-5-7046-2367-0.

3. Анненков А.Ю., Герус С.В., Локк Э.Г., Хутиева А.Б., Садовников А.В., Луговской А.В. Дифракция сверхнаправленного луча поверхностной спиновой волны на сквозном отверстии в ферритовой пластине // XXIX Международная конференция «Электромагнитное поле и материалы (фундаментальные физические исследования)». 26 ноября 2021 г., Москва, Россия, НИУ «МЭИ». Сборник трудов конференции, с. 50-55. М: Издательство МЭИ, 2021 г. – 221с. ISBN 978-5-7046-2518-6.

4. Герус С. В., Локк Э. Г., Анненков А. Ю., Хутиева А.Б., Садовников А.В. Дифракция обратной объёмной спиновой волны на сквозном отверстии в ферритовой пластине. // Известия РАН. Серия физическая. 2022. Т. 86. № 11. С. 1642–1647.

5. Annenkov A.Yu., Gerus S.V., Lock E.H. Superdirected beam of the backward volume spin wave // EPJ Web of Conferences. 2018. V. 185. P. 02006.

EXCITATION BY BULK SPIN WAVES OF LOCAL MODES ON A CIRCULAR HOLE IN A FERRITE FILM

S. V. Gerus, E. H. Lock
Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics
of Russian Academy of Sciences (Fryazino branch), Fryazino, Russia
E-mail: svg318@ire216.msk.su

The interaction of backward volume spin waves with inhomogeneity in the form of a through hole in a ferrite film in which the wave propagates has been experimentally investigated. A superdirected beam of inverse volume spin waves with almost zero diffraction divergence was used as a research tool. It was found that in addition to wave scattering on this obstacle, local oscillations, i.e., intrinsic spin modes, are excited on it in the region of the magnetized ferrite medium surrounding the circular hole.
Keywords: ferrite film, hole, spin wave, amplitude distribution, superdirected beam, local mode.

УДК 537.624;537.632

НАПРАВЛЕНИЕ ПОТОКА ЭНЕРГИИ ПОВЕРХНОСТНОЙ СПИНОВОЙ ВОЛНЫ В КАСАТЕЛЬНО НАМАГНИЧЕННОЙ ФЕРРИТОВОЙ ПЛАСТИНЕ

Э.Г. Локк, С.В. Герус
Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова (Фрязинский филиал), Российская академия наук, Фрязино, Россия
E-mail: edwin@ms.ire.rssi.ru

Теоретически исследованы зависимости ориентации $\psi_П$ потока энергии волны от ориентации φ волнового вектора для поверхностно-поверхностной спиновой волны, распространяющейся в касательно намагниченной ферритовой пластине. Проведено сравнение этих зависимостей с зависимостями $\psi_{UМСП}(\varphi)$ и $\psi_U(\varphi)$, описывающими изменение ориентаций $\psi_{UМСП}$ и ψ_U вектора групповой скорости волны в магнитостатическом приближении и без него соответственно. Впервые установлено, что зависимости $\psi_П(\varphi)$ и $\psi_U(\varphi)$ для этой волны совпадают, то есть, доказано, что вектор потока энергии волны и вектор групповой скорости волны всегда параллельны и сонаправлены.

Ключевые слова: касательно намагниченная ферритовая пластина, спиновая волна, вектор Пойнтинга, направление потока энергии спиновой волны.

В ряде работ [1 – 9], посвященных описанию спиновых волн (СВ) без магнитостатического приближения (МСП), было обнаружено, что некоторые характеристики СВ принципиально отличаются от аналогичных характеристик, рассчитанных с использованием МСП. В частности, в [8] аналитически была решена задача о распространении электромагнитных волн в произвольном направлении вдоль касательно намагниченного бигиротропного слоя. Было обнаружено, что распределение волны по толщине такого анизотропного слоя описывают два разных по величине волновых числа k_{x21} и k_{x22}, которые могут принимать действительные или мнимые значения. Показано, что в ферритовой пластине, являющейся частным случаем бигиротропного слоя, может возникать три типа распределения спиновых волн внутри феррита – поверхностно-поверхностное (k_{x21} и k_{x22} действительные числа), объемно-поверхностное (k_{x21} мнимое число, а k_{x22} – действительное) и объемно-объемное (k_{x21} и k_{x22} мнимые числа), что принципиально отличает полученное описание от описания спиновых волн в МСП. В этой же работе [8] было получено дисперсионное уравнение и рассчитаны различные характеристики поверхностно-поверхностной спиновой волны (далее будем называть ее кратко *SS*-волной), частоты которой лежат выше частоты ферромагнитного резонанса пластины, а распределение z-компоненты СВЧ электрического поля волны по толщине ферритового слоя описывает выражение

$$e_{z2} = A\exp(k_{x21}x) + B\exp(-k_{x21}x) + C\exp(k_{x22}x) + D\exp(-k_{x22}x), \qquad (1)$$

где A, B, C и D – произвольные коэффициенты (см. формулу (26) в [8]).

Продолжая исследования, представленные в [8], ниже будет рассчитано направление $\psi_П$ потока энергии $\vec{П}$ спиновой *SS*-волны в касательно

намагниченной ферритовой пластине, изображенной на рис. 1.

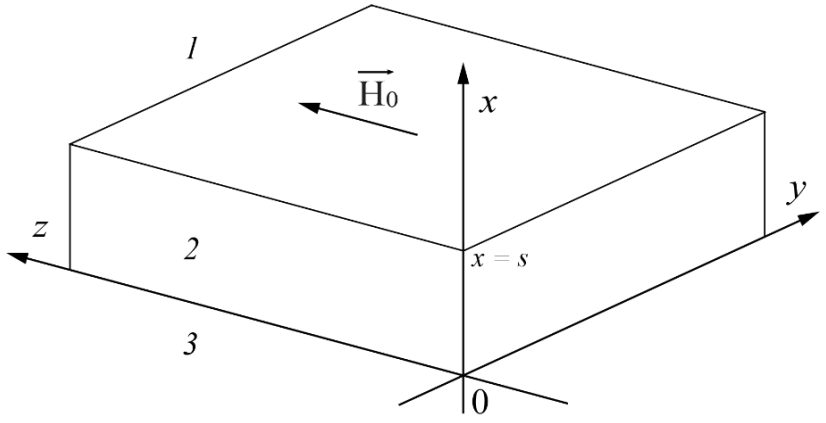


Рисунок 1 – Геометрия задачи: *1* и *3* – полупространства изотропного диэлектрика (или вакуум), *2* – бигиротропный слой (в частном случае – ферритовая пластина) толщиной *s*

Как известно, для любой электромагнитной волны вектор $\vec{\Pi}$ и вектор Пойнтинга $\vec{P}$ связаны формулой

$$\vec{\Pi} = \vec{P}dS \qquad (2)$$

где *dS* – некоторая единичная площадь, выбор которой будет ясен из приводимого ниже рассмотрения.

Из анализа выражений, полученных в работе [8], следует, что, поскольку все компоненты электромагнитного поля в пластине зависят от координаты *x*, то и вектор Пойнтинга $\vec{P}$ будет зависеть от *x*, причем от *x* будет зависеть не только величина вектора $\vec{P}$, но и его направление. Поэтому в данной задаче результирующее направление переноса энергии *SS*-волны определяет не вектор $\vec{P}$, а полный суммарный поток энергии $\vec{\Pi}$, вычисляемый по формуле (2). Однако чтобы получить формулу для вычисления суммарного потока энергии $\vec{\Pi}$, нам придется иметь дело с парциальными векторами $\vec{P}_j$ и $\vec{\Pi}_j$, а также с их компонентами (проекциями этих векторов на оси декартовой системы координат) для каждой из сред (*j = 1*, *2* или *3*). В связи с этим, напомним здесь, что полный суммарный поток энергии $\vec{\Pi}$ физически определяет направление переноса энергии волны, а не парциальные векторы $\vec{P}_1$, $\vec{P}_2$, $\vec{P}_3$ и вычисленные от них парциальные потоки $\vec{\Pi}_1$, $\vec{\Pi}_2$, $\vec{\Pi}_3$ (подробнее см. работу [3]).

Как известно, вектор Пойнтинга $\vec{P}$ в общем случае вычисляется по формуле

$$\vec{P} = \frac{c}{8\pi}\mathrm{Re}\ \vec{E}\vec{H}^{*} \qquad (3)$$

Поскольку внутри ферритовой пластины вектор Пойнтинга $\vec{P}$ зависит от координаты *x*, то удобно записать вектор Пойнтинга $\vec{P}$ в следующем виде:

$$\vec{P} = P_x\vec{x_0} + P_y\vec{y_0} + P_z\vec{z_0} = \sum_{j=1}^{3}\left(P_{xj}\vec{x_0} + P_{yj}\vec{y_0} + P_{zj}\vec{z_0}\right), \quad (4)$$

где компоненты вектора Пойнтинга в средах *j = 1*, *2* и *3* в соответствии с формулой (3) будут определять выражения

$$P_{xj} = \frac{c}{8\pi}\mathrm{Re}\left(E_{yj}H_{zj}^{*} - E_{zj}H_{yj}^{*}\right), \quad (5)$$

$$P_{yj} = \frac{c}{8\pi}\mathrm{Re}\left(E_{zj}H_{xj}^{*} - E_{xj}H_{zj}^{*}\right), \quad (6)$$

$$P_{zj} = \frac{c}{8\pi}\mathrm{Re}\left(E_{xj}H_{yj}^{*} - E_{yj}H_{xj}^{*}\right). \quad (7)$$

Так как в данной геометрии *x*-компоненты P_{xj} вектора $\vec{P}$ во всех трех средах равны нулю (в чем несложно убедиться, подставляя в выражение (5) формулы для соответствующих компонент *E* и *H* из работы [8]), то полный поток энергии $\vec{\Pi}$, вычисляемый по формуле (2), будет иметь лишь *y*- и *z*-компоненты

$$\vec{\Pi} = \Pi_y\vec{y_0} + \Pi_z\vec{z_0}, \quad (8)$$

которые определяются выражениями

$$\Pi_y = \int P_y dxdz = \int \left(P_{y3} + P_{y2} + P_{y1}\right)dxdz, \quad (9)$$

$$\Pi_z = \int P_z dxdy = \int \left(P_{z3} + P_{z2} + P_{z1}\right)dxdy. \quad (10)$$

В выражениях (9) и (10) интегрирование по координатам *y* и *z* является формальным (так как исследуемая структура однородна вдоль осей *y* и *z*) и сводится к умножению на длину единичного участка (однако этот факт необходимо учитывать при определении размерности итоговых потоков). С учетом этого формулы (9) и (10) можно записать в следующем виде:

$$\Pi_z = \Pi_{z3} + \Pi_{z2} + \Pi_{z1} = \int_{-}^{0} P_{z3}dx + \int_{0}^{s} P_{z2}dx + \int_{s} P_{z1}dx, \quad (11)$$

$$\Pi_y = \Pi_{y3} + \Pi_{y2} + \Pi_{y1} = \int_{-}^{0} P_{y3}dx + \int_{0}^{s} P_{y2}dx + \int_{s} P_{y1}dx, \quad (12)$$

Очевидно, что направление суммарного потока энергии $\vec{\Pi}$ будет определять угол ψ_{Π}, определяемый соотношением

$$\psi_{\Pi} = \mathrm{arctg}\left(\Pi_z / \Pi_y\right) \quad (13)$$

Очевидно, при существенном изменении ориентации ψ_P вектора Пойнтинга в зависимости от координаты *x*, нормальной плоскости пластины (см. рис. 4 в [10]), направление переноса энергии СВ будет определять поток $\vec{\Pi}$ и его ориентация ψ_{Π}, вычисляемые по формулам (8) – (13). На рис. 2 представлены расчеты ориентации ψ_{Π} в зависимости от ориентации φ волнового вектора СВ (кривые *1 – 6* на рис. 2 соответствуют изочастотным зависимостям волны, приведенным на рис. 2 в [10]).

Также на рис. 2 приведены ориентации ψ_U и $\psi_{UMCП}$ вектора групповой скорости $\vec{U}$, рассчитанные по формуле (см. [21])

$$\vec{U} = -\frac{\partial F / d\vec{k}}{\partial F / \partial \omega} = -\left(\frac{\partial F}{\partial \omega}\right)^{-1} \mathrm{grad}_{\vec{k}} F = -\left(\frac{\partial F}{\partial \omega}\right)^{-1} \left(\frac{\partial F}{\partial k_x}\vec{x}_0 + \frac{\partial F}{\partial k_y}\vec{y}_0 + \frac{\partial F}{\partial k_z}\vec{z}_0\right) \qquad (14)$$

на основе дисперсионного уравнения спиновой *SS*-волны $F(\omega, \vec{k}) = 0$ (кривые *1′ – 6′*), полученного без МСП [8], и на основе дисперсионного уравнения поверхностной СВ $F_{МСП}(\omega, \vec{k}) = 0$ (кривые *1″ – 6″*), полученного в МСП.

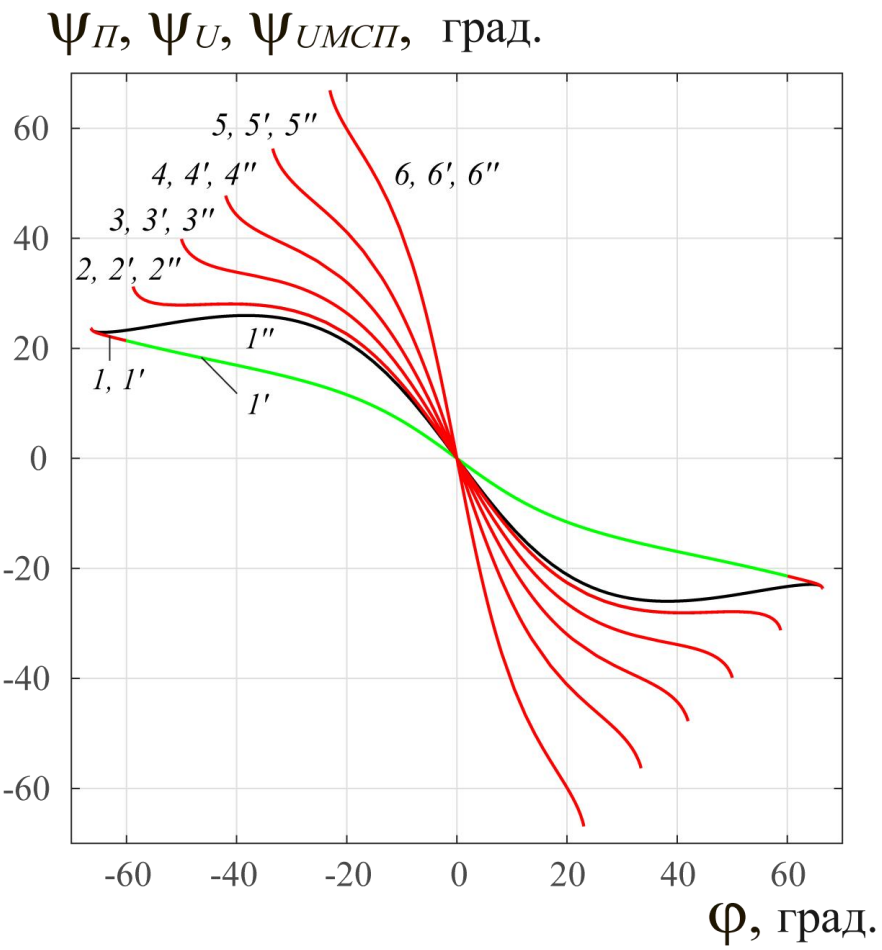


Рисунок 2 – Зависимости $\psi_П(\varphi)$ (кривые *1 – 6*), описывающие ориентацию $\psi_П$ потока энергии $\vec{П}$ *SS*-волны, зависимости $\psi_U(\varphi)$ (кривые *1′ – 6′*), описывающие ориентацию ψ_U вектора групповой скорости $\vec{U}$ СВ, и зависимости $\psi_{UMCП}(\varphi)$ (кривые *1″ – 6″*), описывающие ориентацию $\psi_{UMCП}$ вектора групповой скорости $\vec{U}$ для поверхностной СВ в МСП, для частот: 2200 (*1*, *1′* и *1″*), 2300 (*2*, *2′* и *2″*), 2500 (*3*, *3′* и *3″*), 2700 (*4*, *4′* и *4″*), 2900 (*5*, *5′* и *5″*) и 3100 МГц (*6*, *6′* и *6″*). Кривые *1 – 6* и *1′ – 6′* рассчитаны без МСП, кривые *1″ – 6″* рассчитаны в МСП. Зеленым цветом на кривой *1′* показан участок, соответствующий *VS*-волне, для которой величина k_{x21} является мнимой, а величина k_{x22} – действительной (на рис. 2 в [10] этот участок изочастотной зависимости, описывающий *VS*-волну, соответствует части кривой *1*, лежащей внутри кривой *1″*)

Как видно из рис. 2, зависимости $\psi_П(\varphi)$ (кривые *1 – 6*) и зависимости $\psi_U(\varphi)$ (кривые *1′ – 6′*) не отличаются друг от друга. Таким образом, на основе расчетов *впервые доказано*, что ориентация ψ_U вектора групповой скорости $\vec{U}$

и ориентация ψ_{Π} потока энергии $\vec{\Pi}$ для спиновой *SS*-волны, распространяющейся в ферритовый пластине, совпадают.

В то же время зависимости $\psi_{UMC\Pi}(\varphi)$ (кривые *1″* – *6″*), рассчитанные с использованием МСП и описывающие ориентацию $\psi_{UMC\Pi}$ вектора групповой скорости $\vec{U}$ поверхностной СВ, заметно отличаются от зависимостей $\psi_{\Pi}(\varphi)$ и $\psi_{U}(\varphi)$ для значений частоты СВ f из интервала значений $f_{\perp} < f <$ 2230 МГц и лишь при частоте $f \sim$ 2300 МГц и выше все три зависимости практически совпадают.

Для того, чтобы лучше оценить различия между этими зависимостями, на рис. 3 приведены все три эти зависимости для значения частоты f = 2216.5 МГц, при котором вся изочастотная зависимость соответствует спиновой *SS*-волне (см. кривую *2* на рис. 2 в [10]).

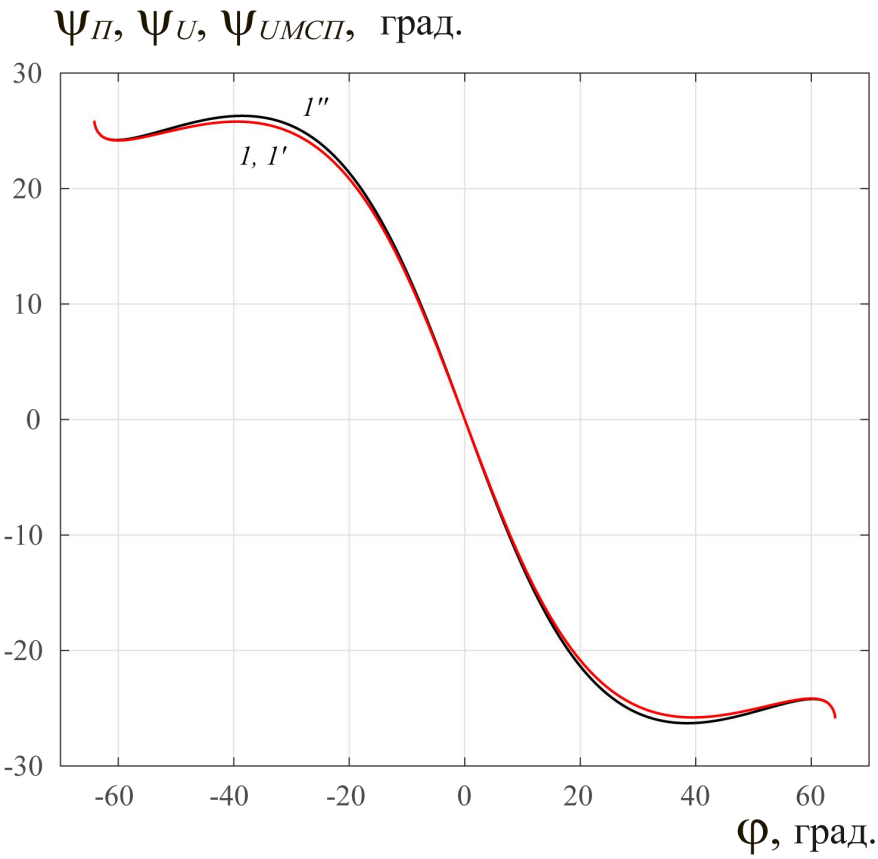


Рисунок 3 – Зависимости $\psi_{\Pi}(\varphi)$ (кривая *1*), $\psi_{U}(\varphi)$ (кривая *1′*) и $\psi_{UMC\Pi}(\varphi)$ (кривая *1″*) для волны с частотой 2216.5 МГц

Работа выполнена в рамках государственного задания Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

Список литературы

1. Вашковский А. В., Локк Э. Г. Влияние диэлектрической подложки и магнитных потерь на дисперсию и свойства поверхностной магнитостатической волны // Радиотехника и электроника. 2001. Т. 46. № 6. С. 729-738.

2. Вашковский А. В., Локк Э. Г. Поверхностные магнитостатические волны в структуре феррит-диэлектрик, окруженной полупространствами с отрицательной диэлектрической проницаемостью // Радиотехника и электроника. 2002. Т. 47. № 1. С. 97-102.
3. Вашковский А. В., Локк Э. Г. О взаимосвязи энергетических и дисперсионных характеристик магнитостатических волн в ферритовых структурах // Успехи физических наук. 2011. Т. 181. № 3. С. 293-304.
4. Вашковский А.В., Локк Э. Г. О физических свойствах обратной магнитостатической волны при ее описании на основе уравнений Максвелла // Радиотехника и электроника. 2012. Т. 57. № 5. С. 541-549.
5. Локк Э. Г. Спиновые волны в структуре диэлектрик-феррит-диэлектрик, граничащей с «магнитными стенками» или идеальными проводниками (на основе уравнений Максвелла) // Радиотехника и электроника. 2014. Т. 59. №7. С. 711- 721.
6. Локк Э. Г. Структура высокочастотных полей поверхностной спиновой волны в касательно намагниченной ферритовой пластине // Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61. № 1. С. 35-44.
7. Локк Э. Г., Вашковский А.В. Влияние металлического экрана и магнитной стенки на картины векторных линий высокочастотного поля поверхностной спиновой волны // Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61. № 8. С. 746-756.
8. Lock E. H., Gerus S. V. Electromagnetic Waves Propagation along Tangentially Magnetised Bihyrotropic Layer (with Example of Spin Waves in Ferrite Plate) // Library of Cornell University http://arxiv.org/abs/2303.08800
9. Локк Э. Г., Герус С. В. Электромагнитные волны в односторонне металлизированном касательно намагниченном бигиротропном слое (с примером расчета характеристик спиновых волн) // Радиотехника и электроника. 2023. Т. 68. № 9. С. 884-892.
10. Локк Э. Г., Герус С. В. Модуль и ориентация вектора Пойнтинга поверхностной спиновой волны в касательно намагниченной ферритовой пластине // XXXI Международная конференция «Электромагнитное поле и материалы (фундаментальные физические исследования)». 22-23 ноября 2024 г., Москва, Россия, НИУ «МЭИ». Сборник трудов конференции.

DIRECTION OF ENERGY FLOW OF A SURFACE SPIN WAVE IN A TANGENTIALLY MAGNETISED FERRITE PLATE

E. H. Lock, S. V. Gerus
Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics
of Russian Academy of Sciences (Fryazino branch), Fryazino, Russia
E-mail: edwin@ms.ire.rssi.ru

The dependences of the orientation ψ_{Π} of the wave energy flux on the orientation φ of the wave vector for the surface-surface spin wave propagating in a tangentially magnetized ferrite plate have been investigated theoretically. These dependences were compared with the dependencies $\psi_{UMC\Pi}(\varphi)$ and $\psi_{U}(\varphi)$ describing the change of orientations $\psi_{UMC\Pi}$ and ψ_{U} of the group velocity vector of the wave in the magnetostatic approximation and without it, respectively. It is established for the first time that the dependences $\psi_{\Pi}(\varphi)$ and $\psi_{U}(\varphi)$ for this wave coincide, i.e., it is proved that the wave energy flux vector and the wave group velocity vector are always parallel and co-directional.
Key words: tangentially magnetized ferrite plate, spin wave, Poynting vector, energy flow direction of spin wave.

СЕКЦИЯ 3: ФИЗИКА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Председатель: ***д.ф.-м.н., проф. П.А. Поляков*** *(МГУ)*

УДК 538.958

ТЕРАГЕРЦОВАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ ИОНОВ ЛИТИЯ В ЭНДОФУЛЛЕРЕНЕ $Li@C_{60}PF_6$

С.С. Жуков[1], А.В. Мелентьев[1], Н.Д. Орехов[1], Д.А. Юламанова[1], Ю.В. Цукова[1], П.А. Жиляев[2], Е.С. Жукова[1], H. Suzuki[3], M. Nakano[4], S.Aoyagi[5], Б.П. Горшунов[1]

[1]Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет), Москва, Россия

[2]Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

[3]Department of Chemistry, Kindai University, Osaka, Japan

[4]Research Center for Thermal and Entropic Science, Graduate School of Science, Osaka University, Toyonaka, Osaka, Japan

[5] Nagoya City University, Nagoya, Japan

E-mail: Zhukov.ss@mipt.ru

Методами терагерцовой спектроскопии измерены спектры комплексной диэлектрической проницаемости эндофуллерена $Li@C_{60}PF_6$ в диапазоне частот 10-120 $см^{-1}$ и при температурах от 5 до 300 К. На основе полученных данных показано, что температурная динамика терагерцовых линий поглощения объясняется термически-активированной прыжковой динамикой иона Li внутри молекулы C_{60}, переходящей при низких температурах к динамике, связанной с туннелированием ионов между отдельными минимумами локализующего потенциала.

Ключевые слова: терагерцовая спектроскопия, комплексная диэлектрическая проницаемость, фуллерены, эндофуллерены.

Введение

Эндофуллерены являются перспективными объектами с точки зрения их применения в качестве молекулярных переключателей [1], кубитов [2], для генерации оптических высших гармоник [3]. Кроме того, они представляют уникальную возможность для исследования квантовых свойств атомов и молекул в условиях наноконфайнмента, например, конверсии спиновых изомеров молекулы воды или их вращательных и колебательных состояний [4]. Конгломераты эндофуллеренов могут образовывать кристаллические структуры, в которых проявляются коллективные эффекты, обусловленные электростатическим взаимодействием локализованных атомов и молекул, например, сигнетоэлектрическое упорядочение [5]. Методами терагерцовой (ТГц) спектроскопии нами были выполнены первые систематические исследования низкоэнергетических состояний ионов лития в поликристаллических образцах $Li^+@C_{60}[PF_6]^-$.

Эксперимент

Эндофуллерены с изотопами лития $^6Li^+$ и $^7Li^+$ со стабилизирующими анионами $[PF_6]^-$, $Li@C_{60}PF_6$, синтезированы в виде порошков в Idea International Co. Ltd. [6]. Порошки спрессовывались в таблетки толщиной от 100 до 200 мкм и диаметром 5 мм. Температурные измерения от 5 до 300 К выполнялись в проточном гелиевом криостате. ТГц спектры действительной ε'(ν) и мнимой ε"(ν) частей комплексной диэлектрической проницаемости были получены в диапазоне частот 10-120 $см^{-1}$ с помощью импульсного спектрометра с временным разрешение TeraView. Обработка обнаруженных линий поглощения с использованием Лорентцианов позволила получить температурные зависимости резонансных частот, диэлектрических вкладов, сил осцилляторов и затуханий.

Результаты и обсуждение

На рис.1 показаны ТГц спектры мнимой диэлектрической проницаемости $^6Li@C_{60}PF_6$. Хорошо различимы три полосы поглощения: 1) широкая линия в диапазоне 30-40 $см^{-1}$; 2) полоса вблизи 75-80 $см^{-1}$; 3) линия на 90 $см^{-1}$. Кроме того, ниже 15 $см^{-1}$ в измеренном спектре ε"(ν) зафиксирован подъем в сторону низких частот, что указывает на наличие линии поглощения в области 2-7 $см^{-1}$. Мы связываем эту линию с низкочастотными колебаниями в кристале C_{60}. Такая интерпретация подтверждается наличием пика в плотности колебательных состояний в кристалле фуллерита в районе ~5-6 $см^{-1}$ [7]. Наличие изотопического сдвига линий на частотах 30 $см^{-1}$ и 90 $см^{-1}$ говорит о том, что природа этих линий связана с динамикой иона лития.

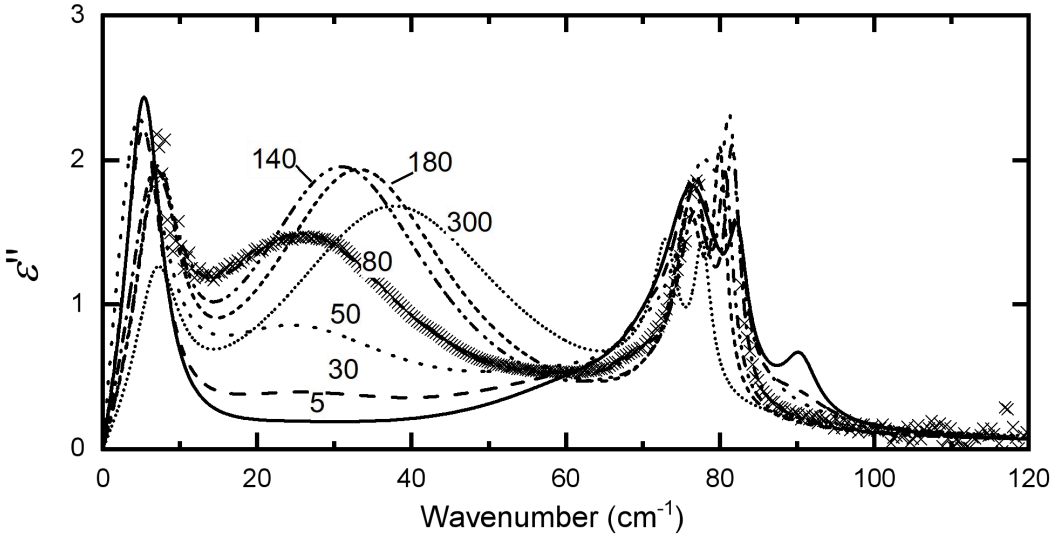


Рисунок 1 – Температурная зависимость терагерцового спектра мнимой части диэлектрической проницаемости 6Li@C60PF6, полученная в результате обработки по методу наименьших квадратов измеренных спектров ε'(ν) и ε"(ν). Температура указана рядом со спектрами. Для 80 К приведен пример экспериментальной зависимости (крестики)

На рис. 2 приведены температурные зависимости резонансных частот и сил осциллятора линий, связанных с откликов иона лития. Значения приведены в долях от соответствующих величин при температуре 5 К. Хорошо видны

следующие особенности: 1) при охлаждении от 300 К до 5 К частота линии на 30 см$^{-1}$ «смягчается» с понижением температуры, и ее интенсивность уменьшается более чем в 20 раз; 2) линия на 90 см$^{-1}$ становится различимой лишь при температурах ниже 40 К, и ее интенсивность увеличивается с понижением температуры.

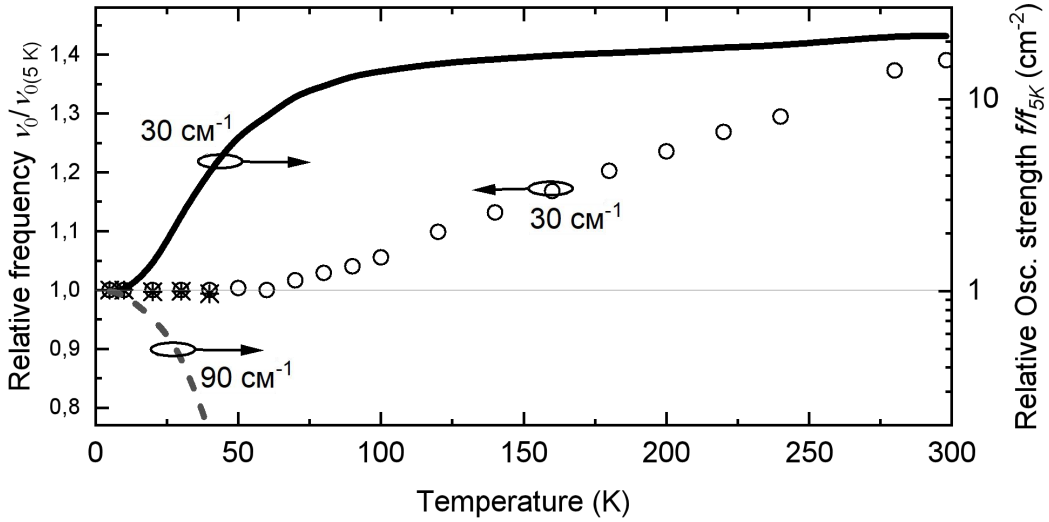


Рисунок 2 – Температурная зависимость параметров терагерцовых линий поглощения ^{6}Li@$C_{60}PF_6$ с частотами вблизи 30 см$^{-1}$и 90 см$^{-1}$: точками показано изменение резонансной частоты (линейный масштаб); сплошной и пунктирной линиями – изменение силы осциллятора (логарифмический масштаб). Величины относительно их значений при температуре 5 К

Линия на 30 см$^{-1}$ наблюдалось ранее и объяснялась в рамках модели квантованного вращения иона Li по сферической оболочке радиусом 1,5 Å внутри C_{60} [8]. Данная модель предсказывает существование набора узких линий, центральная частота которых находится около 20 см$^{-1}$, что несколько отличается от экспериментального значения. Выполненный нами анализ температурного поведения параметров линии показывает, что изменение её частоты и интенсивности при температурах выше 120 К носит активационный характер, что является признаком релаксационного диэлектрического отклика.

Известно, что внутри фуллерена ион лития находится под воздействием локализующего потенциала, имеющего 20 минимумов, расположенных вблизи гексагональных углеродных колец [8,9]. Мы полагаем, что при высоких температурах линия на 30 см$^{-1}$ обусловлена термически-активированным перескакиванием ионов Li между соседними потенциальными ямами. При охлаждении ниже 100К частота перестает существенно зависеть от температуры, что может объясняться переходом от термически активированных перескоков к «перескокам» посредством туннелирования. Поскольку ^{6}Li@$C_{60}PF_6$ образует кристаллическую структуру, представляющую собой гранецентрированную кубическую решетку из ^{6}Li@C_{60}, с молекулами PF_6, расположенными в пустотах между ними, к двадцати потенциальным минимумам добавляются еще два, связанные с катионами PF_6 [9]. Логично ожидать, что при дальнейшем понижении температуры ион лития будет преимущественно локализоваться в одном из этих двух минимумов. Таким

образом, концентрация связанных с PF_6 ионов лития будет увеличиваться, а концентрация ионов, участвующих в «прыжках» по потенциальным ямам C_{60}, уменьшаться. Именно такую картину мы и наблюдаем. Увеличение концентрации атомов Li, связанных с PF_6, приводит к появлению линии на 90 $см^{-1}$ и к увеличению ее интенсивности с понижением температуры (см. пунктирную линию на рис.2), с одновременным уменьшением интенсивности линии на 30 $см^{-1}$.

Заключение

Анализ ТГц спектров комплексной диэлектрической проницаемости $Li@C_{60}PF_6$, при температурах от 5 до 300 К, позволил объяснить природу линий поглощения ионов лития, локализованных внутри молекулы С60.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант РНФ №23-22-00105. Авторы благодарят М.В.Таланова за плодотворные дискуссии и H. Okada и K. Kawachi за предоставленные образцы.

Список литературы

1. Y. Yasutake, Z. Shi, T. Okazaki, H. Shinohara, Y. Majima, Single Molecular Orientation Switching of an Endohedral Metallofullerene, Nano Lett. 5 (2005) 1057–1060. https://doi.org/10.1021/nl050490z.

2. S. Aoyagi, A. Tokumitu, K. Sugimoto, H. Okada, N. Hoshino, T. Akutagawa, Tunneling Motion and Antiferroelectric Ordering of Lithium Cations Trapped inside Carbon Cages, J. Phys. Soc. Jpn. 85 (2016) 094605. https://doi.org/10.7566/JPSJ.85.094605.

3. G.P. Zhang, Optical High Harmonic Generation in C_{60}, Phys. Rev. Lett. 95 (2005) 047401. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.95.047401.

4. S.S. Zhukov, V. Balos, G. Hoffman, S. Alom, M. Belyanchikov, M. Nebioglu, S. Roh, A. Pronin, G.R. Bacanu, P. Abramov, M. Wolf, M. Dressel, M.H. Levitt, R.J. Whitby, B. Gorshunov, M. Sajadi, Rotational coherence of encapsulated ortho and para water in fullerene-C_{60} revealed by time-domain terahertz spectroscopy, Sci. Rep. 10 (2020) 18329. https://doi.org/10.1038/s41598-020-74972-3.

5. M.A. Belyanchikov, E.S. Zhukova, S. Tretiak, A. Zhugayevych, M. Dressel, F. Uhlig, J. Smiatek, M. Fyta, V.G. Thomas, B.P. Gorshunov, Vibrational states of nano-confined water molecules in beryl investigated by first-principles calculations and optical experiments, Phys. Chem. Chem. Phys. 19 (2017) 30740–30748. https://doi.org/10.1039/C7CP06472A.

6. H. Okada, T. Komuro, T. Sakai, Y. Matsuo, Y. Ono, K. Omote, K. Yokoo, K. Kawachi, Y. Kasama, S. Ono, R. Hatakeyama, T. Kaneko, H. Tobita, Preparation of endohedral fullerene containing lithium ($Li@C_{60}$) and isolation as pure hexafluorophosphate salt ($[Li^+@C_{60}][PF_6^-]$), RSC Adv. 2 (2012) 10624–10631. https://doi.org/10.1039/c2ra21244g.

7. A. Giri, P.E. Hopkins, Pronounced low-frequency vibrational thermal transport in C_{60} fullerite realized through pressure-dependent molecular dynamics simulations, Phys. Rev. B 96 (2017) 220303(R). https://doi.org/10.1103/PhysRevB.96.220303.

8. H. Suzuki, M. Ishida, M. Yamashita, C. Otani, K. Kawachi, Y. Kasama, E. Kwon, Rotational dynamics of Li^+ ions encapsulated in C_{60} cages at low temperatures, Phys. Chem. Chem. Phys. 18 (2016) 31384–31387. https://doi.org/10.1039/C6CP06949E.

9. S. Aoyagi, Y. Sado, E. Nishibori, H. Sawa, H. Okada, H. Tobita, Y. Kasama, R. Kitaura, H. Shinohara, Rock-Salt-Type Crystal of Thermally Contracted C_{60} with Encapsulated Lithium Cation, Angew. Chem. Int. Ed. Engl. 51 (2012) 3377–3381. https://doi.org/10.1002/anie.201108551.

TERAHERTZ SPECTROSCOPY OF THE LITHIUM-ION ENERGY STATES IN Li@$C_{60}PF_6$ ENDOFULLERENE

S.S.Zhukov[1], A.V.Melentev[1], N.Orekhov[1], D.Yulamanova[1], Yu.Tsukova[1], P.Zhilyaev[2], E.S.Zhukova[1], H. Suzuki[3], M. Nakano[4], S.Aoyagi[5], B.P.Gorshunov[1]

1Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia

[2]Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russia

[3]Department of Chemistry, Kindai University, Osaka, Japan

[4]Research Center for Thermal and Entropic Science, Graduate School of Science, Osaka University, Toyonaka, Osaka, Japan

[5]Department of Information and Basic Science, Nagoya City University, Nagoya 467-8501, Japan

E-mail: Zhukov.ss@mipt.ru

Transmission spectra and spectra of the complex dielectric constant of lithium endofullerenes in the frequency range 10-700 cm^{-1} and at temperatures from 5 to 300 K were obtained by terahertz and infrared spectroscopy. Based on the data, it is assumed that the temperature dynamics of the lines in the terahertz frequency range is explained by the thermally activated hopping motion of the Li ion inside the C_{60} molecule, and tunnel hopping transitions between neighboring potential wells.

Key words: terahertz spectroscopy, complex permittivity, fullerenes, endofullerenes

УДК 537.621, 537.633

ОСОБЕННОСТИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ О НЕОДНОРОДНОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ ТОКА В МАГНИТОРЕЗИСТИВНОМ ЭЛЕМЕНТЕ СО СМЕШАННЫМИ ГРАНИЧНЫМИ УСЛОВИЯМИ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

В.С. Шевцов[1], В.В. Амеличев[2], Д.В. Костюк[2], Д.В. Васильев[2], С.И. Касаткин[3], П.А. Поляков[1]

[1]Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», физический факультет, Москва, Россия

[2]Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-производственный комплекс «Технологический центр», Москва, Россия

[3]Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук», Москва, Россия

E-mail: vs.shevtcov@physics.msu.ru

В работе представлено развитие модели протекания тока в магниторезистивном элементе как решение двумерной краевой задачи для уравнения Лапласа со смешанными граничными условиями Дирихле – Неймана в среде с анизотропией сопротивления. Модель применена для расчета и анализа характеристик магниторезистивного преобразователя со структурой «barber-pole». Численно рассчитано влияние изменения топологии преобразователя на его выходные характеристики.

Ключевые слова: спинтроника, тонкие пленки, уравнение Лапласа.

Введение

На сегодняшний день спинтроника является одной из наиболее активно развивающихся областей. Особый интерес представляют эффекты, связанные с управлением электрическим сопротивлением и электрическим током, что лежит в основе огромного количества современных устройств и технологий [1, 2].

Несмотря на то, что анизотропный магниторезистивный (АМР) эффект был обнаружен уже более 150 лет назад [3], хотя теоретические аспекты этого явления были открыты существенно позже [4], до сих пор наиболее распространенные датчики и преобразователи магнитного поля используют именно данный эффект. Таким образом задачи о распределении микромагнитных структур и задачи, связанные с особенностями протекания тока в таких анизотропных средах с АМР эффектом, не только не потеряли актуальность [5, 6], но и выходят на первый план для достижения наилучших характеристик магниточувствительных приборов и устройств.

В данной работе представлены результаты решаемой задачи о неоднородном распределении электрического тока в тонкой магниторезистивной ячейке формы параллелограмма, которая является

составной частью тонкопленочного магниторезстивного элемента, известного под названием «barber-pole». Разработанные теоретические модели используются для анализа характеристик данных элементов и оценки наиболее эффективных их параметров. В качестве параметров в работе исследовалось влияние размеров ячейки магниторезистивного материала и размеров низкорезистивных элементов на протекание тока и изменение его сопротивления во внешнем магнитном поле.

Решение обобщенного уравнения Лапласа в среде с анизотропным магниторезистивным эффектом

В случае, если электрический ток течет однородно в анизотропной магниторезистивной (АМР) среде с однородным распределением намагниченности, а внешнее магнитное поле влияет только на процесс когерентного перемагничивания среды, задача о расчете сопротивления такого элемента становится только к определению угла между направлением плотности электрического тока и направлением намагниченности.

Однако в геометрии проводника, представляющего собой тонкую пластину в форме параллелограмма, рассматриваемую в данной работе и показанную на рис. 1, распределение электрического тока неоднородно. В таком случае для нахождения сопротивления элемента необходимо знать распределение электрического потенциала φ и плотности тока $\vec{j}$ вдоль всей поверхности проводника.

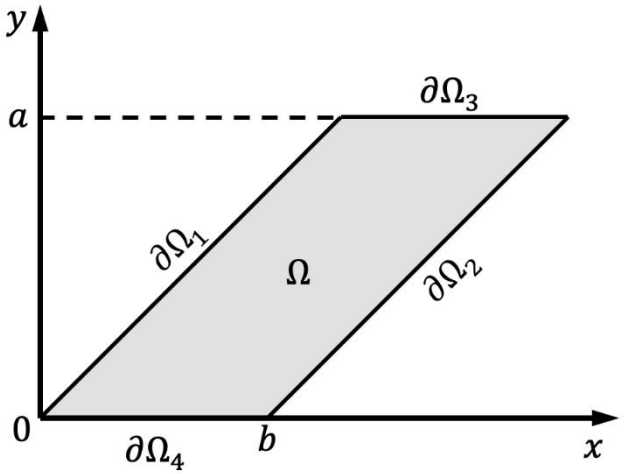


Рисунок 1 – Рассматриваемая область проводника

В случае однородной изотропной среды для таких целей используют уравнение Лапласа

$$\Delta\varphi = 0 \qquad (1)$$

Но в данном случае анизотропной магниторезистивной среды стандартное уравнение Лапласа (1) не подходит, а для решения задачи о распределении потенциала необходимо использовать уравнение, которое можно назвать обобщенным уравнением Лапласа [7]. Более того, для решения обобщенного уравнения Лапласа необходимо знать распределение

намагниченности $\vec{M}$ в среде, которое в свою очередь минется под действием внешнего магнитного поля $\vec{H}$.

Несмотря на описанные выше проблемы, дополнив обобщенное уравнение Лапласа смешанными граничными условиями, соответствующие постоянному потенциалу вдоль границ $\partial\Omega_1$ и $\partial\Omega_2$, а также отсутствию тока через границы $\partial\Omega_3$ и $\partial\Omega_4$, данная задача может быть решена численно, что показано в работах [7, 8].

Применение модели для расчета характеристик магниторезистивного преобразователя

Описанная выше модель протекания тока в анизотропной магниторезистивной ячейке в форме тонкой косоугольной пластины легла в основу анализа характеристик сенсора, широко известного под названием «barber-pole». Магниторезистивный преобразователь (МРП) состоит из системы длинных полосок магниторезистивного материала «1», на которые под углом 45° на равном расстоянии нанесены низкорезистивные шунты «2». Ось легкой намагниченности магниторезистивной пленки направлена вдоль горизонтального направления на рис. 2. Данные элементы соединены в мостовую схему, при этом внешнее магнитное поле, прикладываемое в вертикальном направлении (рис. 2), приводит к перемагничиванию пленок и возникновению выходного напряжения в мостовой схеме.

Параметры рассматриваемой магниторезистивной пленки: намагниченность насыщения M_s = 1050 Гс, поле анизотропии H_a = 15 Э, толщина пленки h = 25 нм, ширина пленки a = 10 мкм.

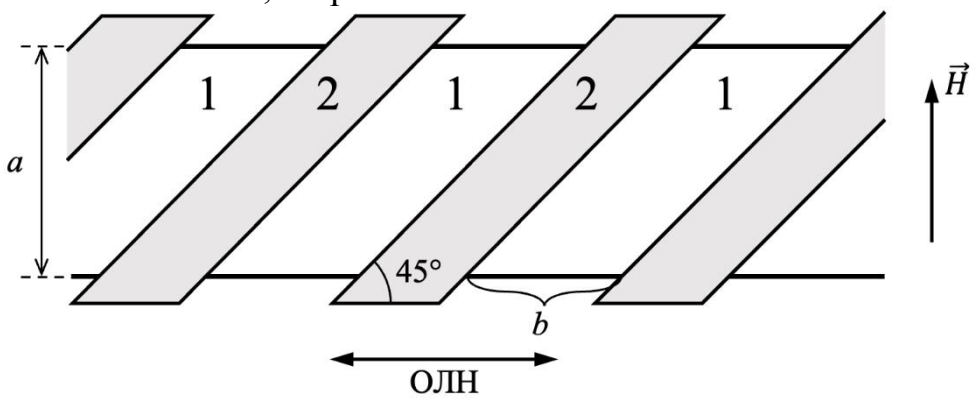


Рисунок 2 – Эскиз фрагмента МРП со структурой «barber-pole»

Разработанная модель позволяет провести анализ влияния расстояния между шунтами b на характеристики МРП с целью выявления оптимальных параметров его работы. Расстояние между шунтами b варьировалось в диапазоне от 2 мкм до 30 мкм в приближении, что шунты «1» на рис. 2 являются идеальными контактами. При этом исследовались зависимости сопротивления в противоположных плечах мостовой схемы МРП и относительного выходного напряжения МРП от величины внешнего магнитного поля (рис. 3).

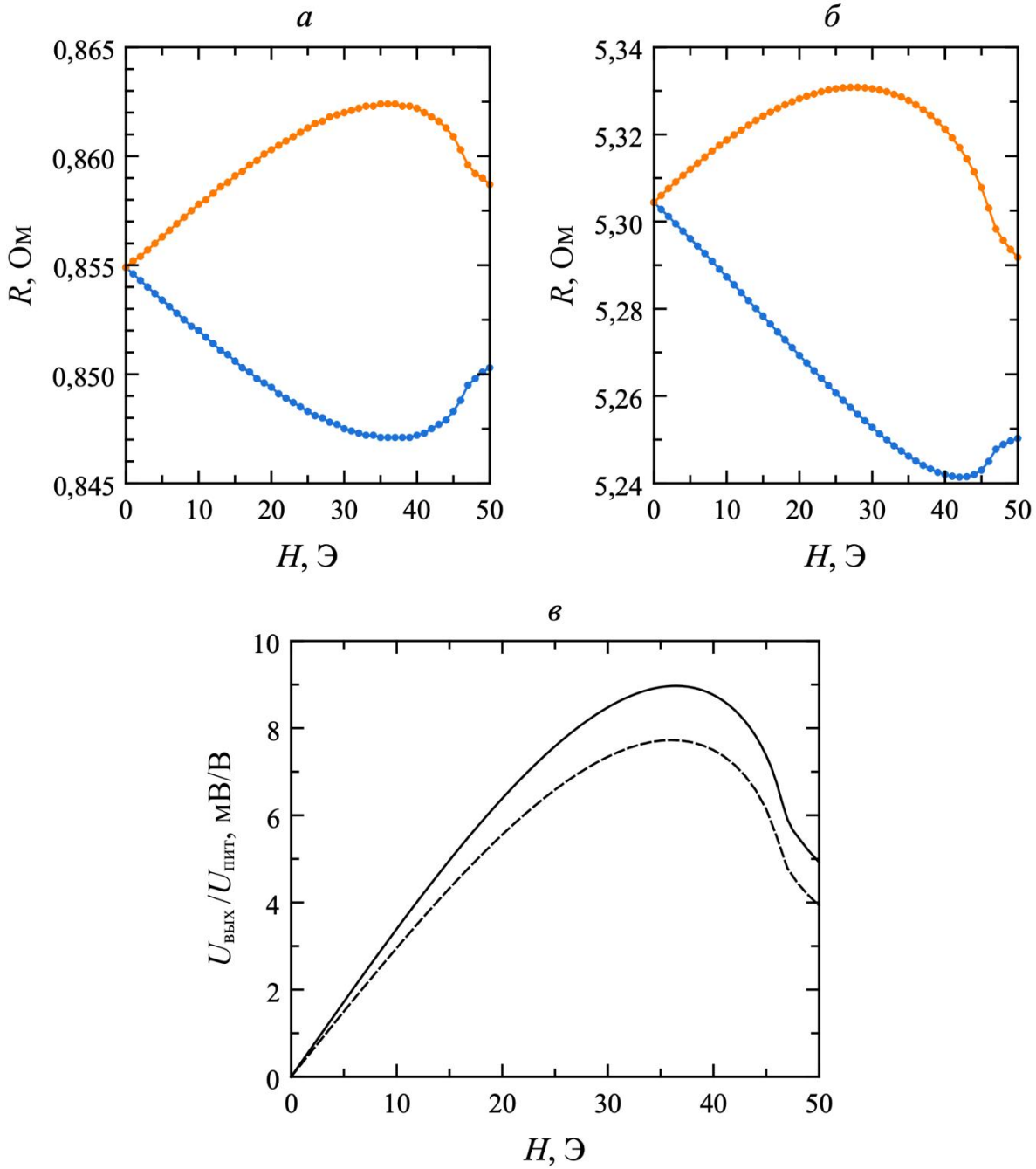


Рисунок 3 – Зависимости сопротивления R в противоположных плечах мостовой схемы МРП (синий и оранжевый) от напряженности внешнего магнитного поля H при b = 2 мкм (*а*) и b = 10 мкм (*б*). (*в*) – зависимости относительного выходного напряжения $U_{вых}/U_{пит}$ МРП от напряженности внешнего магнитного поля H.
Сплошная линия – b = 2 мкм, штриховая линия – b = 10 мкм.

В табл. 1 показаны расчеты чувствительности МРП в зависимости от расстояния между шунтами.

Таблица 1 – Зависимость чувствительности сенсора «barber-pole» в области линейной выходной характеристики (рис. 3) при малых внешних магнитных полях от расстояния *b* между шунтами.

Расстояние между шунтами *b*	Чувствительность
2 мкм	0,344 (мВ / В) / Э
4 мкм	0,340 (мВ / В) / Э
7 мкм	0,327 (мВ / В) / Э
10 мкм	0,301 (мВ / В) / Э
15 мкм	0,238 (мВ / В) / Э
30 мкм	0,131 (мВ / В) / Э

Заключение

Исследуя графики на рис. 3 и данные из табл. 1 можно сделать вывод, что уменьшение расстояния между шунтами положительно влияет на характеристики МРП «barber-pole», увеличивая его чувствительность. Однако сильное уменьшение расстояния между шунтами приводит к тому, что ширина самих шунтов также должна быть уменьшена, иначе относительное изменение сопротивления всей пленки будет сильно снижаться. В связи с технологическими особенностями, нанесение тонких шунтов может быть невозможно, в таком случае неизбежным оказывается увеличение расстояние между шунтами. В данной работе показано, что увеличение расстояние между шунтами от 2 мкм до 7 мкм приводит к снижению чувствительности МРП на 5 %.

Список литературы

1. Hirohata A., Yamada K., Nakatani Y. et al. Review on spintronics: Principles and device applications // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2020. Vol. 509. Atr. No. 166711.
2. Ферт А. Происхождение, развитие и перспективы спинтроники // Успехи физических наук. 2008. Т. 178. No 12. С. 1336-1348.
3. Thomson W. XIX. On the electro-dynamic qualities of metals: — Effects of magnetization on the electric conductivity of nickel and of iron // Proceedings of the Royal Society of London. 1857. Vol. 8. P. 546-550
4. McGuire T., Potter R. Anisotropic magnetoresistance in ferromagnetic 3d alloys // IEEE Transactions on Magnetics. 1975. Vol. MAG-11. No. 4. P. 1018-1038.
5. Wang C., Su W., Hu Z. et al. Highly Sensitive Magnetic Sensor Based on Anisotropic Magnetoresistance Effect // IEEE Transactions on Magnetics. 2018. Vol. 54. Iss. 11. Art. No. 2301103.
6. Sreevidya P.V., Khan J., Barshilia H.C. et al. Development of two axes magnetometer for navigation applications // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2018. Vol. 448. P. 298-302.
7. Shevtsov V.S., Polyakov P.A. Electric current and magnetization distributions self-organization features in a magnetoresistive film nanoelement under the influence of an external magnetic field // International Journal of Modern Physics B. 2022. Vol. 38. No. 25. Art. No. 2250167.
8. Поляков П.А., Шевцов В.С. Решение двумерной электростатической задачи для косоугольного магниторезистивного элемента // Известия РАН. Серия физическая. 2022. Т. 86. No 9. С. 1292-1296; Polyakov P.A., Shevtsov V.S. Solution to a Two-Dimensional Electrostatic Problem for an Oblique Magnetoresistive Element // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2022. V. 86. No. 9. P. 1070-1073.

FEATURES OF SOLVING THE PROBLEM OF INHOMOGENEOUS CURRENT DISTRIBUTION IN A MAGNETORESISTIVE ELEMENT WITH MIXED BOUNDARY CONDITIONS IN A MAGNETIC FIELD

V.S. Shevtsov[1], V.V. Amelichev[2], D.V. Kostyuk[2], D.V. Vasil'ev[2], S.I. Kasatkin[3], P.A. Polyakov[1]

[1]Federal State Budget Educational Institution of Higher Education M.V.Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia.

[2]Scientific-Manufacturing Complex "Technological Centre», Moscow, Russia.

[3]V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.

E-mail: vs.shevtcov@physics.msu.ru

The paper presents the development of a current flow model in a magnetoresistive element as a solution to a two–dimensional boundary value problem for the Laplace's equation with mixed Dirichlet-Neumann boundary conditions in a medium with resistance anisotropy. The model is used to calculate and analyze the characteristics of a magnetoresistive transducer with a "barber-pole" structure. The effect of changing the topology of the transducer on its output characteristics is numerically calculated.

Key words: spintronics, thin films, Laplace's equation.

УДК 537.624

АНИЗОТРОПИЯ В ПЛОСКОСТИ ФЕРРИТ-ГРАНАТОВЫХ ПЛЕНОК: ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ

А.В. Матюнин, Г.М. Николадзе, П.А. Поляков
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет
имени М.В.Ломоносова», физический факультет, Москва, Россия
E-mail: physphak@mail.ru

В данной работе исследован ориентационный фазовый переход из состояния однородного намагничивания в состояние с магнитной доменной структурой под воздействием внешнего вращающегося в плоскости магнитной плёнки поля. Выявлено, что в рассматриваемой плёнке области углов, в которых имеет место доменная структура, в двух взаимно противоположных направлениях (повёрнутых друг относительно друга на 180°) практически совпадают. Однако же другие две области, которые повёрнуты друг относительно друга на 90°, сами по себе сильно отличаются примерно в 2 раза. Данное обстоятельство связано со сложным видом энергии анизотропии.

Ключевые слова: магнитооптическая установка, магнитооптические исследования, анизотропия, плёнки ферритов-гранатов, доменная структура.

Введение

В основе физических принципов работы устройств спинтроники лежат механизмы перемагничивания однородно намагниченных тонких магнитных слоев. Например, в сенсорах магнитного поля на анизотропном магниторезистивном эффекте используются последовательно соединенные магнитные полоски с нано толщинами [1]-[6]. Для стабильной работы этих устройств является важным добиться как можно более однородного перемагничивания магнитных слоев.

В данной работе исследован ориентационный фазовый переход в магнитной плёнке из состояния однородного намагничивания в состояние с магнитной доменной структурой под воздействием внешнего вращающегося в плоскости плёнки магнитного поля.

Установлено, что в рассматриваемой плёнке области углов, в которых имеет место доменная структура, в двух взаимно противоположных направлениях (повёрнутых друг относительно друга на 180°) практически совпадают. Однако же другие две области, которые повёрнуты друг относительно друга на 90°, сами по себе сильно отличаются - примерно в 2 раза. Это обусловлено наличием в плёнке сложного вида энергии анизотропии.

1. Экспериментальные результаты

Использовался образец феррит-гранатовой плёнки состава $(YLuBi)_3(FeGa)_5O_{12}$ с плоскостной анизотропией и при наличии в плоскости плёнки двухосной и одноосной анизотропии [7], совпадающей по направлению с одной из осей двухосной анизотропии. Плотность энергии анизотропии определяется выражением

$$W = \frac{H_{K2}M_S}{8}\sin^2 2\varphi + \frac{H_{K1}M_S}{2}\sin^2 \varphi, \quad (1)$$

где H_{K2} =36 Э — эффективное поле двухосной анизотропии, H_{K1} =4 Э — эффективное поле одноосной анизотропии, M_S = 14 Гс — намагниченность насыщения.

Магнитная структура в плёнке наблюдалась посредством магнитооптического эффекта Фарадея. Поляризованный свет, проходя через намагниченную область плёнки, имеющую небольшой наклон (порядка 15 °) поворачивает свою плоскость поляризации на некоторый угол, пропорциональный проекции вектора намагниченности на направление луча света. Величина этой проекции будет зависеть от направления намагниченности в плоскости плёнки. При наблюдении плёнки через поляроид будет фиксироваться разная интенсивность света, прошедшего через области плёнки с различной ориентацией намагниченности, то есть будет регистрироваться доменная структура плёнки или состояние однородного намагничивания (рис. 1).

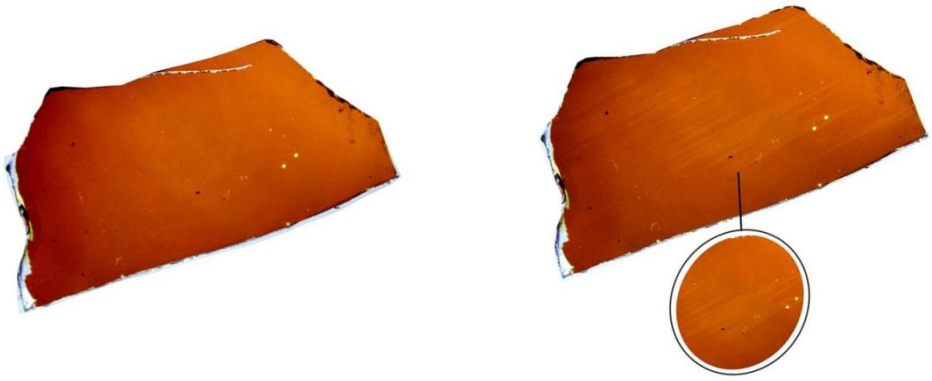


Рисунок 1 – Магнитная структура исследуемой плёнки: а) – плёнка однородно намагничена, б) - наблюдается доменная структура

Схема экспериментальной установки и методика эксперимента изложена в работах [8,9]. Перед началом измерения плёнка была однородно намагничена магнитным полем величиной H_0 = 4 Э, направленным горизонтально слева направо (вдоль оси лёгкого намагничивания). Освещённость плёнки была полностью равномерной. Далее магнитное поле квазистатически поворачивалось против часовой стрелки в плоскости плёнки на угол 360°. В результате было обнаружено, что в некоторой области углов происходит разрушение однородного намагничивания и возникает доменное упорядочение, то есть происходит ориентационный фазовый переход. При дальнейшем повороте в пределах некоторого диапазона углов наблюдается наличие доменного упорядочения, которое пропадает при некотором значении угла поворота вектора напряжённости магнитного поля, после чего восстанавливается состояние однородного намагничивания (то есть происходит второй ориентационный фазовый переход). Всего при повороте вектора напряжённости магнитного поля на угол 360° наблюдалось четыре области с наличием доменной структуры и восемь значений углов поворота, при которых

происходил ориентационный фазовый переход из состояния однородного намагничивания к состоянию с доменным упорядочением и наоборот. Эти четыре угловых интервала, в которых возникали состояния доменного упорядочения, ориентированы относительно друг друга приблизительно на 90° и сосредоточены в направлениях трудных осей. При увеличении модуля напряженности и повороте его на угол 360° происходили аналогичные явления, но области углов, при которых наблюдалось доменное упорядочение, сужалась.

2. Результаты расчётов

На рис. 2 представлены графики изменения этих угловых областей при различных значениях величины напряжённости магнитного поля.

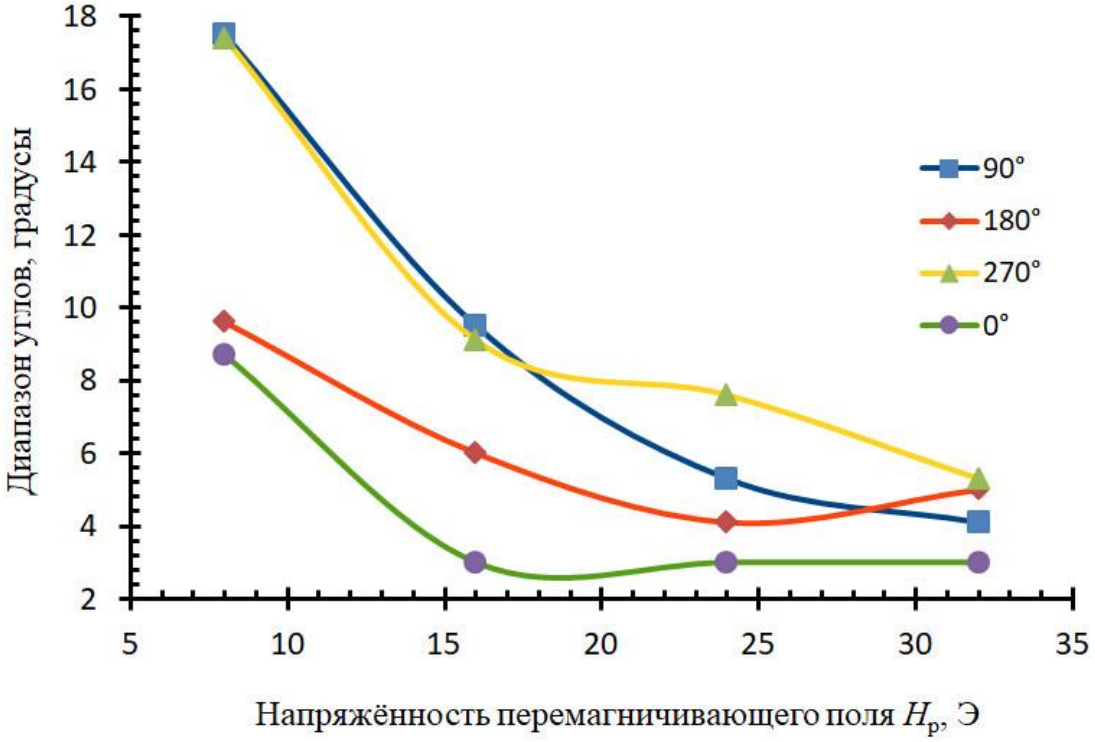


Рисунок 2 – Зависимость диапазона углов, при которых происходит ориентационный фазовый переход из состояния однородного намагничивания к состоянию с доменным упорядочением, от величины перемагничивающего поля $H_р$.
На легенде отражены значения углов ориентации магнитной плёнки относительно оси лёгкого намагничивания

Из рис. 2 следует, что в рассматриваемой плёнке области углов, в которых имеет место доменная структура, в двух взаимно противоположных направлениях (повёрнутых друг относительно друга на 180°) практически совпадают. Однако же другие две области, которые повёрнуты друг относительно друга на 90°, сами по себе сильно отличаются - примерно в 2 раза. Это обусловлено наличием в плёнке сложного вида энергии анизотропии (7): в одном направлении эффективное поле анизотропии составляет $H_{К2} + H_{К1} = 40$ Э, а в направлении, повернутом относительно первого на 90°, составляет $H_{К2} - H_{К1} = 32$ Э.

Заключение

Как было отмечено во введении, во многих устройствах спинтроники используются однородно намагниченные пленочные магнитные элементы. При этом важным для нормальной работы этих устройств является то обстоятельство, чтобы под воздействием магнитного поля эти пленочные элементы перемагничивались однородно. Установленные в данной работе результаты и закономерности помогут разработчикам устройств спинтроники увеличить быстродействие современных устройств.

Список литературы

1. E. Demirci. Magnetic and Magnetotransport Properties of Memory Sensors Based on Anisotropic Magnetoresistance. // J. Supercond. Nov. Magn. 2020. V. 33. PP. 3835-3840.
2. Chenying Wang, Wei Su, Zhongqiang Hu, Jiangtao Pu, Mengmeng Guan, Bin Peng, Lei Li, Wei Ren, Ziyao Zhou, Zhuangde Jiang and Ming Liu. Highly Sensitive Magnetic Sensor Based on Anisotropic Magnetoresistance Effect. // IEEE Trans. Magn. 2018. V. 54. № 11, PP. 1-3 (Art no. 2301103).
3. P.V. Sreevidya, Jakeer Khan, Harish C. Barshilia, C.M. Ananda, P. Chowdhury. Development of two axes magnetometer for navigation applications. // JMMM. 2018. V. 448. PP. 298-302.
4. Chong-Jun Zhao, Min Li, Jian-Wei Li, Lei Ding, Jiao Teng, Guang-Hua Yu. Noise reduction by magnetostatic coupling in geomagnetic-field sensors. // JMMM. 2014. V. 368. PP. 328-332.
5. Lisa Jogschies, Daniel Klaas, Rahel Kruppe, Johannes Rittinger, Piriya Taptimthong, Anja Wienecke, Lutz Rissing and Marc Christopher Wurz. Recent Developments of Magnetoresistive Sensors for Industrial Applications. // Sensors. 2015. V. 15. PP. 28665-28689.
6. В.В. Амеличев, Д.А. Жуков, С.И. Касаткин, Д.В. Костюк, О.П. Поляков, П.А. Поляков, В.С. Шевцов. Особенности расчета и исследования вольт-эрстедной характеристики анизотропного магниторезистивного датчика. // Письма в ЖТФ. 2021. Т. 47. № 10. С. 19-21.
7. Е.Н. Ильичева, Ю.А. Дурасова, Е.И. Ильяшенко, А.В. Матюнин, В.В. Рандошкин. Исследование магнитной анизотропии типа «легкая плоскость» и распределения намагниченности в эпитаксиальных пленках феррит-гранатов с ориентацией (100) // Вестник Московского Университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 2006. № 4. С. 30-34.
8. Г.М. Николадзе, А.В. Матюнин, П.А. Поляков. Разрушение состояния с однородной намагниченностью в магнитных пленках с одноосной анизотропией при их перемагничивании // Физика твердого тела. 2024. Т. 66. № 1. С. 77–81.
9. А.В. Матюнин, Г.М. Николадзе, П.А. Поляков. Особенности экспериментального исследования процессов квазистационарного намагничивания пленок ферритов–гранатов // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2022. Т. 86. № 9. С. 1239–1242.

ANISOTROPY IN THE PLANE OF FERRITE-GARNET FILMS: FEATURES OF THE MANIFESTATION

A.V. Matyunin, G.M. Nikoladze, P.A. Polyakov

Lomonosov MSU, Faculty of Physics, Moscow, Russia

E-mail: physphak@mail.ru

In this paper, the orientational phase transition from a state of homogeneous magnetization to a state with a magnetic domain structure under the influence of an external field rotating in the plane of the magnetic film is investigated. It is revealed that in the considered film, the areas of angles in which the domain structure takes

place in two mutually opposite directions (rotated 180° relative to each other) practically coincide. However, the other two regions, which are rotated relative to each other by 90°, themselves differ greatly by about 2 times. This circumstance is associated with a complex type of anisotropy energy.

Key words: magneto-optical setup, magneto-optical investigations, anisotropy, ferrite-garnet films, domain structure

УДК 537.611, 537.621

ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ МАГНИТНЫХ НАНОСЛОЕВ СИНТЕТИЧЕСКОГО АНТИФЕРРОМАГНЕТИКА СПИН-ТУННЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА В РАМКАХ МОДЕЛИ КОГЕРЕНТНОГО ВРАЩЕНИЯ

Д.В. Васильев[1], П.А. Поляков[2], В.В. Амеличев[1], Д.В. Костюк[1], О.П. Поляков[2], С.И. Касаткин[3]

[1]Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-производственный комплекс «Технологический центр», Москва, Россия

[2]Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», физический факультет, Москва, Россия

[3]Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, Москва, Россия

E-mail: 29diman05@mail.ru

В работе рассмотрена теоретическая модель спин-туннельного элемента с синтетическим антиферромагнетиком на основе когерентного вращения векторов намагниченностей ферромагнитных нанослоев под воздействием внешнего магнитного поля. Получены зависимости $\cos(\theta_r(h))$ от поля h при практически скомпенсированном и не скомпенсированном синтетическом антиферромагнетике; показано, что не скомпенсированный на 30 % синтетический антиферромагнетик перемагничивается при меньших полях.

Ключевые слова: теоретическая модель, когерентное вращение намагниченностей, спин-туннельный элемент, синтетический антиферромагнетик, ферромагнитный нанослой, одноосная анизотропия.

Введение

Развитие технологии получения тонкопленочных наноструктур с толщинами, контролируемыми с точностью до ангстрем, обеспечило развитие спинтронных устройств, к которым относят преобразователи магнитного поля [1], [2], энергонезависимую магниторезистивную память и устройства спиновой логики [3], [4]. Основой физического принципа функционирования этих устройств является спин-туннельный элемент (СТЭ). В простейшем случае СТЭ состоит из свободного слоя, туннельного барьера и опорного слоя. Свободный слой перемагничивается при малых магнитных полях, туннельный барьер представляет собой изолирующий немагнитный слой, обеспечивающий возможность переключения и считывания состояния свободного слоя посредством спин-поляризованного туннельного тока.

Как правило, опорный слой в СТЭ связан обменным взаимодействием с антиферромагнетиком, в роли которого могут выступать сплавы IrMn, FeMn, PtMn. Также опорный слой может быть представлен синтетическим антиферромагнетиком (САФ), состоящим из двух ферромагнитных слоев, которые связаны между собой косвенным обменным взаимодействием Рудермана–Киттеля–Касуя–Иосиды (РККИ). САФ позволяет достаточно точно

регулировать магнитные свойства опорного слоя и может быть рассмотрен как система с уменьшенным магнитным моментом и повышенной анизотропией.

В данной работе рассмотрена теоретическая модель СТЭ, и рассчитаны кривые перемагничивания с учетом характера взаимодействия ферромагнитных слоев в САФ и величины энергии РККИ-взаимодействия.

Основные положения теоретической модели СТЭ с САФ

Эскиз СТЭ с указанием основных функциональных слоев представлен на рис. 1.

Рисунок 1 – Эскиз СТЭ с САФ

Полная поверхностная плотность магнитной энергии СТЭ можно записать в виде [5]

$$E_{tot}(\theta_f,\theta_r,\theta_p) = E_f(\theta_f) + E_{SAF}(\theta_r,\theta_p), \tag{1}$$

где

$$E_f(\theta_f) = -\mu_0 H M_f t_f \cos(\theta_f - \theta_H) + K_f t_f \sin^2(\theta_f - \theta_{f0}), \tag{2}$$

$$\begin{aligned} E_{SAF}(\theta_r,\theta_p) = {} & -K_{eb}\cos(\theta_p - \theta_{eb}) + J_{SAF}\cos(\theta_p - \theta_r) \\ & - \mu_0 H M_r t_r \cos(\theta_r - \theta_H) - \mu_0 H M_p t_p \cos(\theta_p - \theta_H) + \\ & K_r t_r \sin^2(\theta_r - \theta_{r0}) + K_p t_p \sin^2(\theta_p - \theta_{p0}). \end{aligned} \tag{3}$$

В выражениях (1) – (3) переменные $\theta_f,\theta_r,\theta_p$ являются углами ориентации относительно оси X векторов намагниченности $\vec{M}_f,\vec{M}_r,\vec{M}_p$, как показано на рис. 2. Символом H обозначена величина напряженности внешнего магнитного поля, θ_H – угол ориентации вектора напряженности внешнего магнитного поля $\vec{H}$ (рис. 2). Соответственно θ_{eb} – угол ориентации оси однонаправленной анизотропии (exchange bias), $\theta_{f0},\theta_{r0},\theta_{p0}$ – углы ориентации осей одноосной анизотропии соответственно свободного, опорного и закрепленного слоев СТЭ, которые в рассматриваемом случае считаются одинаковыми для всех слоев, то есть $\theta_{f0} = \theta_{r0} = \theta_{p0}$. Величинами t_f,t_r,t_p обозначены толщины данных магнитных слоев, K_{eb} – константа обменного взаимодействия закрепленного слоя с антиферромагнитным слоем, J_{SAF} – константа обменного РККИ-взаимодействия, K_f – константа одноосной анизотропии свободного слоя, K_r – константа одноосной анизотропии опорного слоя, K_p – константа одноосной анизотропии закрепленного слоя.

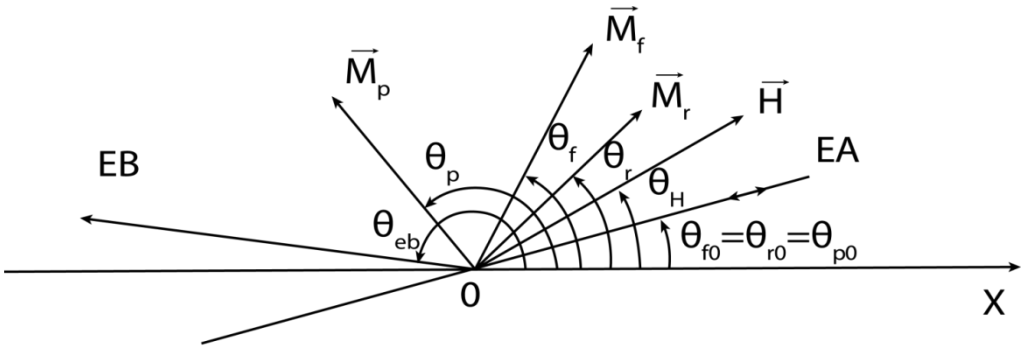


Рисунок 2 – Ориентация векторов намагниченности магнитных слоев СТЭ

Для удобства теоретического анализа перемагничивания магнитных слоев САФ под воздействием внешнего магнитного поля введем безразмерную магнитную энергию и безразмерные параметры. Для этого разделим (1) на характерное постоянное значение магнитной энергии

$$\frac{\mu_0 M_p{}^2 t_p}{2}, \tag{4}$$

тогда получим

$$e_{SAF}(\theta_r,\theta_p)=\frac{E_{SAF}(\theta_r,\theta_p)}{(\frac{\mu_0 M_p{}^2 t_p}{2})}=-\frac{H_{eb}}{M_p}\cos(\theta_p-\theta_{eb})+\frac{H_{SAF}}{M_p}\cos(\theta_p-\theta_r)$$
$$-2\frac{H}{M_p}\frac{M_r t_r}{M_p t_p}\cos(\theta_r-\theta_H)-2\frac{H}{M_p}\cos(\theta_p-\theta_H)+$$
$$\frac{H_r}{M_p}\frac{M_r t_r}{M_p t_p}\sin^2(\theta_r-\theta_{r0})+\frac{H_p}{M_p}\sin^2(\theta_p-\theta_{p0}), \tag{5}$$

где введены эффективные константы полей одноосной анизотропии

$$H_{eb}=\frac{2K_{eb}}{\mu_0 M_p t_p}, \tag{6}$$

эффективное обменное поле РККИ-взаимодействия

$$H_{SAF}=\frac{2J_{SAF}}{\mu_0 M_p t_p}, \tag{7}$$

эффективное поле одноосной анизотропии опорного слоя

$$H_r=\frac{2K_r}{\mu_0 M_r}, \tag{8}$$

эффективное поле одноосной анизотропии закрепленного слоя

$$H_p=\frac{2K_p}{\mu_0 M_p}. \tag{9}$$

Введем безразмерные значения характерных значений параметров полей (6)-(9), нормируя их на величину вектора намагниченности M_p

$$h=\frac{H}{M_p},\ h_{eb}=\frac{H_{eb}}{M_p},\ h_{SAF}=\frac{H_{SAF}}{M_p},\ h_r=\frac{H_r}{M_p},\ h_p=\frac{H_p}{M_p}, \tag{10}$$

тогда для безразмерной поверхностной плотности магнитной энергии САФ будем иметь выражение

$$\begin{aligned} e_{SAF}(\theta_r,\theta_p) = &-h_{eb}\cos(\theta_p-\theta_{eb})+h_{SAF}\cos(\theta_p-\theta_r)\\ &-2hv\cos(\theta_r-\theta_H)-2h\cos(\theta_p-\theta_H)+\\ &h_r v\sin^2(\theta_r-\theta_{r0})+h_p\sin^2(\theta_p-\theta_{p0}), \end{aligned} \tag{11}$$

где введен параметр v компенсации намагниченности ферромагнитных слоев САФ

$$v=\frac{M_r t_r}{M_p t_p}. \tag{12}$$

Рассчитаем безразмерные параметры (10), (12) для типичных физических параметров СТЭ с САФ

$$\begin{gathered} K_{eb}=1{,}73\ \ 10^{-4}J\ \ m^{-2},\ J_{SAF}=7{,}34\ \ 10^{-4}J\ \ m^{-2},\\ \mu_0 H_p=5\ \ 10^{-3}T,\ \mu_0 M_p=1{,}9T,\ t_p=2nm. \end{gathered} \tag{13}$$

Подставляя значения (13) в выражения (6) – (10), получим

$$h_{eb}=0{,}061;\ h_{SAF}=0{,}26;\ h_p=2{,}63\ \ 10^{-3}. \tag{14}$$

Рассмотрим случай, когда $\theta_{eb}=\pi$, то есть ось однонаправленной анизотропии направлена против оси X на рис. 2. Оси одноосной анизотропии опорного и закрепленного слоев направлены вдоль оси X, то есть $\theta_{r0}=\theta_{p0}=0.$ Внешнее магнитное поля направлено вдоль или против оси X, соответственно, если проекция вектора напряженности внешнего поля $H_x>0$, то $\theta_H=0$, если $H_x<0$, то $\theta_H=\pi$.

Пусть $\theta_H=\pi$, тогда выражение (11) для безразмерной поверхностной плотности энергии слоев САФ будет иметь вид

$$\begin{aligned} e_{SAF}(\theta_r,\theta_p) = &\ h_{eb}\cos(\theta_p)+h_{SAF}\cos(\theta_p-\theta_r)\\ &2hv\cos(\theta_r)+2h\cos(\theta_p)+\\ &h_r v\sin^2(\theta_r)+h_p\sin^2(\theta_p). \end{aligned} \tag{15}$$

Равновесная ориентация векторов намагниченности $\vec{M}_r$ и $\vec{M}_p$, то есть значения углов θ_r и θ_p при различных значениях безразмерного внешнего магнитного поля h, может быть определена из условия достижения минимума функции (15). Эта задача была решена численно, и на рис. 3 представлен график зависимости $\cos(\theta_r(h))$ от поля h при $v=1{,}001;$ то есть при практически скомпенсированном САФ. На рис. 4 график зависимости $\cos(\theta_r(h))$ от поля h при $v=1{,}3;$ то есть при не скомпенсированном САФ.

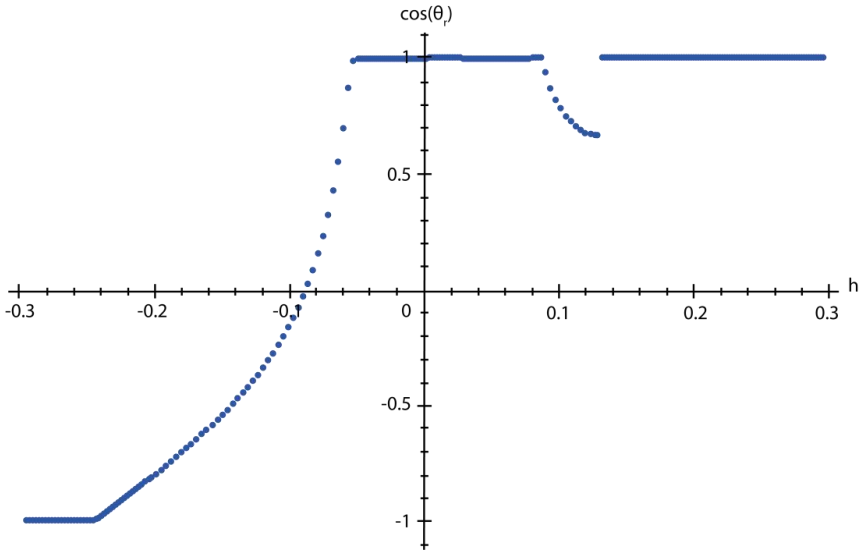


Рисунок 3 – График зависимости $\cos(\theta_r(h))$ от поля h при $v = 1,001$

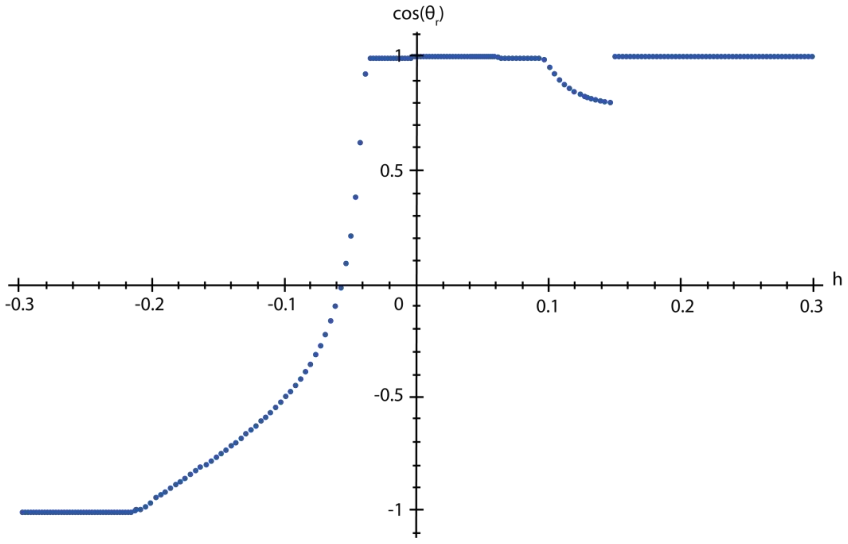


Рисунок 4 – График зависимости $\cos(\theta_r(h))$ от поля h при $v = 1,3$

На рис. 5 представлен график зависимости $\cos(\theta_r(h))$ от поля h при $v = 1,001$; при практически скомпенсированном САФ, но уменьшенной в 10 раз энергией обменного РККИ-взаимодействия $h_{SAF} = 0,026$; которая приблизительно в 2 раза меньше поля однонаправленной анизотропии $h_{eb} = 0,061$.

Из рис. 5 видно, что перемагничивание опорного слоя САФ в этом случае происходит при величине внешнего магнитного поля, меньшей приблизительно в 10 раз.

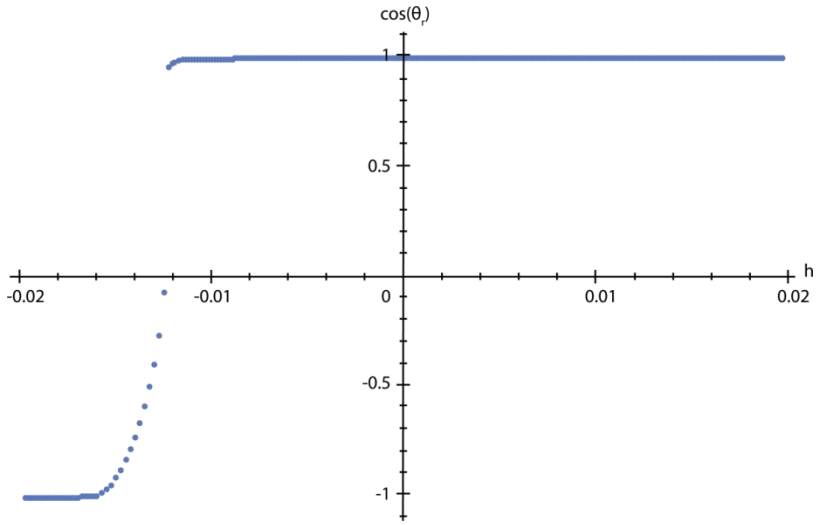


Рисунок 5 – График зависимости $\cos(\theta_r(h))$ от поля h при $v = 1{,}001$ и $h_{SAF} = 0{,}026$

Заключение

Разработана модель перемагничивания СТЭ с САФ с учетом ориентации осей одноосной анизотропии свободного, опорного и закрепленного слоев. Показано влияние не скомпенсированного САФ и энергии обменного РККИ-взаимодействия на величину внешнего магнитного поля, при котором происходит перемагничивание опорного слоя. Полученная модель позволит разработать оптимальный состав и толщины пленок, входящих в состав СТЭ с САФ, для дальнейшей разработки спинтронных устройств на основе данных элементов.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках выполнения НИР «Теоретические и экспериментальные исследования спин-туннельных магниторезистивных наноструктур с синтетическим антиферромагнетиком для создания высокочувствительных преобразователей магнитного поля и элементов ячеек энергонезависимой магниторезистивной памяти», шифр FNRM-2022-0010.

Литература

1. Freitas P. P., Ferreira R., Cardoso S., Cardoso F. Magnetoresistive Sensors // Journal of Physics: Condensed Matter. 2007. V. 19. № 16. P. 165221.

2. Zheng Ch., Zhu K., Cardoso S., Chang J.-Yu., Davies J. E. Magnetoresistive Sensor Development Roadmap (Non-Recording Applications) // IEEE Transactions On Magnetics. 2019. V. 55. № 4. P. 0800130.

3. Dieny B., Goldfarb R. B., Lee K.-J. Introduction to magnetic random-access memory / IEEE Magnetics, 2017. – 255 p.

4. Apalkov D., Dieny B., Slaughter J. M. Magnetoresistive Random Access Memory // Proceedings of the IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2016. V. 104. P.1796-1830.

5. Lu Zh., Pan G., Al-Jibouri A., Hoban M. Effect of Ru-thickness on spin flop in synthetic spin valves // Journal of Applied Physics. 2002. V. 91. № 10. P. 7116-7118.

FEATURES OF MAGNETIZATION OF MAGNETIC NANOLAYERS IN A SYNTHETIC ANTIFERROMAGNET OF SPIN-TUNNEL ELEMENT WITHIN THE FRAMEWORK OF THE COHERENT ROTATION MODEL

D.V. Vasilyev[1], P.A. Polyakov[2], V.V.Amelichev[1],
D.V. Kostyuk[1], O.P. Polyakov[2], S.I. Kasatkin[3]
[1]Scientific-Manufacturing Complex «Technological Centre», Moscow, Russia
[2]Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
[3]V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
E-mail: 29diman05@mail.ru

The paper considers a theoretical model of a spin tunnel element with a synthetic antiferromagnet based on the coherent magnetization rotation of the ferromagnetic nanolayers under the influence of an external magnetic field. The dependences of $\cos(\theta_r(h))$ on field h were obtained for nearly compensated and uncompensated synthetic antiferromagnets. It has been shown that a synthetic antiferromagnet that is not compensated by 30% is remagnetized at lower fields.

Keywords: theoretical model, coherent magnetization rotation, spin-tunnel element, synthetic antiferromagnet, ferromagnetic nanolayer, uniaxial anisotropy.

УДК 621.31:537.523.2

МЕТОДИКА РАСЧЕТА И ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ НА ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ В ВОЗДУХЕ

А.В. Галимова, А.А. Белогловский, С.В. Белоусов
Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия
E-mail: BeloglovskyAA@mpei.ru

Стример – это тонкий нетермоионизированный плазменный канал с избыточным зарядом на обоих его концах или одном из них. Существует ряд прикладных задач, в которых важна способность аэрозольных частиц инициировать стримерный разряд. Показано, что лишь крупные частицы, близкие к сферическим, обеспечивают локальное усиление поля, достаточное для выполнения условия самостоятельности в стримерной форме. Мелкие частицы аэрозолей должны иметь довольно вытянутую форму, чтобы выполнялось условие самостоятельности в стримерной форме.
Ключевые слова: аэрозольные частицы, усиление электрического поля, условие самостоятельности электрического разряда в стримерной форме.

Введение

Стример – это тонкий нетермоионизированный плазменный канал с избыточным зарядом на обоих его концах или одном из них [1]. Его заряженная оконечная часть называется стримерной головкой. В сильном электрическом поле (ЭП) головок происходит эффективная ударная ионизация, благодаря которой они распространяются в разрядном промежутке (РП) [1].

Существует ряд прикладных задач, в которых важна способность аэрозольных частиц инициировать стримерный разряд. В ЭП головок помимо ионизации протекают процессы, ведущие к синтезу химически активных частиц, затем участвующих в реакциях в воздушной среде.

Это даёт возможность применять низкотемпературную разрядную плазму, например, для инактивации бактерий и вирусов [2]. Последние, чаще всего, присутствуют в воздушной среде в мелких частицах водного аэрозоля.

К числу таких задач также относятся исследования с использованием сильных электрических полей, направленные на выявление влияния характеристик гидрометеоров (капель воды, замерзающие капли, градины и пр.) на инициирование и развитие искрового разряда [3]. По одной из гипотез появление разряда на гидрометеорах способствует формированию начальной фазы стримерно-лидерного процесса, завершающегося генерацией молнии [4].

В свете сказанного актуальной является задача создания методики оценки влияния параметров частиц аэрозоля на условия выполнения самостоятельности разряда в стримерной форме [5].

1. Методика расчёта

Рассматривалось ЭП вблизи проводящей частицы, помещенной во внешнее однородное поле с напряженностью E_0 вдали от электродов. Его вектор $\mathbf{E_0}$ сонаправлен с осью Ox декартовой системы координат и $E(x)$ –

распределение напряженности поля вдоль его центральной силовой линии. Частица имеет форму эллипсоида вращения с большой полуосью a и малой полуосью b, начало координат (т. O) находится в ее центре (см. рисунок 1). Большая полуось эллипсоида ориентирована вдоль координатной оси Ox. Сферической частице радиусом a соответствует $a=b$.

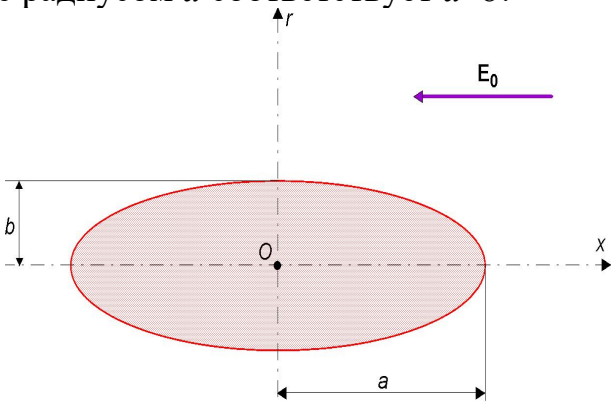


Рисунок 1 – Математическая модель эллиптической проводящей частицы во внешнем электрическом поле

Напряженность ЭП вблизи вытянутой эллиптической частицы ($a>b$) на координатной оси Ox вычислялась по формуле, приведенной в работах [6, 7]:

$$E(x)=-\partial\varphi/\partial x,\ \varphi(x)=-E_0\{1-[\mathrm{Arth}(p_1)-p_1]/[\mathrm{Arth}(p_2)-p_2]\}, \quad (1)$$

где $p_1=[(a^2-b^2)/(a^2+\xi)]^{0,5}$, $p_1=[(1-b^2/a^2]^{0,5}$, $\xi=x^2-a^2$.

Максимальная напряженность поля $E_{max}=E(a)$ достигается на поверхности частицы, а граница зоны ионизации находится на расстоянии $L_и=X_и-a$, где $X_и$ – точка, в которой равны коэффициенты ударной ионизации α и прилипания η, $\alpha_{эф}(X_и)=\alpha(X_и)-\eta(X_и)=0$.

В соответствии с [1] условие самостоятельности электрического разряда в его лавинной форме выполняется, если

$$\int\alpha_{эф}(x)dx>K=\ln(1+1/\gamma), \quad (2)$$

где интегрирование выполняется от поверхности частицы ($x=a$) до границы зоны ионизации ($x=X_и$), γ – коэффициент вторичной ионизации, K=8,2 [1].

Условие самостоятельности разряда в стримерной форме реализовано следующим образом. Допустим, что для лавинно-стримерного перехода (ЛСП) необходимо, чтобы при пересечении зоны ионизации в ней накопилось число электронов n_e не менее критического $n_{eкр}$. В этом случае

$$n_e=\exp[\int\alpha_{эф}(x)dx]>n_{eкр}, \quad (3)$$

или, что то же самое,

$$\int\alpha_{эф}(x)dx>\ln(n_{eкр}), \quad (4)$$

Подобно условию самостоятельности (2) разряда в лавинной форме, интегрирование в неравенстве (3) выполняется от поверхности частицы ($x=a$)

до границы зоны ионизации ($x=X_и$). Выполнение неравенства (3) означает появление стримера вблизи аэрозольной частицы. Варьируя ее параметры, можно оценить условия формирования стримеров.

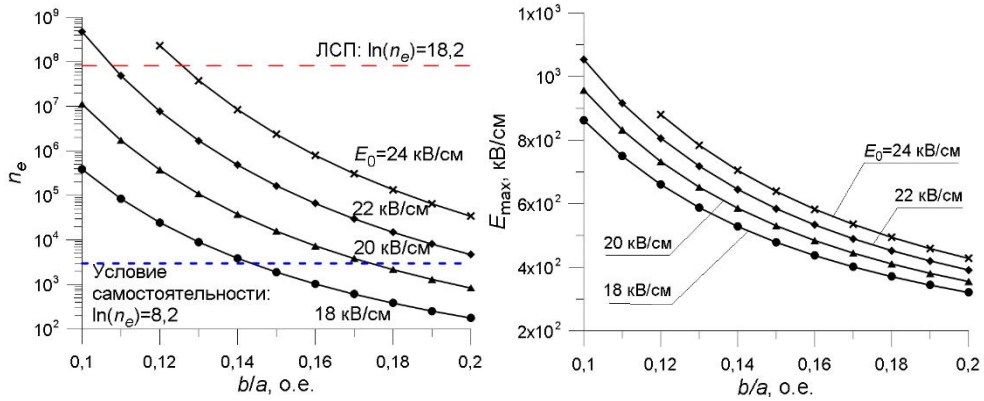
В предыдущей главе было показано, что при ЛСП вблизи электрода, чью роль здесь играет проводящая частица, $n_{екр}\approx 8\cdot 10^7$. Значения $\alpha_{эф}(E)$ эффективного коэффициента ударной ионизации определялись эмпирической формулой

$$\alpha_{эф}/\delta = a_\alpha (E/\delta - b_\alpha)^2, \qquad (5)$$

где a_α=0,2 см/кВ^2, b_α=24,5 кВ/см, а напряженность поля E находилась из (1).

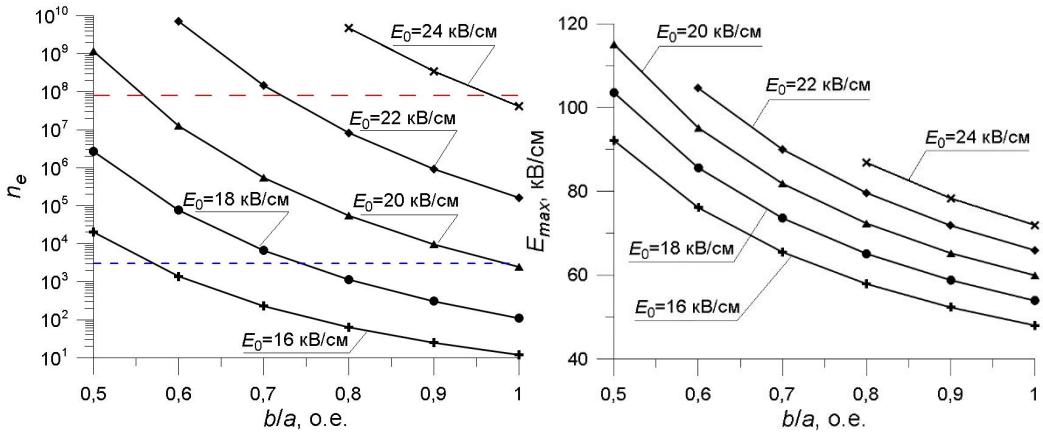
2. Результаты расчёта

В качестве примера приведены результаты расчетов для аэрозольных частиц размером a=0,02 см (см. рисунок 2) и a=0,2 см (см. рисунок 3). Рисунки 2.*а* и 3.*а* иллюстрируют зависимости $n_e(b/a)$, где значения n_e вычислялись по формуле (3). На рисунках 2.*б* и 3.*б* показаны графики $E_{max}(b/a)$, где, как было сказано, $E_{max}=E(a)$, а функция $E(x)$ определяется формулами (3). Критическое число электронов в лавине было в (3) принято равным $n_{екр}=8\cdot 10^7$ [8]. В (4) этому соответствует $\ln(n_{екр})\approx 18{,}2$. Напряженность внешнего поля составила E_0=16÷24 кВ/см.



а) б)

Рисунок 2 – Расчетные зависимости $n_e(b/a)$ (*а*) и $E_{max}(b/a)$ (*б*) для эллиптической аэрозольной частицы с большой полуосью a=0,02 см во внешнем поле с напряженностью E_0=18÷24 кВ/см



а) б)

Рисунок 3 – Расчетные зависимости $n_e(b/a)$ (*а*) и $E_{max}(b/a)$ (б) для эллиптической аэрозольной частицы с большой полуосью a=0,2 см во внешнем поле с напряженностью E_0=16÷24 кВ/см

Результаты, показанные на рисунках 2 и 3, приводят к следующим заключениям. Во-первых, рассматривая сферические частицы или близкой к ней формой, лишь крупные частицы могут обеспечить локальное усиление ЭП, достаточное для выполнения условия самостоятельности в стримерной форме при значениях $E_0 << E_к$. Например, при a=0,2 см (см. рисунок 3) и принятых здесь параметрах модели равенство $n_e = n_{eкр}$ выполняется при $b/a \approx 0{,}97$ и E_0=24 кВ/см, $b/a \approx 0{,}72$ и E_0=22 кВ/см, а также $b/a \approx 0{,}55$ и E_0=20 кВ/см (см. рисунок 3.*а*). Этим случаям соответствуют наибольшие значения напряженности ЭП на поверхности частицы E_{max}=74÷108 кВ/см (см. рисунок 3.б), меньшие значения E_{max} соответствуют большим отношениям b/a, $E_{max}=3E_0$=72 кВ/см при b/a=1 и E_0=24 кВ/см. Во-вторых, мелкие аэрозоли должны быть очень сильно вытянуты для создания выполнения условия самостоятельности разряда в стримерной форме. При a=0,02 см (см. рисунок 2) $n_e = n_{eкр}$ при $b/a \approx 0{,}107$ и E_0=22 кВ/см (см. рисунок 2.*а*). Однако при этом на поверхности частицы $E_{max} \rightarrow 1000$ кВ/см (см. рисунок 2.*б*). Столь сильные поля вряд ли достижимы на практике, поскольку в них раньше будет выполнено условие самостоятельности в лавинной форме (2).

Заключение

Исследование влияния аэрозольных частиц в воздушной среде на появление стримеров в разрядном промежутке показало следующее.

Во-первых, лишь крупные частицы, формой близкие к сферическим, могут обеспечить локальное усиление поля, достаточное для выполнения условия самостоятельности в стримерной форме при значениях E_0 заметно меньших критической величины $E_к$. Например, при a=0,2 см и принятых здесь параметрах модели равенство $n_e = n_{eкр}$ выполняется при $b/a \approx 0{,}97$ и E_0=24 кВ/см, $b/a \approx 0{,}72$ и E_0=22 кВ/см, а также $b/a \approx 0{,}55$ и E_0=20 кВ/см. Этим случаям соответствуют наибольшие значения напряженности ЭП на поверхности частицы E_{max}=74÷108 кВ/см (меньшие значения E_{max} соответствуют большим отношениям b/a, $E_{max}=3E_0$=72 кВ/см при b/a=1 и E_0=24 кВ/см).

Во-вторых, мелкие аэрозоли должны иметь довольно вытянутую форму, чтобы выполнялось условие самостоятельности в стримерной форме. В результате математического моделирования получены условия возникновения разряда, при которых на поверхности аэрозоля $E_{max} \rightarrow 1000$ кВ/см. Столь сильные поля вряд ли достижимы на практике, поскольку в них раньше будет выполнено условие самостоятельности в лавинной форме (2).

Список литературы

1. Электрофизические основы техники высоких напряжений: учеб. / И.М. Бортник и др.; под ред. И.П. Верещагина. – 3-е изд., перераб. и доп. – М: Издательство МЭИ, 2018.
2. Study on flexible surface dielectric barrier discharge plasma film for in situ inactivation of bacteria and viruses / M. Fang, L. Zhang, J. Sun, X. Wang, J. Tie, Q. Zhou, L. Zhang, H. Luo // Appl. Phys. Lett. 2022. Vol. 121. 074101.
3. Белогловский А.А. Об уточнении критерия однолавинно-стримерного перехода в воздухе в сильных однородных электрических полях // Вестник МЭИ. 2020. № 6. С. 29–38.

4. Богатов Н.А. Исследование пороговых характеристик разряда на аэрозольных частицах / Известия вузов. Радиофизика. Том LVI. № 11–12. С. 920–930.
5. Галимова А.В. Методика оценки влияния параметров частиц аэрозоля на появление стримерных разрядов в коротких воздушных промежутках / А.В. Галимова, А.А. Белогловский // РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА: Тридцатая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (29 февраля – 2 марта 2024 г., Москва): Тез. докл. – М.: ООО "Центр полиграфических услуг "Радуга", 2024. С. 1213.
6. Верещагин, И.П. Основы электрогазодинамики дисперсных систем / Верещагин И.П. и др. – М.: Энергия, 1974.
7. Ландау, Л.Д. Теоретическая физика: Учеб. пособ.: Для вузов. В 10 т. Т. VIII. Электродинамика сплошных сред. – 4-е изд., стереот. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005.
8. Галимова А.В., Белогловский А.А., Белоусов С.В., Лебедева Н.А. Математическое моделирование электронных лавин в воздухе для уточнения условий лавинно-стримерных переходов // Промышленная энергетика. 2024. №4. С. 43–50.

THE METHOD OF CALCULATION AND EVALUATION OF THE EFFECT OF AEROSOL PARTICLES ON THE FORMATION OF ELECTRICAL DISCHARGES IN THE AIR

A.V. Galimova, A.A. Beloglovsky, S.V. Belousov
National Research University «MPEI», Moscow, Russia
E-mail: BeloglovskyAA@mpei.ru

A streamer is a thin non-thermoionized plasma channel with excess charge at both ends or one of them. There are a number of applied problems in which the ability of aerosol particles to initiate a streamer discharge is important. It is shown that only large particles, close to spherical, provide local field enhancement sufficient to fulfill the condition of independence in streamer form. Small aerosol particles must have a fairly elongated shape in order for the condition of independence in streamer form to be fulfilled.

Key words: aerosol particles, strengthening of the electric field, condition for the independence of the electric discharge in the air

УДК 537.61

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ОДНОРОДНО НАМАГНИЧЕННОЙ МИКРОПОЛОСКИ С СИНУСОИДАЛЬНЫМ РЕЛЬЕФОМ

М.А. Пятаков, М.Л. Акимов, П.А. Поляков
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», Москва, Россия
E-mail: f33261033444444@yandex.ru

Производится численный расчет магнитного поля микромагнитной полоски с пространственным поверхностным рельефом, то есть в случае магнитного пленочного материала с конечной шириной и бесконечно большой длиной. Произведен анализ результатов численного интегрирования и построены графики для компонент магнитного поля. Также выполнен сравнительный анализ с результатами для компонент магнитного поля, создаваемого микромагнитной пленкой бесконечно больших размеров по двум осям.

Ключевые слова: магнитостатика, микромагнитные полоски, магнитное поле, постоянные пленочные магниты.

Введение

Намагниченные пленочные микромагниты, как известно, имеют широкий спектр применения во многих отраслях: от спинтроники и микроэлектроники до использования в микроэлектромеханических системах (МЭМС) [1–3]. И все это благодаря их миниатюрным размерам и зачастую уникальным свойствам, обусловленным этими масштабами [4]. В области МЭМС, например, они применяются при создании различных компонентов, таких как датчики, микромоторы, различные механизмы. Сами компоненты используются в электродвигателях, медицинском оборудовании, промышленности, автомобилестроении [5–8].

1. Постановка задачи

В данной работе имеется намагниченный вдоль оси OY пленочный материал, расположенный так, как продемонстрировано на рис. 1, и имеющий рельефную структуру синусоидального типа.

Здесь, на рис. 1, показано направление вектора намагниченности, отражен синусоидальный профиль представленной микрополоски (ее сечение в плоскости XOY является функцией косинуса, зависящей от абсциссы), обозначены поверхностные фиктивные магнитные заряды с положительной поверхностной плотностью на поверхности косинусоиды σ, которая также зависит от абсциссы. Высота самого профиля равна $2a$, ширина – $2A$ (см. рис. 1), толщина нижней части структуры, то есть самой пленки, δ. Также пронумерованы пространственные области: 1 – над профилем, 2 – между его «горбами» и внутри них, 3 – под системой.

Путем разбиения на отдельные заряженные с линейной плотностью фиктивных магнитных зарядов $d\gamma$ (в зависимости от поверхности эта величина имеет либо положительный знак, либо отрицательный) вдоль оси OZ тонкие

полоски ширины dx (размер от x до $x+dx$) и бесконечной по оси OZ длины можно вычислить компоненты магнитного поля профилированной пленки. Отметим, что вводится также поверхностная плотность σ, которая соответствует зарядам на горизонтальных площадках dx и, как нетрудно понять, связана с плотностью σ как

$$\sigma = \sigma\cos\alpha\,. \tag{1}$$

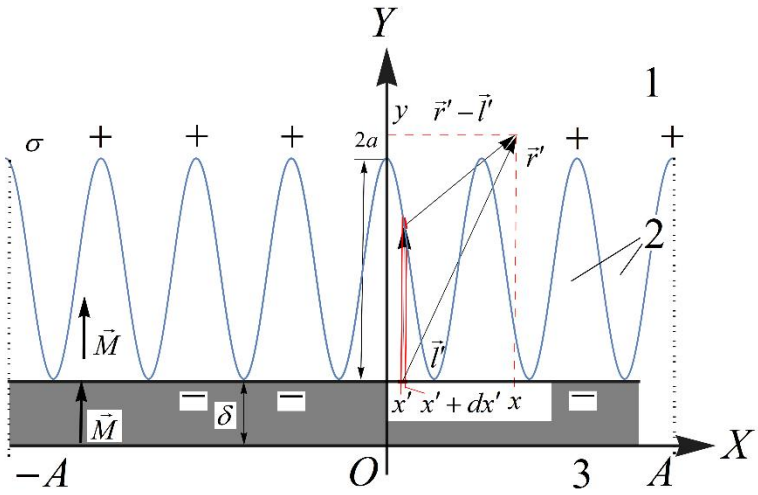


Рисунок 1 – Намагниченная микромагнитная полоска с синусоидальным рельефом

Подобные расчеты были выполнены в работе [9] для пластины с гармоническим профилем бесконечных размеров по двум осям – OX и OZ. В данной работе рассматривается микрополоска, то есть материал с конечной шириной (размерами по оси OX) и бесконечной длиной (размерами по оси OZ), и поле рассчитывается на произвольном расстоянии от поверхности профиля и в произвольной области пространства – внутри и вне микрополоски. Обозначим расстояние между искривленным (на косинусоиде) и плоским (на плоскости XOZ) участками косинусоиды в точке x как $l = \left|\vec{l}\right|$,

где вектор $\vec{l}$ направлен перпендикулярно плоскости XOZ от отрицательного заряда к положительному, а функция l выглядит как (здесь $\vec{n}_y$ – единичный вектор вдоль оси OY)

$$\vec{l} = \vec{n}_y\left(a + a\cos\left(kx\right)\right). \tag{2}$$

Суммарное поле, создающееся микрополоской, в общем случае, когда ширина по оси абсцисс конечна по сравнению с толщиной пленки, будет складываться из поля тонкой пластины, то есть той части структуры, которая имеет плоские границы, и поля самого синусоидального рельефа. И оба вклада необходимо учитывать, что и было, в частности, сделано в данной работе.

2. Расчет потенциала и магнитного поля. Результаты в области выше профиля (область 1)

Выражение для скалярного потенциала магнитного поля верхней части профиля (косинусоиды), разбитой на отдельные бесконечно длинные полоски определяется по формуле [9]

$$d\varphi = 2\sigma\, dx \;\; \ln\left(\left(x-x\right)^2 + y^2\right)^{1/2} - \ln\left(\left(x-x\right)^2 + \left(y - a\left(1+\cos kx\right)\right)^2\right)^{1/2} + C_1, \quad (3)$$

где константу C_1 при соответствующей нормировке потенциала положим равной нулю.

Учитывая вертикальное направление вектора намагниченности материала (отлична от нуля только y -компонента вектора намагниченности), а также связь поверхностной плотности σ и нормальной составляющей вектора намагниченности $\sigma = M_n$ [10], принимая во внимание формулу (1) и отбрасывая константу C_1, можно переписать формулу (3) следующим образом:

$$d\varphi = 2M dx \;\; \ln\left(\left(x-x\right)^2 + y^2\right)^{1/2} - \ln\left(\left(x-x\right)^2 + \left(y - a\left(1+\cos kx\right)\right)^2\right)^{1/2}. \quad (4)$$

Формула (4) – это точное значение дифференциала потенциала как функция координат x и y точки наблюдения для пары элементарных линейных зарядов, имеющих абсциссу x , без учета нижней части структуры.

Для учета вклада потенциала от нижней части, намагниченной аналогично намагниченности профиля, одна из плоских границ которой лежит на оси абсцисс (см. рис. 1), в функции (4) добавляется параметр δ :

$$d\varphi = 2M dx \;\; \ln\left(\left(x-x\right)^2 + y^2\right)^{1/2} - \ln\left(\left(x-x\right)^2 + \left(y - a\left(1+\cos kx\right) - \delta\right)^2\right)^{1/2}. \quad (5)$$

Из (5) получается интегральное соотношение для потенциала, где интегрирование производится по ширине структуры в пределах от $-A$ до A :

$$\varphi = 2M \int_{-A}^{A} dx \;\; \ln\left(\left(x-x\right)^2 + y^2\right)^{1/2} - \ln\left(\left(x-x\right)^2 + \left(y - a\left(1+\cos kx\right) - \delta\right)^2\right)^{1/2}. \quad (6)$$

И интегральные соотношения для компонент результирующего магнитного поля можно получить с учетом (6), если учесть связь напряженности поля и потенциала:

$$\begin{aligned} H_x &= -\frac{\partial\varphi}{\partial x} = -2M \int_{-A}^{A} dx \;\; \frac{x-x}{\left(x-x\right)^2 + y^2} - \frac{x-x}{\left(x-x\right)^2 + \left(y - a\left(1+\cos kx\right) - \delta\right)^2}, \\ H_y &= -\frac{\partial\varphi}{\partial y} = -2M \int_{-A}^{A} dx \;\; \frac{y}{\left(x-x\right)^2 + y^2} - \frac{y - a\left(1+\cos kx\right) - \delta}{\left(x-x\right)^2 + \left(y - a\left(1+\cos kx\right) - \delta\right)^2}. \end{aligned} \quad (7)$$

Приведенные соотношения (7) не вычисляются аналитически, интегралы не берутся, поэтому их расчет можно осуществить численно. Зададим параметры, фигурирующие в (7), следующим образом:

$$a = 0.25 \text{ см}, k = 2\pi \text{ см}^{-1}, M = \frac{13100}{4\pi} \frac{\text{эрг}}{\text{Гс см}^3}, \delta = 0.002, -5 \quad x \quad 5, \quad (8)$$

где намагниченность соответствует неодим-железо-бору.

На рис. 2 представлены зависимости для H_x при параметрах (8) в точках с ординатой $y = 0.6$ (слева) и $y = 0.9$ (справа) при значениях $A = 10$, $A = 100$ и

$A=1000$, а также для сравнения график H_x^{dip}, соответствующий дипольному приближению [9], для которого

$$H_x^{dip}=\pi Make^{-ky}\sin kx. \tag{9}$$

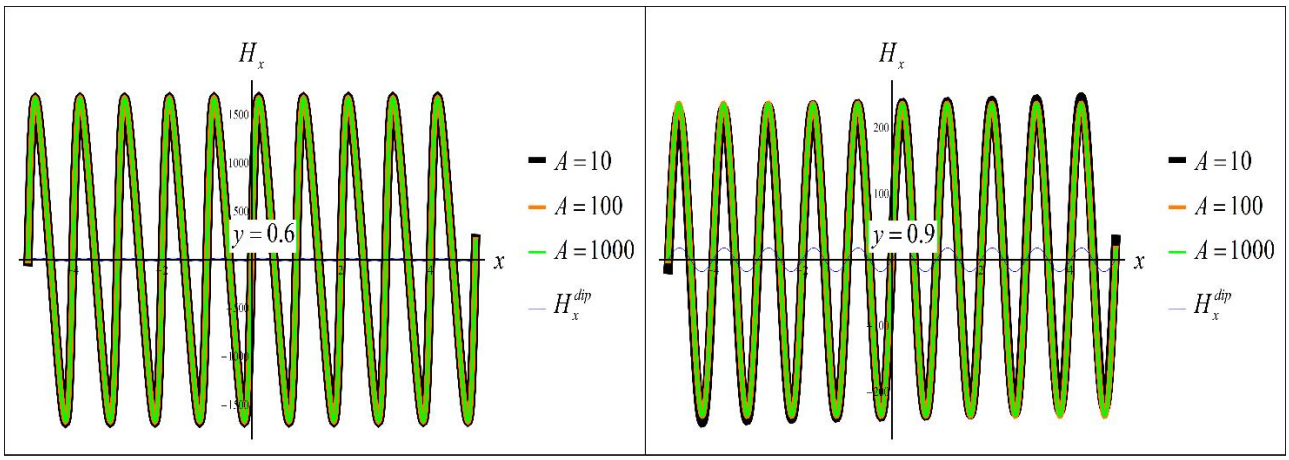


Рисунок 2 – Компонента H_x суммарного магнитного поля в области выше профиля

На рис. 3 представлены зависимости для H_y при параметрах (8) в точках с ординатой $y=0.6$ (слева) и $y=0.9$ (справа) при значениях $A=10$, $A=100$ и $A=1000$, а также для сравнения график H_y^{dip}, соответствующий дипольному приближению [9], для которого

$$H_y^{dip}=\pi Make^{-ky}\cos kx. \tag{10}$$

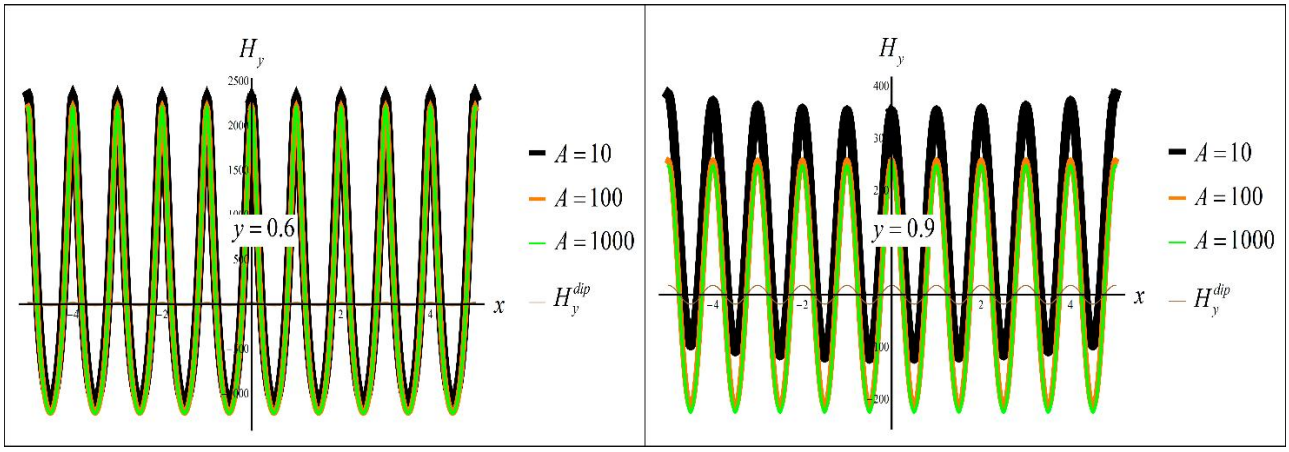


Рисунок 3 – Компонента H_y суммарного магнитного поля в области выше профиля

3. Результаты в области ниже профиля (область 2)

По приведенным соотношениям для компонент магнитного поля (7), как показали расчеты, можно вычислить значение магнитного поля в любой точке, в том числе внутри магнитного материала и между максимума косинусоиды – между «горбами», за исключением точек с ординатами $y=0$ и $y=2a$, в которых при интегрировании в точках с абсциссой $x=x$ появляется особенность подынтегрального выражения.

Графики для области 2 представлены на рис. 4 и 5, где показаны зависимости соответственно для H_x и H_y при параметрах (8) в точках с ординатами $y=0.4$ и $y=-0.4$ (на одной координатной плоскости для каждой компоненты поля) при значении $A=100$, где точки с $y=-0.4$ находятся в области ниже нашей структуры, а с $y=0.4$ – попадают как в область косинусоиды, так и в область между ее максимумами.

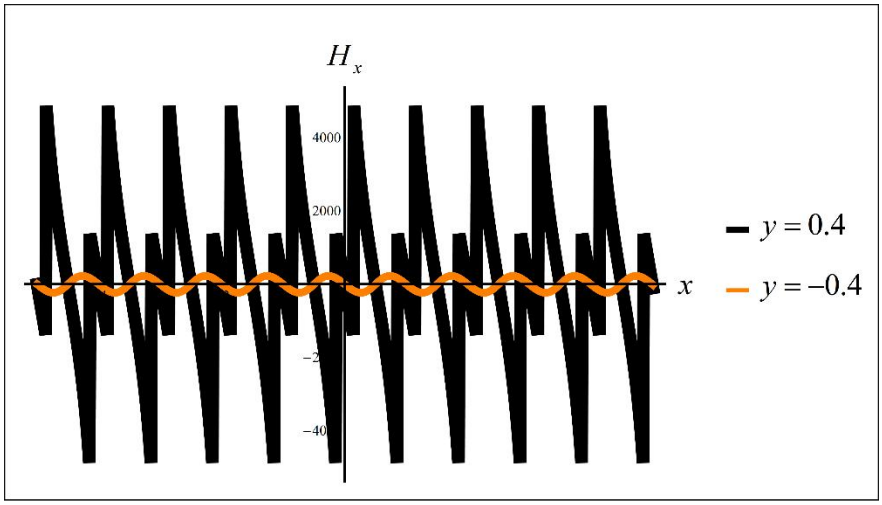


Рисунок 4 – Компонента H_x суммарного магнитного поля в областях внутри косинусоиды и между ее максимумами

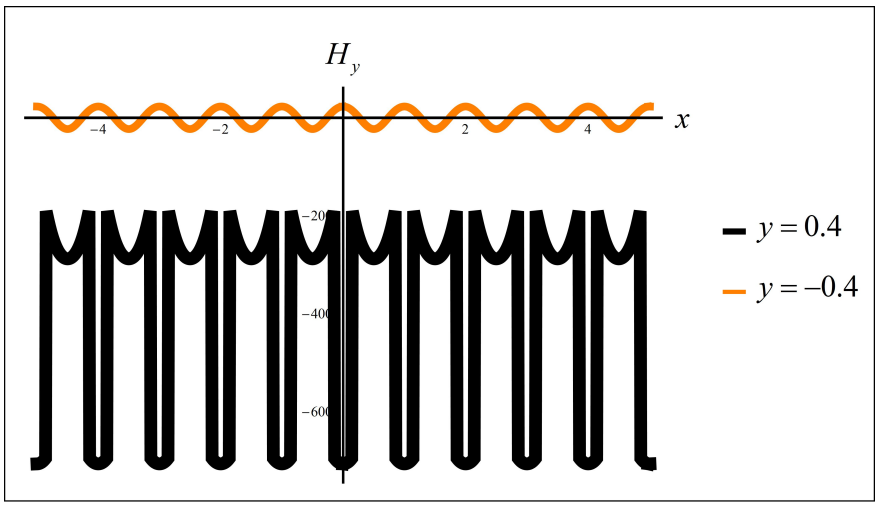


Рисунок 5 – Компонента H_y суммарного магнитного поля в областях внутри косинусоиды и между ее максимумами

Произведем анализ полученных результатов (графиков).

Заключение и анализ результатов

Из полученных зависимостей для пространственной области выше профиля видны следующие интересные особенности. Во-первых, при увеличении расстояния от рельефа до точки наблюдения наши компоненты магнитного поля, как по оси ординат, так и по оси абсцисс, стремятся к компонентам магнитного поля, соответствующим дипольному приближению. То есть при увеличении ординаты дипольное приближение начинает

выполняться с большей точностью. Во-вторых, y -компонента поля не продолжает оставаться гармонической функцией абсциссы, как форма самого профиля, задающегося формулой (2): она лишь напоминает функцию косинуса, что можно объяснить, к примеру, влиянием граничных условий при рассмотрении на близких расстояниях к поверхности и при конечных размерах структуры по оси абсцисс. В-третьих, x -компонента начинает тоже незначительно деформироваться при уменьшении параметра A , который характеризует ширину микрополоски, что также можно интерпретировать как влияние граничных условий.

Для пространственной области ниже профиля – внутри косинусоиды и между ее «пиками» – аналогично прослеживаются интересные свойства. Во-первых, в области пространства $y<0$ y -компонента суммарного магнитного поля является функцией косинуса, определяющейся формой профиля (2). Видно, что искажений не наблюдается. x -компонента, в свою очередь, является перевернутой относительно оси абсцисс синусоидой, что можно объяснить с точки зрения симметрии: осуществлен переход из верхнего полупространства в нижнее. Во-вторых, в области пространства $y>0$ графики даже отдаленно не напоминают гармонические функции. Однако такое поведение компонент H_x и H_y магнитного поля обусловлено периодическими переходами из внутренних областей профиля, где имеется заполнение магнитным веществом, во внешние. Причем провалы и пики на графиках согласуются с функциональной зависимостью (2), задающей профиль.

Работа поддержана Фондом развития теоретической физики и математики «БАЗИС».

Список литературы

1. Jia S., Peng J., Bian J. et al. Design and Fabrication of a MEMS Electromagnetic Swing-Type Actuator for Optical Switch // Micromachines. 2021. Vol. 12. No. 2. Art. No. 12020221.
2. Turutin A.V., Skryleva E.A., Kubasov I.V. et al. Magnetoelectric MEMS Magnetic Field Sensor Based on a Laminated Heterostructure of Bidomain Lithium Niobate and Metglas // Materials. 2023. Vol. 16. No. 2. Art. No. 16020484.
3. Yu S., Wen Y., Li P. High-Performance Two-Dimensional MEMS Micro-Magnetic Sensor With Magnetic Circuit Differential // IEEE Electron Device Lett. 2023. Vol. 44. No. 3. P. 512–515.
4. Shalygina E., Rozhnovskaya A., Shalygin A. The Influence of Quantum Size Effects on Magnetic Properties of Thin-Film Systems // Solid State Phenom. 2012. Vol. 190. P. 514.
5. Mohanraj D., et al. A Review of BLDC Motor: State of Art, Advanced Control Techniques, and Applications // IEEE Access. 2022. Vol. 10. P. 54833–54869.
6. Mahmud M., et al. Control BLDC Motor Speed using PID Controller// IJACSA. 2020. Vol. 11. No. 3. P. 477–481.
7. Blachowicz T. et al. Magnetic Micro and Nano Sensors for Continuous Health Monitoring // Micro. 2024. Vol. 4. No. 2. P. 206–228.
8. Murzin D. et al. Ultrasensitive Magnetic Field Sensors for Biomedical Applications // Sensors. 2020. Vol. 20. No. 6. P. Art. No. 1569.
9. Пятаков М.А., Акимов М.Л., Поляков П.А. Магнитное взаимодействие пленок с гармоническим профилем поверхности // Изв. РАН. Сер. физ. 2024. Т. 88. № 11 (в печати).
10. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М.: Физматлит, 2016. 656 с.

MAGNETIC FIELD OF THE UNIFORMLY MAGNETISED MICROSTRIP WITH SINUSOIDAL RELIEF

Piatakov M.A., Akimov M.L., Polyakov P.A.
Federal State Budget Educational Institution of Higher Education M.V.Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
E-mail: f33261033444444@yandex.ru

The magnetic field of a micromagnetic strip with a spatial surface relief, i.e., in the case of a magnetic film material with finite width and infinitely long length, is numerically calculated. The results of numerical integration are analysed and plots for the magnetic field components are constructed. A comparative analysis with the results for the components of the magnetic field generated by a micromagnetic film of infinitely large dimensions along two axes is also performed.

Key words: magnetostatics, micromagnetic strips, magnetic field, permanent film magnets.

СЕКЦИЯ 4: ФИЗИКА И ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ

Сопредседатели: ***д.т.н., проф. С.В. Серебрянников*** *(НИУ «МЭИ»),*
к.т.н., доц. Т.Г. Безъязыкова *(СПбГУТ)*

УДК 537.62, 621.31

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА НАПОЛНЕННЫХ ФЕРРИТОМ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ СМОЛЫ СЭДМ-2

А.В. Долгов, Г.Г. Мхитарян, А.В. Рамазанова,
С.В. Серебрянников, С.С. Серебрянников
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Российская Федерация
E - mail: SerebriannikSV@mpei.ru

Исследована возможность получения композиционного материала с наполнителем в виде порошка марганец-цинкового феррита в смеси с эпоксидно-кремнийорганической смолой СЭДМ-2. Смола вулканизируется при комнатной температуре с помощью отвердителя на основе растительных масел и полиэтиленполиаминов. Получены адгезионные характеристики, а также поглощающая способность композиций с различным содержанием наполнителя в полимерной матрице, нанесенных на металлическую пластину из авиационного сплава. Результаты сравниваются с поглощением смолы без наполнителя.

Ключевые слова: наполнитель, феррит, эпоксидно-кремнийорганическая смола, отверждение, адгезия, поглощение электромагнитного излучения.

Введение

Сфера создания радиопоглощающих композиций и покрытий остается важной областью физического материаловедения, поскольку средства защиты от электромагнитных излучений постоянно должны совершенствоваться. Путем внедрения в полимерную матрицу ферритов различного состава удается решать поставленную задачу в разных диапазонах электромагнитных излучений. Ферриты обладают широким спектром поглощения на достаточно высоком уровне в сравнении с многими другими материалами.

Так как существует большое количество различных по составу и свойствам ферритов, а также полимерных связующих, которые могут использоваться в качестве полимерной основы композиций, возникают вопросы подбора компонентов таким образом, чтобы полученный композиционный материал обладал необходимыми технологическими и эксплуатационными характеристиками. В том числе, что касается покрытий, то они должны иметь достаточную адгезию к материалам, на который будут наноситься. При этом покрытие должно наноситься легко и застывать без дополнительных на него воздействий.

Ранее [1] предпринималась попытка использовать распространенные эпоксидные и полиэфирные композиции смол, выпускаемые в большом количестве отечественными предприятиями. Но процесс отверждения их включал в себя термическую обработку, что существенно усложняло технологию получения покрытий и приводило к частому браку. В связи с этим в работе исследовалась возможность использования эпоксидно-кремнийорганической смолы СЭДМ-2, которая достаточно быстро отверждается при комнатной температуре, образуя гладкую поверхность необходимой толщины.

Время отверждения композиций

Соотношение компонентов композиций смола: феррит в процессе исследований изменялось. Получены данные как по чистой смоле без наполнителя, так и с добавками порошка феррита от 10 до 50 м.ч на 100 м.ч. матрицы. Соотношение смолы и отвердителя во всех случаях составляло 2:1.

Для проверки окончания отверждения композиций проводилось измерение твердости с помощью твердомера по шкале Шор тип D. Использовался ручной цифровой твердомер, соответствующий стандартам ГОСТ 24621-2015 и ASTM D2240. Результаты измерений и их статистическая обработка показали, что для полного застывания композиций при комнатной температуре достаточно не более 24 часов. Твёрдость по Шор D уже после 23 часов выдержки составляла для разных образцов от 44 до 55 единиц и не изменялась в последующие 2 часа.

Адгезия композиционных покрытий

Исследовалась адгезионная прочность композиций к металлической пластине из авиационного сплава. Пластина подвергалась шлифовке и обезжириванию ацетоном. Толщина покрытий измерялась микрометром и составляла от 0,6 до 1,0 мм.

Измерения усилий отрыва проводилось с помощью портативного механического адгезиометра, соответствующего ГОСТ 32299-2013, ASTM D 4541, ASTM D7234 и ISO 4624. Для определения площади отрыва использован метод клеток. Наибольшая адгезионная прочность получена на составах смола: отвердитель 2:1 и 3:1. Величина прочности составляла 4,32 и 2,99 Мпа, соответственно. Отрыв, как правило имел адгезионную и когезионную составляющие. При этом минимальным был отрыв по клею.

Серия испытаний каждого из композиционных покрытий составляла не менее 5. Однородность результатов проверялась по критерию Фишера. Различия обнаружены только в случаях сравнения образцов с 20 и 50 м.ч. феррита и изготовленного «насыпным» методом (50 м.ч.). В силу жарких погодных условий, наблюдавшихся в период исследований, рядом измерений оценено влияние нагрева на хранившиеся образцы. Получены результаты ниже, чем при нормальных условиях.

В Табл.1. представлены средние значения прочности отрыва для исследованных образцов.

Таблица 1 – Прочность отрыва исследованных покрытий

Количество феррита на 100 м.ч. матрицы, м.ч.	10	20	30	40	50	насып-ной	0
Средняя прочность отрыва, МПа	2,46	2,07	2,17	2,45	2,83	2,73	3,23

Установлено, что чистая смола (без порошка наполнителя) имеет более высокую адгезионную прочность. Это обусловлено тем. Что адгезионные свойства эпоксидно-кремнийорганической смолы зависят от количества эпоксидных групп, взаимодействующих с субстратом. При введении в смолу наполнителя часть эпоксидных групп связывается молекулярными силами уже с частицами наполнителя и не может участвовать в образовании адгезионных связей с субстратом, снижая таким образом, прочность отрыва покрытия [2].

При проведении дальнейших экспериментов необходимо установить влияние на показатели чистой смолы клеевого шва из материала, комплектующего адгезиометр, т.к. он имеет эпоксидную основу и может иметь соразмерную адгезию к алюминиевым упорам прибора.

Минимум средней прочности отрыва получен при наполнении смолы 20 м.ч. феррита. Предполагается, что это связано с противоположно влияющими на адгезию процессами. С одной стороны, частицы феррита адсорбируют на себя реакционноспособные группы смолы, что влияет на процессы отверждения всего состава. С другой стороны, увеличение концентрации феррита затрудняет процесс распространения дефектов (трещин) при разрушении покрытия и повышает, таким образом, прочность соединения.

Исследование поглощения электромагнитного излучения

Для исследования покрытий с различным содержанием феррита на различные участки одной и той же пластины нанесены пробы с различной концентрацией порошка в виде полос толщиной ~ 0,8 мм, отстоящих друг от друга на некоторое расстояние. Кроме того, была подготовлена чистая пластина и образец состава без феррита.

Использован высокочастотный анализатор цепей с диапазоном частот от 1 ГГц до 12 ГГц.

Результаты показали, что все покрытия имеют один ярко выраженный пик поглощения в рассмотренном диапазоне частот. Пластина без покрытия такого пика не имеет и поглощение у нее составляет около 0 дБ. С увеличением содержания феррита этот пик смещается в область более высоких частот от 10,5 ГГц до 11,8 ГГц. Поглощение пластин с покрытием возрастает с ростом количества наполнителя (от -6,8 дБ с чистой смолой до -11,9 дБ при 50 м.ч. феррита). Это объясняется тем. Что на более высоких частотах проявляются потери, которые обусловлены естественным ферромагнитным резонансом. Введение добавок феррита в композицию показывает не сильное, порядка 2 дБ снижение отражения во всем спектре частот от 1 МГц до 12 ГГц, что в свою очередь объясняется эффектом интерференции волны. Из-за достаточно

большой толщины нанесенного на металлическую подложку покрытия происходит отражение на двух границах покрытия «феррит-металл» и «феррит-воздух», что ведет к потере полуволны.

Заключение

Получены и исследованы образцы покрытий на основе смолы СЭДМ-2 и марганец-цинкового феррита. Показано преимущество композиций с точки зрения технологии изготовления при нормальных атмосферных условиях. Выявлены закономерности влияния содержания порошкового ферритового наполнителя на адгезионные свойства покрытий. Исследовано поглощение электромагнитного излучения композициями в диапазоне 1 – 12 ГГц.

Список литературы

1. Шаров М.А., Серебрянников С.В., Серебрянников С.С., Долгов А.В. Исследование адгезии композиционных материалов на основе полимеризующихся составов с ферритовым наполнителем. Труды XIX международной конференции «Электромеханика,Электротехнологии,Электротехнические материалы и компоненты». – М.: Знак,2022, с. 276 - 282
2. Липатов Ю.С. Физико-химические основы наполнения полимеров. М.: Химия, 1991. – 260 с.

PERFORMANCE PROPERTIES OF FERRITE-FILLED COMPOSITIONS BASED ON SEDM-2 RESIN

A.V. Dolgov, G.G. Mkhitaryan, A.V. Ramazanova,
S.V. Serebryannikov, S.S. Serebryannikov
National Research University «MPEI», Moscow, Russian Federation
E–mail: SerebriannikSV@mpei.ru

The possibility of obtaining a composite material with a filler in the form of manganese-zinc ferrite powder in a mixture with epoxy-organosilicon resin SEDM-2 is investigated. The resin is vulcanized at room temperature using a hardener based on vegetable oils and polyethylenepolyamines. The adhesive characteristics as well as the absorption capacity of compositions with different filler content in a polymer matrix deposited on an aircraft alloy metal plate are obtained, the results are compared with the absorption of resin without filler.
Keywords: filler, ferrite, epoxy-organosilicon resin, curing, adhesion, absorption of electromagnetic radiation.

СЕКЦИЯ 5: ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ И МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ И РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ И АГРЕГАЦИЙ

Председатель: ***к.т.н., проф. Ф.Н. Шакирзянов*** *(НИУ «МЭИ»)*

УДК 621.36

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГРАДИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИИ И РАСПОЛОЖЕНИЯ ИНДУКЦИОННО-РЕЗИСТИВНОГО ПРОВОДНИКА НА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ СКИН-СИСТЕМЫ

М.А. Федин, А.Р. Лепешкин, М.А. Булатенко,
К.В. Северин, А.И. Василенко, М.С. Осипова
ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ», Москва, Россия
E-mail: *FedinMA@mpei.ru*

В представленной работе авторами была разработана численная математическая модель электрического поля скин-системы. С использованием математической модели произведено исследование влияния расположения индукционно-резистивного проводника с однослойной изоляцией на распределение напряженности электрического поля внутри скин-системы нагрева. Также исследовано влияние градирования электроизоляции индукционно-резистивного проводника на характер распределения напряженности электрического поля. Получены соответствующие графики распределения напряженности электрического поля внутри скин-системы нагрева.

Ключевые слова: скин-система, индукционно-резистивная система нагрева, напряженность электрического поля, градированная изоляция, электрическое поле, частичные разряды.

Введение

Применение скин-систем нагрева (индукционно-резистивных систем) представляет собой перспективное направление в области обогрева промышленных трубопроводов [1]. При работе скин-системы изоляция индукционно-резистивного проводника (ИРП) подвергается воздействию электрического напряжения частотой 50 Гц, приложенному между многопроволочной жилой ИРП и внешней трубой из ферромагнитной стали – индукционно-резистивным нагревателем (ИРН), а изоляция муфт индукционно-резистивных соединителей напряжению между металлическими проводниками в муфте и стальной индукционно-резистивной соединительной коробкой. Ключевой характеристикой, определяющей надёжность скин-системы, является электрическая прочность кабеля, который используется в качестве ИРП. В скин-системе кабель подвергается значительным электрическим и тепловым нагрузкам, что требует использования материалов с высокой электрической прочностью и устойчивостью к термическим воздействиям [2].

Пробой изоляции, частичные разряды (ЧР) и коронный разряд — взаимосвязанные явления в электрических системах, влияющие на надежность ИРП. Частичные разряды представляют собой локализованные электрические

разряды в изоляции, возникающие из-за дефектов или влаги. Они ослабляют изоляцию и могут привести к пробою. Пробой может быть вызван длительным воздействием ЧР и иметь серьезные последствия. Коронный разряд не всегда приводит к пробою, но может сигнализировать о высоких напряжениях, способствующих ионизационным процессам, и указывать на потенциальные проблемы в системе [3].

Таким образом, все эти три явления связаны, могут негативно сказаться на долговечности и работоспособности скин-системы, накладывают ограничения на величину напряжения, которое может быть приложено к ИРП и ИРН. При этом необходимо помнить, что ситуацию с электрической прочностью кабеля усугубляет то, что положение ИРП в ИРН может быть различным. В реальных условиях кабель чаще всего не находится в центре, он может касаться ИРН. Это приводит к тому, что распределение напряженности электрического поля E становится более неоднородным, и значение этой величины в области вблизи точки касания становится существенно большим. В связи со сказанным, такие задачи, как исследование влияния расположения ИРП с однослойной изоляцией, а также исследование влияния градирования изоляции (ГИ) ИРП, как одного из действенных способов повышения питающего напряжения скин-системы, на неоднородность распределения напряженности электрического поля внутри скин-системы, являются весьма актуальными.

1. Исследование влияния расположения ИРП с однослойной изоляцией на электрическое поле скин-системы

Решение задачи расчёта скин-системы с однослойной изоляцией осуществляется с использованием метода конечных элементов в среде *ELCUT*. В расчетах принимаются следующие допущения: решаемая задача линейная и плоскопараллельная; зависимостями относительных диэлектрических проницаемостей слоёв электроизоляции от температуры, частоты и влажности пренебрегается; форма токов и напряжений синусоидальная.

Электрическое поле в скин-системе с ГИ описывается уравнением Пуассона:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\varepsilon_x \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\varepsilon_y \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial y}\right) = -\frac{\rho}{\varepsilon_0}, \quad (1)$$

где φ – скалярный электрический потенциал, ρ – объемная плотность распределенного заряда, ε – относительная диэлектрическая проницаемость, ε_0 – электрическая постоянная.

Уравнение Пуассона в данной формулировке позволяет учесть анизотропию свойств в диэлектрических материалах, ε_x, ε_y, ρ – постоянные величины в пределах блоков модели. Моделирование проводится при следующих исходных данных: частота переменного напряжения 50 Гц, напряжение (U) 10 кВ, материал жилы ИРП – медь, расчетное значение сечения жилы – 24 мм^2, материал изоляции – сшитый полиэтилен (γ=0 См/м, ε=2,3, обеспечивает снижение E вблизи проводника), толщина изоляции – 2 мм,

материал ИРН – конструкционная ферромагнитная сталь, наружный диаметр трубы – 32 мм, толщина стенки трубы – 3 мм. Для поставленной задачи используются граничные условия Дирихле, которые задают наперёд известные значения электрического потенциала φ на рёбрах или в вершинах модели: $\varphi=U$ на поверхности ИРП и $\varphi=0$ на поверхности ИРН.

Авторами статьи было исследовано три возможных случая расположения проводника во внутреннем пространстве стальной трубы: центрированный ИРП (рис. 1*а*), ИРП находится посередине между геометрическим центром поперечного сечения трубы и ее внутренней поверхностью (рис. 1*б*), ИРП лежит на стенке ИРН, а изоляция соприкасается или почти соприкасается с трубой (рис. 1*в*). Следует отметить, что в однородном поле при нормальном давлении и влажности воздуха напряженность поля, при котором возникает его пробой, составляет приблизительно $3 \cdot 10^6$ В/м. В свою очередь для ЧР и короны этот показатель равен $3 \cdot 10^5$ В/м. Как можно увидеть из представленных ниже картин поля и распределений напряженности электрического поля, только в случае расположения ИРП в центре трубы при напряжении питания 10 кВ вероятность возникновения коронного разряда минимальна, в случае рис. 1*б* весьма вероятен пробой изоляции, а в случае рис. 1*в* пробой изоляции ИРП гарантирован с последующим выходом скин-системы из строя, поскольку значение E вблизи точки касания ИРП с ИРН достигает $1{,}08 \cdot 10^7$ В/м.

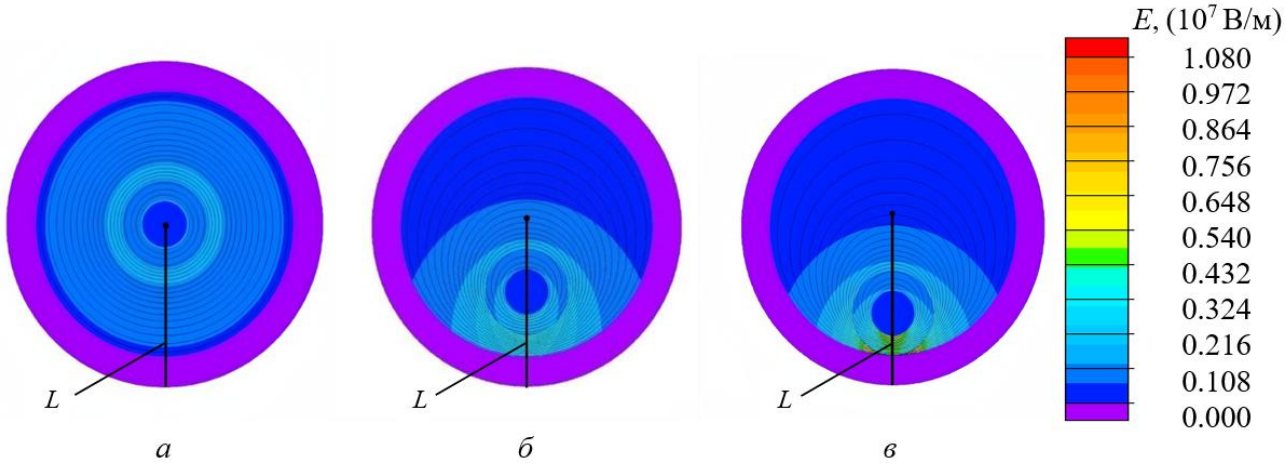


Рисунок 1 – Картина распределения напряженности электрического поля в скин-системе для трех положений ИРП: *а* – ИРП расположен в центре трубы; *б* – ИРП на расстоянии 6,5 мм от центра трубы; *в* – ИРП лежит на внутренней стенке трубы, соприкасаясь с ней

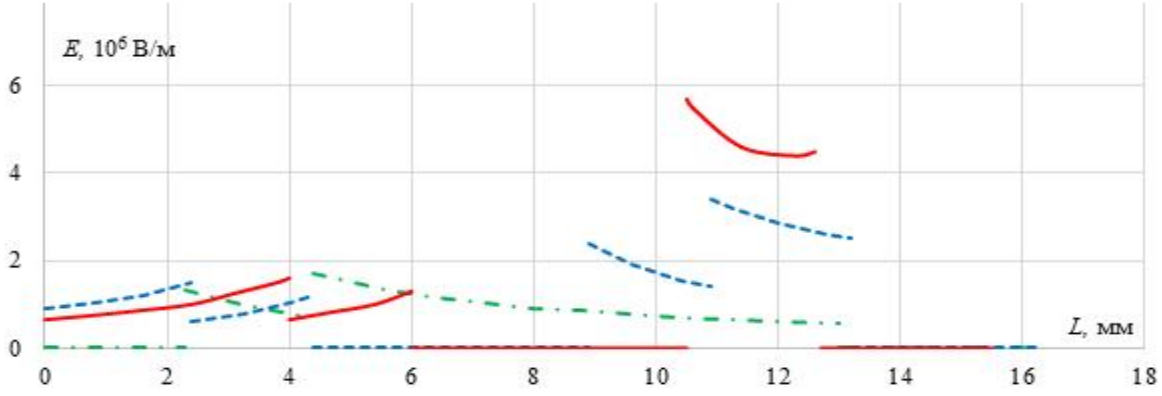


Рисунок 2 – Распределение напряженности электрического поля в скин-системе по направлению *L* для случаев: *а* – ИРП в центре (штрихпунктирная линия); *б* – ИРП на расстоянии 6,5 мм от центра (штриховая линия); *в* – ИРП лежит на трубе (сплошная линия)

2. Исследование влияния градирования электроизоляции ИРП на электрическое поле скин-системы

В высоковольтных кабелях одним из способов воздействия на распределение напряженности электрического поля является градирование изоляции (ГИ) – применение многослойной изоляции с электрическими характеристиками, заданным образом изменяющимися от слоя к слою [4]. Каждый слой изоляции снижает *E* до безопасных значений на границе следующего слоя. Диэлектрические материалы с пространственно-неоднородным распределением диэлектрических свойств могут улучшить электрическую прочность изоляции и повысить надежность ИРП [5].

Рассмотрим эскиз скин-системы с ГИ (рис. 3), основными элементами которой являются ИРП и ИРН. В представленном устройстве применяется ИРП с ГИ – кабель специальной конструкции с изоляцией, состоящей из следующих слоев: слой изоляции из облученного полиэтилена и пористого полиэтилена. Указанные слои позволяют эффективно реализовать принцип градирования изоляции и создать пространственно-неоднородное распределение диэлектрической проницаемости.

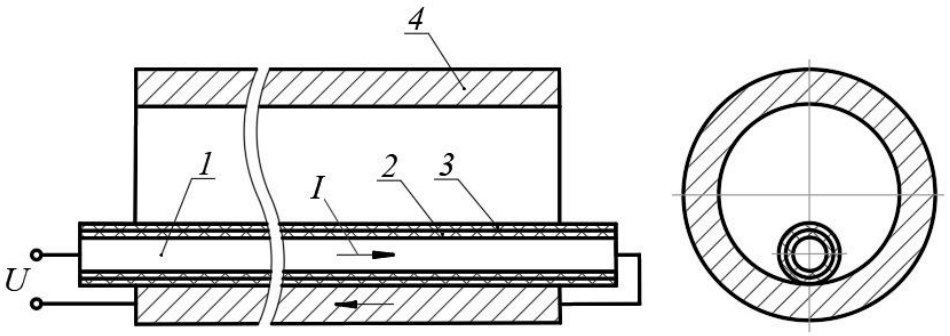


Рисунок 3 – Эскиз градированной скин-системы:
1 – ИРП, *2* – облученный полиэтилен, *3* – пористый полиэтилен, *4* – ИРН

На рис. 4 представлен чертеж скин-системы с ГИ с размерами, задающими толщины слоёв изоляции. При моделировании используется математическое описание, приведенное в предыдущем пункте. Граничные условия и исходные данные аналогичны, за исключением: материала первого слоя изоляции – облученный полиэтилен (γ=0 См/м, ε=2,3, обеспечивает снижение напряженности электрического поля вблизи проводника); материала второго слоя изоляции – пористый полиэтилен (γ=0 См/м, ε=1,5,

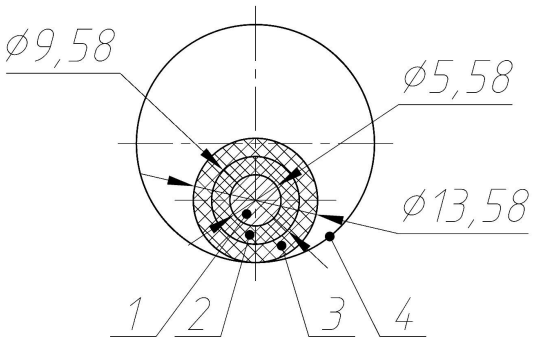


Рисунок 4 – Геометрическая модель скин-системы с ГИ:
1 – ИРП, *2* – облученный полиэтилен, *3* – пористый полиэтилен, *4* – внутренняя поверхность ИРН

способствует выравниванию напряженности электрического поля по толщине изоляции); толщина каждого из слоев – 2 мм.

Результатом расчета является картина E в электроизоляционных слоях ИРП, а также между ИРП и ИРН (рис. 5), позволяющая определить оптимальные толщины изоляции с целью увеличения питающих напряжений, при которых происходит возникновение короны, ЧР и пробой слоёв изоляции.

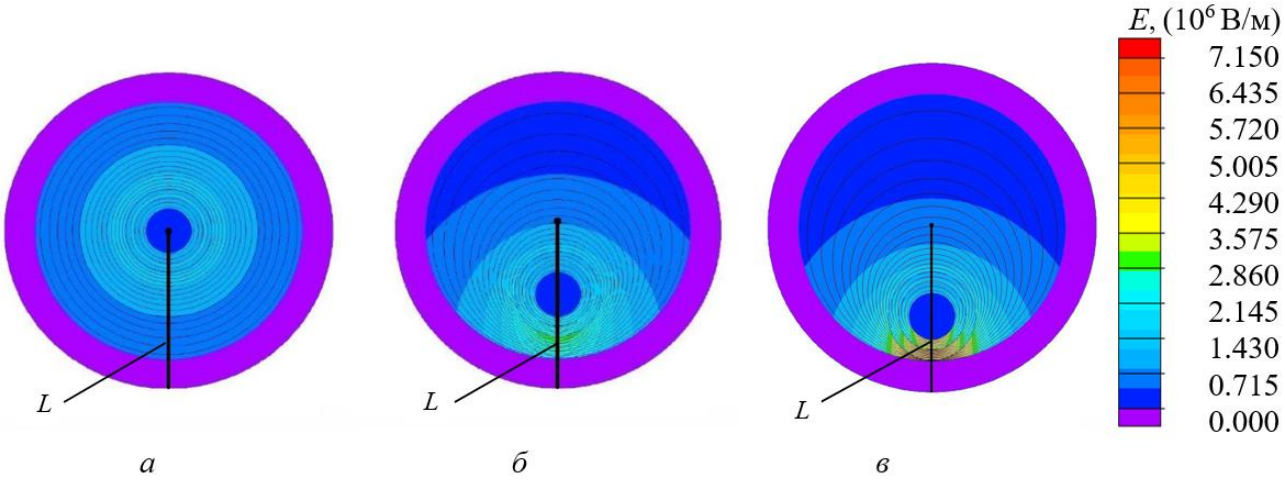


Рисунок 5 – Картина распределения напряженности электрического поля в скин-системе для трех положений: *а* – ИРП с ГИ расположен в центре трубы; *б* – ИРП с ГИ расположен на расстоянии 6,5 мм от центра трубы; *в* – ИРП с ГИ лежит на внутренней стенке трубы, соприкасаясь с ней

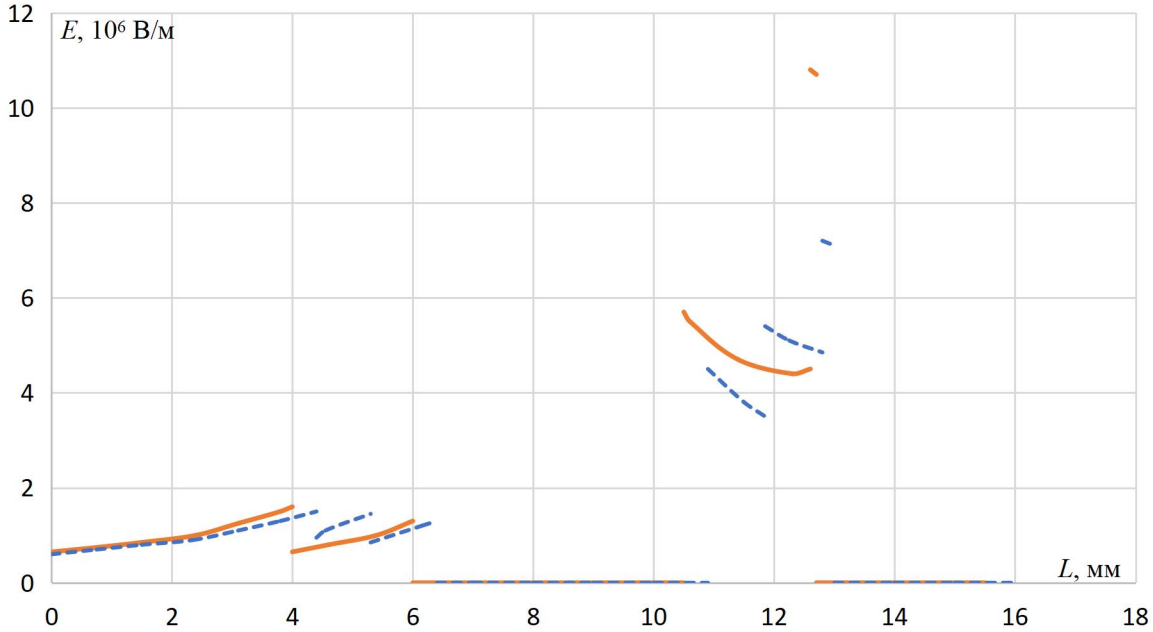


Рисунок 6 – Распределение напряженности электрического поля в скин-системе по направлению L для случая, когда ИРП лежит на трубе: ИРП с однослойной изоляцией (сплошная линия); ИРП с ГИ (штриховая линия)

Сравним максимальные значения E для ИРП с ГИ и без нее для рассмотренного на рис. 6 случая. Максимальные значения E в воздушном промежутке между ИРН и ИРП с ГИ и без него составляют $7{,}15 \cdot 10^6$ В/м и $1{,}08 \cdot 10^7$ В/м соответственно. При этом максимальная напряженность поля в

слоях электроизоляции ИРП с ГИ составляет $5{,}5 \cdot 10^6$ В/м, а в ИРП без ГИ – $5{,}1 \cdot 10^6$ В/м.

Из полученных результатов можно сказать, что, хотя использование ГИ с принятыми толщинами и свойствами слоев позволяет существенно увеличить питающее напряжение, при котором происходит возникновение ЧР и коронного разряда, а также пробой слоёв изоляции, по сравнению со скин-системой без ГИ, при напряжении питания 10 кВ даже ГИ не позволяет использовать кабель такой конструкции в качестве ИРП.

Заключение

Разработаны математические модели электрического поля промышленной частоты в скин-системах, позволяющие получать картины распределения E в зависимости от расположения ИРП с однослойной изоляцией, а также при градировании электроизоляции ИРП.

Результаты расчетов показали, что применение ГИ хотя и позволяет достичь более равномерного распределения E, что, в свою очередь, повышает надёжность и долговечность системы, но не позволяет использовать предложенный кабель в качестве ИРП при напряжении питания 10 кВ. При этом максимальные значения E в воздушном промежутке между ИРН и ИРП с ГИ и без него составляют $7{,}15 \cdot 10^6$ В/м и $1{,}08 \cdot 10^7$ В/м соответственно.

Таким образом, применение в качестве ИРП кабеля с ГИ весьма перспективно для увеличения напряжения начала возникновения ЧР, коронного разряда и пробоя изоляции и, как следствие, расширения возможностей, ведущих к увеличению длины плеча обогрева промышленных трубопроводов, а также повышения надёжности всей системы. Дальнейшие исследования с использованием разработанной математической модели будут способствовать разработке оптимальной конструкции скин-системы для улучшения этих параметров.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00727, https://rscf.ru/project/24-29-00727/

Список литературы

1. Проектирование и эксплуатация систем электрического обогрева в нефтегазовой отрасли / М.Л. Струпинский, Н.Н. Хренков, А.Б. Кувалдин. – 2-е изд. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. – 524 с.

2. Разработка математической модели электромагнитного поля и схемы замещения индукционно-резистивной системы нагрева для промышленных трубопроводов / М.А. Федин, Е.В. Качалина, А.В. Молостова, С.А. Федина, А.И. Василенко, М.Л. Зотов, Ю.А. Демидов// Промышленная энергетика. 2023. № 12. С. 2 – 9.

3. Бирюлин В.И., Куделина Д.В. Моделирование процессов в экранах однофазных силовых кабелей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. №8. С. 568 – 572.

4. Сергеев А.Е., Салихов Р.М. Исследование градирования изоляции высоковольтного силового кабеля с использованием ПО ELCUT // Вести научных достижений. Естественные и технические науки. 2020. №2. С. 78-82. DOI: 10.36616/2687-1335-2020-2-78-82

5. Zhang, Guan-Jun & Li, Wendong & Liu, Z. & Su, Guo-Qiang & Song, Bai-Peng & Xie, R. & Deng, Jun. (2017). Research Progress on Dielectric Func-tionally Graded Materials for Electrical Insulation. Zhongguo Dianji Gong-cheng Xuebao/Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering. 37. 4232-4245. 10.13334/j.0258-8013.pcsee.170086.

УДК 537.62, 621.31

ИССЛЕДОВАНИЕ И СНИЖЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК И ВИХРЕВЫХ ТОКОВ В НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМАХ НА ГИСТЕРЕЗИСНОЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ

С.Ю. Останин[1], Н. Абдугалиев[1], А.С. Лискин[1], И.А. Фёдоров[1], Цуй Шумэй[2], Чжу Чунбо[2]
[1]ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», Москва, Россия
[2]ХПУ, Харбин, Китай
E-mail: OstaninSY@mpei.ru

В статье разрабатываются вопросы физических процессов в гистерезисных электромеханических преобразователях энергии в несимметричных режимах, снижения влияния на показатели преобразователей высших гармоник и вихревых токов. Проводятся исследования использования потоковыравнивающей втулки, размещаемой на статоре, расположения потоковыравнивающего элемента в составе ротора. Проводятся исследования вопросов использования монолитных роторов и формирования в монолитном роторе слоёв с разными магнитными и гистерезисными свойствами.
Ключевые слова: гистерезисные электромеханические преобразователи энергии, несимметричные режимы, монолитный ротор, исследование.

Введение

Задача исследования и моделирования высших гармоник магнитного поля, вызванных наличием зубцов у магнитопроводов, дискретным размещением обмоток в конечном количестве пазов, нелинейными эффектами магнитного насыщения, гистерезиса и вихревых токов актуальна для всех типов электромеханических преобразователей энергии. Особенно это важно для преобразователей, работающих в несимметричных режимах, в первую очередь, для гистерезисных электромеханических преобразователей энергии, обладающих принципиально нелинейной, в силу существенного магнитного гистерезиса активного материала ротора, магнитной системой.

Гистерезисные электромеханические преобразователи энергии в режиме гистерезисного электродвигателя [1-4] эффективны для разноплановых областей техники и отраслей промышленности. В том числе для электроприводов систем управления и автоматики, сканирующих устройств, систем факсимильной связи, турбомолекулярных насосов, мотор-подшипников, многодвигательных электроприводов технологических и производственных машин и агрегатов и других наукоёмких комплексов [4-6].

Задача работы состояла в совершенствовании гистерезисных электродвигателей, реализующих электромеханическое преобразование энергии в несимметричных режимах, на основе исследования физических процессов в них. Исследования велись в следующих направлениях:

1) Анализ и минимизация влияния высших гармоник магнитного поля при использовании потоковыравнивающей втулки, размещаемой на статоре.

2) Исследование и минимизация влияния высших гармоник магнитного поля при расположении потоковыравнивающего элемента в составе ротора.

3) Анализ вопросов создания монолитных роторов в виде одной детали.

4) Исследование вопросов формирования в монолитном роторе слоёв с различными магнитными и гистерезисными свойствами и характеристиками.

1. Исследование физических процессов в гистерезисных электродвигателях в несимметричных режимах, высших гармоник и вихревых токов в них

Высокие электромагнитные потери от высших гармоник и вихревых токов в роторах гистерезисных электродвигателей резко усложняют их работу на высоких и сверхвысоких частотах вращения $n \geq 100\ 000$ об/мин в несимметричных режимах. Важным средством для решения этой проблемы является использование потоковыравнивающих элементов, в частности, втулки, сущность физического эффекта от которых состоит в следующем. Магнитный поток рассеяния первой или высшей гармоники магнитодвижущей силы (МДС) обмотки статора, магнитно насыщает потоковыравнивающий элемент в продольном направлении, оставляя в нём ненасыщенными поперечные магнитные пути для высших пространственных гармоник магнитного поля.

Конструкционно такой потоковыравнивающий элемент может быть выполнен в виде сплошной цилиндрической втулки из магнитно-мягкого материала толщиной 0,1-0,5 мм, охватывающей зубцы магнитопровода статора и закрывающей его пазы. Конструкция и технология выполнения потоковыравнивающей втулки может быть существенно упрощена, если её выполнять из ленты с закреплением концов путём загиба и завальцовки в одном из пазов магнитопровода статора (рис. 1). Дополнительное достоинство потоковыравнивающей втулки из ленты состоит ещё и в том, что она обладает кольцевой – вдоль ленты – анизотропией свойств, повышающей магнитную проводимость пути для высших пространственных гармоник магнитного поля.

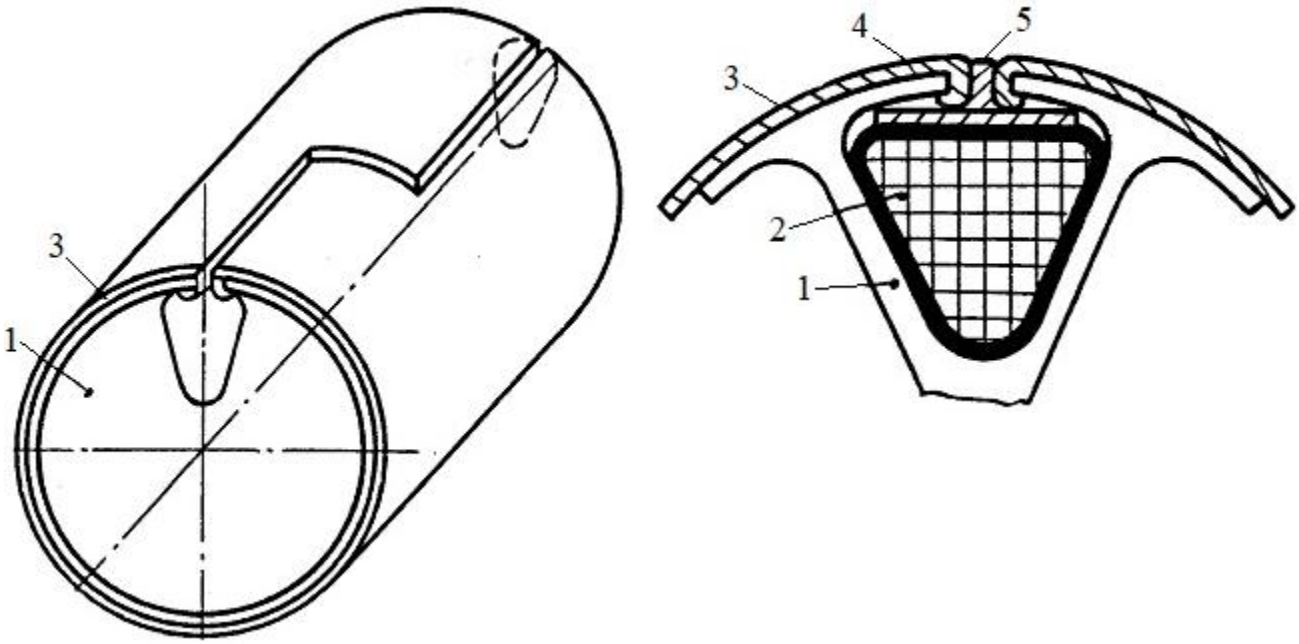


Рисунок 1 – Конструкционное выполнение потоковыравнивающего элемента

Вместе с тем, потоковыравнивающая втулка, размещённая на статоре электродвигателя, непрерывно перемагничивается с частотой тока в обмотке статора, что создаёт значительные магнитные потери, особенно при высокочастотном гистерезисном электромеханическом преобразовании энергии в несимметричных режимах. Поэтому целесообразнее размещать такую втулку на роторе, тогда потери во втулке будут существенны лишь в подсинхронном и синхронном режимах и только от высших пространственных гармоник магнитного поля. Потоковыравнивающая втулка на роторе может быть также выполнена с наличием у неё гистерезисных свойств, чем дополнительно увеличивается гистерезисный электромагнитный момент. При этом для сохранения эффекта потоковыравнивания втулка должна обладать магнитной проницаемостью в 2-5 раз выше, чем у основного гистерезисного слоя ротора.

Однако изготовление тонкостенной, 0,1-0,5 мм, потоковыравнивающей втулки и размещение её на роторе усложняют технологию изготовления и затрудняют обеспечение высокой стабильности центра масс ротора. В настоящее время активно ведётся моделирование и исследование магнитных материалов [4, 7-10]. Технология формирования магнитных свойств и способы специальной термической обработки роторов из сплавов «хром-кобальт», в частности, предложенные в [4], позволяют создавать монолитные роторы гистерезисных электродвигателей в виде одной детали, в которой как слои с различными магнитными свойствами формируются: гистерезисный слой, переходная втулка, вал и потоковыравнивающая втулка. Такие роторы обеспечивают максимально высокие стабильность центра масс и прочностные свойства, что особенно важно для высокоскоростных и сверхвысокоскоростных электродвигателей в несимметричных режимах. При создании такого ротора используются параметры гистерезисного цикла перемагничивания (табл. 1).

Таблица 1 – Параметры гистерезисного цикла перемагничивания материала, используемые в технологии создания монолитных роторов со слоями с разными магнитными свойствами

№	Наименование параметра гистерезисного цикла	Обозначение параметра	Единица измерения
1	Максимальная индукция магнитного поля	B_{m}	Тл
2	Максимальная напряжённость магнитного поля	H_{m}	А/см
3	Остаточная индукция	B_r	Тл
4	Коэрцитивная сила (магнитная жёсткость)	H_C	А/см
5	Коэффициент выпуклости	$k_{\text{В}}$	Отн. ед.

Коэффициент выпуклости показывает относительную площадь цикла гистерезиса по отношению к площади прямоугольника с основанием, равным $2 \cdot H_{\text{m}}$, и высотой, равной $2 \cdot B_{\text{m}}$, и определяется следующим соотношением

$$k_{\text{В}} = S_{\text{ЦГ}} / (4 \cdot B_{\text{m}} \cdot H_{\text{m}}), \quad (1)$$

где $S_{\text{ЦГ}}$ – площадь цикла гистерезиса.

Технология изготовления монолитного ротора гистерезисного электродвигателя в виде одной детали, с послойным формированием различных магнитных свойств, содержит основные этапы, приведённые в табл. 2.

Таблица 2 – Основные этапы изготовления монолитного ротора гистерезисного электродвигателя в виде одной детали, с послойным формированием магнитных свойств

№	Магнитные слои (элементы) ротора	Немагнитные слои ротора	Этапы обработки				
			Этап № 1	**Этап № 2**	**Этап № 3**	**Этап № 4**	**Этап № 5**
1	Основной (гистерезисный) слой потоковыравнивающий слой	Конструкционная переходная втулка, вал	Термомагнитная обработка всего ротора	Отпуск всего ротора в магнитном поле	Повторный отпуск слоя со стороны рабочего воздушного зазора	Кратковременный высокочастотный нагрев магнитных слоёв	Повторный отпуск в магнитном поле магнитных слоёв
2	Основной слой, потоковыравнивающий слой, конструкционная переходная втулка	Вал	Термомагнитная обработка всего ротора	Отпуск всего ротора в магнитном поле	Повторный отпуск слоя со стороны рабочего воздушного зазора и со стороны вала	Кратковременный высокочастотный нагрев магнитных слоёв	Повторный отпуск в магнитном поле магнитных слоёв
3	Основной слой, потоковыравнивающий слой, конструкционная переходная втулка, слой, соответствующий валу	–	Термомагнитная обработка всего ротора	Отпуск всего ротора в магнитном поле	Повторный отпуск всех слоёв, кроме основного слоя	Кратковременный высокочастотный нагрев магнитных слоёв	Повторный отпуск в магнитном поле магнитных слоёв

Технологическая обработка всего монолитного ротора обеспечивает достижение требуемых для основной части ротора магнитных свойств: максимальной индукции, максимальной напряжённости магнитного поля и коэффициента выпуклости рабочего гистерезисного цикла.

Кратковременный высокочастотный нагрев сплавов «хром-кобальт» до температуры выше температуры формирования основных магнитных свойств после получения этих свойств приводит к уменьшению максимальной напряжённости магнитного поля и соответственно коэрцитивной силы рабочего гистерезисного цикла. Это и позволяет, при кратковременном нагреве с помощью электрических токов высокой частоты поверхности ротора создавать в массиве ротора потоковыравнивающий слой, глубина и магнитная жёсткость (H_C) которого зависит от частоты тока индуктора технологической установки для термической и термомагнитной обработки и длительности прогрева.

Ещё больше улучшение показателей у гистерезисного электродвигателя, ротор которого обладает высоким коэффициентом выпуклости в основной части $k_{\text{В}} \approx 0{,}8\text{-}0{,}9$ и невысоким – $k_{\text{В}} \approx 0{,}4\text{-}0{,}5$ – в потоковыравнивающем слое. Такое соотношение значений коэффициента выпуклости позволяет за счёт его

высокого значения в основном объёме ротора повысить электромагнитный момент и коэффициент полезного действия (КПД), а благодаря его невысокому значению в потоковыравнивающем слое снизить добавочные магнитные потери и ещё больше увеличить максимальный синхронный момент электродвигателя при незначительном снижении пускового электромагнитного момента.

Исследования показали, что сравнительно простым, но эффективным является способ уменьшения влияния высших гармоник магнитного поля за счёт оптимизации параметров гистерезисного цикла материала ротора: остаточной индукции, коэрцитивной силы и коэффициента выпуклости. Уменьшая относительное значение остаточной индукции цикла гистерезиса

$$b_r = B_r / B_{\text{m}}, \qquad (2)$$

и увеличивая при этом относительное значение коэрцитивной силы этого цикла

$$h_C = H_C / H_{\text{m}}, \qquad (3)$$

можно добиться постоянства высокого значения коэффициента выпуклости, обеспечивающего высокий КПД гистерезисного электродвигателя, а невысокое значение $b_r = 0{,}70\text{-}0{,}75$ при этом приводит к малому снижению максимального синхронного момента. Оптимизация параметров гистерезисного цикла достигается теми же приёмами термической обработки, что и при формировании монолитных роторов гистерезисных электродвигателей в виде одной детали, содержащей слои с различными магнитными свойствами, рассмотренных выше. Наибольший эффект при этом достигается для роторов, работающих в магнитных полях с уровнями напряжённости до 500 А/см.

Рассмотренные научно-технические предложения обеспечивают резкое снижение влияния высших гармоник магнитного поля и вихревых токов в массивных роторах гистерезисных электродвигателей в несимметричных режимах, в частности, благодаря уменьшению магнитной проницаемости материала ротора на частных циклах перемагничивания и магнитных потерь.

Заключение

Исследования показали, что важным средством для решения проблемы больших электромагнитных потерь от высших гармоник и вихревых токов в массивных роторах гистерезисных электродвигателей, работающих при высоких и сверхвысоких частотах вращения в несимметричных режимах, является использование потоковыравнивающих элементов. Конструкцию и технологию выполнения потоковыравнивающей втулки можно существенно упростить с дополнительным получением кольцевой анизотропии, повышающей магнитную проводимость для высших пространственных гармоник магнитного поля, при выполнении втулки из ленты. Недостатки расположения втулки на статоре электродвигателя устраняются путём размещения её на роторе, что ещё и позволяет придать втулке гистерезисные свойства и этим больше увеличить гистерезисный электромагнитный момент.

Для обеспечения максимально высоких стабильности центра масс и прочностных свойств роторов высокоскоростных и сверхвысокоскоростных гистерезисных электродвигателей в несимметричных режимах работы эффективно выполнять ротор в виде одной детали из сплавов «хром-кобальт», в

которой формируются слои с различными магнитными свойствами, в том числе гистерезисный и потоковыравнивающий слои, с помощью термической и термомагнитной обработки. Наибольшее улучшение показателей электродвигателя обеспечивается при условии, что его ротор обладает высоким коэффициентом выпуклости для гистерезисного слоя и примерно в 2 раза меньшим коэффициентом выпуклости для потоковыравнивающего слоя. При этом снижаются добавочные магнитные потери, повышается электромагнитный момент, в том числе максимальный синхронный момент, и КПД.

Исследования также показали, что эффективным способом уменьшения влияния высших гармоник магнитного поля на показатели гистерезисных электродвигателей в несимметричных режимах является оптимизация параметров цикла гистерезиса у материала ротора приёмами термической и термомагнитной обработки. При снижении относительного значения остаточной индукции цикла гистерезиса и увеличении при этом относительного значения его коэрцитивной силы создаётся постоянно высокий коэффициент выпуклости цикла, что обеспечивает высокий КПД электродвигателя.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ) в рамках научного проекта № 24-29-00763.

Список литературы

1. Тарасов В. Н., Останин С. Ю. Разработка научных основ и технических решений для автоматизации и роботизации роторных и центрифужных технологий // Доклады IX Международной выставки-конгресса «Высокие технологии. Инновации. Инвестиции» (Санкт-Петербург, 2004 г.). С.-Пб. 2004. С. 127-131.
2. Стома С. А., Верещагин В. П., Вейнберг Д. М. Электромеханические исполнительные органы с магнитными опорами для управления ориентацией космических станций // Космический бюллетень. 1995. Т. 2. № 1. С. 5 – 7.
3. Руковицын И. Г., Сарычев А. П. Применение электромагнитных подшипников в газовой промышленности // Компрессорная техника и пневматика. 2008. № 1. С. 12-14.
4. Миляев И.М., Юсупов В.С., Останин С.Ю., Стельмашок С.И., Миляев А.И., Лайшева Н.В. Магнитные гистерезисные и механические свойства магнитотвёрдого сплава 27Х15К2МСТФ // Физика и химия обработки материалов, 2017, № 1, с. 69-76.
5. Jung H.J., Nakamura T, Tanaka N, Muta I, Hoshino T. Characteristic analysis of hysteresis-type BI-2223 bulk motor with the use of equivalent circuit // Physica C: Superconductivity and its Applications. 2004. V. 405. № 2. Pp. 117-126.
6. Dlala E., Belahcen A., Arkkio A. Efficient magnetodynamic lamination model for two-dimensional field simulation of rotating electrical machines // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2008. V. 320. № 20. Pp. 123-132.
7. Абрамовский И.Е., Власов В.С., Плешев Д.А. и др. Исследование нелинейных режимов прецессии намагниченности в двухслойной ферромагнитной структуре. // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 5. С. 721.
8. Алехина Ю.А., Перов Н.С. Моделирование процессов перемагничивания аморфных магнитных микропроводов. // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 2. С. 170.
9. Пашуева И.М., Бондарев А.В., Батаронов И.Л. Моделирование методом Монте-Карло релаксации намагниченности в аморфных сплавах Re–Tb И Re–Gd. // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 5. С. 682.
10. Иванов П.А., Бобровский С.Ю., Розанов К.Н., Петров Д.А. Применимость одномодового приближения при измерении магнитной проницаемости в полосковых линиях передачи. // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 5. С. 687.

INVESTIGATION AND REDUCTION OF THE INFLUENCE OF HIGHER HARMONICS AND EDDY CURRENTS IN NON SYMMETRIC MODES ON HYSTERETIC ELECTROMECHANICAL ENERGY CONVERSION

S.Y. Ostanin[1], N. Abdugaliyev[1], A.S. Liskin[1], I.A. Fyodorov[1],
Cui Shumei[2] Zhu Chunbo[2]
[1]National Research University «MPEI», Moscow, Russia
[2]Harbin Institute of Technology, Harbin, China
E-mail: OstaninSY@mpei.ru

The article deals with the issues of physical processes in hysteretic electromechanical energy converters in non symmetric modes, reduction the effect on the indicators of converters of higher harmonics and eddy currents. Studies are being conducted on the use of a flow-levelling sleeve placed on the stator, the location of the flow-levelling element in the rotor. Research is being conducted on the use of monolithic rotors and the formation of layers with different magnetic and hysteresis properties in a monolithic rotor.

Key words: hysteretic electromechanical energy converters, non symmetric modes, monolithic rotor, research.

УДК 537.62, 621.31

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ С НЕЛИНЕЙНЫМИ МАГНИТНЫМИ СИСТЕМАМИ

С.Ю. Останин[1], Н. Абдугалиев[1], М.Г. Коновалов[1], Ф.Д. Успенский[1], Цуй Шумэй[2], Чжу Чунбо[2]
[1]ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», Москва, Россия
[2]ХПУ, Харбин, Китай
E-mail: OstaninSY@mpei.ru

В статье разрабатываются вопросы расчёта тепловых режимов электромеханических преобразователей энергии с нелинейными магнитными системами в несимметричных режимах, реализующих роторные технологии. Разрабатываются вопросы подхода, формирования методологии и алгоритма для этих расчётов. Прорабатываются предложения по применению результатов для разработки гистерезисных электродвигателей и электроприводов для реализации новых роторных технологий в химической, текстильной, горной, сельскохозяйственной, пищевой и смежных с ними отраслях промышленности.
Ключевые слова: электромеханические преобразователи энергии, нелинейные магнитные системы, несимметричные режимы, тепловые режимы, расчёты.

Введение

Многие электромеханические преобразователи энергии, в том числе применяемые как электродвигатели в электроприводах, имеют нелинейные магнитные системы, то есть системы, где присутствуют нелинейные магнитные эффекты: насыщение, гистерезис, вихревые токи. Кроме того, большинство таких преобразователей работают в несимметричных режимах. Нелинейные магнитные эффекты и несимметричные режимы в полной мере присущи гистерезисным электромеханическим преобразователям энергии [1-3], которым в докладе уделено основное внимание. Электроприводы с электродвигателями с нелинейными магнитными системами, работающими в несимметричных режимах, широко используются для роторных технологий [2-4]. Основные классификационные группы роторных технологий приведены в табл. 1.

Цель работы, которая рассматривается в докладе – исследование тепловых режимов электромеханических преобразователей энергии с нелинейными магнитными системами, работающих в несимметричных режимах при реализации роторных технологий, с использованием возможно общего подхода к расчёту тепловых режимов таких преобразователей энергии.

Общность предлагаемого подхода к расчёту таких режимов в следующем:

1) Обеспечение расчётов электромеханических преобразователей энергии с моментами, отличающимися в десятки тысяч раз – от преобразователей для гиродвигателей до преобразователей для турбокомпрессоров.

2) Учёт всех видов теплообмена, которые в разной степени присутствуют во всех электромеханических преобразователях, реализующих роторные

технологии: теплопередачей (теплопроводностью), излучением (лучеиспусканием), свободной и принудительной конвекцией и их сочетанием.

Таблица 1 – Основные классификационные группы роторных технологий

№	Технологии	Область и примеры применения
1	Гироскопические технологии	Приборы и системы ориентации, стабилизации, навигации и управления движением автономных воздушных, космических водных, наземных автономных объектов, в том числе электрических транспортных средств; системы геодезии, геологии, гравиметрии, инклинометрии, маркшейдерии
2	Центрифужные технологии	Системы для разделения и очистки веществ, суспензий и для других целей в физических, химических, молекулярно-биологических, биохимических, биотехнологических, медицинских лабораториях; объекты медицинской техники и промышленности, учреждений здравоохранения
3	Мотор-подшипниковые технологии	Мотор-подшипники, сканирующие устройства, системы факсимильной связи, стабилизаторы, насосы, в том числе, турбомолекулярные насосы, распылители
4	Электрошпиндельные и электроверетённые технологии	Машины для производства искусственных и синтетических волокон и нитей из растворов и расплавов, крутильные, тростильные и другие химические и текстильные машины
5	Приёмно-намоточные технологии	Перемоточные, бобинажные, бобинажно-перемоточные машины химической и текстильной промышленности, продукция, выпускаемая ими, – все основные типы паковок текстильного материала и волокна
6	Маховичные технологии	Накопители механической энергии, системы стабилизации, изменения положения и направления движения космических летательных аппаратов в безвоздушном пространстве
7	Турбомашинные технологии	Компрессоры, турбокомпрессоры и турбодетандеры систем кондиционирования, криогенных и других систем технического сервиса и жизнеобеспечения

3) Охват широких классов магнитно-твёрдых и магнитно-мягких материалов, имеющих различные химический состав, свойства и размеры элементов из них, контактирующих между собой, часто с взаимным давлением.

4) Учёт импульсного изменения температурных состояний преобразователей энергии при импульсном увеличении в 3-4 раза токов в обмотках их статоров при импульсном управлении преобразователями энергии.

5) Анализ тепловых режимов преобразователей при расположении их активных элементов в средах, имеющих разное агрегатное состояние, в том числе, в гироскопах, заполненных газом или жидкостью, в турбонасосах, перекачивающих жидкости, в частности, в химически активных средах: расплавах, растворах химических материалов при реализации мотор-подшипниковых, электрошпиндельных и электроверетённых технологий.

1. Исследование тепловых режимов электромеханических преобразователей энергии с нелинейными магнитными системами

Базовые фундаментальные подходы к тепловым расчётам электромеханических преобразователей энергии сформированы в [3, 5, 6].

Общим и наиболее эффективным является метод расчёта на основе эквивалентных электротепловых схем замещения [7-9], базирующийся на подобии физических процессов теплопередачи между объектами и их элементами и протекания токов в электрической цепи. При использовании этого метода преобразователь в модели тепловых процессов представляется как взаимосвязанная совокупность однородных физических – тепловых подсистем.

В однородных физически подсистемах возможны элементы ёмкостного, индуктивного и резистивного видов ёмкостного, индуктивного и резистивного видов ёмкостного, индуктивного и резистивного видов ёмкостного, индуктивного и резистивного видов, им соответствуют простые модели:

$$u = R\ i\ ;\quad u = L\ \frac{\mathrm{d}\,i}{\mathrm{d}\,t}\ ;\quad i = C\ \frac{\mathrm{d}\,u}{\mathrm{d}\,t}\ . \tag{1}$$

Здесь i, u, R, L, C – параметры подсистемы элементов, t – время.

Для тепловой подсистемы (табл. 2) соответствующие модели имеют вид:

$$\Delta P = C\ \frac{\mathrm{d}\,T}{\mathrm{d}\,t}\ ;\quad T = R\ \Delta P\ . \tag{2}$$

Здесь ΔP – мощность потерь, Вт, ей численно равен тепловой поток; C – теплоёмкость, Дж / ° С; T – температура, ° С; R – тепловое сопротивление.

Таблица 2 – Соотношения аналогии фазовых переменных и параметров элементов электрической и тепловой подсистем

№	**Фазовые переменные и параметры элементов**	**Наименование**	
1	Подсистема	Электрическая	Тепловая
2	Фазовые переменные вида потенциала u	Электрическое напряжение	Температура
3	Фазовые переменные вида потока i	Электрический ток	Тепловой поток
4	Ёмкостной параметр подсистемы C	Электрическая ёмкость	Теплоёмкость
5	Индуктивный параметр подсистемы L	Электрическая индуктивность	—
6	Резистивный параметр подсистемы R	Электрическое сопротивление	Тепловое сопротивление

Предложенный алгоритм теплового расчёта электромеханического преобразователя энергии содержит следующие основные этапы:

1) Составление на базе конструкционной структуры преобразователя схемы замещения, содержащей источники тепла и тепловые сопротивления и охватывающей наиболее вероятные пути отвода тепла от нагретых частей преобразователя (табл. 3) с учётом необходимых теплоёмкостей (табл. 4).

2) Установление соответствия тепловым потокам численно равных им мощностей потерь в соответствующих узлах эквивалентной схемы замещения.

3) Расчёт тепловых сопротивлений элементов схемы замещения.

4) Определение методами расчёта электрических цепей температурного поля преобразователя и значений перегревов элементов его конструкции.

5) Подготовка мер для снижения температур и их перепадов между узлами: выявление участков схемы замещения, наиболее влияющих на распределение температур, и подбор распределения мощности потерь между узлами, наиболее благоприятного с позиций минимума градиентов температур.

6) Анализ результатов теплового расчёта преобразователя.

7) При необходимости, с целью получения оптимального распределения температур, коррекция геометрических размеров и параметров преобразователя, уточнение значений давления газовой или жидкостной среды.

С использованием этого подхода и предложенного алгоритма были выполнены расчёты тепловых процессов в гистерезисных электродвигателях для электроприводов машин по производству химических волокон и нитей.

Таблица 3 – Параметры наиболее вероятных путей отвода тепла от нагретых частей электромеханического преобразователя энергии

№	Путь отвода тепла	Вид теплообмена	Параметр	Единица измерения
1	Пазовая часть обмотки статора – магнитопровод статора	теплопередача	Тепловое сопротивление	°С / Вт
2	Пазовая часть обмотки статора – лобовая часть обмотки статора	теплопередача	Тепловое сопротивление	°С / Вт
3	Магнитопровод статора – внутренняя среда	принудительная конвекция за счёт вращения	Тепловое сопротивление	°С / Вт
4	Лобовая часть обмотки статора – внутренняя среда	теплопередача + свободная конвекция	Тепловое сопротивление	°С / Вт
5	Активная часть ротора – переходная втулка ротора с валом	теплопередача	Тепловое сопротивление	°С / Вт
6	Активная часть ротора – статор	свободная конвекция	Тепловое сопротивление	°С / Вт
7	Активная часть ротора – корпус	теплопередача	Тепловое сопротивление	°С / Вт
8	Активная часть ротора – внутренняя среда	принудительная конвекция за счет вращения	Тепловое сопротивление	°С / Вт
9	Корпус – внешняя среда	свободная конвекция	Тепловое сопротивление	°С / Вт
10	Внутренняя среда – корпус	свободная конвекция	Тепловое сопротивление	°С / Вт

Таблица 4 – Теплоёмкости, необходимые для исследования тепловых процессов и теплообмена в наиболее вероятных путях отвода тепла от нагретых частей преобразователя

№	Параметр	Единица измерения
1	Теплоёмкость лобовой части обмотки статора	Дж / °С
2	Теплоёмкость пазовой части обмотки статора	Дж / °С
3	Теплоёмкость активной части ротора	Дж / °С
4	Теплоёмкость магнитопровода статора	Дж / °С
5	Теплоёмкость корпуса	Дж / °С
6	Теплоёмкость переходной втулки ротора	Дж / °С

Для анализа точности расчётов были использованы результаты проведённых испытаний на нагрев при номинальных и предельных нагрузках указанных гистерезисных электродвигателей. В докладе приводятся результаты испытаний на нагрев электродвигателя, обладающего базовым электромагнитным моментом в составе спроектированного ряда гистерезисных электродвигателей. Результаты испытаний приведены в табл. 5.

Таблица 5 – Изменение параметров гистерезисного электромеханического преобразователя энергии в процессе работы в двигательном режиме при разных уровнях мощности потерь

№	Параметр	Единица измерения	Значения параметров			
1	Время работы	мин	0	20	40	60
2	Рассеиваемая мощность потерь	Вт	90	90	90	90
3	Сопротивление обмотки статора	Ом	0,800	0,830	0,860	0,867
4	Температура корпуса	°С	24	29	37	40
5	Рассеиваемая мощность потерь	Вт	150	150	150	150
6	Сопротивление обмотки статора	Ом	0,867	0,915	0,917	0,922
7	Температура корпуса	°С	40	48	52	60
8	Рассеиваемая мощность потерь	Вт	200	200	200	200
9	Сопротивление обмотки статора	Ом	0,922	0,950	0,970	1,000
10	Температура корпуса	°С	52	57	60	70

Испытания проводились при частоте тока электропитания 50 Гц и разных уровнях мощности потерь в электродвигателе. Анализ показал, что при номинальном моменте сопротивления нагрузки 3,0 Н · м потери составляют 90 Вт, а при максимальном моменте нагрузки 3,7 Н·м – не превышают 130 Вт.

Выбор параметров электропитания для рабочего режима давал возможность анализировать разные уровни мощности потерь, в частности, 90, 150 и 200 Вт. Измерялось электрическое сопротивление обмотки статора электродвигателя, изменяемое во времени, а с помощью термодатчика определялась температура корпуса электродвигателя. Нагрев обмотки статора анализировался по изменению электрического сопротивления его обмотки, а нагрев корпуса оценивался с помощью комбинированной термопары.

Температура обмотки статора определялась по соотношению [5]:

$$t_{\text{об.м}} = \frac{R_{\text{ф.г}}}{R_{\text{ф.х}}} \left(235 + t_{\text{опр}}\right) - 235 \ . \qquad (3)$$

Здесь $R_{\text{ф. г}}$, $R_{\text{ф. х}}$ – электрическое сопротивление фазы обмотки статора электродвигателя в нагретом и ненагретом состоянии; $t_{\text{опр}} = 24$ °С.

При рассеиваемой мощности потерь 90 Вт температура обмотки 55 °С; при рассеиваемой мощности потерь 150 Вт температура обмотки 64 °С; при рассеиваемой мощности потерь 200 Вт температура обмотки 90 °С.

Заключение

Предложенный подход и составленный алгоритм теплового расчёта электромеханических преобразователей энергии с нелинейными магнитными

системами для работы в несимметричных режимах обеспечивают расчёты с учётом всех видов теплообмена; охватом разных материалов; учётом режимов импульсного управления; анализом теплового состояния преобразователей при размещении их активных частей в средах с разным агрегатным состоянием.

Наиболее благоприятное с точки зрения минимума градиентов температур распределение потерь между узлами преобразователя, определяется соотношением потерь в роторе и статоре. Указанное соотношение в большинстве реализаций зависит от соотношения объёмов статора и ротора, магнитопроводов и обмоток, активной и конструкционной частей ротора.

Испытания показали, что нагрев базового варианта гистерезисного электродвигателя при номинальной нагрузке составил не больше 60…70 °С по обмотке статора преобразователя и не больше 40…50 °С по его корпусу. Перегрев обмотки был не более 70 °С, даже при мощности потерь, больших номинальной мощности потерь в 2 раза, что допустимо для выбранного класса изоляции и оптимально в плане тепловых режимов преобразователя.

Сопоставительный анализ результатов тепловых расчётов и опытных данных показал, что для всех спроектированных гистерезисных электродвигателей участка ряда с электромагнитными моментами от 0,4 до 7,2 Н·м расхождение расчётных и опытных значений показателей не более 10 %.

Полученные результаты перспективны для разработки электромеханических преобразователей энергии с нелинейными магнитными системами, работающих в несимметричных режимах при реализации роторных технологий, в частности, гистерезисных электродвигателей и электроприводов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ) в рамках научного проекта № 24-29-00763.

Список литературы

1. Делекторский Б. А., Тарасов В. Н. Управляемый гистерезисный электропривод. М.: Энергоатомиздат. 1983. 128 с.

2. Тарасов В. Н., Останин С. Ю. Разработка научных основ и технических решений для автоматизации и роботизации роторных и центрифужных технологий // Доклады IX Международной выставки-конгресса «Высокие технологии. Инновации. Инвестиции» (Санкт-Петербург, 2004 г.). С.-Пб. 2004. С. 127-131.

3. Гиродвигатели / Ю. В. Арбузов, Б. А. Делекторский, В. Б. Никаноров и др.; Под ред. И. Н. Орлова. М.: Машиностроение. 1983. 252 с.

4. Шнайдер А. Г., Пчелин И. К. Динамика мотор-подшипников. Москва: Наука. 2007. 276 с.

5. Базаров В. Н. Тепловые процессы в электромеханических преобразователях энергии летательных аппаратов. М.: МАИ. 1991.

6. Мастяев Н. З., Орлов И. Н. Нагрев и охлаждение электрооборудования летательных аппаратов. – М.: Издательство МЭИ. 1995.

7. Веников В. А. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики). М.: Высш. шк. 1976.

8. Крон Г. Тензорный анализ сетей. М.: Сов. Радио. 1978. 720 с.

9. Н. С. Бахвалов, Н. П. Жидков, Г. М. Кобельков. Численные методы. М.: БИНОМ. 2008.

INVESTIGATION OF THERMAL MODES OF ELECTROMECHANICAL ENERGY CONVERTERS WITH NONLINEAR MAGNETIC SYSTEMS

S.Y. Ostanin[1], N. Abdugaliyev[1], M.G. Konovalov[1], F.D. Uspensky[1], Cui Shumei[2] Zhu Chunbo[2]

[1]National Research University «MPEI», Moscow, Russia

[2]Harbin Institute of Technology, Harbin, China

E-mail: OstaninSY@mpei.ru

The article deals with the calculation of thermal operating modes of electromechanical energy converters with nonlinear magnetic systems in non symmetrical modes implementing rotary technologies. The issues of approach, formation of methodology and algorithm for these calculations are being developed. Proposals are being worked out on the application of the results for the development of hysteretic electric motors and electric drives for the realization of new rotary technologies in chemical, textile, mining, agricultural, food and related with them industries.

Key words: electromechanical energy converters, nonlinear magnetic systems, non symmetric modes, thermal modes, calculations.

УДК 537.62, 621.31

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОПРОСОВ ПОВЫШЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ СТАБИЛЬНОСТИ И ПРОЧНОСТИ РОТОРОВ ГИСТЕРЕЗИСНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

С.Ю. Останин[1], М.Г. Коновалов[1], И.А. Фёдоров[1], И.М. Миляев[2], Цуй Шумэй[3], Чжу Чунбо[3]
[1]ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», Москва, Россия
[2]ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН, Москва, Россия
[3]ХПУ, Харбин, Китай
E-mail: OstaninSY@mpei.ru

В статье разрабатываются вопросы повышения механической стабильности и прочности роторов гистерезисных электромеханических преобразователей энергии – гистерезисных электродвигателей в несимметричных режимах работы, повышения магнитных и гистерезисных свойств и характеристик материалов их роторов. Исследуются конструкции роторов для конусного исполнения гистерезисных электродвигателей, в том числе, конструкции, в которых гистерезисный слой и базовый элемент конструкции приводимого механизма выполнены как одно целое из одного и того же материала.
Ключевые слова: гистерезисные электромеханические преобразователи энергии, несимметричные режимы, механическая стабильность и прочность.

Введение

Гистерезисные электромеханические преобразователи энергии в режиме гистерезисного электродвигателя [1] широко применяются для электроприводов различных классов высокотехнологичных устройств и систем в наукоёмких областях техники и промышленности: инструментальных механизмов, электроверетён, мотор-подшипников, электрошпинделей, турбомолекулярных насосов и других [1-4]. Совершенствование таких электродвигателей, в частности, для повышения их коэффициента полезного действия (КПД), частоты вращения, удельного электромагнитного момента в несимметричных режимах работы особенно актуально. Важные направления совершенствования связаны с улучшением конструкций гистерезисных электродвигателей, материалов их роторов, методов обработки материалов роторов, методов управления электродвигателями в составе электропривода.

Цель работы, которая рассматриваются в докладе, состояла в исследовании вопросов повышения в несимметричных режимах работы гистерезисных электродвигателей механической стабильности и прочности их роторов, магнитных и гистерезисных свойств и характеристик материалов роторов. Для достижения цели решались следующие основные задачи:

1) Анализ условий для создания оптимальных вариантов конструкций роторов гистерезисных электродвигателей и синхронных электродвигателей с возбуждением от постоянных магнитов, а также комбинаций этих электродвигателей для работы при высоких и сверхвысоких угловых скоростях.

2) Поиск и анализ новых магнитно-твёрдых материалов с высокими гистерезисными и механическими свойствами и с невысокой стоимостью.

3) Исследование вопросов повышения механической стабильности и прочности конструкции и упрощения технологии изготовления роторов.

4) Анализ магнитных потерь в массивном роторе от вихревых токов гармоник магнитного поля и мероприятий по снижению указанных потерь.

5) Исследование вопросов магнитной развязки для активного слоя ротора гистерезисного электродвигателя и подшипников газостатических опор.

В качестве объектов исследования были выбраны варианты высокоскоростных гистерезисных электродвигателей, у которых:

1) Принципиально несимметричные рабочие режимы.

2) Основное применение – мотор-подшипники, в первую очередь, а также электрошпиндели, электроверетёна, инструментальные механизмы и др.

3) Конусное конструкционное исполнение, то есть поверхности статоров и роторов, обращённые к рабочему воздушному зазору, конические.

4) Рабочие частоты вращения роторов 24 000-60 000 об/мин.

5) Мощности электродвигателей 150-10 000 Вт.

6) Роторы электродвигателей выполнены на газомагнитных опорах.

7) Необходимо обеспечивать механическую связь ротора с важным конструкционным элементом – державкой приводного рабочего органа.

1. Исследование гистерезисных электродвигателя с позиций повышения стабильности и прочности их роторов в несимметричных режимах

Анализ условий для создания оптимальных вариантов роторов гистерезисных электродвигателей и синхронных электродвигателей с возбуждением от постоянных магнитов и комбинаций этих электродвигателей для работы в несимметричных режимах при высоких и сверхвысоких угловых скоростях показал, что ключевыми являются следующие условия:

1) Малокомпонентность конструкций роторов, то есть наличие в составе роторов минимального количества компонентов – деталей.

2) Наличие магнитно-твёрдых материалов, применимых для выполнения и роторов гистерезисных электродвигателей и постоянных магнитов.

3) Присутствие у указанных материалов лучших, по возможности, магнитных, гистерезисных и механических свойств и характеристик.

4) Возможности различной термической обработки этих материалов.

5) Невысокая стоимость указанных магнитно-твёрдых материалов.

Поиск и анализ магнитно-твёрдых материалов [5-10] показал, что указанным условиям в наибольшей степени отвечают материалы группы хромокобальтовых сплавов, особенно новые сплавы этой группы. В таких сплавах достигаются высокие требуемые свойства и характеристики с одновременным снижением стоимости за счёт уменьшения содержания в их химическом составе дорогостоящих компонентов, в первую очередь, кобальта. Это обеспечивается путём совершенствования технологий изготовления указанных сплавов и методов и средств их технологической обработки.

Роторы конструкций для конусного исполнения электродвигателей, структуры которых приведены на рис. 1, содержат два элемента: активный или гистерезисный слой, создающий гистерезисный электромагнитный момент – 1, и несущая этот слой державка – 2. Важное преимущество этих вариантов – простота конструкции, но сочленение активного слоя с державкой требует высокоточного выполнения сопрягаемых поверхностей. Поскольку ротор рассматриваемых конструкционных вариантов электродвигателя должен иметь механическую связь с приводимым рабочим органом (механизмом), то конструкционный элемент – державка рабочего органа обеспечивает эту механическую связь и также является базовым элементом. Она должна быть немагнитопроводящей, а в некоторых вариантах и неэлектропроводящей.

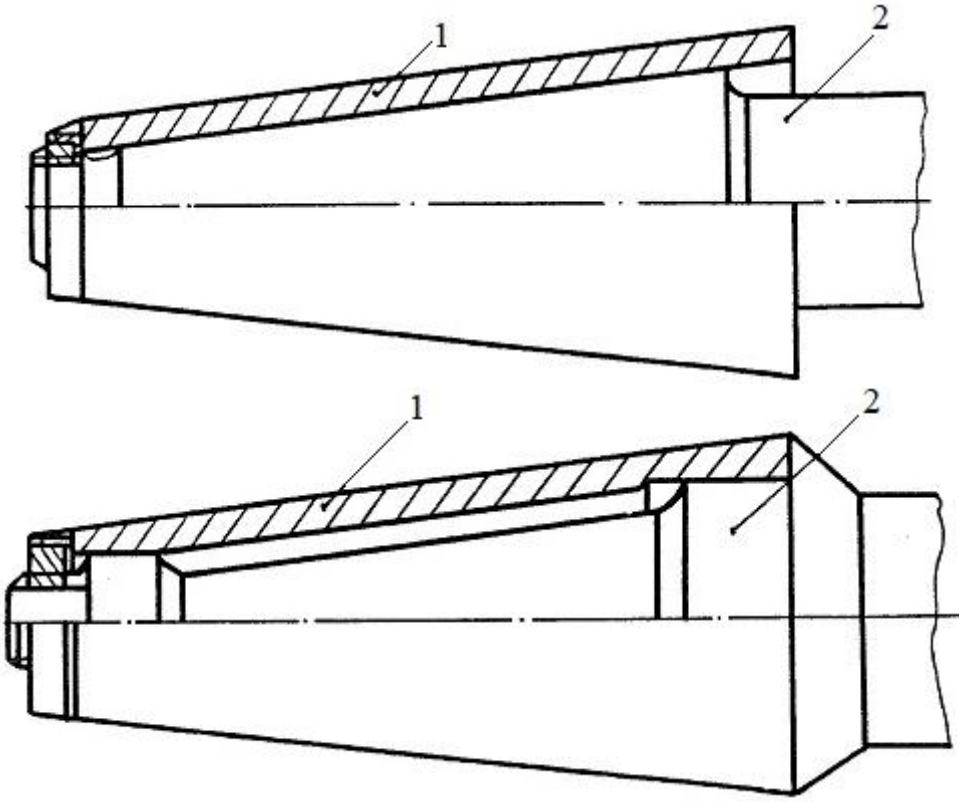


Рисунок 1 – Варианты роторов для конусного исполнения гистерезисного электродвигателя

Роторы конструкций для конусного исполнения, структуры которых показаны на рис. 2, лишены недостатков рассмотренных выше вариантов за счёт того, что активный слой и державка выполнены как одно целое из одного и того же материала. Такая реализация повышает механическую стабильность и прочность конструкции и упрощает технологию изготовления ротора. Уменьшение магнитных потерь в массивном роторе от вихревых токов гармоник магнитного поля, в том числе первой гармоники, частично решается при оребрении поверхности ротора (рис. 2). Дополнительное уменьшение влияния вихревых токов от гармоник магнитного поля, в том числе от первой гармоники, достигается выполнением кольцевых канавок на внутренней поверхности. Применение этих канавок также обеспечивает надёжное сцепление с нетокопроводящей державкой, выполненной в виде втулки.

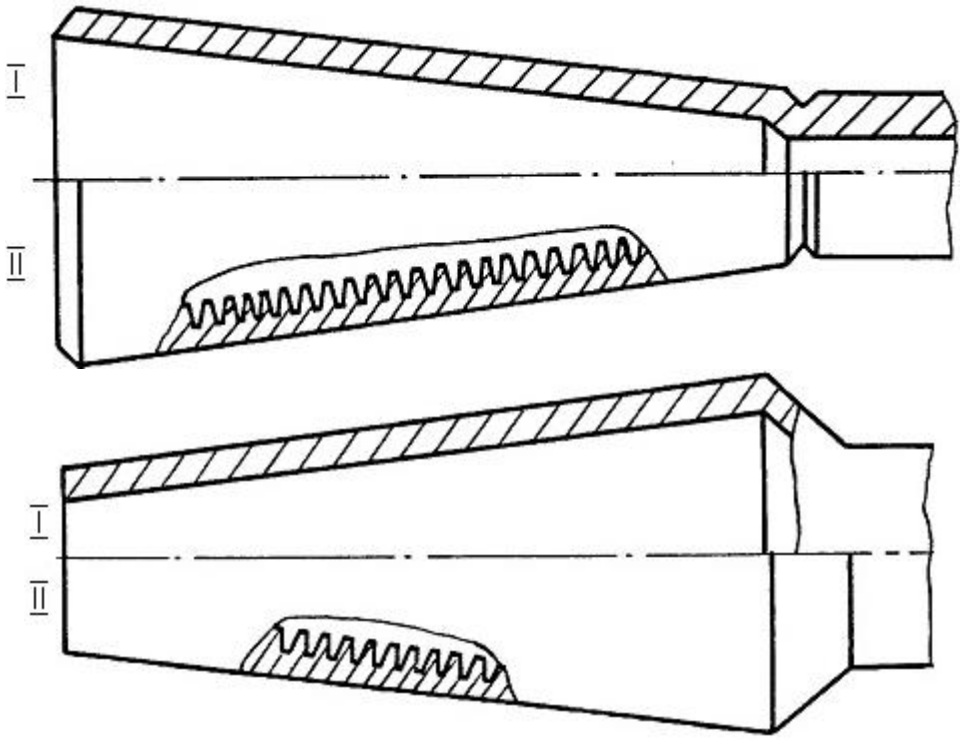


Рисунок 2 – Варианты роторов для конусного исполнения, в которых активный слой и державка выполнены как одно целое из одного и того же материала

Также были проведены исследования влияния скорости охлаждения в магнитном поле при термомагнитной обработке (ТМО) активного материала ротора на следующие параметры цикла гистерезиса этого материала:

относительную остаточную индукцию

$$b_r = B_r / B_{\text{m}}, \tag{1}$$

где B_r – остаточная индукция, B_{m} – максимальная индукция;

относительную коэрцитивную силу

$$h_C = H_C / H_{\text{m}}, \tag{2}$$

где H_C – коэрцитивная сила, H_{m} – максимальная напряжённость;

коэффициент выпуклости

$$k_{\text{В}} = S_{\text{ЦГ}} / (4 \cdot B_{\text{m}} \cdot H_{\text{m}}), \tag{3}$$

где $S_{\text{ЦГ}}$ – площадь цикла гистерезиса.

Сочетание высокой механической стабильности и прочности и, вместе с тем, оптимальных магнитных и гистерезисных свойств и характеристик у материалов группы хромокобальтовых сплавов позволяет создавать конструкции высокоскоростных гистерезисных роторов и роторов с постоянными магнитами электродвигателей в несимметричных режимах, а также конструкционные комбинации таких роторов. При этом варьирование режимами термической и термомагнитной обработки обеспечивает достижение любого сочетания разных магнитных и немагнитных свойств в объёме ротора.

На рис. 3 приведено семейство эквивалентных параметризованных гистерезисных зависимостей в относительных единицах напряжённости магнитного поля при ТМО $h_{\text{ТМО}}$ от длительности охлаждения τ материала в магнитном поле для b_r, штрих-пунктир, h_C, пунктир, $k_{\text{В}}$, сплошная линия.

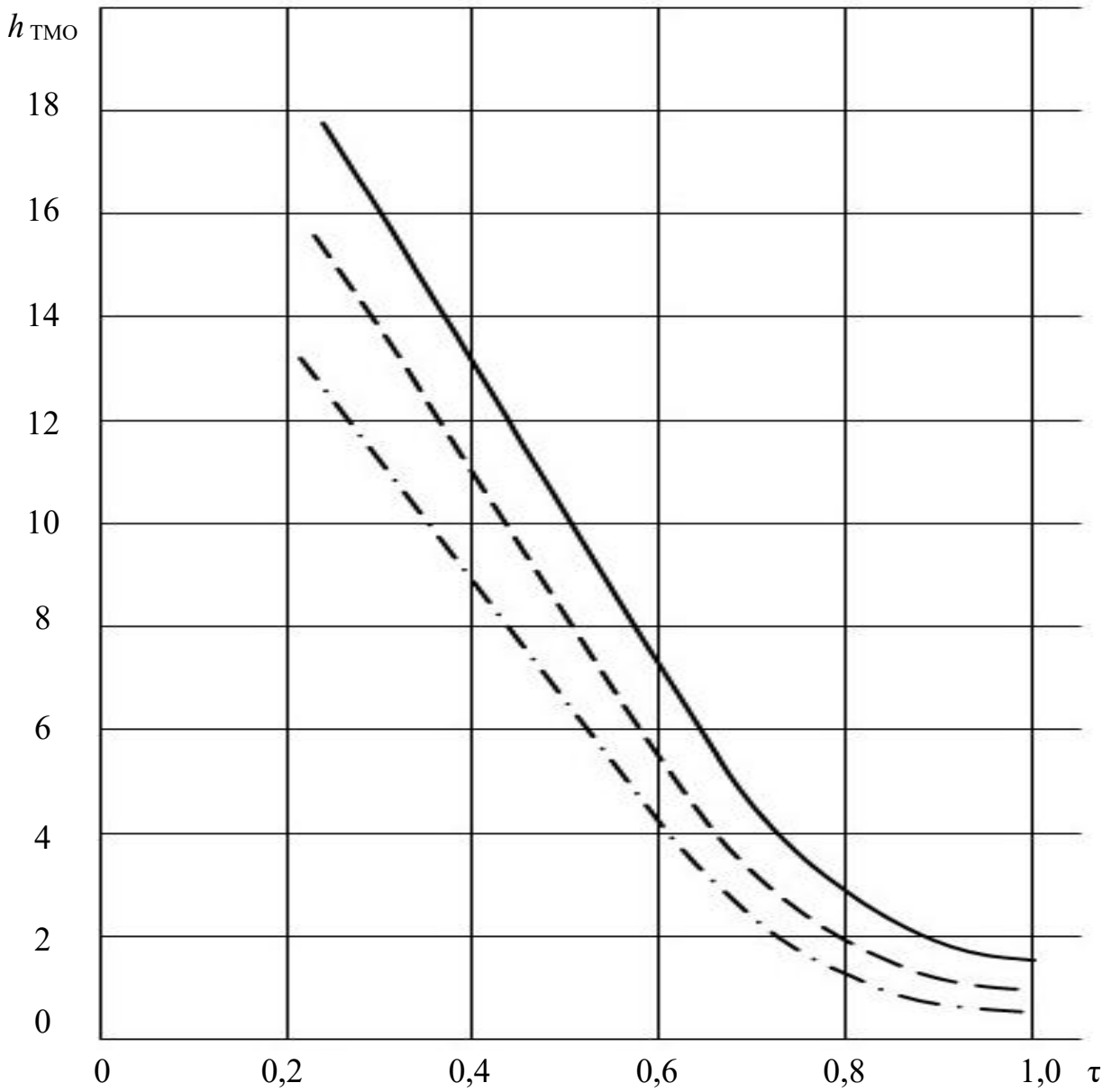


Рисунок 3 – Семейство эквивалентных параметризованных гистерезисных зависимостей напряжённости магнитного поля при ТМО от длительности охлаждения в нём τ материала

Исследование электромагнитных процессов в роторах базовых вариантов гистерезисных электродвигателей для работы в несимметричных режимах в электроприводах высокоскоростного электрошпинделя и турбомолекулярного насоса показали целесообразность и эффективность выполнения подшипников газомагнитных опор как одного целого с гистерезисным слоем ротора. Также важно обеспечение механической связи этого слоя с приводимым рабочим механизмом через немагнитопроводящую и неэлектропроводящую державку рабочего механизма и магнитная развязка гистерезисного слоя и подшипников газостатических опор, достигаемая за счёт их местной термической обработки.

Заключение

Исследования показали, что прочностные механические свойства хромокобальтового сплава, из которого выполнены роторы, и конструкции

роторов позволяют развивать частоты вращения до 250 000 об/мин для электроприводов электрошпинделей и до 70 000 об/мин – для турбонасосов.

Возможна реализация комбинированных электродвигателей, конструкция которых сочетает гистерезисный электродвигатель и электродвигатель с возбуждением от постоянных магнитов. Это обеспечивается выполнением ротора из высококоэрцитивного сплава группы хромокобальтовых сплавов с гистерезисным слоем, охватывающим гладкий магнитно-твёрдый цилиндр с неявновыраженными магнитными полюсами. Такие полюсы, а также немагнитные, проводящие электрический ток, межполюсные участки и короткозамыкающие немагнитные торцы указанного цилиндра формируются путём специальной термической и термомагнитной обработки роторов.

Таким образом, высокопрочные и вместе с тем высококоэрцитивные материалы группы хромокобальтовых сплавов позволяют создавать конструкции высокоскоростных гистерезисных роторов, роторов с постоянными магнитами и комбинаций указанных типов роторов электродвигателей, работающих в несимметричных режимах, а варьирование режимами термической и термомагнитной обработки – достижение любого сочетания различных магнитных и немагнитных свойств в объёме ротора.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ) в рамках научного проекта № 24-29-00763.

Список литературы

1. Тарасов В. Н., Останин С. Ю. Разработка научных основ и технических решений для автоматизации и роботизации роторных и центрифужных технологий // Доклады IX Международной выставки-конгресса «Высокие технологии. Инновации. Инвестиции» (Санкт-Петербург, 2004 г.). С.-Пб. 2004. С. 127-131.
2. Мартынов И. А., Прошков А. Ф., Яскин А. П. и др. Машины и агрегаты текстильной и легкой промышленности: Энциклопедический справочник. Том IV-13. М.: Машиностроение. 1997.
3. Шнайдер А. Г., Пчелин И. К. Динамика мотор-подшипников. Москва: Наука. 2007. 276 с.
4. Musina T. K. 100 years of chemical fibres' development in Russia. M.: Mytischi. October, 2009.
5. Миляев И.М., Юсупов В.С., Останин С.Ю., Стельмашок С.И., Миляев А.И., Лайшева Н.В. Магнитные гистерезисные и механические свойства магнитотвёрдого сплава 27Х15К2МСТФ // Физика и химия обработки материалов, 2017, № 1, с. 69-76.
6. Jin S., Chin G. Y., Wonsiewicz B. C. A low cobalt ternary Cr-Co-Fe alloy for telephone receiver magnet use // IEEE Transactions on Magnetics. 1980. MAG-16. No. 1. P. 139-146.
7. Ковалевская Т.А., Данейко О.И. Формирование максимальной прочности дисперсно-упрочненных кристаллических сплавов на основе алюминия, содержащих некогерентные частицы. // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 7. С. 1002.
8. Филиппова В.П., Блинова Е.Н., Жуков О.П. и др. Компьютерное моделирование химической неоднородности в конструкционных сталях, полученных совмещением прокатки с непрерывным литьем (по технологии "Strip-Casting"). // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 7. С. 1053.
9. Блинова Е.Н., Либман М.А., Петровский В.Н. и др. Влияние лазерной обработки на прочностные характеристики γ-фазы в сплавах системы железо–хром–никель. // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 7. С. 984.
10. Соловьева Ю.В., Старенченко С.В., Старенченко В.А. и др. Структура и механические свойства монокристаллов Ni3Fe после интенсивной пластической деформации. // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 9. С. 1229.

INVESTIGATION OF THE ISSUES OF INCREASING THE MECHANICAL STABILITY AND STRENGTH OF THE ROTORS OF HYSTERETIC ELECTROMECHANICAL ENERGY CONVERTERS

S.Y. Ostanin[1], M.G. Konovalov[1], I.A. Fyodorov[1], I.M. Milyaev[2], Cui Shumei[3], Zhu Chunbo[3]

[1]National Research University «MPEI», Moscow, Russia

[2]Institute of Metallurgy and Material Science, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

[3]Harbin Institute of Technology, Harbin, China

E-mail: OstaninSY@mpei.ru

The article deals with the issues of increasing the mechanical stability and strength of the rotors of hysteretic electromechanical energy converters – hysteretic electric motors in non symmetric operating modes, increasing the magnetic and hysteresis properties and characteristics of the materials of their rotors. The designs of rotors for cone-shaped hysteresis electric motors are investigated, including designs in which the hysteresis layer and the basic structural element of the driven mechanism are made as one whole from the same material.

Key words: hysteretic electromechanical energy converters, non symmetric modes, mechanical stability and strength

УДК 621.36

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛЬНЫХ ТРУБ ДЛЯ ИНДУКЦИОННО-РЕЗИСТИВНЫХ СИСТЕМ НАГРЕВА

М.А. Федин, М.А. Булатенко, А.И. Василенко, В.В. Крылов, Д.А. Жгутов
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», Россия, Москва
E-mail: FedinMA@mpei.ru

В работе разрабатывается методика экспериментального определения электрофизических свойств (основной кривой намагничивания и удельных объемных потерь на перемагничивание) стальных труб для индукционно-резистивных систем нагрева. Разработана экспериментальная установка, позволяющая определять электрофизические свойства стальных труб в зависимости от напряженности магнитного поля и частоты. Получены основная кривая намагничивания и удельные объемные потери на перемагничивание для стальной трубы из стали 10.

Ключевые слова: электромагнитное поле, индукционно-резистивный нагреватель, моделирование, петля магнитного гистерезиса, ферромагнитные материалы.

Введение

Индукционно-резистивные системы нагрева (ИРСН) широко применяются в различных отраслях промышленности, в частности для начального разогрева и дальнейшего поддержания температуры протяженных магистральных нефтяных трубопроводов, находящихся в суровых климатических условиях. Конструктивно ИРСН состоит из индукционно-резистивного нагревателя (ИРН) и индукционно-резистивного проводника (ИРП), находящегося в электроизоляции (рис. 1). Конструкция и принцип действия ИРСН подробно описываются в [1, 2].

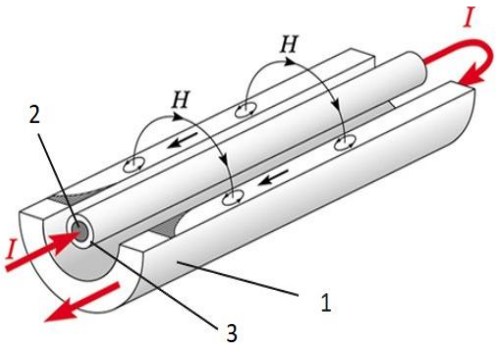


Рисунок 1 – Конструкция устройства индукционно-резистивного нагрева:
1 – ферромагнитная труба; *2* – стержневой индуктор; *3* – электроизоляция

Обычно ИРН представляет собой бесшовную холодно- или горячекатаную трубу, изготавливаемую из ферромагнитной стали согласно ГОСТ 8734-75 или ГОСТ 8732-78. Ферромагнитные стали, такие как сталь 10, сталь 20Х13, сталь СТ20 и другие, обладают высокими относительной магнитной проницаемостью и электрической проводимостью, особенно в слабых электромагнитных полях.

Развитие теории и практики индукционного нагрева ферромагнитной стали в настоящее время идет по двум основным направлениям. С одной

стороны, требуется совершенствование методов моделирования процессов и устройств, что позволяет более точно прогнозировать поведение материалов при индукционном нагреве и оптимизировать конструкции нагревательных систем. С другой стороны, существует острая необходимость в разработке методов определения электрофизических свойств материалов, в частности труб, используемых в конструкции устройств индукционного нагрева ферромагнитной стали.

Одна из методик определения электрофизических свойств труб из ферромагнитных сталей, предложенная Кувалдиным А.Б., Струпинским М.Л., Хренковым Н.Н. [3 – 4], основана на проведении экспериментов с постоянным и переменным током. Данная методика не позволяет получить зависимость удельных потерь на перемагничивание (на гистерезис) от напряженности магнитного поля и от частоты.

Сандомирский С.Г. по результатам измерений параметров предельной петли гистерезиса вывел формулу для расчета основной кривой намагничивания конструкционных сталей, используя такие параметры, как напряженность магнитного поля, коэрцитивная сила и остаточная намагниченность [5].

В статье С. М. Плотникова [6] рассмотрен метод разделения полных потерь в электротехнической стали на две составляющие: потери на гистерезис и вихревые токи, однако данный метод сопряжён со значительными погрешностями, поскольку он основан лишь на информации о характере зависимостей тепловыделения в стали за счёт индуцированных токов и гистерезиса от частоты и не учитывает реальную форму петли магнитного гистерезиса.

В связи с этим необходима разработка более совершенной методики, учитывающей реальные формы петли магнитного гистерезиса для определения электрофизических свойств стальных труб, особенно в свете возможности применения их в качестве ИРН. Для решения этих задач авторами предложен осциллографический метод с последующей обработкой полученных экспериментальных результатов.

Большинство устройств, изготовленных из ферромагнитных материалов, работают в переменных магнитных полях, что является динамическим режимом работы этих материалов, для исследования которых была разработана экспериментальная установка, схема которой представлена на рис. 2.

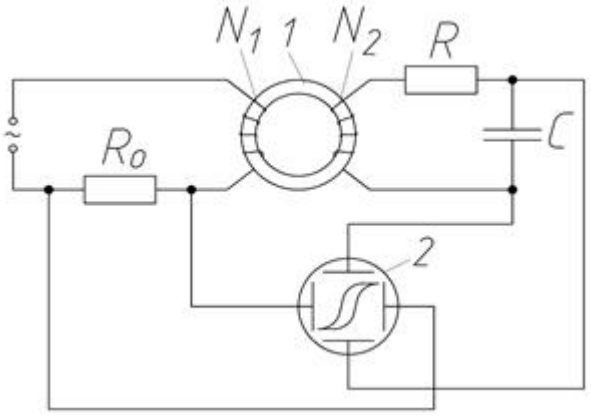


Рисунок 2 – Схема экспериментальной установки: *1* – трансформатор; *2* – осциллограф

Основным элементом установки является трансформатор (поз. 1 на рис.2, фотография на рис. 3, а), сердечник которых изготовлен из исследуемого ферромагнитного материала (отрезок трубы 28х1) (рис. 3, б). На сердечнике размещены первичная и вторичная обмотки с числом витков N_1 и N_2 соответственно.

Для получения изображения динамической петли магнитного гистерезиса на экране осциллографа (поз. 2 на рис. 2) необходимо поместить ферромагнетик в переменное магнитное поле, создаваемое токами, протекающими по обмоткам трансформатора. Первичная обмотка с числом витков N_1 подключена к источнику переменного напряжения через шунт R_0, который используется для получения сигнала (напряжение U_x), пропорционального напряженности магнитного поля в образце. Напряжение с шунта R_0 подается на горизонтально отклоняющие пластины осциллографа.

а *б*

Рисунок 3 – Экспериментальный трансформатор (*а*) и исследуемые образцы труб (*б*)

Вторичная обмотка с числом витков N_2 соединена с *RC*-цепочкой, которая выполняет функцию интегрирования сигнала, что позволяет перейти от ЭДС индукции к магнитному потоку, а затем к магнитной индукции. Напряжение с конденсатора C (U_y), пропорциональное магнитной индукции в образце, подается на вертикально отклоняющие пластины осциллографа.

Таким образом, на экране осциллографа формируется изображение динамической петли магнитного гистерезиса, где по горизонтальной оси отображается напряженность магнитного поля, а по вертикальной – магнитная индукция в исследуемом образце, что позволяет наблюдать и анализировать магнитные свойства материала в условиях переменного магнитного поля.

Работа представленной на рис. 2 схемы была проверена путём моделирования в пакете *Matlab/Simulink*. Схема, представленная на рис. 4, предлагает эффективный способ моделирования петель гистерезиса для различных параметрических настроек системы.

В процессе моделирования использовался блок, имитирующий нелинейный трансформатор, в который была заложена исходная петля магнитного гистерезиса, представленная на рис. 5а. Для решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений в данном моделировании

используется метод *ode23s*. Время моделирования задано 0,04 с, частота 50 Гц.

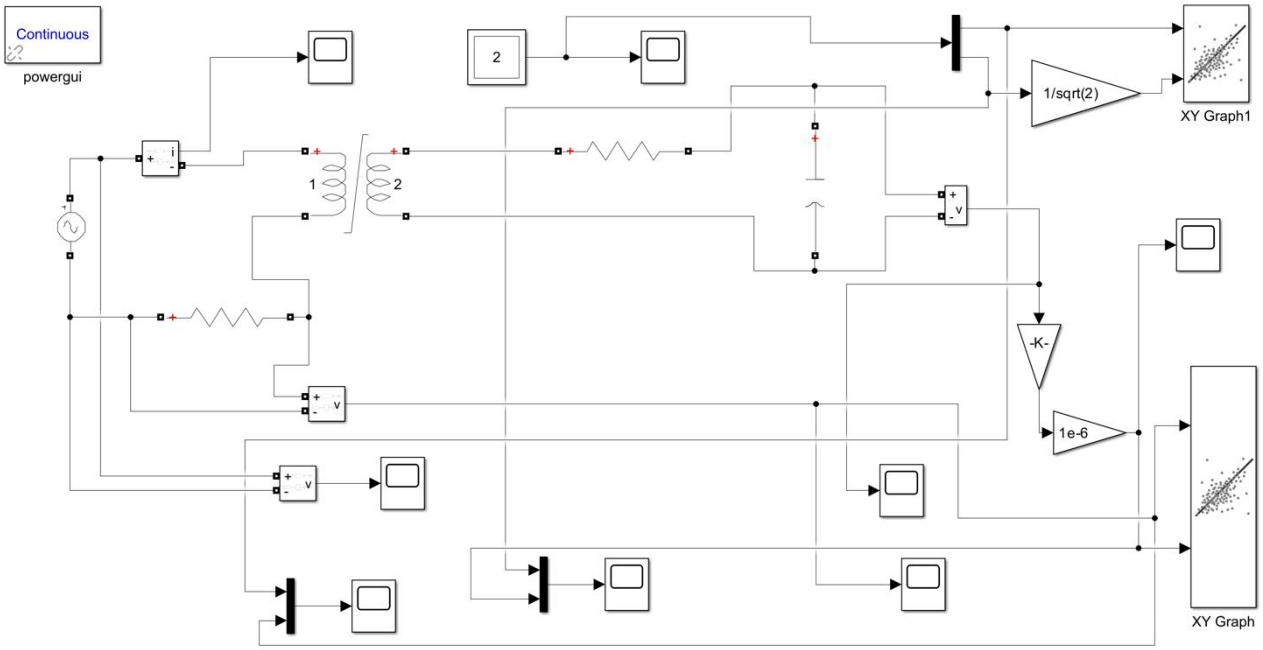
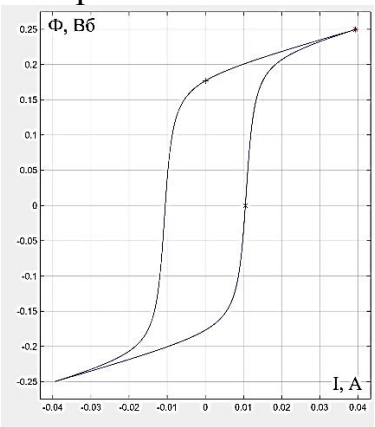
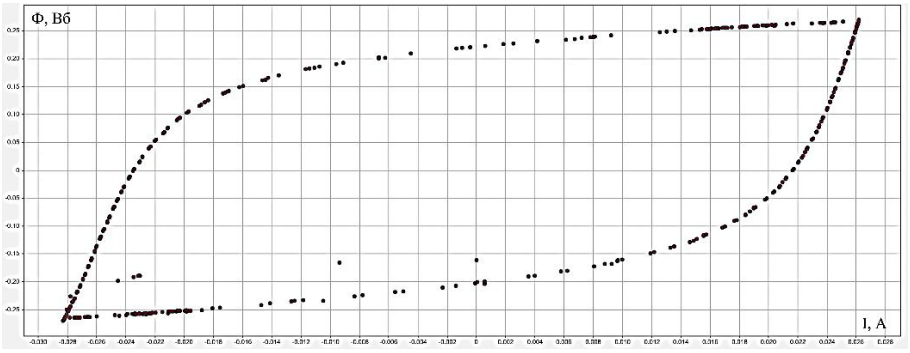


Рисунок 4 – Имитационная модель экспериментальной установки в Matlab/Simulink

Полученные результаты, отображенные на рис. 5б, показывают петлю магнитного гистерезиса, сформированную в ходе моделирования. Сравнительный анализ исходной (заложенной с модель) и полученной петель гистерезиса показывает их высокую степень сходства как по форме, так и по размерам. Важно отметить, что из-за ограничений *Matlab/Simulink* в изменении масштаба графиков, визуальное сравнение может быть затруднено, однако детальный анализ показывает, что значение тока и магнитного потока в обоих случаях очень близки, что подтверждает правильность предложенной схемы измерений.





а *б*

Рисунок 5 – Результат моделирования петли магнитного гистерезиса в Matlab/Simulink:

а – петля магнитного гистерезиса, заложенная в модель;

б – петля магнитного гистерезиса, полученная в результате моделирования

В соответствии с предложенной схемой (рис. 2) на кафедре ЭППЭ НИУ «МЭИ» была спроектирована и собрана экспериментальная установка для проведения измерений (рис. 6).

Рисунок 6 – Экспериментальное оборудование и исследуемый образец трубы

При экспериментальном исследовании использовались следующие исходные данные: длина средней линии ферромагнитного сердечника l=0,029 м число витков первичной обмотки N_1=150; число витков вторичной обмотки N_2=50; эталонный резистор R_0=1 Ом, R=10 Ом; ёмкость конденсатора C=22 мкФ; площадь одного витка S=0,00003 м^2.

При прохождении тока I через первичную катушку в сердечнике возникает магнитное поле с напряжённостью H, вычисляемой по формуле:

$$H = \frac{I_1 \cdot N_1}{l} \quad (1.1)$$

Напряжение U_x на резисторе R_0 прямо пропорционально току I_1 в первичной обмотке, а, значит, и напряженности магнитного поля и рассчитывается по формуле:

$$U_x = I_1 \cdot R_0 = \frac{R_0 \cdot l}{N_1} \cdot H. \quad (1.2)$$

Для определения величины магнитной индукции сердечника во вторичную обмотку измерительного трансформатора включена цепь, состоящая из резистора R и конденсатора C. Ток определяется через ЭДС индукции в

катушке. Напряжение на конденсаторе U_y пропорционально интегралу силы тока во вторичной обмотке и рассчитывается по формуле:

$$U_y = \frac{1}{C}\int_0^{t_1} I_2\,dt = \frac{1}{C}\int_0^{t_1} \frac{\varepsilon}{R}dt = -\frac{S \cdot N_2}{C \cdot R}\int_0^{t_1} \frac{dB}{dt}dt\,. \quad (1.3) \qquad (1.3)$$

Таким образом, из (1.3) определяется индукция B, которая прямо пропорциональна напряжению на конденсаторе U_y:

$$B = \frac{S \cdot N_2}{C \cdot R} \cdot U_y. \qquad (1.4)$$

При обработке экспериментальных данных проводим расчёт B и H по формулам (1.2) и (1.4), строим частные кривые гистерезиса для участков, на которых напряженность магнитного поля H повышается и понижается. На основе полученных результатов получаем зависимость относительной магнитной проницаемости исследуемой стали 10 (рис. 7).

Далее были рассчитаны площади петли и оценены потери на гистерезис через активную мощность, выделяющуюся в сердечнике трансформатора, в зависимости от H (рис. 8). Значение энергии за один цикл перемагничивания на единицу объема:

$$\frac{W_r}{V} = \int_{-H_m}^{H_m} (B_\downarrow - B_\uparrow)dH = \frac{4}{3} \cdot \beta \cdot \mu_0 \cdot H_m^3. \qquad (1.5)$$

В экспериментальном исследовании частота изменялась от 50 до 400 Гц с использованием лабораторного источника питания (рис. 6).

Из результатов проведенных исследований можно сделать вывод о том, что в исследуемом диапазоне частота практически не оказывает никакого влияния ни на семейство полученных экспериментально частных петель магнитного гистерезиса, ни на предельную петлю магнитного гистерезиса, соответствующую магнитной индукции насыщения, а значит она практически не оказываем влияния на основную кривую намагничивания, а также на зависимости относительной магнитной проницаемости и удельной объемной мощности за счет гистерезиса от напряженности магнитного поля, приведенные для стали 10 на рис. 7 и 8.

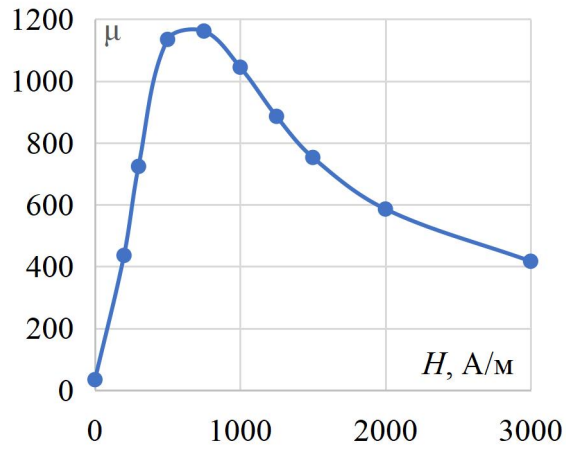


Рисунок 7 – Зависимость относительной магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля для стали 10

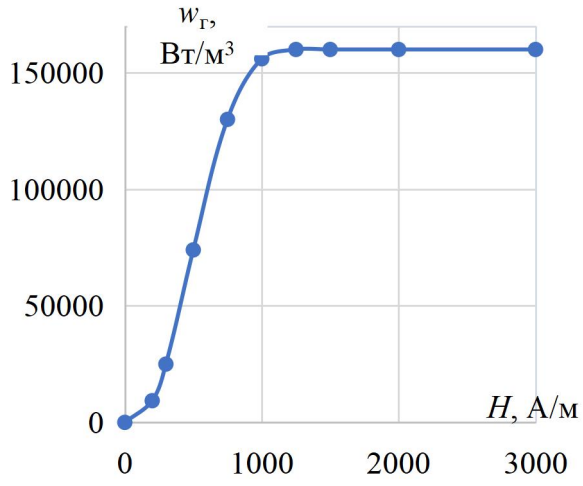


Рисунок 8 – Зависимость удельной объемной мощности за счет гистерезиса в зависимости от напряженности магнитного поля на частоте 50

Гц для стали 10

Заключение

В результате исследования была разработана и успешно применена методика экспериментального определения электрофизических свойств стальных труб для ИРСН в зависимости от напряженности магнитного поля и частоты, основанная на осциллографическом методе. Корректность предложенной схемы измерения была подтверждена с помощью имитационной модели экспериментальной установки в среде Matlab/Simulink. Были получены основная кривая намагничивания и зависимость удельных объемных потерь на перемагничивание от напряженности магнитного поля для стальной трубы из стали 10. Полученные результаты могут быть использованы для совершенствования методов моделирования процессов в ИРСН. Дальнейшие исследования могут быть направлены на изучение электрофизических свойств конструкционных сталей в условиях переменных магнитных полей.

Список литературы

1. Федин М.А. Разработка математической модели электромагнитного поля и схемы замещения индукционно-резистивной системы нагрева для промышленных трубопроводов / М. А. Федин, Е. В. Качалина, А.И. Василенко [и др.] / Промышленная энергетика, №12, 2023. С. 2 – 9.

2. Кувалдин А.Б., Погребисский М.Я., Федин М.А., Нехамин С.М., Крутянский М.М., Чурсин А.Ю. Электротехнологические установки и системы. Учебник и практикум для бакалавров. – М.: Издательство МЭИ, 2022. – 476 с.

3. Кувалдин А.Б. / Моделирование электромагнитного поля в ферромагнитной стали при индукционном, электроконтактном и комбинированном нагреве / Кувалдин А.Б., Струпинский М.Л., Хренков Н.Н., Федин М.А. / Индукционный нагрев, № 13, 2010. С. 15-19.

4. Kuvaldin A.B., Strupinskii M.L., Khrenkov N.N., Shatov V.A. Electrothermal model of coaxial inductive-resistive heating system / Russian Electrical Engineering, Vol. 76, No. 1, pp. 51–56, 2005. © Allerton Press, Inc., 2005.

5. Сандомирский С.Г. Расчёт основной кривой намагничивания конструкционных сталей по результатам измерений параметров предельной петли гистерезиса // Измерительная техника. 2017. № 2. С. 54-57

6. Плотников С.М. Определение потерь на вихревые токи и на гистерезис в магнитопроводах электрических машин // Измерительная техника, 2020. № 11. С. 54 – 58.

УДК 621.3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК С ТЕМНЫМИ ИЗЛУЧАТЕЛЯМИ ПРИ ПИТАНИИ ПЕРЕМЕННЫМ ТОКОМ И ТОКОМ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

Д.В. Птицын, Е.В. Птицына
Омский государственный технический университет, Омск, Россия
E-mail: evptitsyna@yandex.ru

В работе исследованы энергетические характеристики излучательных электротехнологических установок с инфракрасными темными излучателями разных типов на основе сравнительного анализа режимов их работы при питании током 50 Гц и током сложной формы. Экспериментальные исследования проведены на модельных устройствах с темными излучателями с целью выявления путей повышения их энергоэффективности.
Ключевые слова: излучательная электротехнологическая установка (ИЭТУ), темный инфракрасный излучатель, ток сложной формы (ТСФ), КПД установки.

Введение

Излучательные электротехнологические установки (ИЭТУ) находят применение для сушки материалов и покрытий, пайки, термообработки, обогрева помещений, сушки меха, зерна и т.д. [1 - 6]. Широко используются светлые, темные и газоразрядные излучатели, при этом мощность ИЭТУ может достигать 800 кВт [1 – 8]. В [4-5] исследованы энергетические характеристики ИЭТУ со светлыми ИК – излучателями и элементы оборудования источника питания: трансформаторы, дроссели насыщения. Доказано, что КПД светлых ИК- излучателей зависит от режимов работы: при питании ТСФ показатель повышается на 4 – 12 % за счет снижения тепловых потерь в излучателе. Потери в элементах источника питания (ИП) ИЭТУ тоже могут изменяться и зависят не только от конструкции и материала магнитопровода, но и частоты тока и др.

Экспериментальные исследования

Для выполнения исследований энергетических характеристик ИЭТУ с темными излучателями разных типов потребовалось разработать экспериментальный стенд, методику исследования, выбрать соответствующие измерительные приборы. В модельных исследованиях использованы реально выпускаемые промышленностью модификации современных инфракрасных темных излучателей.

В работе уделено внимание исследованию следующих важных моментов:

- определению и сравнению потерь энергии в излучательной электротехнологической установке в различных режимах : режим с питанием

переменным током 50 Гц, и током сложной формы при регулировании подмагничивания дросселя насыщения (ДН);

- исследованы динамические режимы: режимы подъема температуры за 10-15 минут изменения температурных полей темных излучателей, в сравнении режимов с питанием переменным током 50 Гц и ТСФ.

Тепловизионные исследования выполнены в функции фиксированного расстояния между излучателем и тепловизором (при его размещении на фиксированном удалении 240 мм от горизонтальной поверхности, например, обогрева сельскохозяйственных объектов. Выполнен сравнительный анализ температурного поля темного излучателя при одинаковом напряжении 220 В на излучателе для разных типов.

Для исследования потерь активной мощности в элементах ИЭТУ: в силовом трансформаторе, ДН, излучателе от электрических режимов необходимо было разработать методику исследований энергетических характеристик, разработать стенд, выбрать измерительные приборы.

Цель работы: исследование энергетических характеристик излучательных электротехнологических установок с разными типами темных излучателей для питания их ТСФ для повышения их коэффициента полезного действия.

Оборудование и методика исследования

Исследования динамических режимов подъема температуры выполнялись на модельных устройствах. Функциональная схема установки для исследования энергетических характеристик ИЭТУ для режимов с питанием током 50 Гц и ТСФ приведена на рис.1 [4,5]. Настоящая работа является продолжением ранее выполненных исследований в [4,5]. В представленной работе питание ИЭТУ реализовано от сети 220 В: 1) через однофазный трансформатор типа ОСМ1 мощностью 1,6 кВА 220 / 220 В: 2) трансформатором ОСМ1 220/115 В с переключением ступеней напряжения и ДН с регулированием тока подмагничивания. В работе выполнены исследования параметров ИЭТУ для режимов работы: 50 Гц и ТСФ с диапазоном регулирования значений тока подмагничивания от 0,1 до 0,4 А ДН.

В схеме предусматривалось регулирование напряжения устройством РПН трансформатора и гармонического состава ТСФ путем изменения тока подмагничивания дросселя насыщения (ДН). В качестве излучателя выбраны темные излучатели разных типов: керамический ИКН-100 с плоской поверхностью мощностью 100 Вт, керамическая лампа и др.

Для измерений значений мощности в различных точках схемы использовался анализатор качества электрической энергии ANALYST 2060.

Напряжение на излучателях в исследуемых режимах было 220 В.

Температурное поле излучателя измеряли тепловизором типа «Testo 885-2» (Testo 876) использовался для получения термограмм излучающей и облучаемой поверхностей. Погрешность измерения температуры – ±2 °С (±2 %).

Цифровой мультиметр MASTECH M9508 использовали для измерения температуры поверхности излучателя Т с помощью термопары. Погрешность измерения температуры была: ±3 °С (±1 %).

На рис. 1 представлена функциональная схема ИЭТУ с темными излучателями

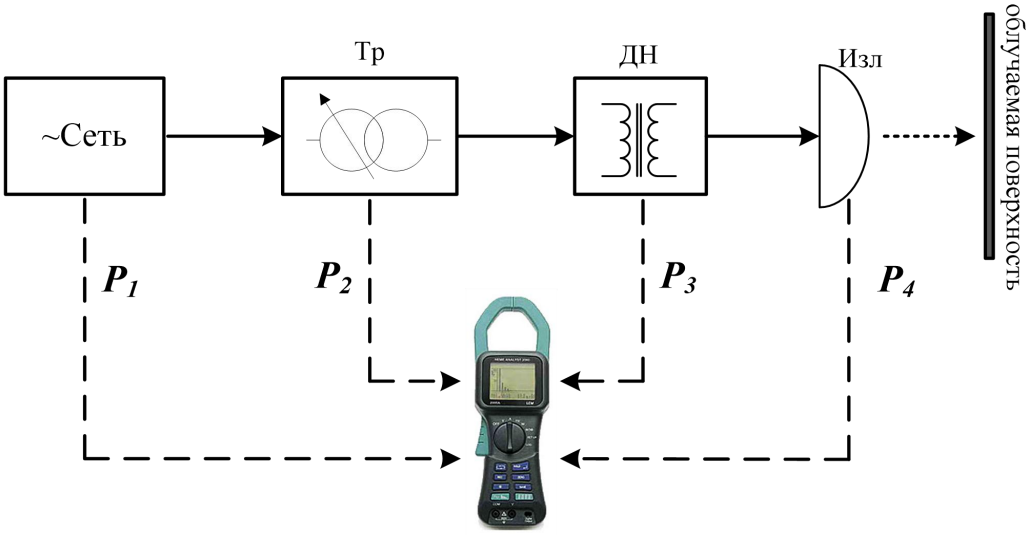


Рисунок 1 - Функциональная схема исследования энергетического баланса излучательных электротехнологических установок (темный излучатель) с питанием ТСФ

В табл. 1 – табл. 4 представлены результаты экспериментального исследования энергетических характеристик ИЭТУ с различными типами темных излучателей. В качестве примера на рис. 2 и рис. 3 термограммы, соответственно, для излучателя ИКН и черной керамической лампы.

Таблица 1 - Энергетические характеристики ИЭТУ с темным излучателем ИКН

Электрический режим	**Мощность из сети**			***cosφ***	***$U_{из}$*, В**
	***P*, Вт**	***Q*, вар**	***S*, ВА**		
Ток 50 Гц	123	23	260	0,6	220
ТСФ	101	14	102	0,986	

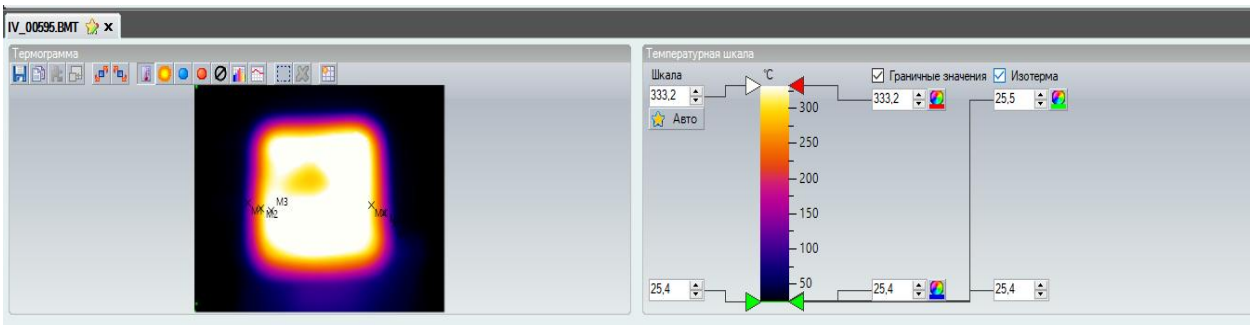


Рисунок 2 - Термограмма темного излучателя (ИКН -100) за 10 минут подъема температуры

Таблица 2 - Энергетические характеристики ИЭТУ с темным излучателем (гибким ленточным нагревателем ЭНГЛ) от напряжения

Электрический режим	**Мощность из сети**			***cosφ***	***U*из, В**
	***P*, Вт**	***Q*, вар**	***S*, ВА**		
Ток 50 Гц	27	99	103	0,30	115
ТСФ	17	16	24	0,70	

Таблица 3 - Энергетические характеристики ИЭТУ с темным излучателем (гибкой греющей пластиной) от напряжения

Электрический режим	**Мощность из сети**			***cosφ***	***U*из, В**
	***P*, Вт**	***Q*, вар**	***S*, ВА**		
Ток 50 Гц	41	98	107	0,40	115
ТСФ	34,7	10	37	0,94	

Таблица 4 - Энергетические характеристики ИЭТУ с темным излучателем (керамической лампой) от напряжения

Электрический режим	**Мощность из сети**			***cosφ***	***U*из, В**
	***P*, Вт**	***Q*, вар**	***S*, ВА**		
Ток 50 Гц	174	260	316	0,55	220
ТСФ	147	17	148	0,99	

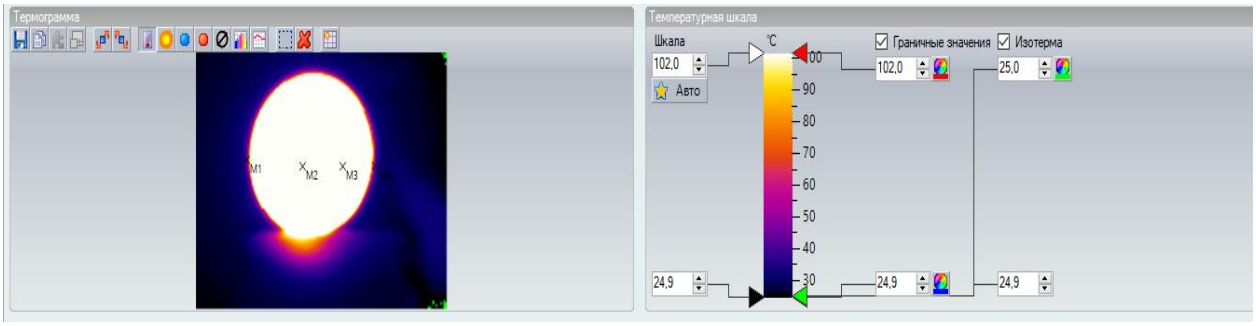


Рисунок 3 - Термограмма темного излучателя (черной керамической лампы) за 10 минут подъема температуры

Заключение

1. Исследованы динамические режимы подъема температуры за 10-15 мнут темных излучателей и энергетические характеристики ИЭТУ в режимах с питанием током 50 Гц и ТСФ. Показано, что дополнительное использование ДН не ухудшает суммарный энергетический эффект в режиме с ТСФ из-за снижения потерь активной мощности в трансформаторе, ДН и в ЭТУ с темными излучателями [4, 5].

2. Получено изменение температурного профиля обрабатываемых изделий: отмечен более пологий и равномерный температурный профиль в режиме с ТСФ по сравнению с током 50 Гц [4, 5].

3. Доказано, что при ТСФ с регулированием напряжения силовой трансформатора работает на более низкой ступени РПН, что обусловливает снижение индуктивности его обмоток и обеспечивает повышение коэффициента мощности ИЭТУ.

4. Установлено, что применение дополнительного канала регулирования – трансформатора с РПН, кроме тока подмагничивания ДН, расширяет диапазон регулирования параметров в ИЭТУ, что положительно сказывается на выборе оптимального электрического режима нагрева

Список литературы

1. Волф У., Цисис, Г. Справочник по инфракрасной технике. В 4-х томах. – Москва: Мир, 1995-1999. – С. 15-17.
2. Электротехнологические установки и системы: учебник / А.Б. Кувалдин, М.Я. Погребисский , М.А. Федин и др. – М.: Издательство МЭИ, 2023. – С. 47 – 131.
3. Бутырин, П. А. Автоматизация физических исследований и эксперимента: компьютерные измерения и виртуальные приборы на основе LabView / П.А. Бутырин. - М.: ДМК Пресс, 2005. – 264 с.
4. Птицына Е.В., Птицын Д.В., Кувалдин А.Б. Методика экспериментального определения энергетических характеристик излучателей при питании током сложной формы / Е.В. Птицына и др. // Промышленная энергетика. - 2023. №4. - С. 16-20.
5. Птицын Д.В., Птицына Е.В. Исследование энергетических характеристик дросселей насыщения, используемых в излучательных электротехнологических установках с темными и светлыми инфракрасными излучателями для питания током сложной формы. Наука России: цели и задачи : материалы XLII международной науч.-практ. конф. (5 февраля). – Екатеринбург, 2024. – 8 с.
6. Электротехнический справочник: В 4 т. Т.1. Общие вопросы.: Электротехнические материалы / Под ред. Профессоров МЭИ В.Г. Герасимова и др. – 9-е изд., стер. – М.,: Издательство МЭИ, 2003. – 440 с., ил. С. 362-392.
7. Теплоэнергетика и теплотехника: справочная серия: В 4 кн. / под общ.ред. член-корр. РАН А.В. Клименко и проф. Зорина. – 5-е изд., стереот. – М.: Издат. дом МЭИ, 2022. Кн. 4: Промышленная теплоэнергетика и теплотехника. – 631 с., ил. JSBN 948-5-383-01548-3
8. Brenner A. Electrodeposition of alloys. N. York. London. 1963.

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE ENERGY CHARACTERISTICS OF RADIATIVE ELECTROTECHNOLOGICAL INSTALLATIONS WITH DARK RADIATORS POWERED BY ALTERNATING CURRENT AND COMPLEX CURRENT

D.V. Ptitsyn[1], E.V. Ptitsyna[1],
[1] Omsk State Technical University, Omsk, Russia
E-*mail: evptitsyna@yandex.ru*

The paper investigates the energy characteristics of radiating electrotechnological installations (IETU) with infrared dark ceramic radiators of the IKN - 100 type based on a comparative analysis of their operating modes when powered by a current of 50 Hz and a current of complex shape (TSF). Experimental studies have been conducted on model IETU devices with IR emitters in order to identify ways to improve the energy efficiency of their operation.
Key words: radiative electrotechnological installation, dark ceramic radiator type IKN-100, ceramic lamp, CE-100-200-1 , The efficiency of the installation.

УДК 621.372.826

МИКРОВОЛНОВАЯ АНТЕННА НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРАХ

Л.В. Алексейчик, А.А. Курушин
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»», Москва, Россия
E - mail: AlexeychikLV@mpei.ru

Предложена конструкция микроволновой антенны на диэлектрических резонаторах (ДР), предназначенная для применения в технике мобильной и спутниковой связи сантиметрового и миллиметрового диапазона длин волн.. Проведено моделирование частотных характеристик микроволновой антенны на двух взаимно связанных диэлектрических резонаторах. Антенна выполнена на паре диэлектрических резонаторах (ДР), установленных на подложке микрополосковой линии, симметрично по обе стороны полоскового проводника. Приведены результаты численного моделирования технических характеристик антенны на ДР.

Ключевые слова: микроволновые антенны, диэлектрические СВЧ резонаторы, численное моделирование.

В работе представлены результаты разработки и моделирования микроволновой антенны на диэлектрических резонаторах, предназначенной для применения в средствах мобильной и космической связи СВЧ диапазона длин волн. Возможности применения диэлектрических резонаторов (ДР) в качестве антенных элементов рассматривались еще в первых работах по исследованию собственных типов колебаний диэлектрических тел с высокой диэлектрической проницаемостью, обладающих внутренними и внешними электромагнитными полями, энергия которых способна излучаться в окружающее свободное пространство, в частности при исследовании спектров колебаний диэлектрической сферы [1].

В конструкциях фильтрующих СВЧ устройств на ДР обычно требовались меры по устранению излучения с помощью экранов, которыми могли служить металлические стенки линий передачи или специальные экранирующие устройства. Способность ДР к излучению была подтверждена в первых реализациях волноводных и полосковых конструкций антенн на ДР, приведенных в работах [2,3]. В настоящее время продолжаются интенсивные исследования антенн на ДР (DRa) в области частот мм- и субмм- диапазонов, вплоть до оптического диапазона [4,5]. С развитием мобильной и космической связи антенны на ДР (DRa) получили распространение в средствах связи микроволнового диапазонов волн. Перспективы применения ДР в антеннах и антенных решетках раскрыты в работах [3-5]. При этом остается важным исследование физических процессов дифракции ДР при возбуждении их сторонними источниками, что открывает новые возможности для совершенствования антенных СВЧ элементов и решеток на основе ДР.

Известные работы по применению диэлектрических резонаторов в качестве антенных элементов ограничивались рассмотрением одиночных ДР с

введением в них разнообразных неоднородностей с целью расширения полосы частот пропускания [6-9]. Известны микрополосковые конструкции ДРа, выполненные на диэлектрических резонаторах, использующихся для создания антенных решеток. Так в патенте [6] возбуждение одного ДР производится при размещении ДР непосредственно на полосковом проводнике МПЛ, что приводит к увеличению тепловых потерь ДР и снижению эффективности излучения ДРа, а расширение рабочей полосы частот достигнуто за счет уменьшения добротности ДР. В техническом решении конструкции [7] прямоугольный ДР, возбуждение которого производится на $H_{11\delta}$. типе колебания, установлен непосредственно на полосковом проводнике МПЛ, и в нем дополнительно выполнено внутреннее сквозное отверстие, перпендикулярное полосковому проводнику, а увеличение эффективности излучения ДРа и расширение рабочей полосы частот достигнуто за счет уменьшения добротности ДР.

В предложенной конструкции ДРа [10] достигнуто расширение функциональности, уменьшение тепловых потерь и повышение уровня излучения. На рис.1 представлена микроволновая антенна на диэлектрических резонаторах, которая содержит микрополосковую линию 1, состоящую из диэлектрической подложки 2, металлизированного основания 3, полоскового проводника 4, и два диэлектрических резонатора 5 и 6, выполненных в виде прямоугольных призм, установленных на диэлектрической подложке 2 симметрично относительно полоскового проводника 4 с возможностью перемещения диэлектрических резонаторов 5 и 6 относительно полоскового проводника 4 и последующего их крепления на диэлектрической подложке 2, так. что широкие грани диэлектрических резонаторов 5 и 6 ориентированы вдоль полоскового проводника 4 и перпендикулярно поверхности диэлектрической подложки 2. ДР изготовлены из высокопроницаемого диэлектрического материала с относительной диэлектрической проницаемостью равной $\varepsilon = 44$ и тангенсом угла потерь $tg\delta = 10^{-4}$. Геометрические размеры ДР: прямоугольная призма 4×4×2 мм. Собственная резонансная частота ДР находится в окрестности 13,6 ГГц.

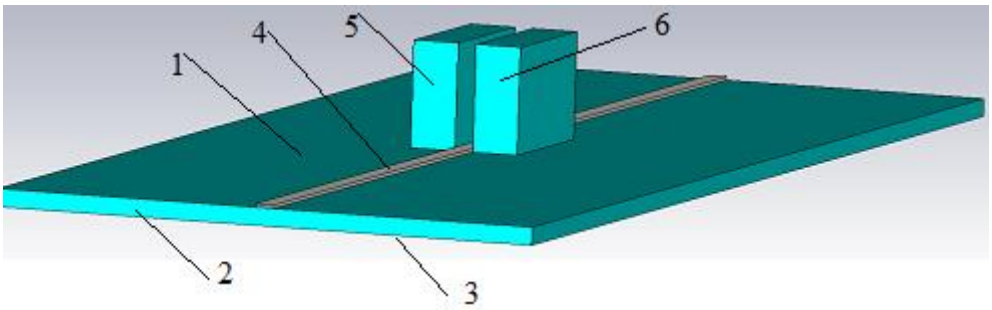


Рисунок 1 – Вид антенны на ДР

Микроволновая антенна на ДР работает следующим образом. На входной порт МПЛ поступает сигнал электромагнитного поля распространяющейся ТЕМ-волны МПЛ, вызывающий возбуждение двух ДР на рабочем низшем типе колебаний $H_{11\delta}$,, как показано на рис.2, что приводит к накоплению

энергии электромагнитного поля в них и излучению этой энергии из ДР в окружающее свободное пространство. Возбуждение ДР может быть осуществлено как в согласованном режиме МПЛ, так и в режиме «холостого хода» (ХХ), в этом случае ДР установлены в пучности магнитного поля МПЛ. Моделирование конструкции ДРа проводилось с помощью программы CST MWS [11].

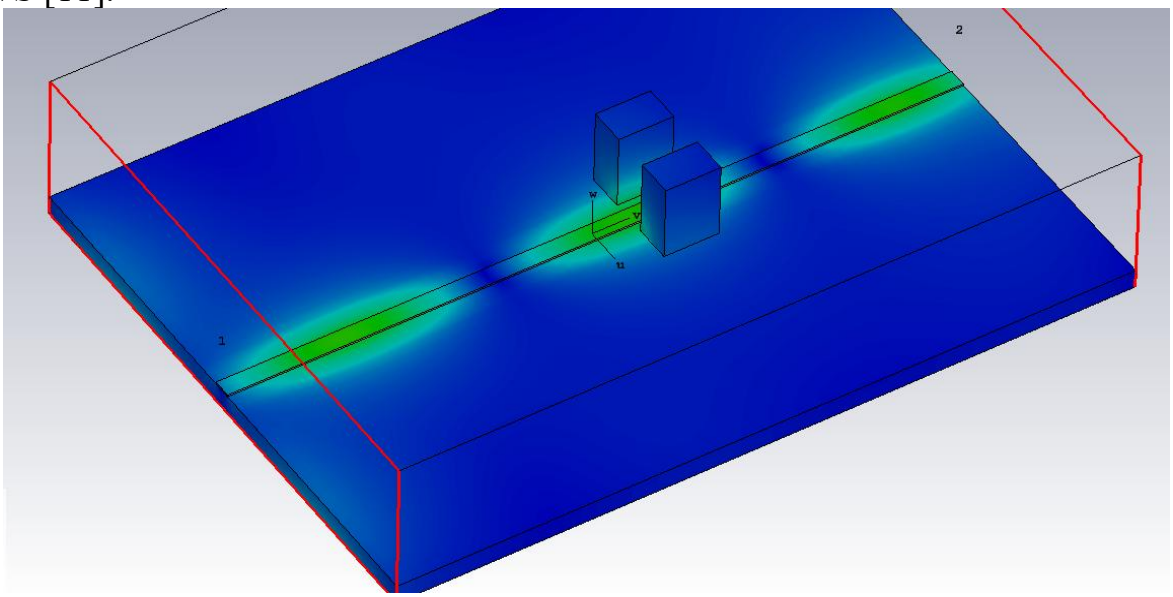


Рисунок 2 – Возбуждение ДР в микрополосковой линии

Электромагнитное поле пары ДР совместно с полем МПЛ наводит поверхностные токи на металлических частях конструкции, что дополнительно влияет на характеристики излучения антенны. На рис. 3 представлена картина распределения поверхностных токов на проводящих частях конструкции ДРа. Из картины распределения поверхностных токов следует, что наибольший вклад дают полосковый проводник и металлическое основание МПЛ

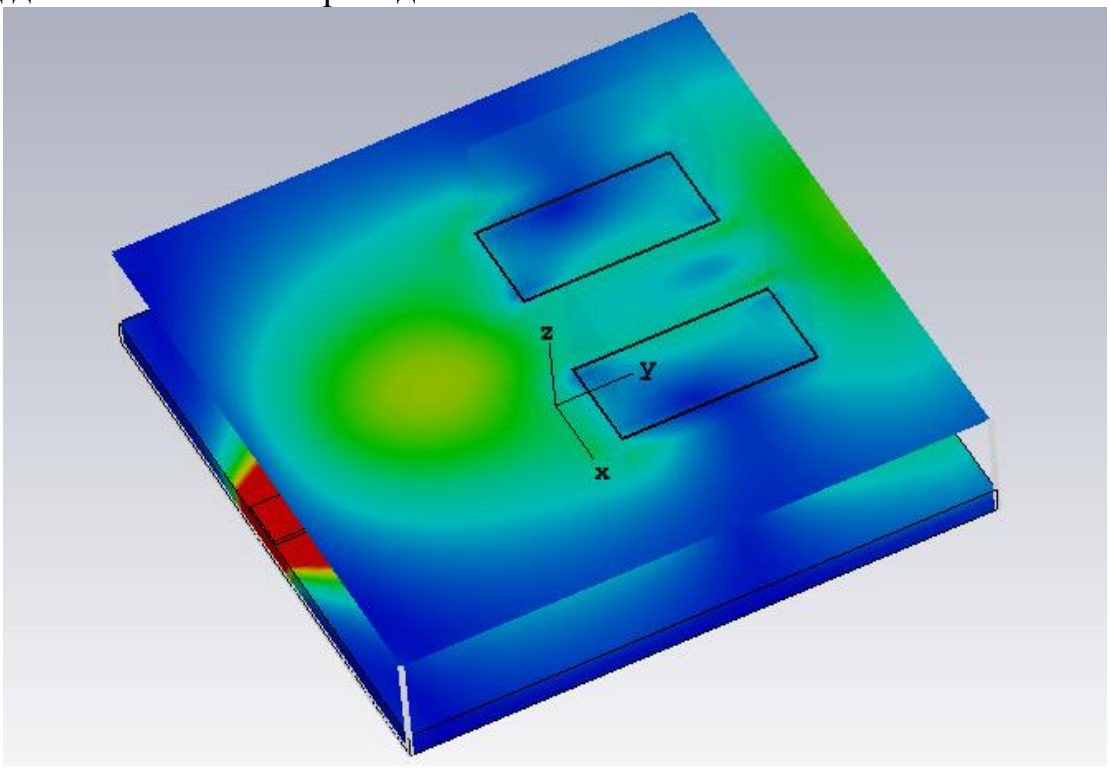


Рисунок 3 – Распределение поверхностных токов на проводящих поверхностях ДРа

На рис. 4, 5 представлены картины векторного электрического поля ***E*** в плоскости широкой грани одного из ДР и векторного магнитного поля ***H*** в плоскости, параллельной плоскости диэлектрической подложки МПЛ на половинной высоте двух ДР, подтверждающих возбуждение ДР на резонансной частоте порядка 13,6 ГГц на низшем магнитном типе колебаний $H_{11\delta}$.

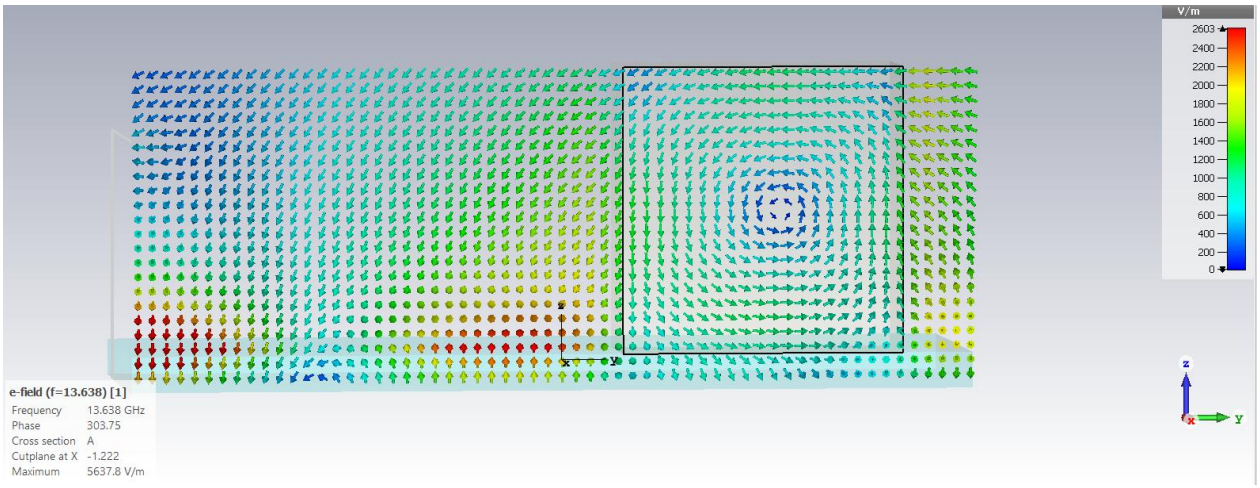


Рисунок 4 – Распределение векторов электрического поля в сечении ДР

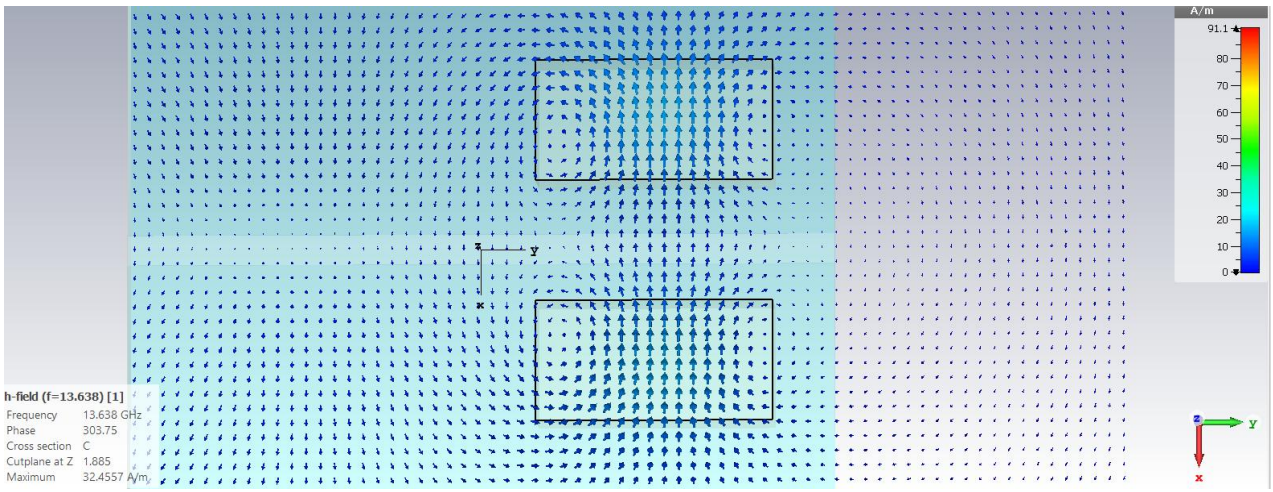


Рисунок 5 – Распределение векторов магнитного поля в сечении ДР

Из картин распределения электромагнитного поля следует, что за счет использования двух ДР со взаимной связью «согласного типа» включения резонаторов, достигается более широкое пространственное распределение результирующего магнитного момента (формируемого магнитным полем ДР) в сравнении с одиночным ДР, что приводит к усилению излучения электромагнитной энергии и к некоторому сужению лепестка диаграммы направленности (ДН) в плоскости, перпендикулярной полосковому проводнику МПЛ. Благодаря размещению ДР на диэлектрической подложке вне полоскового проводника МПЛ достигается уменьшение тепловых потерь ДРа и следовательно повышение отношения потерь на излучение к тепловым потерям. Система двух ДР при этом образует звено двухконтурного фильтра, за счет

чего достигается улучшение избирательности частотных характеристик ДРа.

На рис. 6 и рис. 7 представлены диаграммы направленности (ДН) ДРа для режимов бегущей волны в МПЛ (режим согласованной нагрузки) и для режима стоячей волны (режим холостого хода МПЛ), соответственно, подтверждающих близость их форм и параметров излучения.

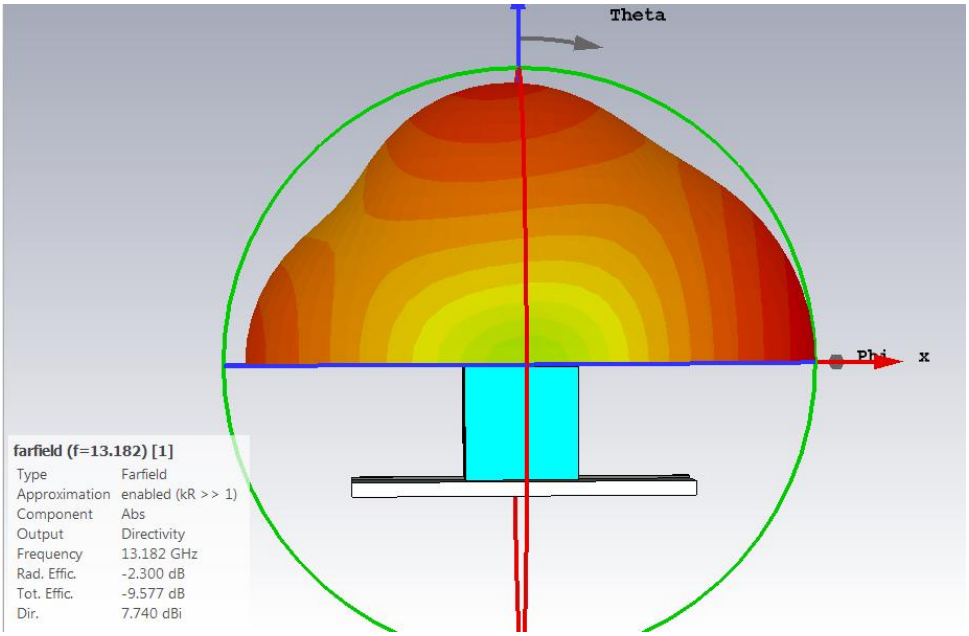


Рисунок 6 – ДН излучения ДРа (режим согласованной нагрузки МПЛ)

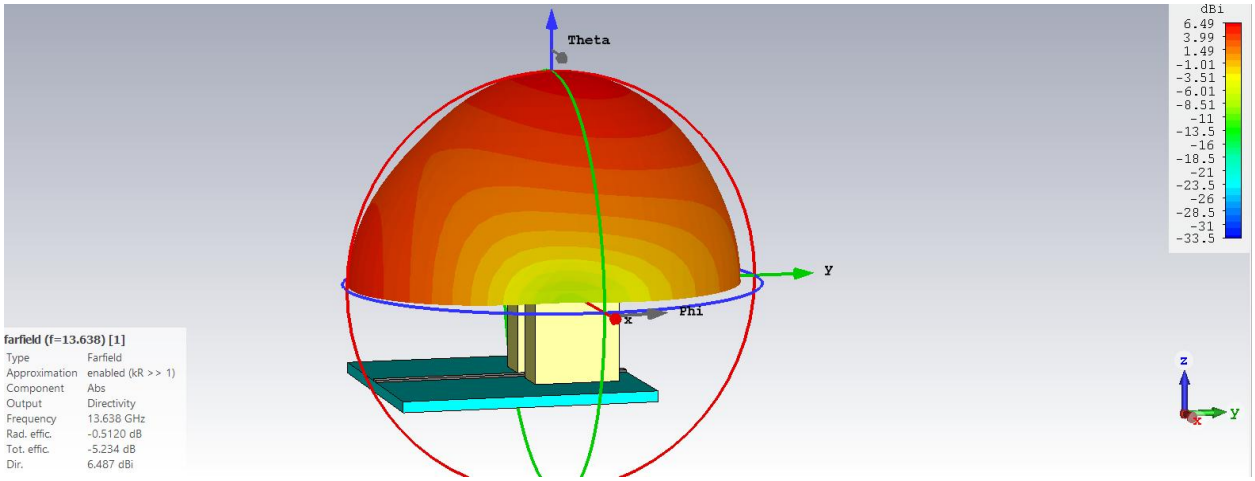


Рисунок 7 – ДН излучения ДРа (в режиме ХХ МПЛ)

На рис. 8, 9 приведены кривые ДН во взаимно перпендикулярных плоскостях сечения ДН. При этом усиление ДРа составило более 6 дБ. Несимметрия кривой рис. 8 обусловлена несимметричным размещением ДР в МПЛ.

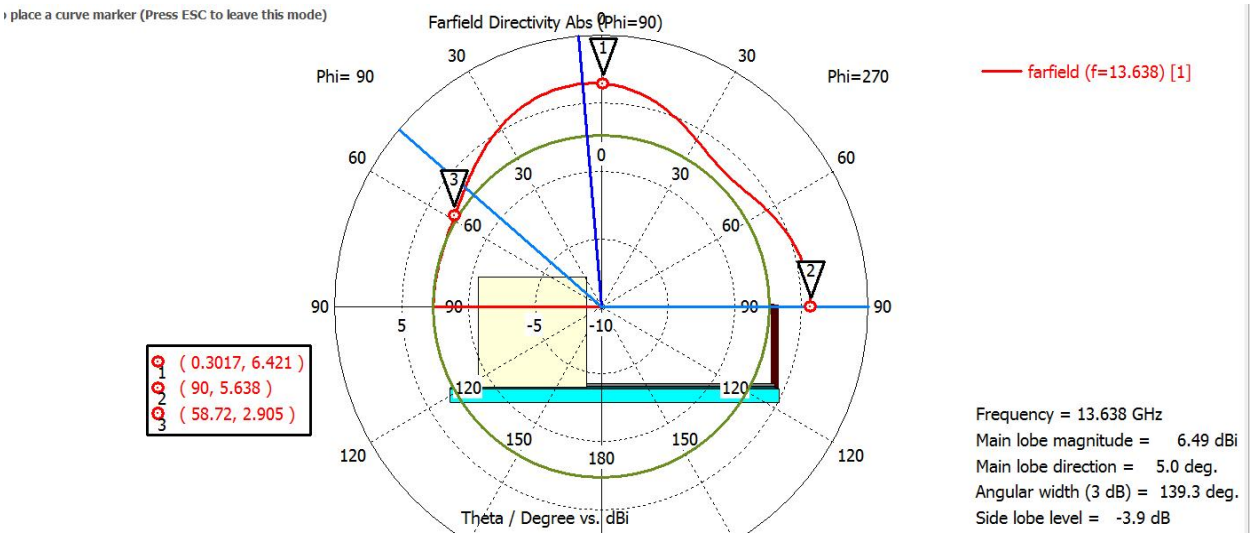


Рисунок 8 – Сечение ДН вдоль оси Z МПЛ

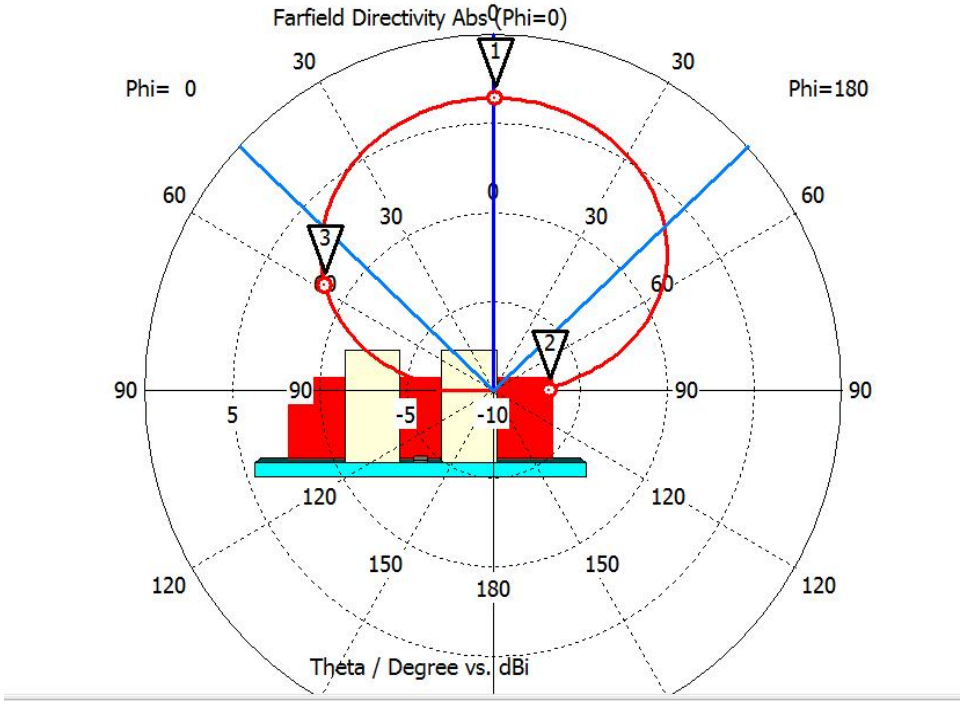


Рисунок 9 – Сечение ДН перпендикулярно оси Z МПЛ

Так как ДР, помимо низшего рабочего типа колебаний, обладает множеством других высших типов колебаний, то для каждого из них ДРа формирует свою соответствующую ДН. В качестве примера дополнительно на рис.10 показано распределение ДН для гибридного типа колебания двух ДР на высшем типе колебаний на частоте 18 ГГц. Однако. из данных рис. 10 следует, что эффективность излучения ДРа в этом случае значительно снижается по сравнению с ДРа, работающей на низшем магнитном типе колебаний ДР.

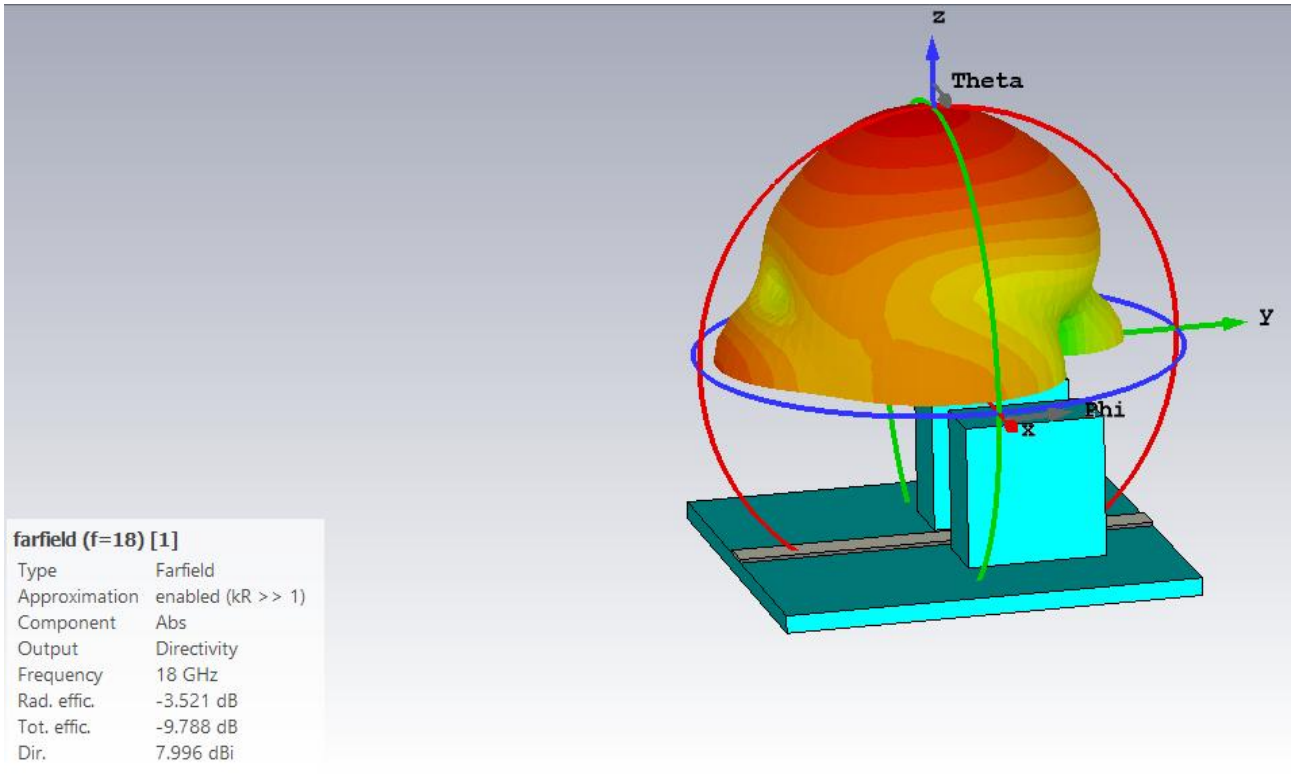


Рисунок 10 – ДН для гибридного типа колебания ДР на частоте 18 ГГц

Заключение

Таким образом, предложенная в работе конструкция ДРа с размещением двух прямоугольных ДР обеспечивает синфазное возбуждение ДР на $H_{11\delta}$ типе колебаний, необходимое для эффективного излучения энергии электромагнитного поля через апертуру раскрыва экрана МПЛ, при этом ДРа выполняет одновременно функции излучения антенного элемента и фильтрации двухзвенного фильтра. Представленные результаты моделирования предложенной ДРа в виде данных распределения электромагнитного поля и диаграмм направленности демонстрируют перспективность применения диэлектрических резонаторов в антенной СВЧ технике сантиметрового и миллиметрового диапазона длин волн, в том числе для создания малогабаритных антенных решеток.

Список литературы

1. Загер О., Тиси Ф. О собственных и вынужденных модах диэлектрической сферы. _ ТИИЭР, 1968, том 66, № 9, с. 203.

2. Алексейчик Л.В., Геворкян В.М, Калугин Е.И. Исследование миниатюрных диэлектрических СВЧ резонаторов в качестве антенных СВЧ элементов, - Труды МЭИ, 1981, выпуск 528, с. 31-40.

3. Long, S. A., M. W. McAllister, and L. C. Shen \The Resonant Cylindrical Dielectric Cavity Antenna, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 31, No. 3, 406 - 412, May 1983

4. Dielectric Resonator Antennas: Designs and Advances, Dipali Soren, Rowdra Ghatak, Rabindra K. Mishra, and Dipak R. Poddar. // Progress In Electromagnetics Research B, Vol. 60, 195-213, 2014

5. Keyrouz S. and Caratelli D. Dielectric Resonator Antennas: Basic Concepts, Design Guidelines, and Recent Developments at Millimeter-Wave Frequencies, SHindawi Publishing Corporation

International Journal of Antennas and Propagation, Volume 2016, Article ID 6075680, 20 pages, http://dx.doi.org/10.1155/2016/6075680
6. US Patent 5,952,972, 11.07.1999 Broadband nonhomogeneous dielectric resonator antenna systems, Мэтью Бьорн Оливер, Medley Яхиа.
7. US Patent 2016/0322708 A1, 03.10.2016 Mahammadreza Taufeh Allodarz and others. Dielectric resonator antenna arrays.
8. Li, B. and K. W. Leung, \Strip-fed rectangular dielectric resonator antennas with/without a parasitic patch, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 53, No. 7, 2200-2207, Jul. 2005.
9. Thame, L. Z. and Z. Wu, \Broadband bowtie dielectric resonator antenna, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 58, No. 11, 3707-3710, Nov. 2010.
10. Патент РФ № 2789727 Микроволновая антенна на диэлектрических резонаторах, Алексейчик Л.В., Курушин А.А., приоритет 04.08.22, гос. регистрация 07.02.23
11. Курушин А.А., Пластиков А.Н. Проектирование СВЧ устройств в среде CST Microwave Studio. – М. Издательство МЭИ, 2012, 152 стр.

MICROWAVE ANTENNA ON DIELECTRIC RESONATORS

L.V. Alekseychik, A.A. Kurushin
National Research University "MPEI", Moscow, Russia
E–mail: AlexeychikLV@mpei.ru

The design of a microwave antenna on dielectric resonators (DR) is proposed, intended for use in mobile and satellite communications technology in the centimeter and millimeter wavelength ranges. The frequency characteristics of a microwave antenna on two mutually coupled dielectric resonators are simulated. The antenna is made on a pair of dielectric resonators mounted on a microstrip line (MSL) substrate, symmetrically on both sides of the strip conductor. The main electrical and technical parameters of the antenna on dielectric resonators (DRa), are considered. Based on the results of modeling the technical characteristics, the advantages of the proposed design of a microwave antenna on DR over known analogues are shown.
Keywords: microwave antennas, dielectric microwave resonators, numerical simulation.

УДК 621.311.001.57

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ТОКОПРОВОДА 10 КВ С ТВЕРДОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

Д.В. Голубев, Д.И. Ковалев, С.А. Елфимов, Т.П. Тарасова, А. Болотин
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», Москва, Россия
E-mail: golubev_dmitry@list.ru

Представлены результаты исследования распределения напряженности электрического поля в токопроводе напряжением 10 кВ с твердой изоляцией. Основное внимание уделено анализу и моделированию электрического поля внутри изоляционного слоя, что позволяет определить области с наибольшей напряжённостью электрического поля и как следствие произвести анализ и дать рекомендации по улучшению конструкции токопровода для повышения его надежности и эффективности.

Ключевые слова: токопровод, твердая изоляция, напряженность электрического поля, высокое напряжение, моделирование, расчет электрического поля, изоляционные материалы, надежность, эксплуатационные характеристики, оптимизация конструкции.

Введение

Современные энергетические системы сталкиваются с рядом вызовов, связанных с необходимостью повышения надежности, эффективности и безопасности эксплуатации оборудования. Одним из ключевых компонентов таких систем являются токопроводы с твердой изоляцией, которые играют важную роль в обеспечении передачи и распределения электроэнергии. Токопроводы, работающие при напряжениях 10 кВ и выше, должны обладать высокой механической прочностью, устойчивостью к внешним воздействиям и минимальными потерями энергии.

Основной задачей проектирования токопроводов является обеспечение их длительной и безопасной эксплуатации. Одним из критических аспектов в этом контексте является распределение напряженности электрического поля внутри изоляционного слоя токопровода. Неравномерное распределение напряженности может привести к локальным перегрузкам, пробоям изоляции и, как следствие, к выходу из строя всего устройства. Поэтому понимание и управление распределением электрического поля являются важными элементами разработки токопроводов.

Введение новых материалов и технологий в конструкцию токопроводов открывает возможности для значительных улучшений их характеристик. Современные высокопрочные полимеры и композиционные материалы позволяют создавать изоляцию с улучшенными электрическими и механическими свойствами. Однако использование новых материалов требует тщательного анализа их поведения в условиях эксплуатации, что включает моделирование и экспериментальные исследования.

Цель данного доклада – представить результаты исследования распределения напряженности электрического поля в токопроводах напряжением 10 кВ с твердой изоляцией. Рассмотрены методы моделирования и расчета электрического поля, проанализировано влияние различных факторов на его распределение, а также предложены конструктивные решения для улучшения надежности токопроводов. Проведенные испытания и их результаты подтверждают эффективность предложенных подходов и демонстрируют потенциал для их широкого применения в энергетических системах.

1. Моделирование токопровода

Процесс моделирования и расчета электрического поля в токопроводах с твердой изоляцией начинается с разработки математической модели, которая точно описывает геометрические и физические параметры токопровода. В данной работе рассматривается токопровод напряжением 10 кВ, для которого важно правильно определить распределение напряженности электрического поля в изоляционном слое.

Для расчета электрического поля использован метод конечных элементов (МКЭ), который позволяет решить уравнения Максвелла для сложных геометрий и неоднородных материалов. Уравнения Максвелла, описывающие электрическое поле, могут быть записаны в виде:

$$\nabla \cdot D = \rho$$
$$\nabla \cdot E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (1)$$

где D – электрическая индукция, ρ – объемная плотность заряда, E– напряженность электрического поля, B – магнитная индукция.

Для статических полей и в случае отсутствия свободных зарядов уравнения принимают упрощенный вид:

$$\nabla \cdot \left(\epsilon \nabla \varphi\right) = 0 \quad (2)$$

где є – диэлектрическая проницаемость материала, φ – электрический потенциал.

На токоведущие шины было подано синусоидальное трехфазное напряжение, которое описывается следующими уравнениями:

$$u_a(t) = U_m \cdot \sin(\omega t)$$
$$u_b(t) = U_m \cdot \sin(\omega t - 2\pi/3) \quad (3)$$
$$u_{\mathrm{c}}(t) = U_m \cdot \sin(\omega t + 2\pi/3)$$

где $u_a(t)$, $u_b(t)$, $u_{\mathrm{c}}(t)$ – напряжения, подаваемые на шины токопровода, U_m – амплитудное значение максимального рабочего напряжения, ω – угловая частота.

Модель токопровода 6(10) кВ, а также геометрическая сетка для решения задачи методом конечных элементов представлена на рис. 1.

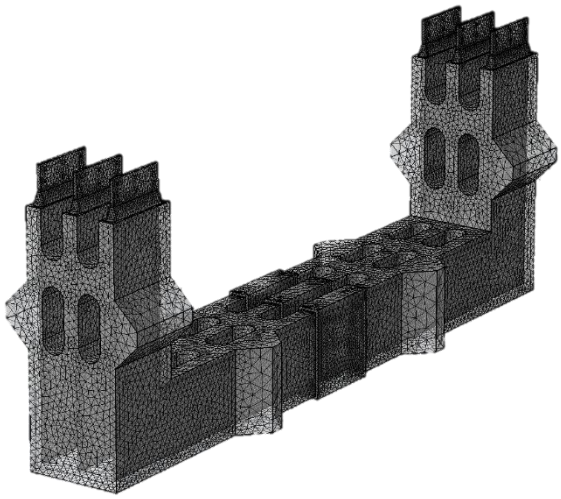


Рисунок 1 – Модель токопровода 6(10) кВ и его расчетная геометрическая сетка

2. Исследование распределения напряженности электрического поля

Результаты моделирования распределения напряженности электрического поля приведены на рис. 2.

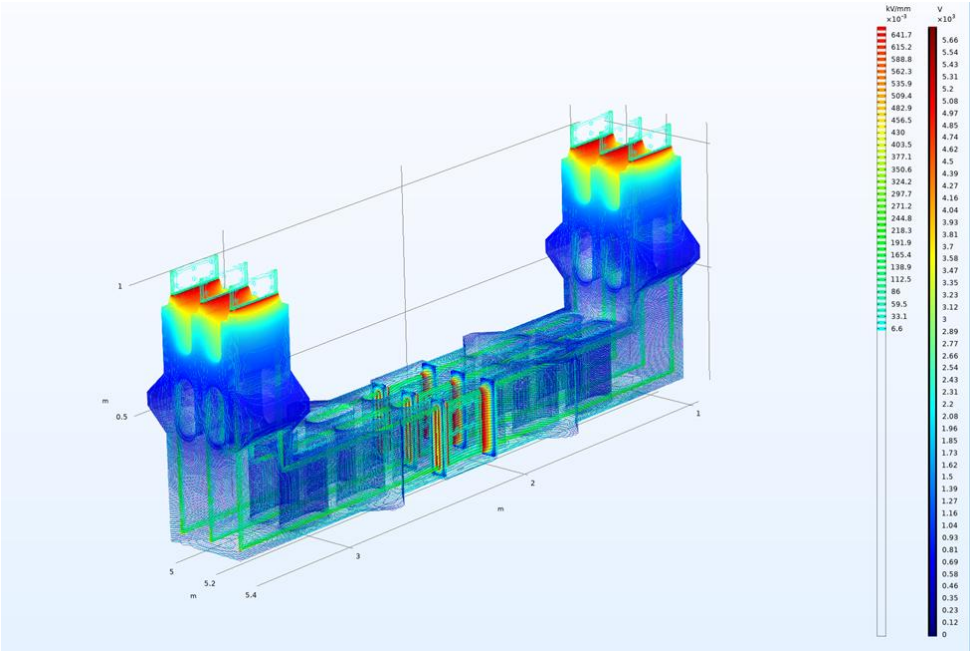


Рисунок 2 – Распределение потенциала и напряженности электрического поля в изоляционном слое токопровода 6(10) кВ

Анализ электрической прочности выполнялся на основе граничных значений допустимой напряженности для сильно неоднородных полей, которые равны 0,5 и 1 кВ/мм соответственно. При этом максимально допустимая напряженность поля внутри токопровода 6(10) кВ составляет 1 кВ/мм (действующее значение). Достижение этого уровня напряженности сопряжено с риском пробоя изоляции, что требует применения дополнительных технологических решений и оптимизации конструкции для уменьшения напряженности до безопасных значений.

Вектор нормальной составляющей напряженности внутри токопровода в среднем составляет около 0,2 кВ/мм, однако в местах угловых изгибов токопроводящей шины могут наблюдаться локальные повышения до 0,65 кВ/мм. Эти показатели остаются ниже максимально допустимых значений, что свидетельствует о наличии запаса по электрической прочности, исходя из максимального допустимого значения 1 кВ/мм.

Для оценки напряженности электрического поля была проанализирована напряженность в поперечном сечении линейной части токопровода 6(10) кВ (см. рисунок 3). На графике отображены распределения действительной и мнимой составляющих вектора электрической напряженности. Стоит отметить, что данные распределения подтверждают соответствие рассчитанных значений реальным условиям эксплуатации, что позволяет сделать вывод о достаточности электрической прочности выбранного изоляционного решения.

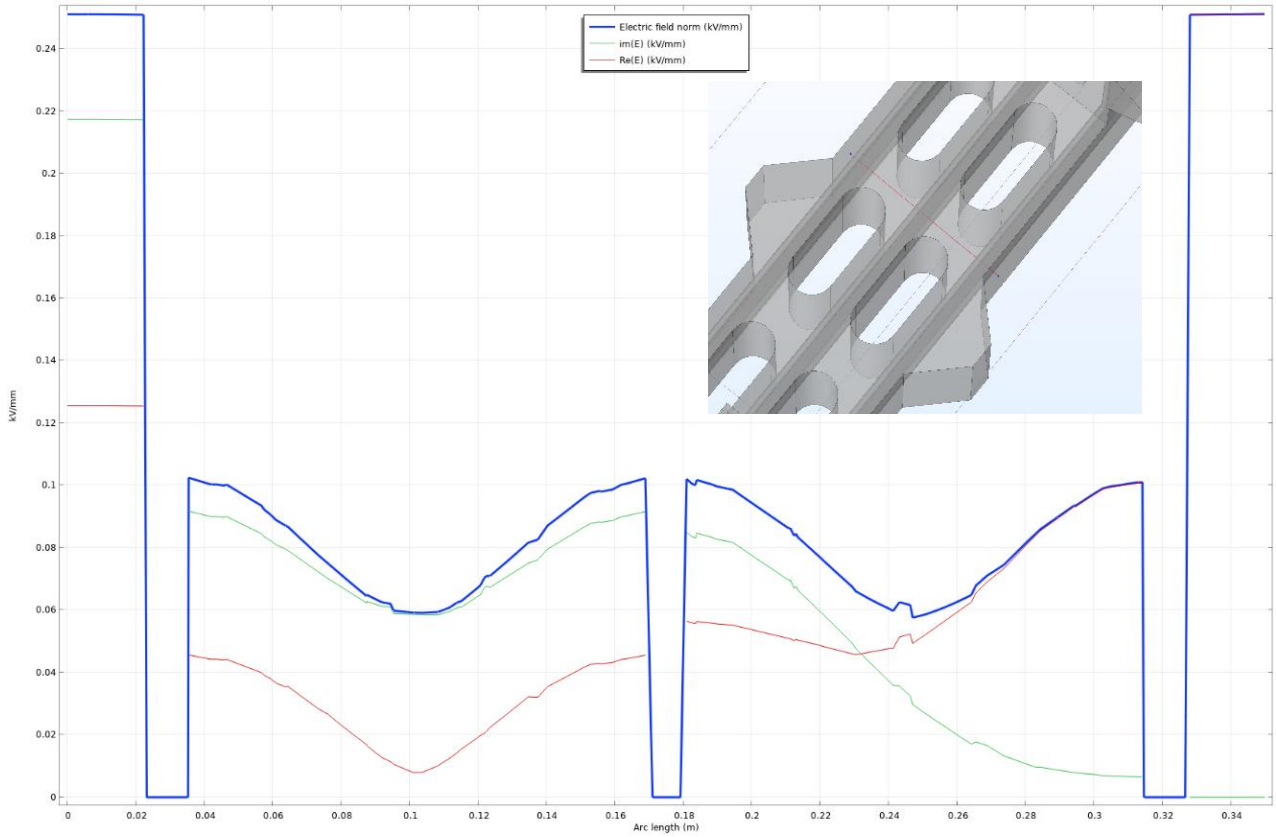


Рисунок 3 – График напряженности электрического поля в поперечном сечении линейной части токопровода 6(10) кВ

Результаты численного моделирования распределения напряженности электрического поля в поперечном сечении линейной части токопровода с номинальным напряжением 6(10) кВ показали, что максимальная нормальная составляющая напряженности составляет $\vec{E}$ = 0,24 кВ/мм. Этот показатель в два раза ниже нижней границы допустимых напряженностей для сильно неоднородных электрических полей внутри литой эпоксидной изоляции.

Низкая напряженность в 0,24 кВ/мм указывает на значительную безопасность и надежность изоляционного решения, так как реальные напряженности значительно ниже критических уровней. Наличие

существенного запаса прочности изоляции снижает риск электрического пробоя и повышает долговечность токопровода, что особенно важно для длительной эксплуатации и минимизации технического обслуживания. Литая эпоксидная изоляция эффективно снижает напряженность электрического поля до безопасных значений, что подтверждает правильность выбора данного изоляционного материала и его пригодность для применения в токопроводах с номинальным напряжением 6(10) кВ. Значительное снижение напряженности электрического поля в два раза ниже допустимых значений указывает на высокую технологическую эффективность применяемой изоляции, что позволяет улучшить надежность токопровода без необходимости значительных технологических изменений или дополнительных мер по усилению изоляции.

Для дальнейшего повышения надежности и безопасности токопровода рекомендуется продолжать мониторинг напряженности электрического поля в реальных условиях эксплуатации для подтверждения результатов моделирования, исследовать влияние различных эксплуатационных факторов, таких как температура и механические нагрузки, на распределение напряженности электрического поля, а также рассмотреть возможность применения композитных материалов и других усовершенствованных изоляционных технологий для дальнейшего улучшения характеристик токопровода.

Аналогичным образом была произведена оценка уровня напряженности электрического поля в продольном сечении линейной части токопровода 6(10) кВ (рис. 4).

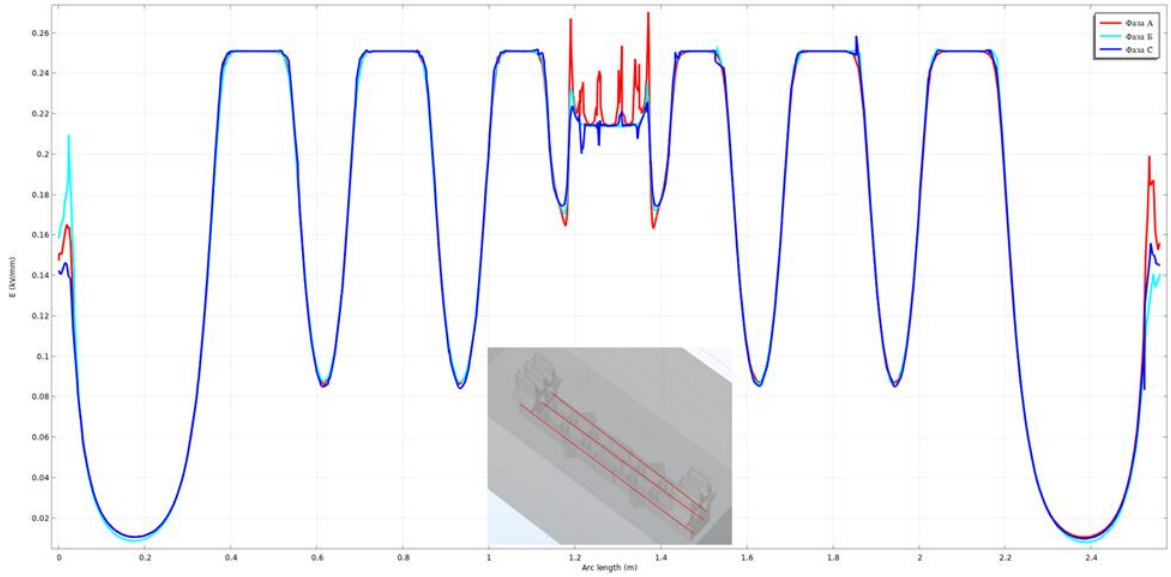


Рисунок 4 – График напряженности электрического поля в продольном сечении линейной части токопровода 6(10) кВ

На рис. 4 представлены зависимости напряженности электрического поля (совокупность действительных и мнимых частей) для трех фаз напряжения. Результаты численного моделирования распределения напряженности электрического поля в продольном сечении линейной части токопровода 6(10) кВ показали, что максимальное значение нормальной составляющей равняется $\overrightarrow{E_{norm}}$ = 0,27 кВ/мм.

Максимальная нормальная составляющая напряженности электрического поля, равная 0,27 кВ/мм, свидетельствует о том, что распределение напряженности в продольном сечении токопровода находится в пределах допустимых значений. Этот уровень напряженности является приемлемым для номинального напряжения 6(10) кВ, что подтверждает эффективность выбранного изоляционного решения.

Дальнейший анализ показал, что напряженность электрического поля равномерно распределена по трем фазам, что свидетельствует о стабильной работе токопровода и отсутствии значительных электрических неоднородностей. Результаты моделирования также указывают на то, что при соблюдении технологических стандартов и контроле качества установки, вероятность возникновения электрического пробоя минимальна.

В рамкой данной работы также было установлено, что наиболее опасным местом с точки зрения повышенной напряженности является пространство на стыке соединения токопроводящей шины и эпоксидного компаунда. График напряженности электрического поля по трем фазам в местах стыка шины и компаунда представлен на рис. 5.

Наибольшее значение нормальной составляющей напряженности электрического поля в угловых частях элементов токопроводов равняется $\vec{E}$ = 0,75 кВ/мм, что превышает значения нижней границы допустимой напряженности при максимальной величине 1 кВ/мм.

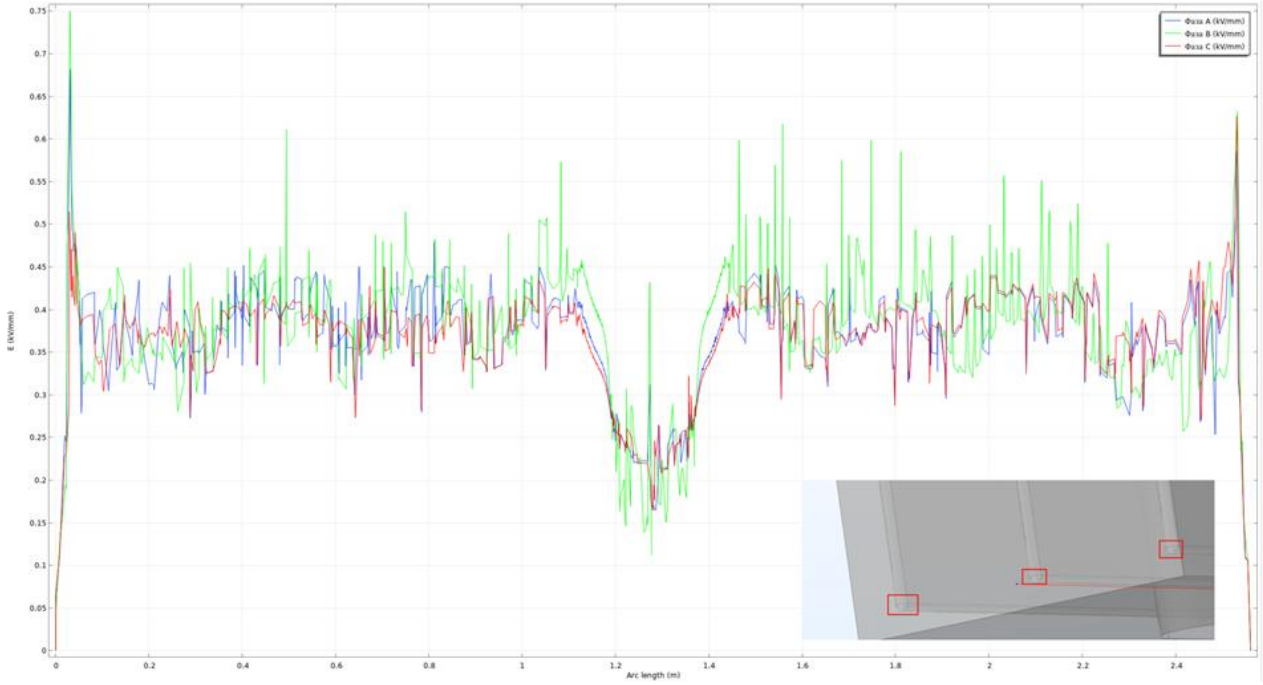


Рисунок 5 – Результаты распределения напряженности электрического в местах стыка компаунда и токоведущей шины токопровода 6(10) кВ

Данный показатель выше нижнего порогового уровня, что говорит о необходимости технологической оптимизации угла токоведущей шины:

- острые края имеют два основных недостатка – резко повышают локальную электрическую напряженность и значительно повышают

внутренние локальные термомеханические напряженности (и то и другое снижает электрическую прочность изоляции);

- наиболее часто эта проблема встает при использовании шин прямоугольного профиля;

- при использовании специальной оснастки можно делать такие шины с радиусом закругления равным половине толщины шины;

- внутренние термомеханические напряженности вблизи краев шин с малым радиусом закругления или без него (бесконечно малым) можно снижать с помощью предварительного нанесения тонких слоев изоляции на шины (технологическое предварительное нанесение небольшого слоя изоляции, либо тонких термоусадочных трубок) толщиной от долей миллиметра до нескольких миллиметров в зависимости от класса напряжения.

Заключение

Исследование распределения напряженности электрического поля для токопровода 10 кВ с твердой изоляцией показало важность тщательного анализа и моделирования электрических характеристик изоляции. Результаты моделирования, выполненного методом конечных элементов, продемонстрировали, что распределение электрического поля значительно зависит от геометрии и состава изоляционных материалов.

Максимальная нормальная составляющая напряженности электрического поля в токопроводе составила 0,24 кВ/мм в поперечном сечении и 0,27 кВ/мм в продольном, что в два раза ниже допустимых значений. Это указывает на высокую надежность и безопасность используемой литой эпоксидной изоляции. Однако, в местах соединения токоведущих шин и эпоксидного компаунда было выявлено локальное повышение напряженности до 0,75 кВ/мм, что требует технологической оптимизации для предотвращения электрического пробоя.

Литая эпоксидная изоляция эффективно снижает напряженность электрического поля, что значительно увеличивает срок службы токопровода и снижает потребность в техническом обслуживании.

Локальные повышения напряженности в местах угловых изгибов токопроводящих шин требуют конструктивных улучшений, таких как использование радиусных закруглений и предварительное нанесение тонких слоев изоляции для уменьшения термомеханических напряжений.

Рекомендуется продолжать мониторинг электрического поля в реальных условиях эксплуатации и изучать влияние температурных и механических факторов для дальнейшего повышения надежности токопровода.

Результаты исследования подтверждают, что применение современных изоляционных материалов и технологий позволяет существенно улучшить эксплуатационные характеристики токопроводов. Внедрение предложенных рекомендаций по оптимизации конструкции токопроводов и продолжение исследований в данной области могут привести к значительному увеличению надежности и эффективности энергетических систем в целом.

Исследование проведено в Национальном исследовательском университете «МЭИ» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (проект № FSWF-2024-0017).

Список литературы

1.Moskvichev, E. V. Information support of mechanical strength analysis of cast-resin insulated busbar systems [Text] / E.V. Moskvichev, S. V. Doronin // Vychisl. Tekhnol. – 2017. – Vol. 22. – Is. 1. – P. 48 – 54.
2. Moskvichev, E. V. Research tasks of mechanical strength and fracture of cast-resin insulated busbar systems [Text] /E.V. Moskvichev, Yu. F. Filippova, N. V. Eremin // Zh. Sib. Fed. Univ. Ser. Tekhn. Tekhnol. – 2017. – Vol. 10. – Is. 1. –P. 17 – 23.
3. Piatek, Z. Magnetic field of a shielded three-phase busbar system [Text] / Z. Piatek, T. Szczegielniak, D. Kusiak, P. Jab³onski // 16th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE). – 2015. – P. 146–148. – (https: // doi.org / 10.1109 / CPEE.2015.7333361).
4.Varivodov, V. N. Busbars for the Switchgears and Internal Connections of the Power Plants and 6- to 750-kV Substations [Text] / V. N. Varivodov, D. I. Kovalev,N. V. Krupenin [et al.] // Russ. Electr. Engin. – 2018. – Is. 89. – P. 298 – 303. – (https: // doi.org / 10.3103 /S1068371218050127).
5. Liu, S. Thermal field calculation in gas insulated busbars based on fluid multiple species transport [Text] / S. Liu, H. Zhou, G. Ma [et al.] // 2017 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomenon (CEIDP). – 2017.
6. Колечицкий Е.С. Расчет электрических полей устройств высокого напряжения / Колечицкий Е.С- М.: Энергоатомиздат, 1983. -168 с.

STUDY OF THE ELECTRIC FIELD INTENSITY DISTRIBUTION IN 10 KV CONDUCTORS WITH SOLID INSULATION

D. Golubev, D. Kovalev, S. Elfimov, T. Tarasova, A. Bolotin
National Research University «MPEI», Moscow, Russia
E-mail: golubev_dmitry@list.ru

Presented are the results of a study on the distribution of electric field intensity in a 10 kV busbar with solid insulation. The focus is on analyzing and modeling the electric field within the insulation layer, which allows for the identification of areas with the highest electric field intensity. Consequently, this analysis provides recommendations for improving the busduct design to enhance its reliability and efficiency.
Key words: busbar, solid insulation, electric field intensity, high voltage, modeling, electric field calculation, insulation materials, reliability, operational characteristics, design optimization.

УДК 621.311.001.57

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТВЕРДЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ВНУТРЕННИХ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Д.В. Голубев, С.А. Елфимов, А.А. Нестеренко
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», Москва, Россия
E-mail: golubev_dmitry@list.ru

Доклад посвящен исследованию эпоксидных компаундов, их классификации, свойствам и применению в электротехнической и электронной аппаратуре. Эпоксидные компаунды делятся на пропиточные, заливочные и герметизирующие, каждый из которых имеет свои особенности и область применения. Пропиточные компаунды используются для пропитки обмоток трансформаторов и других электротехнических изделий, заливочные — для заполнения промежутков между деталями, что позволяет создавать малогабаритные монолитные блоки. В статье представлены основные компоненты, входящие в состав эпоксидных компаундов, и их электрофизические характеристики. Особое внимание уделяется влиянию времени воздействия напряжения на электрическую прочность литой эпоксидной изоляции и расчетам, необходимым для обеспечения надежной работы изоляционных систем. Также рассматриваются механизмы пробоя полимерной изоляции и влияние различных факторов на этот процесс. Приведенные экспериментальные данные и теоретические обоснования позволяют более точно прогнозировать поведение изоляционных материалов в различных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: эпоксидные компаунды, пропиточные компаунды, заливочные компаунды, герметизирующие компаунды, электротехническая изоляция, литая изоляция, частичные разряды.

Введение

Эпоксидные компаунды являются неотъемлемой частью современного электротехнического оборудования, играя ключевую роль в обеспечении надежной изоляции и защиты компонентов. Разнообразие видов эпоксидных компаундов, таких как пропиточные, заливочные и герметизирующие, позволяет использовать их в широком спектре применений от пропитки обмоток трансформаторов до создания монолитных блоков сложной конфигурации.

Основным преимуществом эпоксидных компаундов является их способность обеспечивать высокую механическую прочность, термостойкость и устойчивость к воздействию различных внешних факторов. В зависимости от назначения в состав компаундов вводят различные добавки, такие как пластификаторы, наполнители, отвердители и пигменты, что позволяет оптимизировать их свойства для конкретных условий эксплуатации.

В данной статье рассматриваются классификация эпоксидных компаундов, их состав и основные электрофизические характеристики. Особое

внимание уделяется вопросам электрической прочности литой изоляции и влиянию времени воздействия напряжения на ее характеристики. Анализируются механизмы старения и пробоя полимерной изоляции, а также методы расчета допустимых значений электрической прочности.

Представленные экспериментальные данные и теоретические обоснования позволяют сделать выводы о надежности и долговечности эпоксидных компаундов в различных условиях эксплуатации, что является важным аспектом при разработке и производстве электротехнического оборудования.

1. Электрофизические характеристики эпоксидных компаундов

Эпоксидные компаунды делятся на пропиточные, имеющие низкую начальную вязкость и высокую пропитывающую способность, заливочные (литые) – обладающие вязкостью, обеспечивающей хорошее заполнение различных объемов, а также герметизирующие компаунды. Тот или иной компаунд получается путем подбора соответствующих компонентов.

Пропиточные компаунды используют для пропитки обмоток трансформаторов, дросселей, электрических машин, различных изделий электротехнической и электронной аппаратуры; заливочные – для заполнения промежутков между деталями электротехнических и электронных устройств. Основное преимущество литой изоляции – возможность получения изделий в виде малогабаритных монолитных блоков любой конфигурации, не требующих практически дополнительной обработки.

В состав эпоксидных компаундов в зависимости от назначения кроме эпоксидной смолы или эпоксидной смолы с добавками других смол вводят пластификаторы, наполнители, отвердители, ускорители отверждения, пигменты и другие добавки.

Названия эпоксидных компаундов могут быть различны. За рубежом принято обозначать компаунды отдельным словом (например, «Аральдит»), а в России – аббревиатурой, отражающей некоторое свойство компаунда или его номер (например, КЭ-3 – компаунд эпоксидный третий, ЭПК-эпоксидный пропиточный компаунд и т.д.)

В таблицах 1 и 2 приведены основные электрофизические характеристики российских пропиточных эпоксидных компаундов.

Пропиточные эпоксидные компаунды достаточно широко применяются в измерительных и силовых трансформаторах на низкие и средние классы напряжения.

Таблица 1 - Показатели компаундов горячего отверждения (Д и ЭПК)

Показатель	Д-1	Д-3	ЭПК-4	Д-36	Д-61	Д-112
Плотность, кг/м^3	1230-1250	1230-1250	1230-1250	–	1230-1250	–
Предел прочности при статическом изгибе, МПа	110-143	100-140	110	105	98-110	131

Предел прочности при сжатии, кДж/м^2	10-28	9-21	16	10* 33**	8-19	18-22
Теплостойкость по Мартенсу, °С	105-110	–	–	70-80	103	82
ТК l, 10^{-6} °С$^{-1}$	60	65	65	–	60	–
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)	0,16	0,17	0,17	–	0,16	–
ρ при 25±10 °С	10^{13}	10^{12}	10^{12}	10^{12}	10^{13}	10^{12}
ε_r (10^6 Гц) при 25±10 °С	4,0	4,0-4,1	4,2	4,0*	3,9	3,5***
tg δ (10^6 Гц) при 25±10 °С	0,02	0,019-0,02	0,025** **	0,025*	0,019-0,023	0,01***
$E_{пр}$, МВ/м, при 50Гц в однородном поле (толщина 1,0 мм):						
при 20 °С	–	–	–	22	52	53
при 120 °С	–	–	–	–	27	–
$U_{пр}$, кВ, при 50 Гц между залитыми игольчатыми электродами радиусом 3 мм:						
при 20 °С	31	30	–	–	31	31
при 120 °С	29	17	–	–	31	–
* при 20 °С ** при 120 °С *** при 10^3 Гц **** при 50 Гц						

Таблица 2 - Основные электрофизические характеристики российских пропиточных эпоксидных компаундов типа ВЭС и «монолит»

Показатель	ЭМТ-1 (смола ЭД-16, отвердитель МТГФА)	ПК-11 (смола ЭД-22, отвердитель и-МТГФА)	110
Продолжительность отверждения при 150 °С, ч	2,5-3	2-4	–
Ударная вязкость, кДж/м^2	10-17	12-20	–
Предел прочности при растяжении, МПа:			
при 20 °С	45-50	50-70	40-45
при 130 °С	3,9-4,5	6,5-9,0	3,3-4,4
Относительное удлинение при разрыве, %			
при 20 °С	5,5-10	6-10	4,5-5,0
при 130 °С	20-26	25-30	7,0-11,3
Теплостойкость по Мартенсу, °С			
ρ, Ом·м, не менее:	110-115	114-118	–
при 20 °С	$2\cdot10^{14}$	10^{13}	10^{13}
при 130 °С	$2\cdot10^{12}$	10^{11}	10^9
tg δ (50 Гц), не более:			
при 20 °С	0,003	0,002	0,01
при 130 °С	0,06	0,05	0,15
ε_r (50 Гц), не более:			
при 20 °С	3,9	3,8	–

при 130 °С	4,6	4,8	–
$E_{пр}$, при 20 °С, МВ/м, не менее	26-28	25-30	25

2. Влияние напряжения на прочность изоляции

Важнейшим фактором, влияющим на электрическую прочность литой изоляции, является время воздействия напряжения.

Как правило, вольт - временные зависимости (или «кривые жизни» - Рисунок 1) литой эпоксидной изоляции, находящейся в слабонеоднородном электрическом поле при воздействии напряжения промышленной частоты, хорошо аппроксимируются для средних значений соотношением:

$$E\tau = E\kappa p\,(\frac{\tau}{\tau\kappa p})^{-\frac{1}{m}} \qquad (1)$$

где τ - время до пробоя изоляции при воздействии электрического поля напряженностью $E\tau$, $\tau\kappa p -$ время до пробоя изоляции при кратковременном воздействии электрического поля напряженностью $E\kappa p$, m - показатель степени, характеризующий скорость старения, равный для слабонеоднородного поля 10-15, а в среднем около 12.

В резконеоднородном электрическом поле при аппроксимации «кривых жизни» соотношением (1) зависимость отличается от линейной, а показатель степени m при малых временах воздействия напряжения значительно уменьшается.

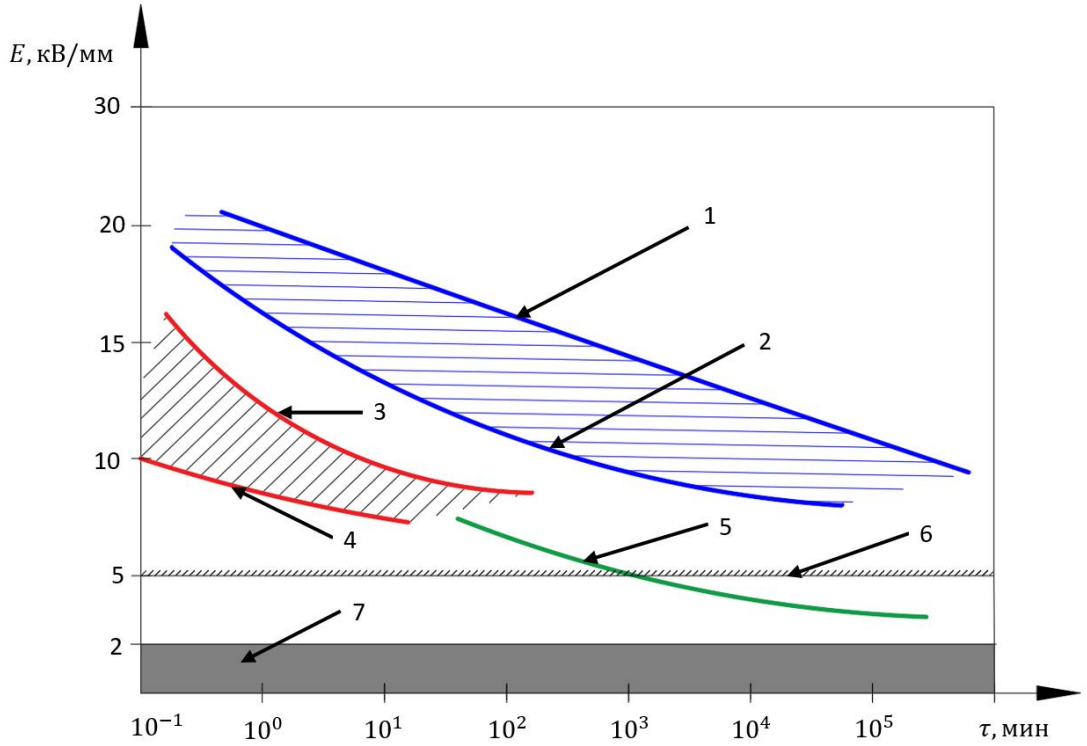


Рисунок 1 - «Кривые жизни» литой эпоксидной изоляции при воздействии напряжения промышленной частоты (где 1- средние значения электрической прочности для изоляции без ЧР (слабонеоднородное электрическое поле); 2- электрическая прочность при вероятности пробоя 0,05 для изоляции без ЧР (слабонеоднородное электрическое поле); 3 – средние значения электрической прочности изоляции при наличии ЧР интенсивностью более 50 пКл (слабонеоднородное электрическое поле); 4- электрическая прочность при вероятности пробоя 0,05 для изоляции с ЧР (слабонеоднородное электрическое поле); 5 - средние значения электрической прочности (резконеоднородное электрическое поле); 6 –нижнее

предельное значение электрической прочности изоляции без ЧР в слабонеоднородном электрическом поле; 7 – допустимая электрическая прочность изоляции резконеоднородном электрическом поле)

Столь существенное снижение среднего значения электрической прочности при длительном воздействии напряжения означает, что выбор толщины изоляционных промежутков в литой эпоксидной изоляции нужно проводить с учетом длительной электрической прочности изоляции.

При выборе допустимых значений электрической прочности литой эпоксидной изоляции в слабонеоднородных электрических полях при длительном воздействии рабочего напряжения необходимо учитывать экспериментально подтвержденную закономерность (2) для малых вероятностей пробоя: оптимальная аппроксимация вольтвременных зависимостей достигается при использовании следующего соотношения, учитывающего нижний предел электрической прочности и соответствие функции распределение времени до пробоя закону Вейбулла (рис. 2):

$$\tau = \tau_{кр}\left(\frac{E_{кр} - E_{\tau н}}{E_{\tau} - E_{\tau н}}\right)^{m}\left(ln\frac{1}{1-P}\right)^{\frac{1}{\beta_{\tau}}} \quad (2)$$

где τ кр - наиболее частое значение времени до пробоя при кратковременном воздействии электрического поля с напряженностью Екр; E_{τ} - напряженность электрического поля при длительном воздействии напряжения; $E_{\tau н}$ – нижний предел электрической прочности при длительном воздействии напряжения; Р- вероятность пробоя; βτ- мера дисперсии.

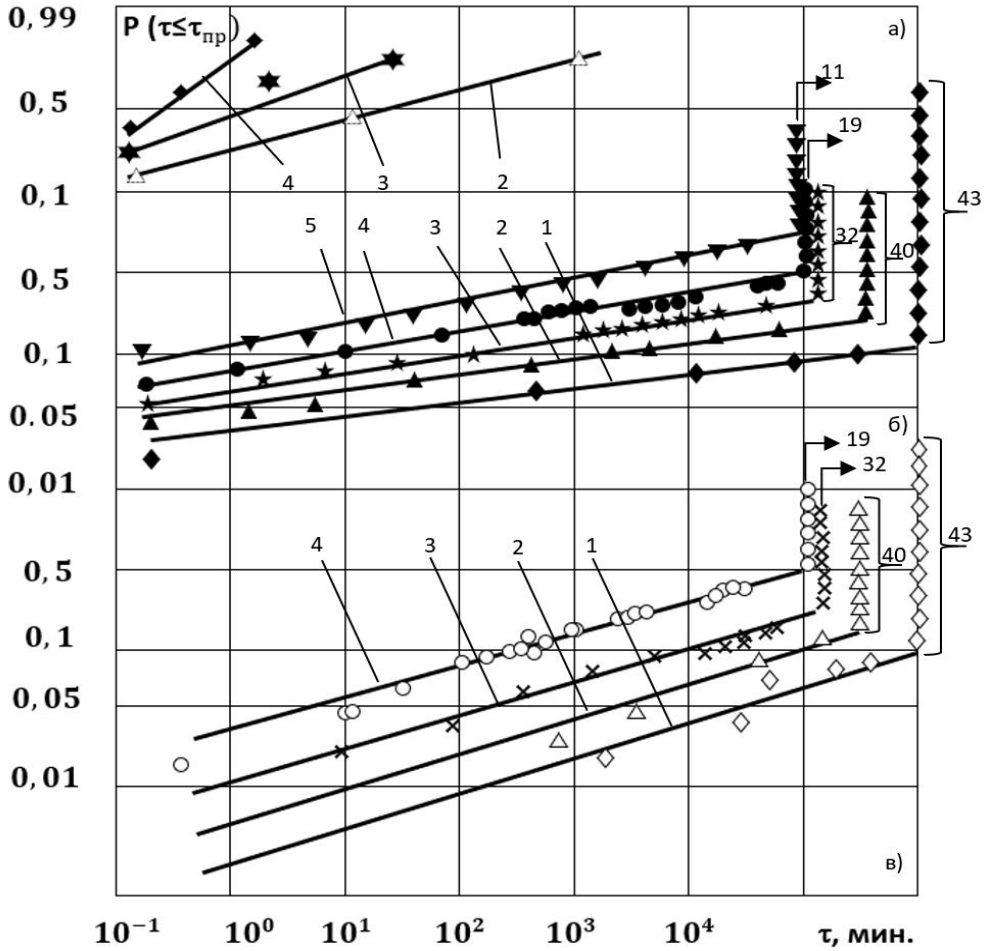


Рисунок 2 - Функция распределения времени до пробоя ЛЭИ (б), в том числе с частичными разрядами (а) и без ЧР (в) при различной напряженности электрического поля (1 – E_τ=14±2 кВ/мм, 2 – E_τ=17±2 кВ/мм, 3 – E_τ=20±2 кВ/мм, 4 – E_τ=24±2 кВ/мм, 5 – E_τ=14±2 кВ/мм)

В Таблице 3 приведены экспериментально определенные меры дисперсии, которые можно использовать при проведении расчетов.

Таблица 3 - Экспериментально определенные меры дисперсии функции распределения времени до пробоя

Мера дисперсии времени до пробоя	Образцы без ЧР	0,35	0,32	0,35	0,315	0,32	0,33	0,315
	Все образцы (без ЧР и с ЧР)	0,16	0,17	0,2	0,24	0,245	0,26	0,28
Напряженность электрического поля, кВ/мм (максимальная напряженность поля)	14		17	20	24	29	32	38

Из приведенной таблицы также следует, если в изоляции отсутствуют частичные разряды, то мера дисперсии не меняется и равна примерно 0,33.

Если в изоляции возможны частичные разряды (ЧР), то на меру дисперсии может влиять величина напряженности электрического поля: с увеличение напряженности мера дисперсии увеличивается от 0,16 до 0,28.

Нижнее значение длительной электрической прочности литой эпоксидной изоляции в слабонеоднородном электрическом поле по данным статистической обработки экспериментальных данных при отсутствии ЧР составляет 10-13 кВ/мм (максимальная напряженность, амплитудное значение), что с учетом коэффициента усиления электрического поля соответствует действующим значениям средней напряженности величиной около 5-7 кВ/мм.

Следует отметить, что это значение близко к экспериментально обнаруженным минимальным значениям напряженности возникновения частичных разрядов для большого числа исследованных образцов. Это факт подтверждает предположение того, нижний предел электрической прочности литой эпоксидной изоляции в слабонеоднородном электрическом поле соответствует условиям, когда возникновение ионизационных процессов внутри диэлектрика оказывается затруднено, что, как оказывается, происходит при локальной напряженности электрического поля в объеме диэлектрика 10-13 кВ/мм (амплитудное значение).

При отсутствии ЧР это значение напряженности электрического поля может быть выбрано в качестве допустимого при выборе толщины изоляции.

Допустимые напряженности электрического поля при небольших значениях «активного» объема могут быть и выше этого значения.

При длительном воздействии напряжения механизм пробоя литой полимерной изоляции обусловлен вероятностной природой нарушения во времени химических связей и разрушения полимера вследствие теплового колебательного движения атомов и молекул с учетом искажения энергетических зон из-за воздействия электрического поля – в начальной стадии, а также на последующих стадиях - накопления механических и электрических микроразрушений изоляции и соответствующего их развития, в том числе под действием частичных разрядов.

Процесс разрушения полимера при воздействии высокого напряжения обычно начинается в локальной области с максимальной напряженностью электрического поля, т. е. около электродов с малыми радиусами кривизны или около включений, содержащихся в компаунде и искажающих электрическое поле. Такими неоднородностями могут, например, явиться поры, скопления частиц наполнителя и т.п.

При небольших градиентах напряженности электрического поля на скорость старения влияет размер радиусов кривизны электродов. При больших градиентах электрическое поле у электрода может искажается объемным зарядом.

Что касается других полимеров, используемых в технике высоких напряжений, то их кривые жизни при воздействии напряжения имеют аналогичный вид, хотя и характеризуются своими особенностями, обусловленными процессом изготовления и эксплуатации.

Например, для изоляции из сшитого полиэтилена при длительном воздействии напряжения наблюдается развитие микроповреждений, развивающих в результате одновременного действия электрического поля и воды, диффундирующей в изоляцию из окружающей среды. Эти повреждения, получившие название водных триингов (ВТ), зарождаются на микроскопических технологических дефектах (на газовых полостях, инородных включениях) и полимерных электропроводящих экранов (на выступах экранов в изоляции, на инородных включениях в экранах).

Поскольку ВТ развиваются под действием электрического поля, преимущественное направление их роста совпадает с направлением вектора напряженности. ВТ растут сравнительно медленно (но достаточно быстро, чтобы преждевременно вывести кабель из строя), но по мере того, как их размеры и степень повреждения полимера внутри ВТ достигают некоторого критического уровня, на ВТ, как на "вторичных" дефектах зарождаются электрические триинги - разветвленные древовидные каналы неполного пробоя изоляции. Электрические триинги растут относительно быстро, рост сопровождается интенсивным выделением и рассеянием энергии за счет того, что в их полых ветвях развиваются частичные разряды. Как только электрический триинг прорастает сквозь всю толщу изоляции наступает электрический пробой.

Заключение

В данном докладе рассмотрены основные аспекты использования эпоксидных компаундов в электротехнической и электронной аппаратуре. Эпоксидные компаунды благодаря своей универсальности и высоких эксплуатационным характеристикам нашли широкое применение в качестве пропиточных, заливочных и герметизирующих материалов. Приведенные экспериментальные данные демонстрируют, что правильно подобранные компоненты компаундов позволяют достигать оптимальных значений механической прочности, термостойкости и электрической прочности, необходимых для надежной работы изоляционных систем.

Эпоксидные компаунды могут быть адаптированы для различных применений, что делает их незаменимыми в производстве электротехнических изделий.

Комплексное использование различных добавок в составе компаундов позволяет значительно улучшить их механические, термические и электрические свойства.

Исследование показало, что электрическая прочность литой эпоксидной изоляции зависит от времени воздействия напряжения, что необходимо учитывать при проектировании изоляционных систем. Выявленные закономерности позволяют прогнозировать поведение материалов в условиях длительного воздействия электрических полей.

Понимание механизмов старения и пробоя эпоксидной изоляции, а также влияние частичных разрядов на эти процессы, способствует повышению надежности и долговечности изоляционных материалов.

Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации состава и структуры эпоксидных компаундов, что в конечном итоге приведет к повышению надежности и безопасности электротехнической продукции.

В заключение, эпоксидные компаунды остаются важным элементом в разработке и производстве высоконадежных изоляционных систем. Будущие исследования и разработки в этой области будут способствовать дальнейшему улучшению их свойств и расширению областей применения, обеспечивая устойчивое развитие электротехнической индустрии.

Исследование проведено в Национальном исследовательском университете «МЭИ» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (проект № FSWF-2024-0004)

Список литературы

1. Pleşa, I.; Noţingher, P.V.; Schlögl, S.; Sumereder, C.; Muhr, M. Properties of Polymer Composites Used in High-Voltage Applications. *Polymers* 2016, *8*, 173. https://doi.org/10.3390/polym8050173
2. Герасимова Виктория Михайловна, «Разработка эпоксидных композиционных материалов с повышенными эксплуатационными свойствами на основе модифицированных волокнистых наполнителей различной химической природы», диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Саратов, 2017
3. Pleşa, I.; Noţingher, P.V.; Schlögl, S.; Sumereder, C.; Muhr, M. Properties of Polymer Composites Used in High-Voltage Applications. *Polymers* 2016, *8*, 173. https://doi.org/10.3390/polym8050173
4. Composite Insulators Market Segmentation by Type (Braced Line Post, Horizontal Vee, Insulated Cross-Arm, Line Post, Pivoting Braced Post and Suspension); By Application (Low Voltage Line and High Voltage Line) – Global Demand Analysis & Opportunity Outlook 2027, Research Nester, Report ID: 1908, Published On: 7 December, 2021
5. Современные изоляционные материалы и среды для высоковольтной техники / В. Н. Вариводов, Д. И. Ковалев, Д. В. Голубев [и др.] // Электротехника. – 2024. – № 4. – С. 13-23. – DOI 10.53891/00135860-2024-4-13-23. – EDN BRVBXH.
6. Канискин В.А. Влияние эксплуатационных факторов на электрические свойства и диагностика полимерной изоляции кабелей. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук, Санкт-Петербург,2000г.
7. Важов В.Ф., Лавринович В.А., Высоковольтная техника в электроэнергетике, Томск, Изд-во Томского политехнического университета, 2011
8. Системы полимерной изоляции в технике высоких напряжений / В. Н. Вариводов, Д. И. Ковалев, Д. В. Голубев, Е. М. Воронкова // Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. – 2022. – № 3. – С. 93-104. – DOI 10.24160/1993-6982-2022-3-93-104. – EDN KDNSNU.
9. Вариводов В.Н., «Электрическая прочность литой эпоксидной изоляции в квазиоднородных электрических полях», Прикладная физика, №5, 2001. с 34-39
10. Varivodov V.N., Kovalev D.I., Zhulikov S.S, Golubev D.V., Romanov V.A., Mirzabekyan G.Z., Technological Aspects of the Use of Cast Polymer Insulation for High-Voltage Switchgear and Busbars, Power Technology and Engineering, 54, pages 915–922 (2021), DOI 10.1007/s10749-021-01306-2, 2021
11. Гинзбург Л.Д., Высоковольтные трансформаторы и дроссели с эпоксидной изоляцией, «Энергия», Ленинград, 1978 год.
12. Системы полимерной изоляции в технике высоких напряжений / В. Н. Вариводов, Д. И. Ковалев, Д. В. Голубев, Е. М. Воронкова // Вестник Московского энергетического института.

Вестник МЭИ. – 2022. – № 3. – С. 93-104. – DOI 10.24160/1993-6982-2022-3-93-104. – EDN KDNSNU.\

ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS OF SOLID POLYMER MATERIALS FOR INTERNAL ELECTRICAL INSULATION STRUCTURES OF POWER EQUIPMENT

D. Golubev, S. Elfimov, A. Nesterenko
National Research University «MPEI», Moscow, Russia
E-mail: golubev_dmitry@list.ru

This report is dedicated to the study of epoxy compounds, their classification, properties, and applications in electrical and electronic equipment. Epoxy compounds are categorized into impregnating, potting, and sealing compounds, each with its specific features and applications. Impregnating compounds are used for impregnating transformer windings and other electrical products, while potting compounds are used for filling gaps between parts, allowing the creation of compact monolithic blocks. The article presents the main components of epoxy compounds and their electrophysical characteristics. Special attention is given to the influence of voltage exposure time on the dielectric strength of cast epoxy insulation and the calculations necessary to ensure the reliable operation of insulation systems. Additionally, the mechanisms of polymer insulation breakdown and the impact of various factors on this process are examined. The experimental data and theoretical justifications provided allow for more accurate predictions of the behavior of insulation materials under various operating conditions.

Key words: epoxy compounds, impregnating compounds, potting compounds, sealing compounds, electrical insulation, cast insulation, partial discharges.

УДК 621.313.333.2

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ «ТИРИСТОРНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ – АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ» С УЛУЧШЕННЫМИ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

М.В Шамсиев С.А, Абдулкеримов, Ф.С. Собиров, С.С. Пардаев
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» (филиал в г. Душанбе), Республика Таджикистан
E-mail: muqim.shamsiev@gmail.com

В настоящее время для управления электроприводами с асинхронными двигателями (АД) широко используются электронные преобразователи частоты (ПЧ). С учетом их высокой стоимости и чувствительности к изменениям производственной среды для электроприводов с невысоким диапазоном регулирования скорости (до 10:1) конкурентоспособным является вариант системы «тиристорный преобразователь ТП-АД с короткозамкнутым (КЗ) ротором». В работе последовательно рассмотрены вопросы построения такой системы в которой для улучшения электродинамических показателей в статорную цепь АД включается токоограничивающая индуктивность на стороне постоянного тока. Отмечается невысокая стоимость такого варианта системы ТП-АД с КЗ ротором и существенный выигрыш по мощности электропривода.

Ключевые слова: преобразователь частоты (ПЧ), тиристорный преобразователь (ТП), индуктивность, механическая характеристика, переходной процесс, асинхронный двигатель с КЗ ротором.

Введение

Широкое использование систем электропривода на базе преобразователей частоты (ПЧ) [1] ограничивается рядом условий:

1) относительно высокая стоимость;
2) сложность схемной реализации и связанные с этим высокие эксплуатационные расходы;
3) ограничения по мощности установок, в основном для электроприводов малой и средней мощности;
4) высокая чувствительность ПЧ к перепадам температуры, к наличию электромагнитных полей, вибраций и механических ударов, что характерно для условий работы на производстве.

Безусловным достоинством ПЧ является плавность и большой диапазон регулирования скорости [2,3,4,5].

С учётом вышеизложенного в работе показана возможность использования электроприводов с тиристорными преобразователями [6], включенными в цепь статора АД с КЗ ротором, которые в комплексе с отрицательной обратной связью по скорости обеспечивают диапазон 10:1. Для ограничения бросков тока и момента используется токоограничивающая индуктивность по стороне постоянного тока [7,8,9].

Предлагаемый способ — это включение индуктивности в статорную цепь двигателя через неуправляемый выпрямитель, то есть исключаются какие-либо переключатели или электронные схемы управления [10,11] и как следствие повышается надежность.

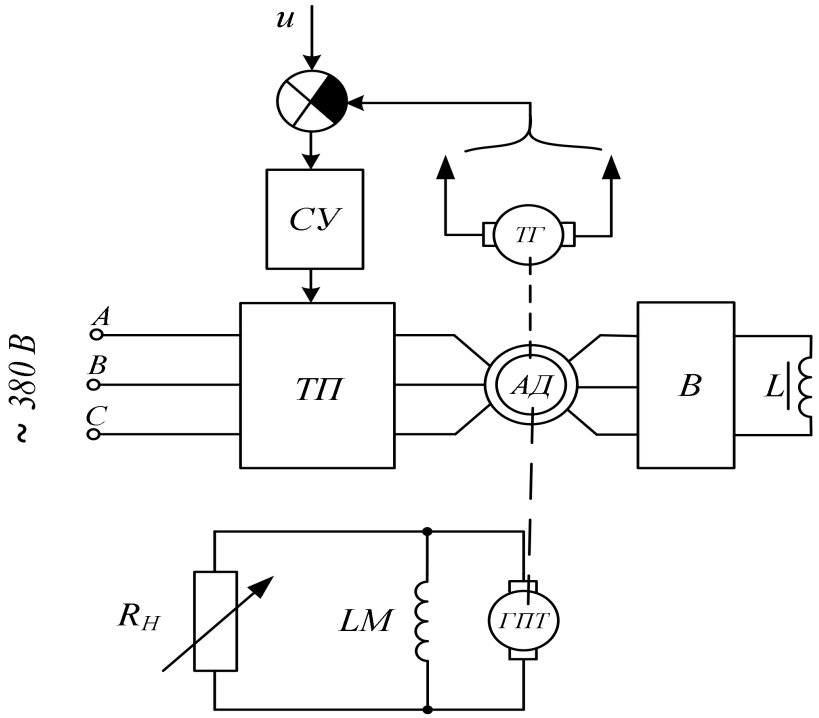


Рисунок 1 – Схема управления ТП – АД с КЗ ротором
с подключением индуктивности в цепь статора

В экспериментах использовалось электрооборудование, перечисленное в табл. 1.

Таблица 1 – Перечень оборудования, используемого в экспериментах

Наименование	**Тип**
Асинхронный двигатель (АД)	АИР63В4У3
Генератор постоянного тока (ГПТ)	П11М
Асинхронный двигатель (АД)	4АР80-4s
Тиристорный преобразователь (ТП)	ТРМ-3М
Тахогенератор	E40S6-500-6-L-5
Выпрямитель (мост Ларионова)	В50-12-6 шт

Расчет катушки индуктивности для двигателя АИР63В4У3 производился по методике [8,12]. Значение индуктивности L = 149 мГн.

Исследование процессов пуска

Для двигателя 4АР80-4s прямой пуск в режиме холостого хода без L и с включением L (рис.2,3).

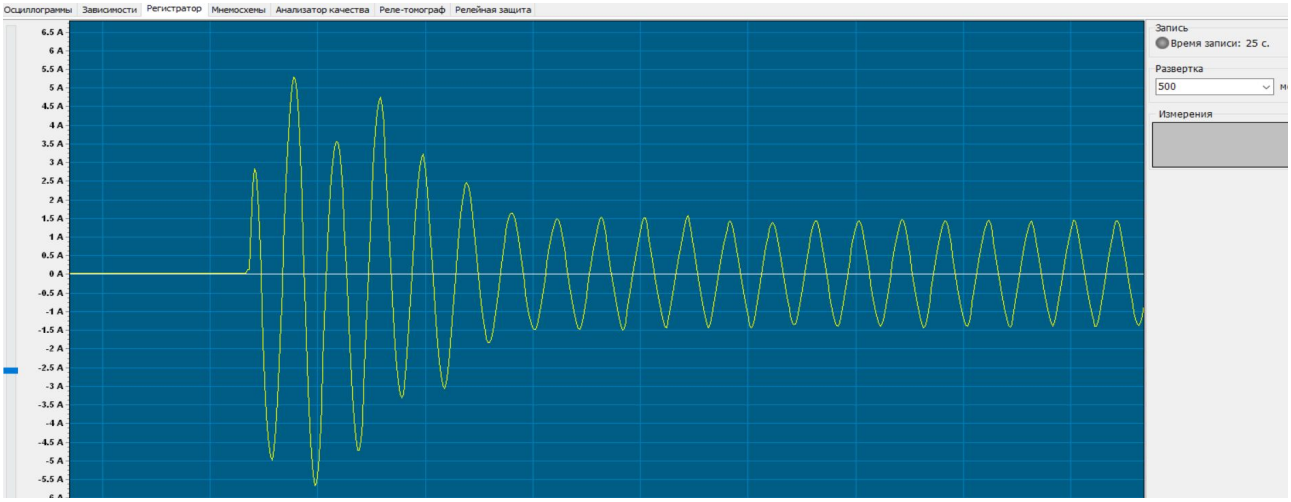


Рисунок 2– Осциллограмма изменения тока при пуске АД с КЗ ротором без *L*

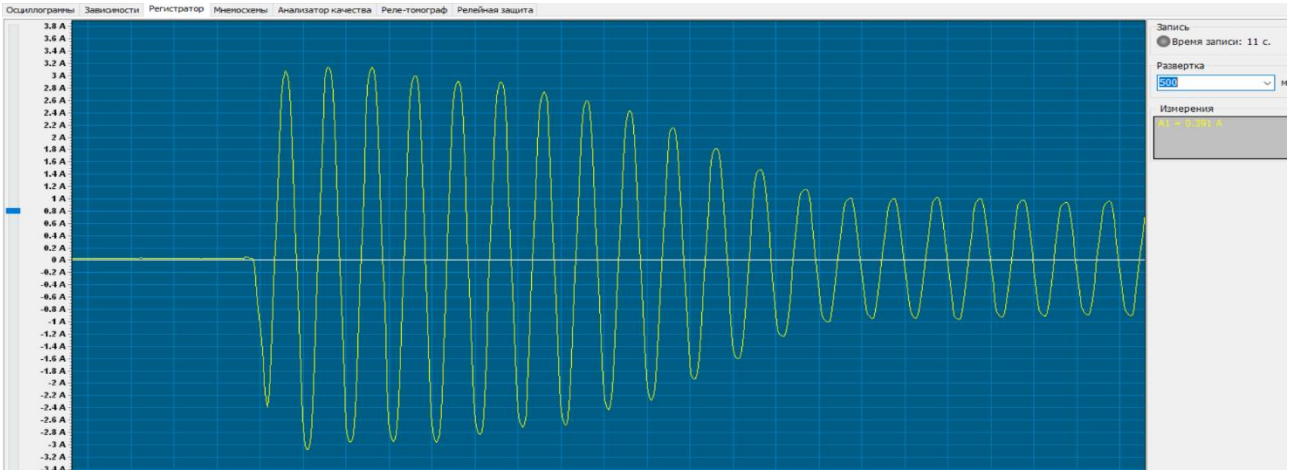


Рисунок 3– Осциллограмма изменения тока при пуске АД с КЗ ротором с *L*

Для двигателя АИР63В4У3 пуск в системе ТП-АД с КЗ ротором с отрицательной связью по скорости в режиме нагрузки с включением *L* и без *L* (рис.4,5).

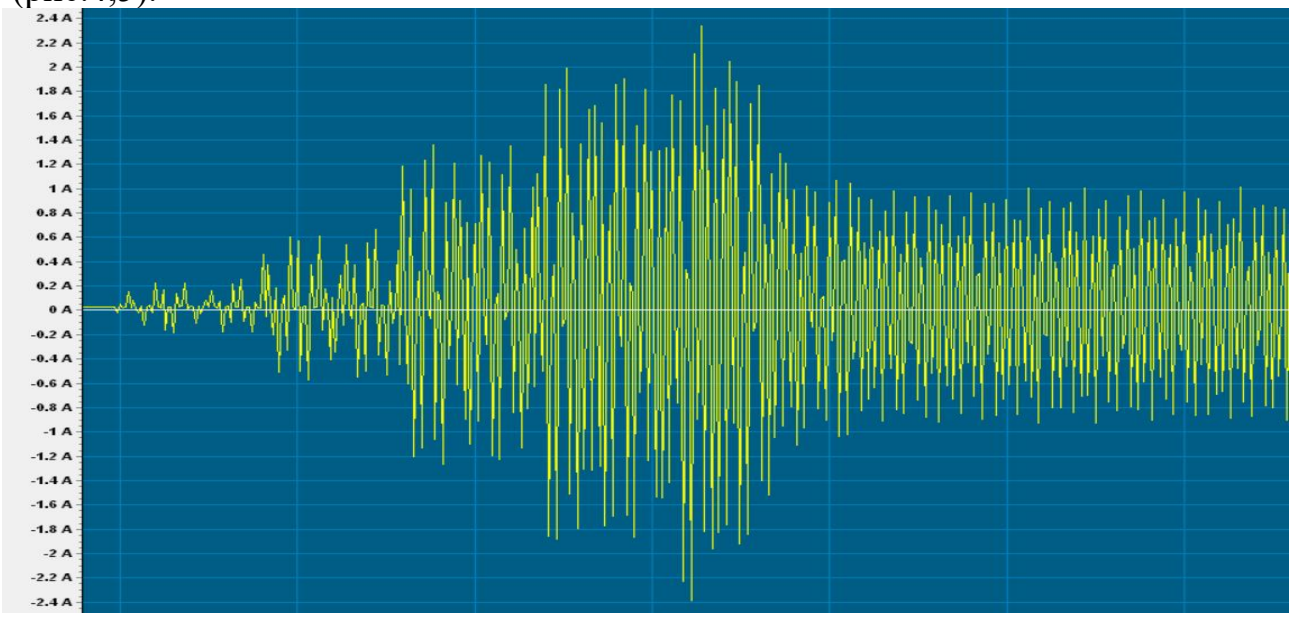


Рисунок 4– Осциллограмма изменения тока при пуске системы ТП-АД с КЗ ротором без *L* при n_{max}=1487 об/мин

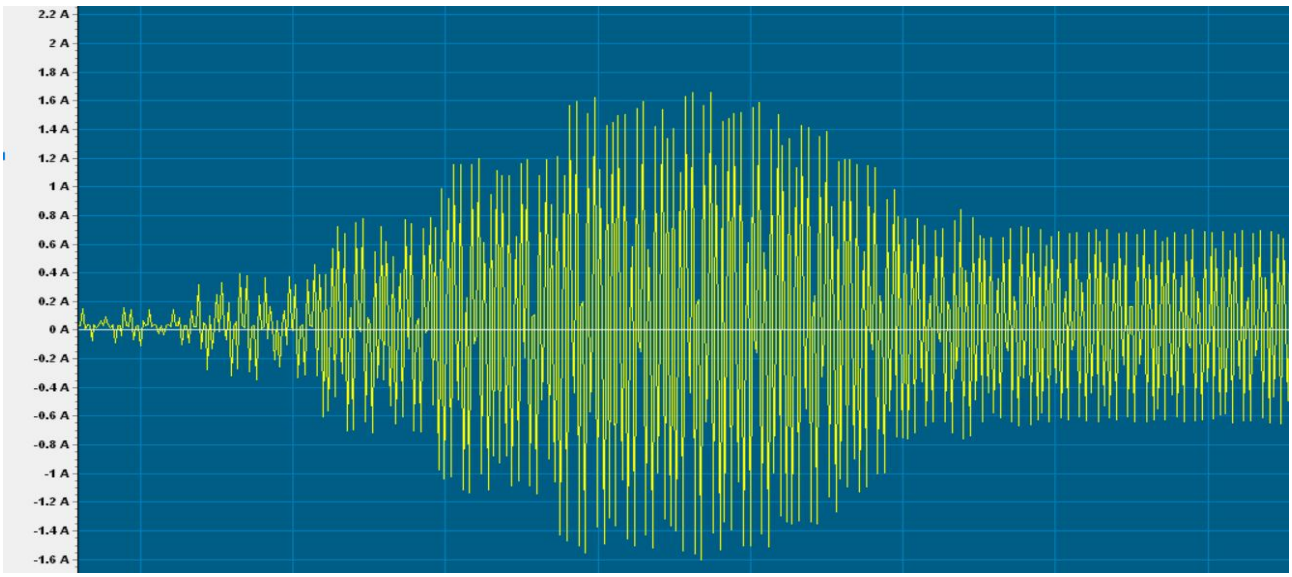


Рисунок 5 – Осциллограмма изменения тока при пуске системы ТП-АД с КЗ ротором с *L* при n_{max}=1487 об/мин

Исследование механических характеристик АД типа АИР63В4У3

Первоначально производился расчет естественной механической характеристики АД с КЗ ротором (по формуле Клосса) (рис.6 кривая 1). Далее изменением нагрузки на валу двигателя с помощью машины постоянного тока производилось снятие экспериментальных механических характеристик (рис.6 кривые 2,3), с наличием *L* (кривая 2) и без *L* (кривая 3). Наглядно показано что включение *L* не влияет на вид механической характеристики.

Также кривые 4,5 демонстрируют возможность достижения диапазона регулирования в пределах $Д = \frac{n_{max}}{n_{min}} = \frac{1487\ об/мин}{35\ об/мин} \approx 42$ в системе ТП-АД с КЗ ротором с обратной связью по скорости при включении *L*.

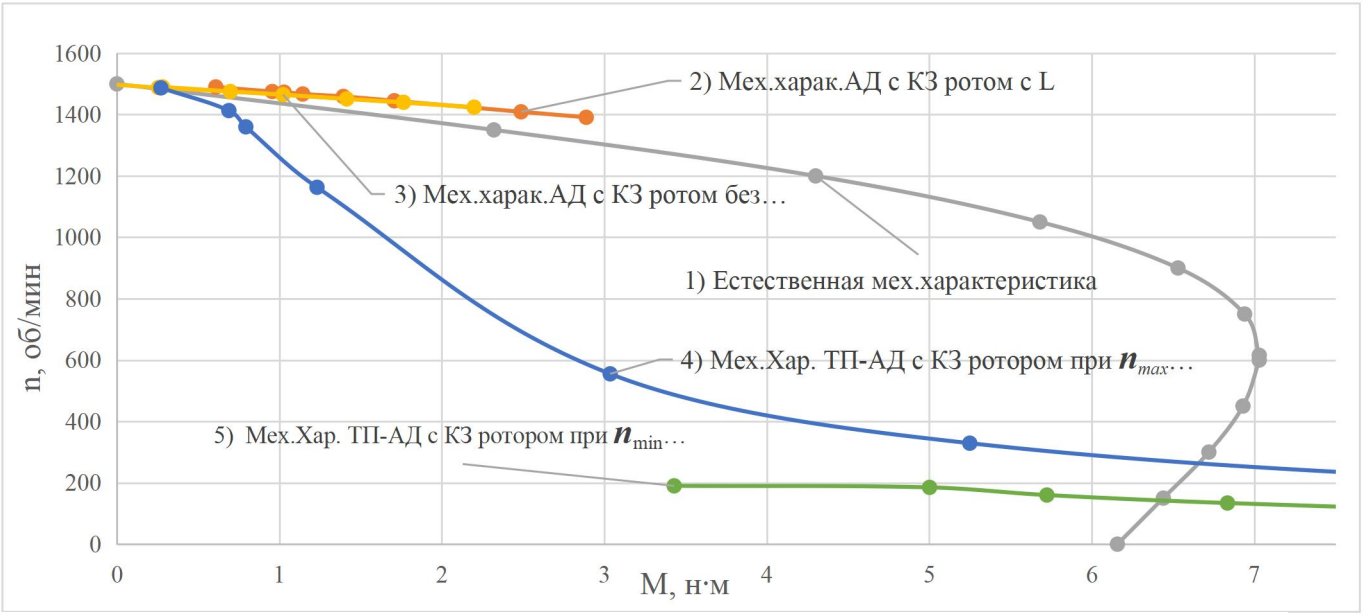


Рисунок 6 - Механические характеристики асинхронного двигателя

Заключение

По результатам проведенных расчетов и экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Включение дополнительной индуктивности по постоянному току, т.е. через выпрямитель, в цепи статора АД с КЗ ротором позволяет практически вдвое сократить бросок пускового тока.

2. Такая же картина наблюдается при сравнительном пуске в системе ТП-АД с КЗ ротором.

3. Использованная инженерная методика расчета дополнительной индуктивности хорошо согласуется с экспериментальными данными.

4. Включение дополнительной индуктивности качественно не влияет на характер механических характеристик системы ТП – АД с КЗ ротором.

5. При этом существенно возрастает диапазон регулирования скорости: если ТП-АД с КЗ рот. без L→D≈10:1, то ТП-АД с КЗ рот. с L→D≈42:1

6. Сравнительный анализ предлагаемой системы и системы ТПЧ-АД с КЗ ротором показывает:

а) существенное упрощение конструкции, при сохранении диапазона регулирования скорости.

б) снижение стоимости на порядок

в) при одинаковых габаритах мощность ТП в сотни раз больше мощности ТПЧ.

г) использование ТП на производстве не предполагает создание дополнительных условий.

Список литературы

1. COMBIVERT, KEB, F4, V.2. Технический паспорт серии преобразователей частоты на мощности 0,75-160 кW.
2. Гейлер Л.Б. «Основы электропривода» Высшая школа, Минск 1972 год, 608 с.
3. Чиликин М.Г., Сандлер А.С., «Общий курс электропривода», Энергоиздат, М., 1981г, 576 с.
4. Электротехнический справочник, т.3, книга вторая, под общей редакцией В.Г. Герасимова и др., Энергоатомиздат, М., 1988г, 616 с.
5. Фираго Б.И., Павлячик Л.Б. Регулируемые электроприводы переменного тока. М.: Техноперспектива, 2006, 363 с.
6. ЭКМ – Электротехническая компания Меандр. Трёхфазный тиристорный регулятор. ТРМ – 3М (30-80А) ТУ3428-006-31928807-2014. Описание и руководство по экиплуатации.
7. Шамсиев М.В., Шамсиев А.М. Способ стабилизации тока статора асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Материалы международной научно-практической конференции. «Водно-энергетические ресурсы- основа реализации международного десятилетия действий» «Вода для устойчивого развития, 2018-2028 годы. Душанбе-2019г. С 50-55.
8. Шамсиев М.В., Шамсиев А.М. Абдулкеримов С.А. Ограничение бросков тока в электроприводах, содержащих асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором. Журнал «Электричество» №2,2020. С 22-26.
9. Шамсиев М.В, Собиров Ф. Разработка системы ограничения пускового тока АД с КЗ ротором. Сборник тезисы XXVII международной научно-технической конференции студентов и аспирантов “Радиоэлектроника, электротехника и энергетика”, 11-12 марта 2021 г.– ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Издательский дом МЭИ, 2021. В 3 т. Т. 3. – С.1146.

10. Сидоров С.Н., Боровиков М.А., Кудряшов П.В. «Способ ограничения пускового тока асинхронного двигателя» патент РФ № 2253179, 2005 год.
11. Ванурин В.Н., Пономаренко К.Б., Креймер А.С. «Снижения пускового тока асинхронных двигателей изменением параметров статорной обмотки» Научный журнал КубГАУ№87, 2013 год, с 1-14.
12. Дьяков В.И. «Типовые расчеты по электрооборудованию»; Высшая школа, М., 1991г, 160 с

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF A THYRISTOR CONVERTER SYSTEM - ASYNCHRONOUS MOTOR WITH A SHORT-CIRCUITED ROTOR WITH IMPROVED ELECTRODYNAMIC CHARACTERISTICS

M.V. Shamsiev S.A, Abdulkerimov, F.S. Sobirov, S.S. Pardaev
National Research University «MPEI», Dushanbe, Republic of Tajikistan
E-mail: muqim.shamsiev@gmail.com

Currently, electronic frequency converters (FC) are widely used to control electric drives with asynchronous motors (AM). Considering their high cost and sensitivity to changes in the production environment, a competitive option for electric drives with a low speed regulation range (up to 10:1) is the system variant of a thyristor converter TC-AM with a squirrel-cage rotor. This paper sequentially examines the issues of constructing such a system in which a current-limiting inductance is included in the stator circuit of the AM on the direct current side to improve electrodynamic performance. The low cost of this TC-AM system variant with a squirrel-cage rotor and the significant gain in electric drive power are noted.
Key words: Frequency converter (FC), thyristor converter (TC), inductance, mechanical characteristic, transitional process, asynchronous motor with a squirrel-cage rotor.

Бутырину Павлу Анфимовичу 75 лет

Исполнилось 75 лет известному ученому в области электротехники, члену-корреспонденту РАН, доктору технических наук, профессору, главному редактору журнала «Электричество» Павлу Анфимовичу Бутырину.

П.А. Бутырин родился 15 августа 1949 г. в Челябинске. В 1974 г. окончил вечернее отделение энергетического факультета Челябинского политехнического института (ЧПИ). Во время учебы работал техником, старшим техником, инженером в институте Тяжпромэлектропроект, учебным мастером в ЧПИ, после окончания вуза – стажером-преподавателем, ассистентом, доцентом ЧПИ. В 1975–1979 гг. проходил стажировку и обучение в очной аспирантуре Ленинградского политехнического института, где в 1980 г. защитил кандидатскую диссертацию «Разработка принципов макромоделирования вентильных цепей на основе методов решения некорректных задач».

В 1981 г. по приглашению научного руководителя (ныне академика РАН) К.С. Демирчяна П.А. Бутырин переезжает в Москву и работает на кафедре Теоретические основы электротехники (ТОЭ) Московского энергетического института (МЭИ) ведущим инженером, старшим научным сотрудником, профессором и с 1999 по 2020 гг. – заведующим кафедрой ТОЭ. В 1991–2000 гг. П.А. Бутырин работал также старшим научным сотрудником Института высоких температур РАН, позже возглавлял Институт электроэнергетики МЭИ и научно-технический совет ПАО «Россети». В 1994 г. в МЭИ защитил докторскую диссертацию «Разработка аналитических и численно-аналитических методов решения уравнений состояния электрических цепей». В 2000 г. избран членом-корреспондентом Российской академии наук.

Область научных интересов юбиляра весьма широка и охватывает как проблемы математического моделирования, информационных технологий,

теории электрических цепей и систем, так и социологические вопросы развития науки и техники.

Широкую известность у специалистов получила написанная П.А. Бутыриным в соавторстве с академиком К.С. Демирчяном книга «Моделирование и машинный расчет электрических цепей» (1988 г.), а всего им опубликовано свыше 200 научных работ, ряд учебников по электротехнике для высшего и среднего образования. В 1995 г. за цикл работ «Теория, проектирование и моделирование управляемых машинно-вентильных систем» П.А. Бутырин с соавторами был удостоен премии им. П.Н. Яблочкова РАН. Подготовленные им специалисты высшей научной квалификации успешно развивают актуальные направления электротехнической науки в России, странах ближнего и дальнего зарубежья. Его деятельность в 2005 г. отмечена также премией Правительства РФ в области образования.

П.А. Бутырин проводит большую научно-организационную, учебную и методическую работу. Является президентом Академии электротехнических наук РФ, главным редактором журналов «Электричество» и «Известия Академии электротехнических наук РФ», заместителем главного редактора журнала «Известия РАН. Энергетика», членом редколлегии ряда научно-технических журналов.

П.А. Бутырин удостоен званий «Почётный энергетик Минэнерго» (2010 г.), «Почётный работник топливно-энергетического комплекса» (2015 г.), «Почётный работник высшего профессионального образования» (2017 г.).

Сердечно, от всей души поздравляем Павла Анфимовича с юбилеем, желаем ему здоровья и успехов в его плодотворной деятельности на благо развития отечественной электротехники.

Коллеги, ученики, друзья

СОДЕРЖАНИЕ

Организаторы конференции……..... 3

ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ

Теплоемкость в конденсированных состояниях при высоких температурах..... 5
П.Н. Николаев

К 120-летию со дня рождения Поливанова Константина Михайловича……..... 5
С.А.Абдулкеримов, П.А. Бутырин, С.В. Серебрянников, Ф.Н. Шакирзянов

СЕКЦИЯ 1:
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В СОВРЕМЕННОЙ ФИЗИКЕ

Исследование параметров электромагнитного поля в коаксиальном кабеле на разных частотах тока..... 11
А.Р. Лепешкин, А.Б. Кувалдин, М.А. Федин, М.А. Булатенко, М.Л. Зотов, А.А. Ушаков

Исследование взаимного влияния электромагнитных полей индукторов при нагреве дисков турбин..... 17
А.Р. Лепешкин, М.А. Федин, А.Б. Кувалдин, А.В. Данченко, Ц. Ху, Ч. Гуанхуа

Конечно-элементное моделирование электромагнитных полей и практическая реализация электромагнитного преобразователя числа фаз для однофазных индукционно-резистивных нагревателей ……... 24
М.А. Федин, А.Р. Лепешкин, Е.В. Качалина, С.А. Федина, Д.А. Жгутов, М.Ф. Тупеков

О влиянии магнитоимпульсной обработки на доменную структуру фольг из аморфного сплава $Fe_{73}(SiBNb)_{27}$ с добавкой 1% меди..... 31
Т.П. Каминская, П.А. Поляков, М.А. Степович, М.Н. Шипко, А.В. Стулов, Е.С. Савченко

Рентгенодифракционные и мёссбауэровские исследования модификации свойств бентонита наночастицами оксидов железа..... 36
А.В. Носков, О.В. Алексеева, Д.Н. Яшкова, А.В. Агафонов, М.Н. Шипко, М.А. Степович, В.Г. Костишин, Е.С. Савченко

Магнитные свойства и особенности структуры нанокомпозитов на основе ферритов $CoFe_2O_4$, $NiFe_2O_4$, $CuFe_2O_4$, полученных в условиях подводной плазмы…..... 42
М.Н. Шипко, М.А. Степович А.В. Хлюстова, А.В. Агафонов, Н.А. Сироткин, Е.С. Савченко

Напряженность электрического поля при электрическом разряде в жидкости..... 48
Ю.А. Жукова, Д.Н. Герасимов

СЕКЦИЯ 2:
ФИЗИЧЕСКИЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СПИНОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Формирование светлых солитонов огибающей в дважды отрицательных бигиротропных средах на основе ферро- и антиферромагнитных полупроводников..... 52

А.В. Жабова, С.В. Гришин
О возможности использования данных геостационарного детектора молний для изучения гиротропных явлений в волноводе земля - ионосфера..... 59
А.Л. Филатов
Модуль и ориентация вектора Пойнтинга поверхностной спиновой волны в касательно намагниченной ферритовой пластине..... 64
Э. Г. Локк, С. В. Герус
Возбуждение объёмными спиновыми волнами локальных мод на круглом отверстии в ферритовой плёнке..... 70
С. В. Герус, Э. Г. Локк
Направление потока энергии поверхностной спиновой волны в касательно намагниченной ферритовой пластине..... 74
Э. Г. Локк, С. В. Герус

СЕКЦИЯ 3:
ФИЗИКА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Терагерцовая спектроскопия энергетических состояний ионов лития в эндофуллерене $Li@C_{60}PF_6$..... 81
С.С. Жуков, А.В. Мелентьев, Н.Д. Орехов, Д.А. Юламанова, Ю.В. Цукова, П.А. Жиляев, Е.С. Жукова, H. Suzuki, M. Nakano, S.Aoyagi, Б.П. Горшунов
Особенности решения задачи о неоднородном распределении тока в магниторезистивном элементе со смешанными граничными условиями в магнитном поле..... 86
В.С. Шевцов, В.В. Амеличев, Д.В. Костюк, Д.В. Васильев, С.И. Касаткин, П.А. Поляков
Анизотропия в плоскости феррит-гранатовых пленок: особенности проявления..... 91
А.В. Матюнин, Г.М. Николадзе, П.А. Поляков
Особенности перемагничивания магнитных нанослоев синтетического антиферромагнетика спин-туннельного элемента в рамках модели когерентного вращения..... 97
Д.В. Васильев, П.А. Поляков, В.В. Амеличев, Д.В. Костюк, О.П. Поляков, С.И. Касаткин
Методика расчета и оценка влияния аэрозольных частиц на формирование электрических разрядов в воздухе..... 104
А.В. Галимова, А.А. Белогловский, С.В. Белоусов
Магнитное поле однородно намагниченной микрополоски с синусоидальным рельефом..... 109
М.А. Пятаков, М.Л. Акимов, П.А. Поляков

СЕКЦИЯ 4:
ФИЗИКА И ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ

Эксплуатационные свойства наполненных ферритом композиций на основе смолы СЭДМ-2..... 116
А.В. Долгов, Г.Г. Мхитарян, А.В. Рамазанова, С.В. Серебрянников, С.С. Серебрянников

СЕКЦИЯ 5:
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ И МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ И РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ И АГРЕГАЦИЙ

Исследование влияния градирования электроизоляции и расположения индукционно-резистивного проводника на электрическое поле скин-системы…..... 120
М.А. Федин, А.Р. Лепешкин, М.А. Булатенко, К.В. Северин, А.И. Василенко, М.С. Осипова

Исследование и снижение влияния высших гармоник и вихревых токов в несимметричных режимах на гистерезисное электромеханическое преобразование энергии..... 127
С.Ю. Останин, Н. Абдугалиев, А.С. Лискин, И.А. Федоров, Цуй Шумэй, Чжу Чунбо

Исследование тепловых режимов электромеханических преобразователей энергии с нелинейными магнитными системами..... 134
С.Ю. Останин, Н. Абдугалиев, М.Г. Коновалов, Ф.Д. Успенский, Цуй Шумэй, Чжу Чунбо

Исследование вопросов повышения механической стабильности и прочности роторов гистерезисных электромеханических преобразователей энергии..... 141
С.Ю. Останин, М.Г. Коновалов, И.А. Федоров, И.М. Миляев, Цуй Шумэй, Чжу Чунбо

Исследование электрофизических свойств стальных труб для индукционно-резистивных систем нагрева..... 148
М.А. Федин, М.А. Булатенко, А.И. Василенко, В.В. Крылов, Д.А. Жгутов

Экспериментальные исследования энергетических характеристик излучательных электротехнологических установок с темными излучателями при питании переменным током и током сложной формы..... 155
Д.В. Птицын, Е.В. Птицына

Микроволновая антенна на диэлектрических резонаторах..... 162
Л.В. Алексейчик, А.А. Курушин

Исследование распределения напряженности электрического поля токопровода 10 кВ с твердой изоляцией..... 170
Д.В. Голубев, Д.И. Ковалев, С.А. Елфимов, Т.П. Тарасова, А.Болотин

Электрофизические характеристики твердых полимерных материалов для внутренних электроизоляционных конструкций энергетического оборудования..... 178
Д.В. Голубев, С.А. Елфимов, А.А. Нестеренко

Разработка и исследование системы тиристорный преобразователь-асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором (ТП-АД с КЗ ротором) с улучшенными электродинамическими характеристиками..... 188

Научное издание

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ И МАТЕРИАЛЫ (ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ)

XXXI МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

МАТЕРИАЛЫ

ELECTROMAGNETIC FIELD AND MATERIALS (FUNDAMENTAL PHYSICAL RESEARCHES)

XXXI INTERNATIONAL CONFERENCE

PROCEEDINGS

Компьютерная верстка Ю.И. Захаровой

200

Подписано в печать . .2024		Печать цифровая	Формат 60×84/16	Печ. л.
Тираж 100 экз.		Изд. №	Заказ №	

Оригинал-макет подготовлен в РИО НИУ «МЭИ».
111250, Москва, Красноказарменная ул., д. 14.
Отпечатано в типографии НИУ «МЭИ».
111250, Москва, Красноказарменная ул., д. 13.