

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования «Уральский федеральный
университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»
Уральский энергетический институт
Кафедра «Электротехника и электротехнологические системы»

На правах рукописи

Абдуллаев Жахонгир Одашжонович

**ЛИНЕЙНЫЕ ИНДУКЦИОННЫЕ МАШИНЫ СО ВСТРЕЧНО
БЕГУЩИМИ МАГНИТНЫМИ ПОЛЯМИ**

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук,
профессор, Коняев
Андрей Юрьевич

Екатеринбург – 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. СОСТОЯНИЕ РАЗРАБОТОК ЛИНЕЙНЫХ МАШИН СО ВСТРЕЧНО БЕГУЩИМИ МАГНИТНЫМИ ПОЛЯМИ И ЗАДАЧАМИ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	10
1.1. Применение ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями в технологических процессах и оборудовании.....	10
1.2. Особенности формирования встречно бегущих магнитных полей в рассматриваемых ЛИМ. Характеристика объекта исследования.....	16
1.3. Выводы по разделу 1	20
2. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИМ СО ВСТРЕЧНО БЕГУЩИМИ МАГНИТНЫМИ ПОЛЯМИ	21
2.1. Выбор и совершенствование моделей ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями с учетом их особенностей	21
2.2. Исследование электромагнитных сил в ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями.....	30
2.3. Анализ электромагнитных процессов в ЛИМ со встречно бегущими полями на основе построения диаграмм намагничивающих сил	44
2.4. Выводы по разделу 2	63
3. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ СЕПАРАТОРОВ НА ОСНОВЕ ЛИМ СО ВСТРЕЧНО БЕГУЩИМИ МАГНИТНЫМИ ПОЛЯМИ	65
3.1. Электродинамические сепараторы для извлечения цветных металлов из потоков металлосодержащих отходов.....	65
3.2. Электродинамические сепараторы для индукционной сортировки цветных металлов.....	73
3.3. Выводы по разделу 3	81
4. ЛИНЕЙНЫЕ ИНДУКЦИОННЫЕ МАШИНЫ СО ВСТРЕЧНО БЕГУЩИМИ МАГНИТНЫМИ ПОЛЯМИ ДЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ, ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ И ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК	83
4.1. ЛИМ для перемещения и позиционирования заготовок	83
4.2. Использование ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями в установках индукционного нагрева металлических заготовок.....	89
4.3. Выводы по разделу 4	99
5. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РАЗРАБОТОК.....	101

5.1. Основные характеристики экспериментальных линейных индукционных машин.....	101
5.2. Результаты экспериментальных исследований	107
5.3. Практическое использование результатов исследований ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями	114
5.3.1. Электродинамические сепараторы для обработки дробленого электронного и кабельного лома	114
5.3.2. Электродинамические сепараторы для извлечения цветных металлов из твердых коммунальных отходов	116
5.3.3. ЛИМ для перемещения и нагрева металлических заготовок и прокатных изделий.....	116
5.3.4. Использование результатов работы в учебном процессе	117
5.4. Выводы по разделу 5	117
Заключение	118
Список литературы	120
Приложение 1. Результаты расчетов электромагнитных усилий	132
Приложение 2. Диаграммы намагничивающих сил	137
Приложение 3. Оценка позиционирования ВЭ	145
Приложение 4. Документы о сотрудничестве с предприятиями	153

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Повышение эффективности производства требует разработки и создания нового оборудования, позволяющего повысить функциональные и технико-экономические показатели технологических процессов при надлежащем качестве выпускаемой продукции. Основу такого оборудования могут составлять специальные электрические машины, конструкция и характеристики которых максимально соответствуют особенностям тех или иных рабочих машин. К таким специальным электрическим машинам относятся, в частности, линейные индукционные машины (ЛИМ) технологического назначения, в которых вторичными элементами (ВЭ) являются обрабатываемые материалы, заготовки и изделия [1-10]. Например, вращающиеся и бегущие магнитные поля, создаваемые ЛИМ, используются в МГД-технологиях обработки жидких металлов (перемешивание, транспортировка, дозирование, сепарация, дросселирование и т.п.), при электродинамической сепарации сыпучих смесей (извлечение металлов из отходов, сортировка цветных металлов), для манипулирования металлическими изделиями и заготовками в процессе их обработки, для комплексного электромагнитного воздействия на заготовки (например, их перемещение и индукционный нагрев) и др.

Основные достоинства ЛИМ связаны с бесконтактной передачей усилия вторичным элементам (обрабатываемым заготовкам, изделиям и материалам). При этом устраняются механические передачи, упрощаются кинематические схемы приводов, появляется возможность передачи усилия в замкнутые объемы, снимаются ограничения, связанные с передачей усилий за счет сцепления поверхностей и т.д. Благодаря таким свойствам устройства на основе ЛИМ характеризуются хорошими функциональными и энергетическими показателями, а в ряде случаев линейные электрические машины не имеют альтернативы. Отмечается также хорошая встраиваемость линейных индукторов в технологические машины и механизмы. Одним из достоинств ЛИМ технологического назначения является возможность совмещения в одной машине нескольких функций. Двухцелевые (многоцелевые) ЛИМ могут выполнять функции элек-

тродвигателя, подъемного электромагнита, индукционного нагревателя, первичного информационного преобразователя датчиков, измеряющих параметры движения ВЭ и др.

Основная особенность ЛИМ технологического назначения состоит в том, что размеры и свойства ВЭ не являются предметом выбора при разработке машин, а задаются технологической задачей. Это заметно сужает возможности формирования необходимых механических и рабочих характеристик ЛИМ. В то же время при разработке линейных индукторов таких машин возможно использование технических решений, не применяемых в традиционных электрических машинах. Одним из таких решений является использование индукторов с обмотками, создающими встречно бегущие магнитные поля (движущиеся от центра или к центру линейного индуктора) [11-12]. Как показывают уже известные применения [12], у ЛИМ с такими индукторами появляются новые функциональные возможности, которые могут быть востребованы при создании технологических машин, роботизированных комплексов, гибких автоматизированных производственных линий. Например, применение ЛИМ с разбегающимися магнитными полями в электродинамических сепараторах позволяет повысить качество сепарации и снизить потребление энергии. Линейные индукторы со сбегающимися магнитными полями позволяют решать задачи позиционирования металлических заготовок и изделий и т.д. Широкое применение рассматриваемых машин сдерживается тем, что электромагнитные процессы в них недостаточно изучены. Этим обусловлена актуальность данной диссертационной работы.

Исследования, результаты которых составили основу диссертации, выполнены в рамках основного научного направления кафедры «Электротехника и электротехнологические системы» Уральского федерального университета «Разработка научных основ энергосберегающих электротехнологических и специальных электромеханических систем», а также в рамках сотрудничества с заинтересованными предприятиями.

Степень разработанности темы исследования. Использование линей-

ных индукторов, создающих встречно бегущие магнитные поля, открывает новые возможности при применении ЛИМ во вспомогательном технологическом оборудовании. Ранее в УрФУ (УГТУ-УПИ) проводились работы по разработке и созданию такого оборудования [6-7, 34, 45-46, 53-55]. Разрабатывались линейные электродвигатели для перемещения стальных труб и листового проката; загрузочно-подающие устройства для подачи стальных листов к технологическим машинам; электромагнитные устройства для натяжения металлических лент; ЛИМ, совмещающие функции двигателя и индукционного нагревателя, для комплектования линии непрерывного индукционного нагрева стальных листов. Однако подробные исследования, связанные с особенностями электромагнитных процессов в активной зоне ЛИМ со встречно бегущими полями, не проводились.

Цель исследования: разработка линейных индукционных машин со встречно бегущими магнитными полями для разных технологических применений. Для достижения цели решались **следующие задачи:**

- разработка математических моделей и методик расчета ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями и развитие теории таких машин;
- выявление закономерностей, влияющих на характер распределения электромагнитных усилий в ЛИМ со встречно бегущими полями;
- разработка методики и анализ электромагнитных процессов в рассматриваемых ЛИМ на основе построения диаграмм намагничивающих сил;
- разработка рекомендаций по проектированию ЛИМ, а также апробация результатов исследований на опытных образцах;
- разработка ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями для решения ряда технологических задач (электродинамическая сепарация, перемещение и позиционирование обрабатываемых металлических заготовок, индукционный нагрев в бегущем магнитном поле).

Объект исследования – линейные индукционные машины со встречно бегущими магнитными полями.

Предметом исследования являются электромагнитные процессы в ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями и характеристики технологических устройств на основе таких машин.

Научная новизна результатов исследования состоит в следующем:

1. Разработаны алгоритмы и методики расчета ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями с учетом основных особенностей машин (неравномерность распределения магнитных полей в активной зоне ЛИМ, ограниченность размеров массивного вторичного элемента).

2. Разработана методика оценки электромагнитных процессов в ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями на основе построения диаграмм намагничивающих сил.

3. Выявлены закономерности распределения электромагнитных усилий в активной зоне ЛИМ со встречно бегущими полями, зависящие от схемы соединения обмоток индуктора и определяемые появлением пульсирующих составляющих магнитных полей.

4. Разработаны рекомендации по выбору параметров ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями с учетом специфики электромагнитных процессов для решения различных технологических задач.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработана методика расчета ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями в рамках «квазитрехмерного» подхода на основе сочетания аналитической и численной моделей ЛИМ в двухмерной постановке.

2. Предложена методика оценки характера электромагнитных процессов в ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями на основе построения и анализа диаграмм н.с. обмоток.

3. Выявлены особенности электромагнитных процессов в ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями при различных схемах обмоток линейных индукторов и показана физическая сущность таких особенностей.

4. Показаны преимущества применения рассматриваемых ЛИМ в электродинамических сепараторах, применяемых для извлечения цветных металлов

из твердых отходов и для индукционной сортировки металлов.

5. Экспериментально подтверждены возможности самоцентрирования металлических заготовок в активной зоне ЛИМ со сбегаящимися магнитными полями, показана целесообразность их применения во вспомогательном технологическом оборудовании металлообрабатывающих производств, а также в установках индукционного нагрева мерных заготовок;

6. Созданы опытные устройства на основе ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями для решения ряда технологических задач. Новые технические решения защищены патентами РФ на полезные модели.

Методология и методы исследований. В теоретической части работы использованы методы теоретической электротехники и теории электрических машин. Математические модели для расчета электромагнитных усилий построены на основе решения полевых задач в двухмерной и трехмерной постановке. Методики расчетов реализованы с помощью математических пакетов Mathcad, Elcut и COMSOL Multiphysics. Теоретические результаты дополнены данными исследований экспериментальных образцов ЛИМ.

Достоверность полученных результатов подтверждается сравнением результатов расчетов, полученных по разным методикам; сопоставлением с данными экспериментов; соответствием результатов расчетов физическому смыслу процессов в ЛИМ.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель и алгоритм расчета электромагнитных усилий ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями.

2. Методика оценки характера электромагнитных процессов в ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями на основе построения и анализа диаграмм н.с. обмоток.

3. Рекомендации по выбору схем соединения обмоток ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями, полученные на основе исследования электромагнитных процессов в ЛИМ.

4. Рекомендации по применению ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями в ряде технологических устройств (электродинамические сепараторы, установки индукционного нагрева и др.).

5. Результаты экспериментальных исследований опытных ЛИМ со встречно бегущими полями и технологических установок на их основе.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях и семинарах: Международная конференция «Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий» (Екатеринбург, 2014, 2017); Международная НПК «Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии» (Екатеринбург, 2014, 2017-2019); Международная НПК «Эффективное и качественное снабжение и использование электроэнергии» (Екатеринбург, 2015-2017); Международная НТК «Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике» (Пермь, 2016); Международная НПК «Федоровские чтения» (Москва, 2016); Конгресс с международным участием «Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований» (Екатеринбург, УрО РАН, 2017); Научно-техническая конференция молодых ученых Уральского энергетического института УрФУ (Екатеринбург, 2017-2018); Международная конференция «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты» (Алушта, 2018); IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (St. Petersburg, Russia, 2018-2019).

Публикации. Основное содержание работы представлено в 9 статьях, опубликованных в научных изданиях, рекомендованных ВАК, 2 патентах на полезные модели, 18 тезисах докладов на всероссийских и международных конференциях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения. Содержит 131 страниц основного текста (с приложением 156), 98 рисунков и 16 таблиц, список литературы, включающий 101 наименование и приложения.

1. СОСТОЯНИЕ РАЗРАБОТОК ЛИНЕЙНЫХ МАШИН СО ВСТРЕЧНО БЕГУЩИМИ МАГНИТНЫМИ ПОЛЯМИ И ЗАДАЧАМИ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1. Применение ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями в технологических процессах и оборудовании

Одной из тенденций в развитии специальных электрических машин является разработка и создание линейных индукционных машин (ЛИМ) технологического назначения. В таких машинах бегущее магнитное поле оказывает непосредственное воздействие на обрабатываемые материалы, заготовки и изделия. Прежде всего, можно отметить применения ЛИМ в МГД-технологиях [1, 13-20]. Все более широко используются ЛИМ для электродинамической сепарации твердых металлосодержащих отходов, либо индукционной сортировки цветного металлолома при подготовке его к металлургическому переделу [7, 9, 21-30]. Перспективно применение установок индукционного нагрева в бегущем магнитном поле, где рационально используются преобразование электрической энергии как в тепловую, так и в механическую энергию [7, 31-42].

Известны применения ЛИМ во вспомогательном технологическом оборудовании: для создания загрузочно-подающих устройств, устройств позиционирования и фиксации обрабатываемых заготовок или деталей, электромагнитных устройств для натяжения и выравнивания листов и полос в линиях прокатных станов и т.д. [2-8, 43-46]. Создание таких вспомогательных технологических устройств, наряду с совершенствованием основного технологического оборудования и обслуживающих это оборудование робототехнических комплексов и систем управления позволяет повысить эффективность современного производства, характеризующегося широким применением автоматизированных и автоматических технологических линий и гибких производственных систем в машиностроении, непрерывных технологических линий в прокатных цехах и в металлообрабатывающем производстве, высокоавтоматизированных транспортно-складских систем [47-50].

Можно отметить, что на протяжении многих лет разработки ЛИМ технологического назначения для указанных применений выполняются в Уральском федеральном университете (УПИ, УГТУ-УПИ) [6-7, 26-29, 34, 45-46, 54-58].

Во всех рассмотренных случаях применения ЛИМ технологического назначения вторичным элементом (ВЭ) служат обрабатываемые материалы, заготовки или изделия (например, жидкий металл, извлекаемые из отходов проводящие частицы и предметы, сортируемые фрагменты металлолома, обрабатываемые металлические заготовки или прокатные изделия). Поскольку свойства таких ВЭ заданы технологической задачей, то при разработке ЛИМ технологического назначения невозможно формирование характеристик машин за счет выбора параметров ВЭ. Единственным способом повышения показателей рассматриваемых устройств является совершенствование линейных индукторов. В то же время при разработке ЛИМ технологического назначения появляется возможность использования новых технических решений, нетрадиционных для традиционных машин. Одним из таких решений является применение в индукторах ЛИМ трехфазных обмоток, создающих встречно бегущие магнитные поля. Примеры линейных индукторов с обмотками, возбуждающими встречно бегущие магнитные поля, показаны на рис. 1.1. Скорости движения магнитных полей зависят от значений полюсного деления τ и частоты f индуктора ($V_0 = 2\tau f$). При этом в общем случае скорости полей, создаваемых левой и правой секциями обмотки, V_{01} и V_{02} и амплитуды индукции таких магнитных полей B_{m1} и B_{m2} могут отличаться. Это позволяет изменять параметры электромагнитного воздействия на обрабатываемые заготовки, изделия и материалы.

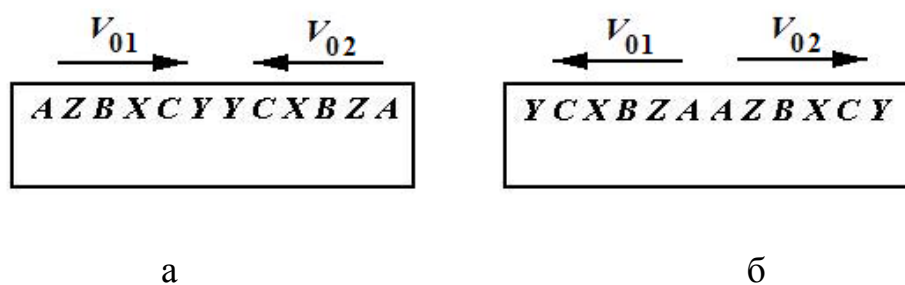


Рисунок 1.1 – Индукторы ЛИМ, создающие встречно бегущие магнитные поля: сбегающиеся к центру индуктора (а) и разбегающиеся от него (б)

Применение встречно бегущих полей в МГД-устройствах позволяет формировать нужную конфигурацию течений в жидком металле, управлять движением жидкого металла, изменяя направления и скорости потоков [19-20]. Один из примеров организации двухконтурного движения металла при перемешивании его в ванне металлургической печи схематично показан на рис. 1.2. Применяя комбинации линейных индукторов со встречно бегущими полями, можно формировать четырехконтурное движение жидкого металла, либо его движение по более сложным траекториям.

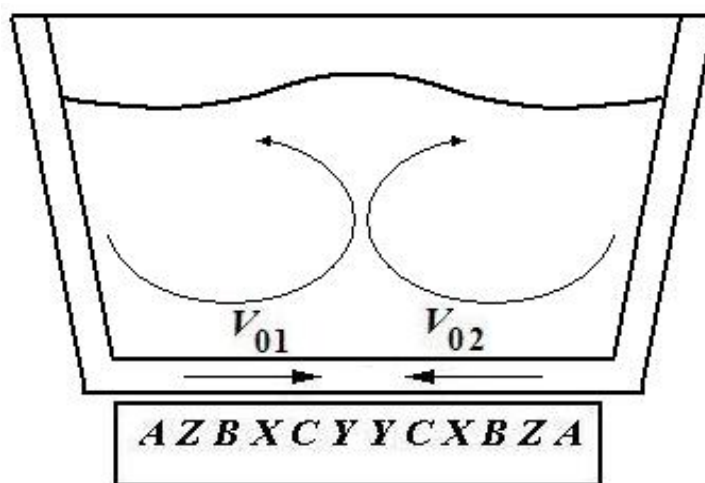


Рисунок 1.2 – Схема формирования двухконтурного движения металла в ванне печи

Ранее трехфазные линейные индукторы с разбегающимися магнитными полями применены при разработке в УГТУ-УПИ устройств электродинамической сепарации на основе ЛИМ, предназначенных для извлечения металлических включений из потока смешанных бытовых отходов [11, 28]. В созданной совместно с ОАО «Уралэнергоцветмет» по заказу АО «НИКТИстройкомаш» (г. Санкт-Петербург) установке КМ203-М индукторы устанавливались под лентой транспортера, перемещающего отходы. Применение бегущих магнитных полей, движущихся от центра индуктора, обеспечивает выход извлекаемых из отходов металлических предметов не в одну, а в обе стороны от транспортера, как показано на рис. 1.3. Такое решение наиболее целесообразно в

установках по сепарации твердых бытовых отходов, имеющих большую ширину ленты конвейера (1,0-1,2 м) [28, 51].

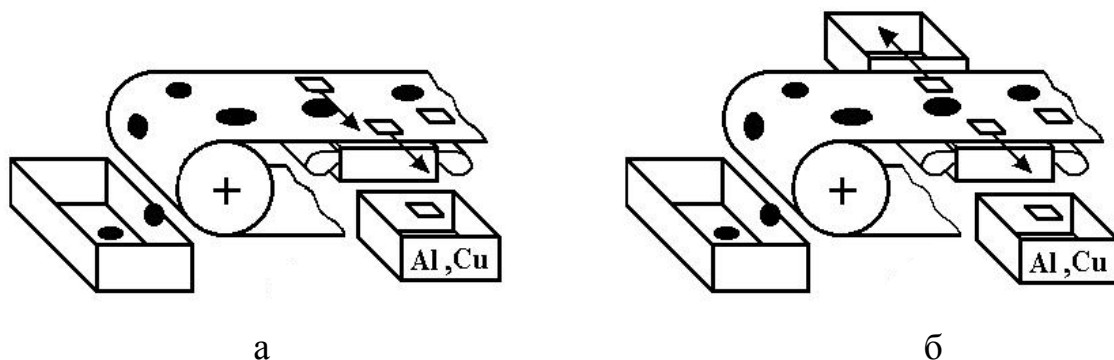


Рисунок 1.3 – Электродинамические сепараторы на основе ЛИМ с односторонним (а) и двухсторонним (б) выходом извлекаемых металлов

Необходимо отметить, что в качестве прототипа для создания установки электродинамической сепарации КМ203-М, послужил разработанный ранее в АООТ «НИКТИстройкоммаш» сепаратор КМ203, линейные индукторы для которого проектировались и изготавливались Особым конструкторским бюро линейных электродвигателей (с опытным производством), г. Киев. Основные данные сепаратора КМ203 приведены в [52]. По данным АООТ «НИКТИстройкоммаш» при испытаниях индуктора с разбегающимися магнитными полями в центральной части индуктора наблюдалась зона, в которой электромагнитное усилие было близко к нулю («мертвая» зона). Это вынудило разработчиков использовать в установке дополнительный индуктор с односторонним движением магнитного поля и увеличить мощность сепаратора.

При создании модернизированной установки КМ203-М удалось существенно уменьшить мощность сепаратора, потребляемую из сети, а также создать линейные индукторы с разбегающимися магнитными полями, в которых «мертвая» зона отсутствовала [28, 51]. Однако подробные исследования, связанные с особенностями электромагнитных процессов в активной зоне ЛИМ со встречно бегущими полями, не проводились. Исследования таких ЛИМ как основы электродинамических сепараторов представлены в разделе 3.

Использование линейных индукторов, создающих встречно бегущие магнитные поля, открывает новые возможности при применении ЛИМ во вспомогательном технологическом оборудовании. Ранее в УрФУ (УГТУ-УПИ) проводились работы по разработке и созданию такого оборудования [6-7, 34, 45-46, 53-55]. Разрабатывались линейные электродвигатели для перемещения стальных труб и листового проката; загрузочно-подающие устройства для подачи стальных листов к технологическим машинам; электромагнитные устройства для натяжения металлических лент; ЛИМ, совмещающие функции двигателя и индукционного нагревателя, для комплектования линии непрерывного индукционного нагрева стальных листов и др.

В ходе разработок и исследований наряду с достоинствами линейных электроприводов вспомогательного технологического оборудования обнаруживались и определенные недостатки. Например, при разработке линии непрерывного нагрева на основе линейных двигателей – индукционных нагревателей было показано, что при большой мощности линейных индукторов, необходимой для нагрева стальных листов, двигатели развивали электромагнитное усилие, намного превышающее усилие, требуемое для перемещения листов. Это обстоятельство потребовало установки дополнительных тормозных роликов, стабилизирующих скорость подачи листов. Указанную трудность можно преодолеть при использовании ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями.

Рассмотрим один из возможных вариантов решения данной задачи [56-57]. ЛИМ с двухсторонним линейным индуктором, создающим встречно бегущие магнитные поля, схематично представлена на рис. 1.4. Трехфазная обмотка ЛИМ состоит из двух секций, которые располагаются слева и справа от центра индуктора. При этом порядок чередования фаз в каждой из секций обмотки выбирается таким, что создаются бегущие магнитные поля, движущиеся к центру индуктора (сбегающиеся магнитные поля). Электромагнитные усилия $F_{эм}$, действующие на левую и правую части вторичного элемента (обрабатываемой металлической заготовки), также направлены навстречу друг другу.

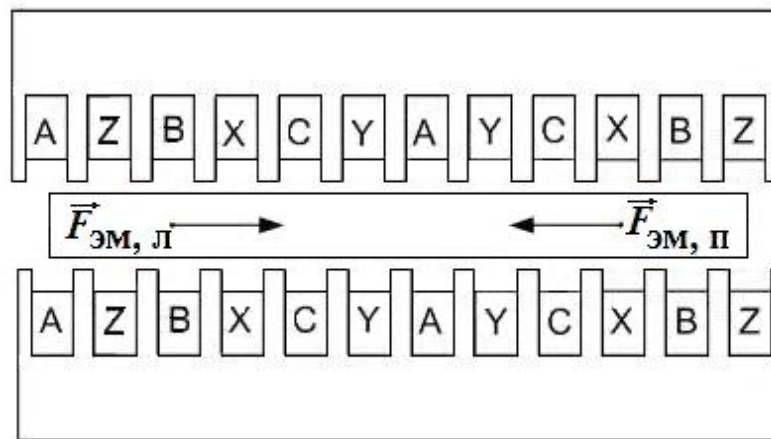


Рисунок 1.4 – Схема ЛИМ с двухсторонним индуктором, создающим сбегающиеся магнитные поля

Предлагаемая ЛИМ позволяет легко управлять движением заготовок. Включение одной из секций обмотки обеспечивает перемещение заготовки в нужном направлении. Поочередное включение секций обмотки позволяет создать возвратно-поступательное движение. Включение обеих секций при условии неравенства электромагнитных сил $F_{эм,л}$ и $F_{эм,п}$ приводит к движению заготовки на пониженной скорости, а в случае равенства $F_{эм,л} = F_{эм,п}$ реализуется режим позиционирования заготовок в центре индуктора (при условии, что длина заготовки меньше длины индуктора).

Указанные возможности ЛИМ со встречно бегущими полями позволяют создавать на их основе загрузочно-подающие устройства для подачи заготовок в рабочую зону технологических машин в металлообрабатывающем производстве, для подачи деталей под схват робота на сборочных операциях в машиностроении и приборостроении и др. Отметим, что для таких вспомогательных технологических операций режим позиционирования заготовок при использовании рассматриваемых ЛИМ может оказаться наиболее востребованным, поскольку за счет эффекта самоцентрирования можно добиться высокой скорости и точности позиционирования. Более детально такие ЛИМ обсуждаются в разделе 4 диссертации.

Исследование и разработка указанных устройств на основе ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями продолжаются на кафедре электротех-

ники и электротехнологических систем Уральского федерального университета. По разработкам кафедры создан ряд промышленных установок, либо опытные образцы устройств, работающие в исследовательской лаборатории. Моделирование ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями, изучение особенностей электромагнитных процессов в них, апробация различных технологических устройств на основе ЛИМ создают предпосылки для широкого применения рассматриваемых электрических машин на практике.

В данной диссертационной работе рассматриваются применения ЛИМ со встречно бегущими полями в установках электродинамической сепарации и во вспомогательном технологическом оборудовании для задач металлообработки и индукционного нагрева заготовок.

1.2. Особенности формирования встречно бегущих магнитных полей в рассматриваемых ЛИМ. Характеристика объекта исследования

Как уже отмечалось в разделе 1.1, в ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями возможно появление в центре индуктора зоны, в которой электромагнитное усилие близко к нулю («мертвой» зоны). Это объясняется искажениями магнитного поля в этой области (наложением магнитных полей секций обмотки, расположенных слева и справа от центральной оси индуктора, появлением дополнительных пульсирующих составляющих поля).

Уже первые экспериментальные исследования показали, что характер искажения магнитного поля и электромагнитных усилий в центральной зоне рассматриваемых машин зависит от схемы и конструкции обмотки индуктора, а также порядка чередования фаз на его половинах. Например, на рис. 1.5 показаны кривые распределения электромагнитных усилий по длине ЛИМ с разбегающимися полями. Двухсторонний пятиполюсный линейный индуктор исследованной машины характеризовался следующими основными данными: полюсное деление $\tau = 49$ мм, ширина активной зоны $L_{\text{и}} = 125$ мм, воздушный зазор $\delta = 30$ мм (более подробная информация о экспериментальных ЛИМ приводится в разделе 5). В качестве вторичного элемента использовалась алюми-

вая пластина с размерами $20 \times 20 \times 3$ мм. С учетом малости развиваемых электромагнитных усилий их измерения выполнялись с помощью тензодатчика и системы рычагов.

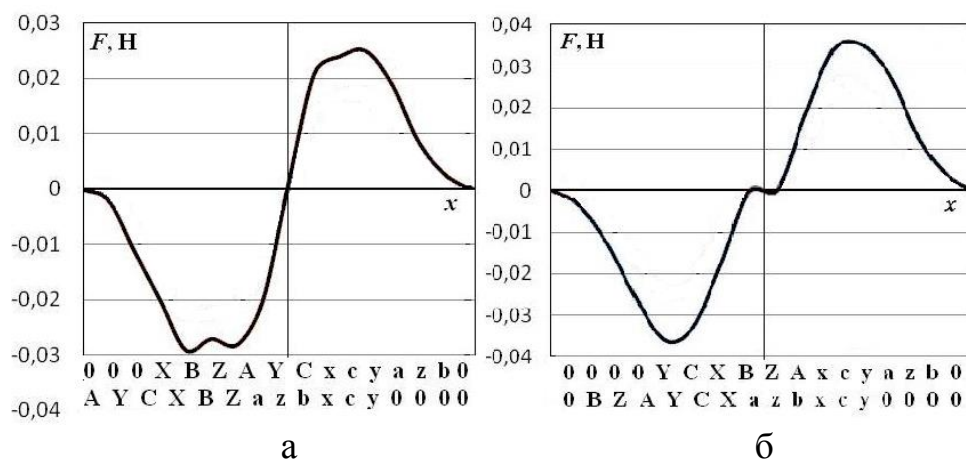


Рисунок 1.5 – Кривые распределения электромагнитного усилия по длине экспериментальной ЛИМ при разных схемах обмоток

Как видно из рис. 1.5, простая перестановка фаз обмотки на левой половине индуктора приводит не только к качественному, но и количественному изменению кривых усилий. В варианте ЛИМ по рис. 1.5, а отсутствует «мертвая» зона в центре индуктора, однако уровень усилий понижается. В варианте по рис. 1.5, б развиваются большие усилия, но появляется «мертвая» зона в центре, где усилие близко к нулю.

Следует отметить, что формирование встречно бегущих магнитных полей (сбегающихся к центру индуктора – СБМП и разбегающихся от него – РБМП) возможно при использовании разных конструкций трехфазных обмоток индуктора (одно- или двухслойных, с укорочением шага обмотки или без него и др.), а также при разных схемах укладки и соединения катушек в обмотках, отличающихся, например, порядком чередования фаз на левой и правой половинах индуктора.

Рассмотрим возможные варианты схем укладки и соединения катушек обмотки простейшего линейного индуктора, имеющего четырехполюсную однослойную обмотку с количеством пазов на полюс и фазу $q = 1$. Основные схемы укладки и соединения катушек приведены в табл. 1.1.

Таблица 1 – Основные варианты схем обмоток ЛИМ с однослойной обмоткой индуктора при $q = 1$

Вид поля. Варианты схем	№ пазов	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
БМП		A	Z	B	X	C	Y	a	z	b	x	c	y
РБМП	1p	B	Z	A	Y	C	X	a	z	b	x	c	y
	2p	X	B	Z	A	Y	C	a	z	b	x	c	y
	3p	C	X	B	Z	A	Y	a	z	b	x	c	y
	4p	Y	C	X	B	Z	A	a	z	b	x	c	y
	5p	A	Y	C	X	B	Z	a	z	b	x	c	y
	6p	Z	A	Y	C	X	B	a	z	b	x	c	y
СБМП	1c	A	Z	B	X	C	Y	b	z	a	y	c	x
	2c	A	Z	B	X	C	Y	x	b	z	a	y	c
	3c	A	Z	B	X	C	Y	c	x	b	z	a	y
	4c	A	Z	B	X	C	Y	y	c	x	b	z	a
	5c	A	Z	B	X	C	Y	a	y	c	x	b	z
	6c	A	Z	B	X	C	Y	z	a	y	c	x	b

В качестве базового варианта приведена обмотка, создающая бегущее магнитное поле, движущееся в одном направлении (слева направо). Такая обмотка может состоять из двух секций, занимающих левую (пазы 1-6) и правую (пазы 7-12) половины индуктора. Для возбуждения разбегающихся магнитных полей (РБМП) оставляем неизменной правую секцию обмотки, а в левой секции обмотки изменяем чередование фаз для создания магнитного поля, движущегося налево. Как можно видеть из табл. 1, число независимых вариантов схем равняется шести. Аналогично формируются варианты обмоток, создающих сбегающиеся магнитные поля (СБМП). При этом фиксируется схема в левой секции обмотки, а в правой секции осуществляется необходимая перестановка фаз.

Как следует из приведенного примера, при разработке ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями необходимо проводить сравнение как минимум шести вариантов обмоток индукторов, возбуждающих поля нужного направле-

ния. В более сложных случаях число принимаемых во внимание вариантов будет возрастать. Например, при одновременном рассмотрении ЛИМ с одно- и двухслойными обмотками число вариантов удваивается. Количество вариантов схем возрастает также в случаях, когда левая и правая секции обмотки имеют разные параметры (число пазов, число полюсов и др.), или когда применяется двухстороннее исполнение индуктора.

Необходимость управления структурой магнитного поля и распределением электромагнитных усилий в рассматриваемых машинах за счет рационального выбора обмоток обуславливает актуальность исследования таких ЛИМ. В то же время многообразие вариантов обмоток ЛИМ, создающих встречно бегущие магнитные поля, не позволяет использовать упрощающие допущения при разработке расчетных моделей линейных индукторов.

Другой особенностью ЛИМ технологического назначения, затрудняющей во многих случаях теоретические исследования, является ограниченность размеров вторичного элемента. Размеры металлических изделий и заготовок, на которые воздействуют ЛИМ во вспомогательном технологическом оборудовании, могут быть меньше размеров индуктора. А в случае использования ЛИМ в электродинамических сепараторах вторичными элементами являются частицы и фрагменты металлов, размеры которых меньше длины полюсного деления индуктора. Как известно, ЛИМ с коротким вторичным элементом характеризуются сложным распределением вторичных токов, что осложняет моделирование и учет поперечного краевого эффекта [29, 58].

Таким образом, выбранная в качестве объекта исследования ЛИМ с магнитными полями, бегущими во встречных направлениях, характеризуется сложностью электромагнитных процессов, определяемой как традиционными для линейных электрических машин краевыми эффектами (продольным и поперечным), так и сложностью обмоток, возбуждающих магнитные поля, приводящей, в частности, к искажениям поля в центре активной зоны индуктора. При использовании рассматриваемых ЛИМ в конкретных технологических установках (электродинамические сепараторы, устройства индукционного нагрева в

бегущем магнитном поле, вспомогательные технологические устройства) необходимо учитывать также особенности электромагнитных процессов во вторичных элементах, определяемые как видами ВЭ, так и режимами работы устройств.

1.3. Выводы по разделу 1

1. Как показывает обзор литературы, линейные индукционные машины находят достаточно широкое применение для решения многих технологических задач. Применение ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями позволяет расширить функциональные возможности устройств на основе таких машин. В частности, появляются возможности создания двухцелевых машин, заключающиеся в создании устройств подачи заготовок с ее одновременным нагревом. В задачах электродинамической сепарации использование таких ЛИМ позволяет увеличивать производительность устройств за счет выхода материалов в две стороны от линии подачи. Также, возможно применение таких машин для решения задач бездатчикового позиционирования заготовок под последующую технологическую операцию.

2. Объектом исследования выбрана ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями. Исследования направлены на изучение особенностей формирования встречно бегущих магнитных полей в ЛИМ, зависящих от чередования фаз обмоток, а также от их конструкции.

3. Электромагнитные процессы в ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями характеризуются, прежде всего, искажениями поля в центре активной зоны индуктора. В зависимости от варианта чередования фаз обмоток искажения в центре активной зоны могут существенно отличаться. Указанные особенности необходимо учитывать при моделировании ЛИМ наряду с такими явлениями, как продольный и поперечный краевые эффекты, ограниченность размеров массивных вторичных элементов и др.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИМ СО ВСТРЕЧНО БЕГУЩИМИ МАГНИТНЫМИ ПОЛЯМИ

2.1. Выбор и совершенствование моделей ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями с учетом их особенностей

Как отмечено в разделе 1.2, ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями характеризуются целым рядом эффектов, приводящих к искажениям магнитного поля в активной зоне и, как следствие, к неравномерному распределению электромагнитных усилий по длине машины. Задача моделирования усложняется тем, что массивные вторичные элементы ЛИМ имеют ограниченные размеры, как правило, меньшие размеров индуктора (в ряде случаев меньшие полюсного деления τ), и могут занимать произвольное положение в активной зоне индуктора. С учетом указанных особенностей для расчетов электромагнитных процессов в рассматриваемых ЛИМ необходимо их моделирование численными методами в трехмерной постановке. Например, можно использовать метод конечных элементов, реализованный в программных пакетах ANSYS, Comsol Multiphysics и т.п.

Для одной из экспериментальных ЛИМ с двухсторонним индуктором (характеристики ЛИМ8 приведены в табл. 5.2) в пакете Comsol Multiphysics построена трехмерная модель и выполнены расчеты распределения электромагнитных усилий, действующих на алюминиевую пластину с размерами $b \times a \times d = 20 \times 20 \times 2$ мм, по длине активной зоны. Выбор для тестирования двухполюсной ЛИМ8 обусловлен тем, что такая машина характеризуется явно выраженной неравномерностью распределения магнитного поля. Результаты расчетов электромагнитных усилий, действующих на алюминиевую пластину, представлены на рис. 2.1.

Расчеты ЛИМ с использованием трехмерных моделей позволяют учесть наибольшее количество факторов, однако являются весьма трудоемкими и требуют больших ресурсов компьютеров. Например, расчет одной точки на портативном компьютере (ПК) в пакете Comsol Multiphysics занимает 9-12 минут,

при помощи специализированного сервера, это время можно сократить до 1,0-1,5 минут. Технические характеристики сравниваемых вычислительных машин приведены в табл. 2.1. Для построения кривой усилия, показанной на рис. 2.1, потребовался расчет 64 точек с шагом 2 мм, и общее время расчета составляло соответственно около 1,5 часов (сервер) и более 12 часов (ПК). В силу указанных причин решение задачи в трехмерной постановке нецелесообразно для выполнения многовариантных расчетов при исследовательских работах и в инженерной практике. Поэтому в данной работе рассмотрены возможности применения для расчетов рассматриваемых ЛИМ двумерных математических моделей.

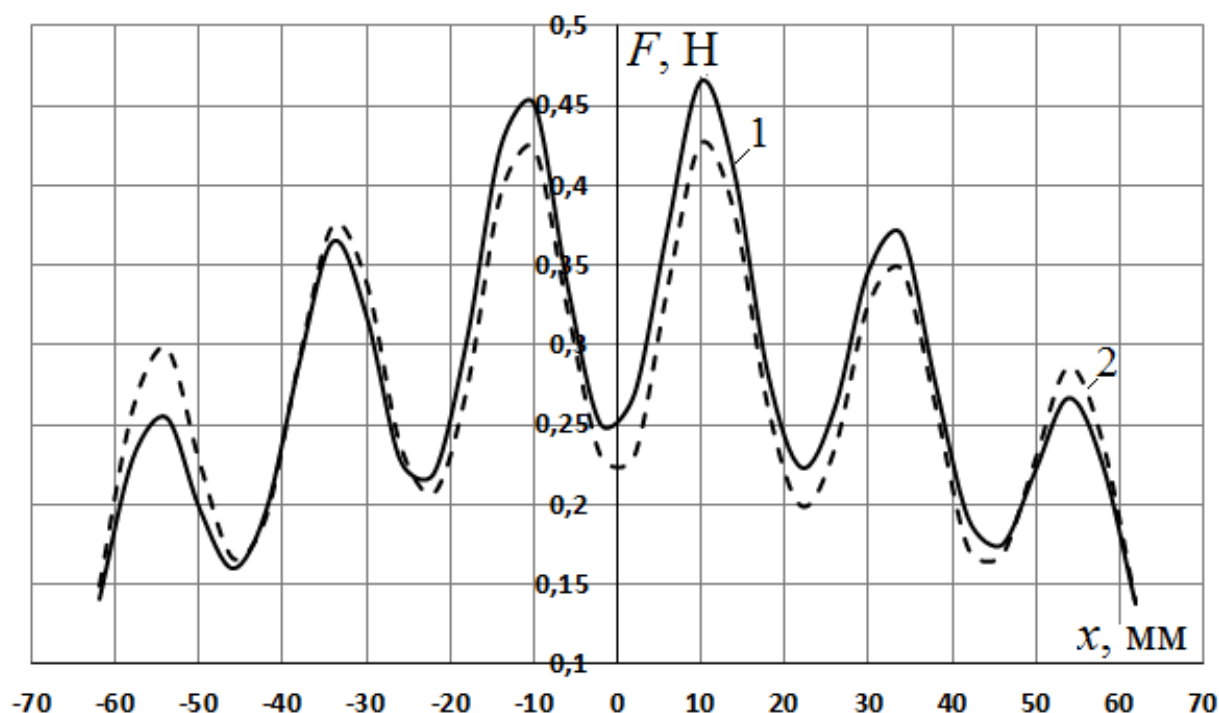


Рисунок 2.1 – Распределение электромагнитных усилий по длине ЛИМ:
1 – расчет в трехмерной постановке (Comsol Multiphysics); 2 – расчет в «квазитрехмерной» постановке по предлагаемой методике

Таблица 2.1 – Технические характеристики компьютеров, использованных при тестовых расчетах ЛИМ

Параметры	ПК	Сервер
Процессор	Intel Pentium Dual-Core T4500	Intel Xeon Processor E5-2630 v4
Количество ядер	2	10
Частота, МГц	2,3	2,2-3,1
Оперативная память, Гб	2 (DDR2)	256 (DDR4)
Жесткий диск, Тб	0,32	2

Известны аналитические методы расчета ЛИМ со ВЭ ограниченных размеров в двухмерной постановке, основанные на допущении существования в активной зоне только бегущей волны магнитного поля [29, 62]. Модель ЛИМ, принятая в [29, 62], включает двухсторонний бесконечно протяженный индуктор с гладкой (без зубчатости) поверхностью магнитопроводов (к такой модели сводятся и другие конструкции ЛИМ: с открытым односторонним индуктором, а также с односторонним индуктором и обратным магнитопроводом). Первичные и вторичные токи вынесены в область воздушного зазора. Подобный подход был впервые предложен профессором Вольдеком А.И. [1]. При этом в модели, предложенной в [29, 62], ВЭ в направлении оси z заполняет весь зазор, но в отличие от [1] в плоскости x - y имеет реальные размеры.

Схема модели ЛИМ показана на рис.2.2. Показанная модель описывается системой дифференциальных уравнений, решение которой позволяет получить аналитические выражения для составляющих вторичного тока в проводящей пластине (по осям x и y), а также для электромагнитного усилия, действующего на ВЭ.

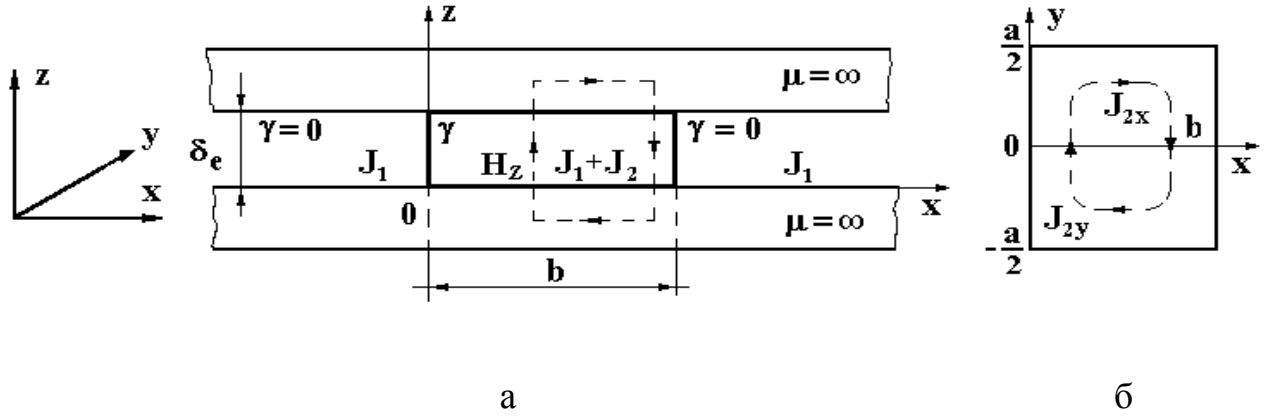


Рисунок 2.2 – Двухмерная модель ЛИМ [29, 62]:

а – к расчету магнитного поля; б – к расчету вторичных токов

Выражение для электромагнитного усилия в [29, 62] получено в виде:

$$F_x = \frac{4}{\pi^2} \mu_o ab \delta \operatorname{Re} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \cdot \frac{\varepsilon_o s J_{1m}^2}{\alpha(1 + \lambda_n^2 / \alpha^2 + j\varepsilon_o s)} \cdot \left[1 - k_{1n} \frac{1 - e^{(\chi_{1n} + j\alpha)b}}{(\chi_{1n} + j\alpha)b} + k_{2n} \frac{1 - e^{(\chi_{2n} + j\alpha)b}}{(\chi_{2n} + j\alpha)b} \right] \right\}. \quad (2.1)$$

В (2.1) J_{1m} представляет собой амплитуду объемной плотности первичного тока (A/m^2), а коэффициенты определяются выражениями

$$k_{1n} = \frac{e^{\chi_{2n}b} - e^{-j\alpha b}}{e^{\chi_{1n}b} - e^{\chi_{2n}b}}, \quad k_{2n} = \frac{e^{\chi_{1n}b} - e^{-j\alpha b}}{e^{\chi_{1n}b} - e^{\chi_{2n}b}},$$

$$\chi_{1n} = \alpha \left[\frac{\varepsilon_o(1-s)}{2} + \sqrt{\frac{\varepsilon_o^2(1-s)^2}{4} + \left(\frac{\lambda_n}{\alpha}\right)^2} + j\varepsilon_o \right],$$

$$\chi_{2n} = \alpha \left[\frac{\varepsilon_o(1-s)}{2} - \sqrt{\frac{\varepsilon_o^2(1-s)^2}{4} + \left(\frac{\lambda_n}{\alpha}\right)^2} + j\varepsilon_o \right],$$

$$\lambda_n = 2(n-1)\frac{\pi}{a} \quad (n = 1, 2, 3, \dots).$$

$$\varepsilon_0 = \frac{2\mu_0 \cdot \gamma \cdot f \cdot \tau^2 \cdot d}{\pi \cdot \delta_3}, \quad (2.3)$$

где ε_0 – электромагнитная добротность ЛИМ; μ_0 – магнитная постоянная; γ и d – удельная электропроводность и толщина ВЭ; τ – полюсное деление индуктора; δ_3 – эквивалентный воздушный зазор.

Достоинством модели является учет перераспределения вторичных токов, обусловленного ограниченностью размеров ВЭ. Однако, принятые в [29, 62] допущения о бесконечной протяженности линейных индукторов и существовании в зазоре только бегущей составляющей магнитного поля не применимо к ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями. Корректный учет неравномерности распределения магнитного поля по длине индуктора возможен при расчетах ЛИМ методом конечных элементов в двухмерной постановке (в пакетах ANSYS, Comsol Multiphysics, Elcut и др.). В то же время такой подход не позволяет учесть реальное распределение вторичных токов, особенно в случаях малых размеров ВЭ. С учетом сказанного для моделирования и расчетов рассматриваемых ЛИМ предлагается методика, основанная на «квазитрехмерном» подходе, сочетающая достоинства двухмерных аналитических и численных методов.

В [63] показано, что на основе аналитической модели, соответствующей схеме на рис. 2.2, возможна оценка влияния на характеристики ЛИМ поперечного краевого эффекта при разном соотношении размеров ВЭ и полюсного деления τ . При этом коэффициент поперечного краевого эффекта может быть определен из сравнения результатов расчета электромагнитного усилия для идеализированной ЛИМ с бесконечно широким в направлении оси y вторичным элементом ($a \gg b$) с учетом приведения усилия к реальной ширине ВЭ и расчета усилия при реальных размерах ВЭ:

$$k_{non} = \frac{F_{эм.ид}}{F_{эм}}. \quad (2.4)$$

В частности, при малой длине ВЭ ($b < 0,5\tau$), когда преобладает одноконтурное распределение вторичных токов, показано, что определяемые по (2.4) значения коэффициента поперечного эффекта $k_{\text{поп}}$ совпадают со значениями, получаемыми по предложенной ранее в [7, 64] формуле:

$$k_{\text{нон}} = 1 - \frac{2b}{\pi a} \cdot \text{th} \frac{\pi a}{2b}, \quad (2.5)$$

Как показано в [63, 65] и подтверждено расчетами, выполненными автором, использование такого поправочного коэффициента для определения электромагнитных усилий ЛИМ при $b < 0,5\tau$ дает достоверные результаты.

Применение коэффициентов $k_{\text{поп}}$, рассчитываемых по (2.4)-(2.5), позволяет скорректировать параметры ВЭ, задаваемые при расчетах ЛИМ с использованием метода конечных элементов в двухмерной постановке. В частности, в пакете Elcut (версия 5.5 и выше) имеется возможность моделирования массивного ВЭ с помощью цепной электрической схемы замещения, количество элементов которой соответствует количеству участков (блоков), на которые в направлении b разбивается ВЭ. С учетом сказанного сопротивление таких участков схемы замещения можно определять по выражению:

$$R_{\text{э}} = \frac{a}{\gamma \cdot \Delta b \cdot d \cdot k_{\text{нон}}}, \quad (2.6)$$

где a и d – ширина и толщина ВЭ; γ – удельная электропроводность ВЭ; $\Delta b = b/n$ – ширина участка разбиения ВЭ; n – их количество (четное число).

Сочетание достоинств аналитической и численной моделей ЛИМ в двухмерной постановке позволило создать методику расчета, в которой учитываются основные особенности ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями (неравномерность распределения магнитного поля по длине линейного индуктора и перераспределение вторичных токов, обусловленное ограниченностью размеров ВЭ). Алгоритм методики показан на рис. 2.3 (выделена оригинальная часть алгоритма).

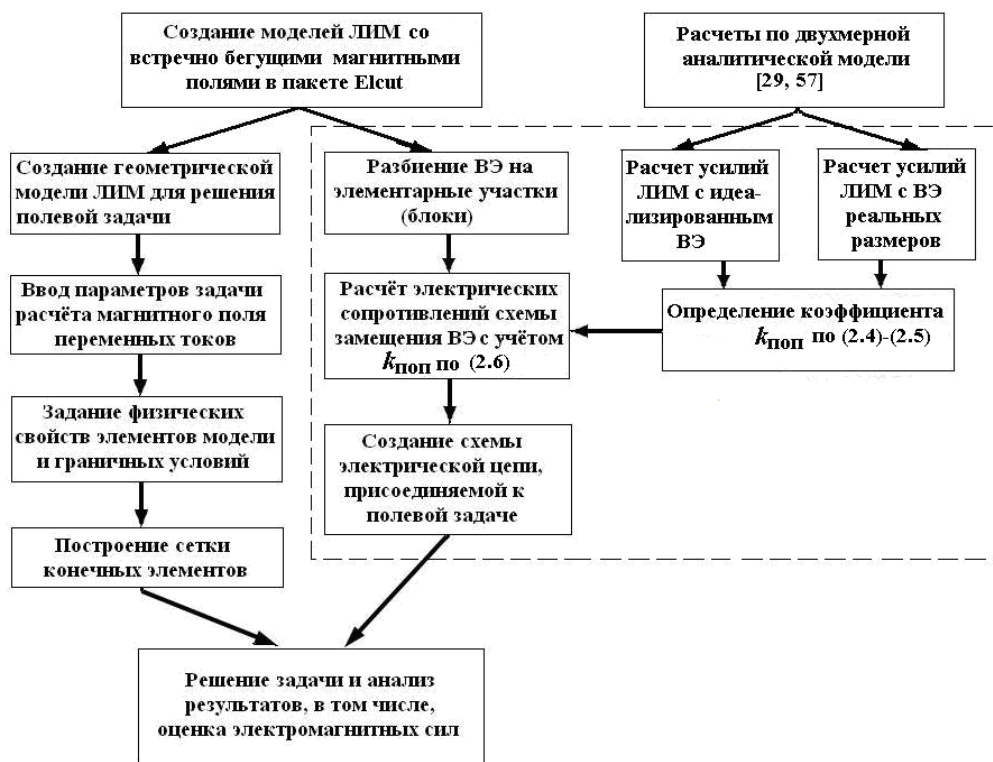
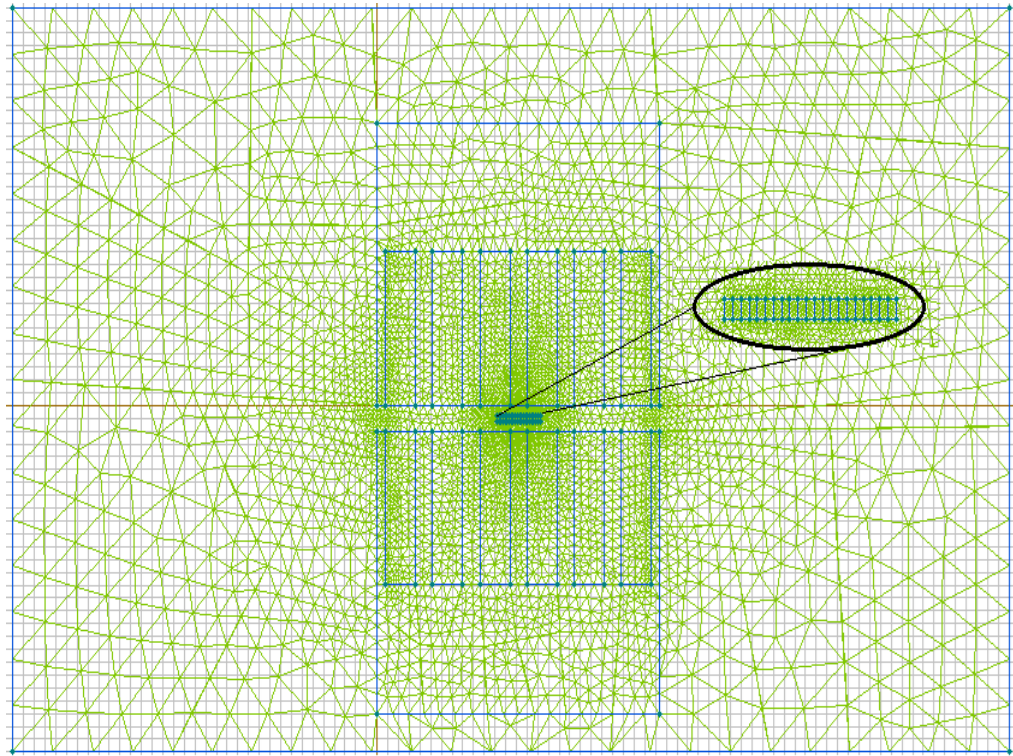
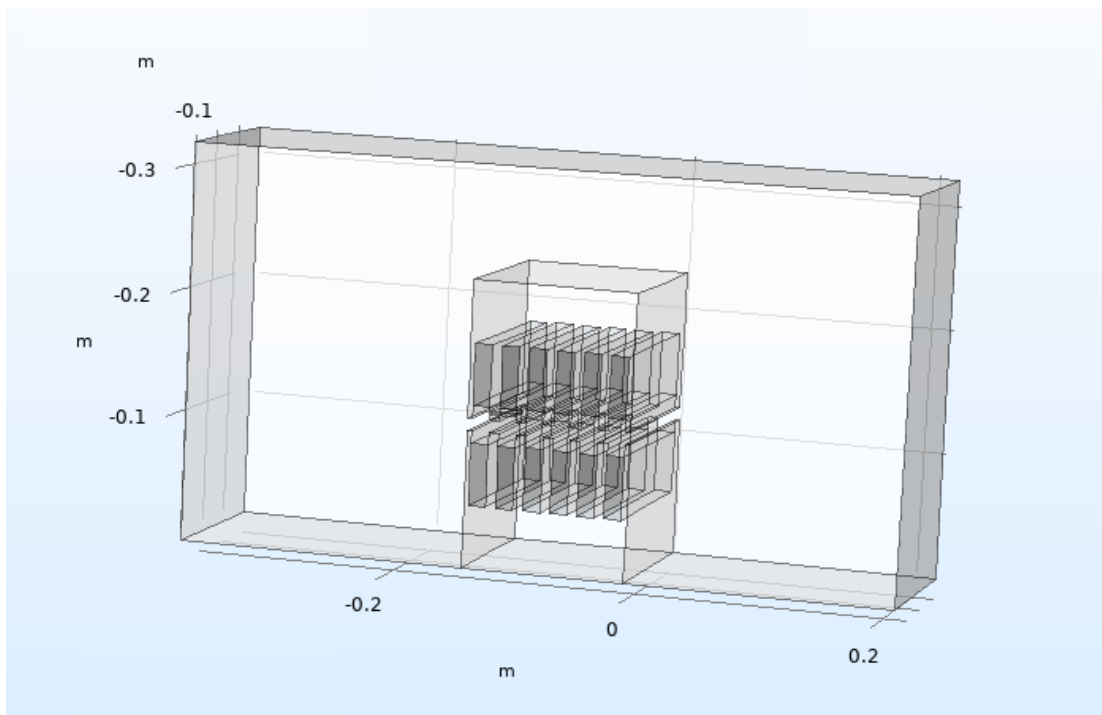


Рисунок 2.3 – Алгоритм расчета ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями

Тестовые расчеты по предлагаемой методике были выполнены для той же ЛИМ8, что и при расчетах в пакете Comsol Multiphysics. Геометрические модели ЛИМ8 для расчетов в пакетах Elcut и Comsol Multiphysics приведены на рис. 2.4. Алюминиевая пластина, выполняющая роль ВЭ, разбита в модели Elcut на 20 участков, которые соответствуют блокам электрической схемы замещения, присоединяемой к полевой задаче. Результаты расчета усилий ЛИМ8 по предлагаемой методике показаны на рис. 2.1 (кривая 2). Можно отметить хорошее качественное и количественное совпадение кривых распределения усилий, рассчитанных по трехмерной модели и по предлагаемой методике. Достоверность результатов расчетов по предлагаемой методике подтверждается в дальнейшем сравнениями расчетных и экспериментальных данных. Важно отметить, что подготовка расчетной модели в двумерной постановке менее трудоемка, чем для трехмерной модели в пакете Comsol Multiphysics, а для расчета одной точки на обычном ПК тратится около 10 с.



а)



б)

Рисунок 2.4 – Геометрические модели ЛИМ8 для пакетов Elcut (а) и Comsol Multiphysics (б)

Результаты расчетов ЛИМ по трехмерной модели в пакете Comsol Multiphysics подтвердили высказанное ранее в работах [58, 60] предположение о

чередовании в ВЭ малых размеров (меньших полюсного деления τ) одно- и двухконтурного распределения вторичных токов. Для случая алюминиевой пластины с размерами 20×20 мм ($b/\tau = 0,3$) распределения токов наглядно показаны на рис. 2.5 (а - одноконтурное распределение, б – распределение токов в промежуточном положении, в – двухконтурное распределение токов). Бегущее магнитное поле перемещается в направлении оси z .

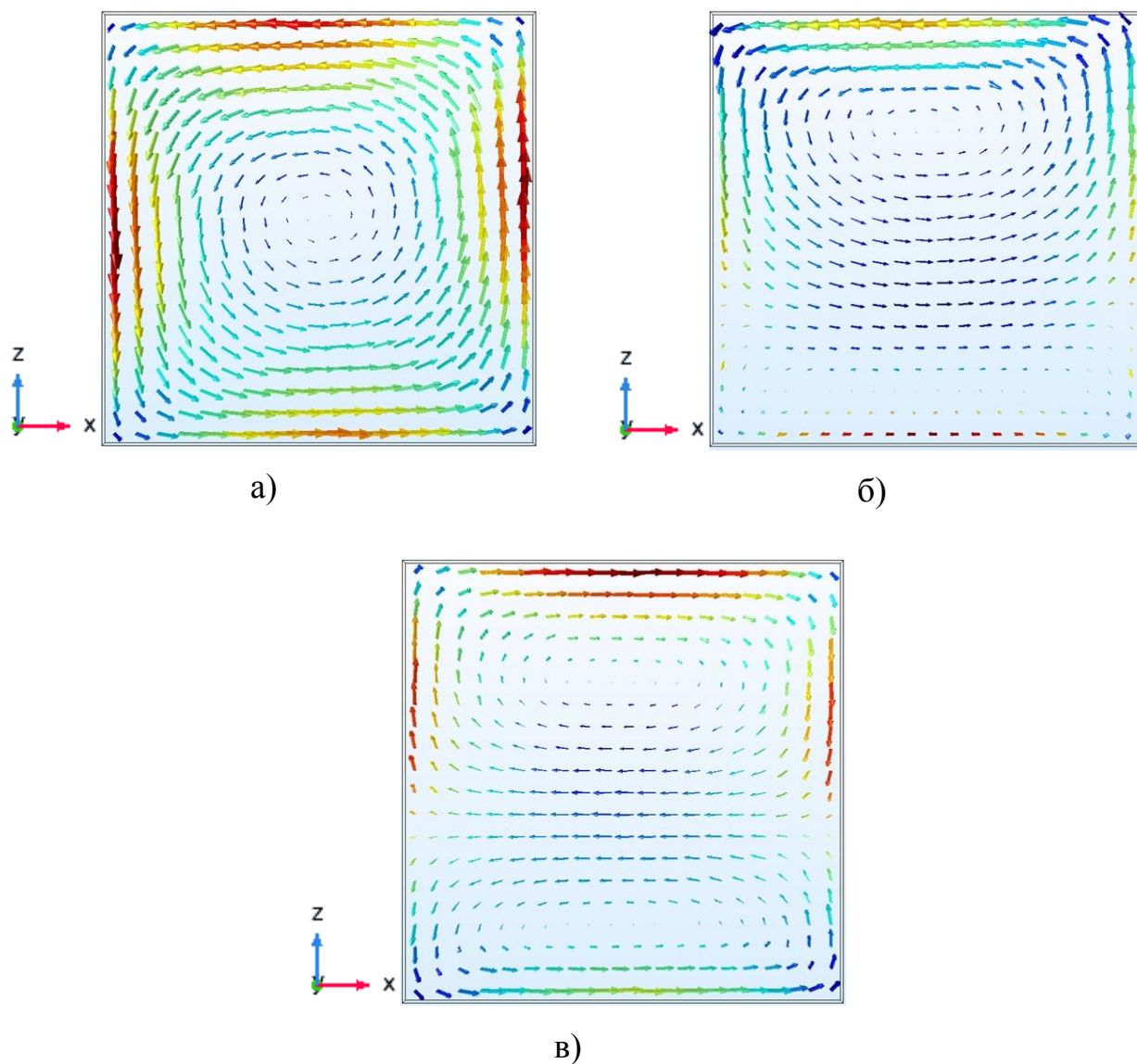


Рисунок 2.5 – Конфигурации вторичных токов ЛИМ в разные моменты времени

Расчеты показали, что при соотношении размеров $b/\tau = 0,3$ (для исследованной ЛИМ8 $\tau = 66$ мм) доля времени существования двухконтурного распре-

деления токов составляет 10%, что совпадает с аналитическими оценками, приведенными в [63, 65]. Полученные результаты подтвердили обоснованность использования в случае ВЭ малых размеров для расчета коэффициента поперечного эффекта выражения (2.5), полученного при допущении об одноконтурном распределении вторичных токов. Например, в случае квадратного ВЭ ($a = b$) коэффициент поперечного эффекта равен $k_{\text{поп}} = 0,416$. Формула (2.5) дает удовлетворительные результаты при относительных размерах ВЭ $b/\tau < 0,5$. При увеличении длины ВЭ следует уточнять значения $k_{\text{поп}}$ в ходе дополнительных расчетов по (2.4).

Результаты тестовых расчетов позволяют рекомендовать описанную методику расчета в рамках «квазитрехмерного» подхода, сочетающую достоинства аналитической и численной моделей ЛИМ в двухмерной постановке, для исследования ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями.

2.2. Исследование электромагнитных сил в ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями

Целью исследований ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями являлось выявление закономерностей протекания электромагнитных процессов в них. Уже первые оценки характеристик, рассматриваемых ЛИМ показали, что в центре линейного индуктора возникает зона, характеризующаяся искажениями в распределении как магнитного поля, так и электромагнитных усилий. Такие искажения могут приводить к снижению эффективности работы ЛИМ и созданию неработоспособных установок на их основе, поэтому, в первую очередь, исследовалась возможность управления структурой магнитного поля и распределением электромагнитных усилий в рассматриваемых машинах.

При теоретических исследованиях использовалось моделирование ЛИМ с помощью метода конечных элементов в пакете Elcut 5.5 в «квазитрехмерной» постановке (как показано в разделе 2.1). Одновременно с электромагнитными расчетами проводились экспериментальные исследования ЛИМ, данные которых позволяли оценивать достоверность результатов расчетов и справедливость

теоретических выводов. Для решения указанных задач основные расчеты выполнялись для ЛИМ, созданных в исследовательской лаборатории кафедры. Технические характеристики таких ЛИМ приведены в разделе 5 (табл. 5.1-5.2).

На первом этапе исследовалась четырехполюсная ЛИМ6 с односторонним индуктором мощностью до 500 ВА. Индуктор исследованной машины имеет полюсное деление $\tau = 102$ мм и ширину активной зоны $L_{\text{и}} = 105$ мм. Трехфазная однослойная обмотка такого индуктора, уложенная в 24 паза, позволяла легко изменять схемы соединений катушек для формирования встречно бегущих магнитных полей. Основные варианты таких обмоток, создающих разбегающиеся магнитные поля (РБМП), показаны в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Схемы укладки катушек ЛИМ6, создающей разбегающиеся магнитные поля

Вид поля	$N_{\text{п}}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
РБМП	1р	У	У	С	С	Х	Х	В	В	З	З	А	А	А	А	З	З	В	В	Х	Х	С	С	У	У
	2р	А	А	У	У	С	С	Х	Х	В	В	З	З	А	А	З	З	В	В	Х	Х	С	С	У	У
	3р	З	З	А	А	У	У	С	С	Х	Х	В	В	А	А	З	З	В	В	Х	Х	С	С	У	У
	4р	В	В	З	З	А	А	У	У	С	С	Х	Х	А	А	З	З	В	В	Х	Х	С	С	У	У
	5р	Х	Х	В	В	З	З	А	А	У	У	С	С	А	А	З	З	В	В	Х	Х	С	С	У	У
	6р	С	С	Х	Х	В	В	З	З	А	А	У	У	А	А	З	З	В	В	Х	Х	С	С	У	У

Для оценки процессов в активной зоне ЛИМ наиболее показательны кривые распределения электромагнитных усилий, действующих на ВЭ, по длине индуктора. В качестве ВЭ при исследованиях использовались алюминиевые пластины (сплав АД31, удельная электропроводность $\gamma = 29$ МСм/м) разных размеров (b , a , d – длина ВЭ в направлении движения поля, его ширина и толщина). Изменение усилий при перемещении ВЭ вдоль индуктора обусловлено неравномерностью распределения магнитного поля, которая связана с целым рядом явлений: а) первичный краевой эффект, обусловленный разомкнутостью магнитопровода; б) изменения магнитной проводимости воздушного зазора из-

за зубцово-пазовой структуры индуктора; в) искажения поля в центре ЛИМ на границе встречно бегущих полей; г) наличие полузаполненных пазов и др.

Очевидно, что влияние неравномерности распределения магнитного поля наиболее заметно для ВЭ малой длины. Поэтому основные исследования выполнены на ВЭ с размерами $b \times a \times d = 20 \times 100 \times 6$ мм (зазор 3,5 мм). Кривые распределения электромагнитных усилий по длине индукторов ($N_{\text{п}}$ – номера пазов) для схем обмоток, приведенных в табл. 2.2, показаны на рис. 2.6-2.11. Результаты для разных схем получены при одинаковой токовой нагрузке (среднее значение амплитуды суммарного тока паза 750 А). В расчетах учитывалась несимметрия токов отдельных фаз. Частота токов $f = 50$ Гц.

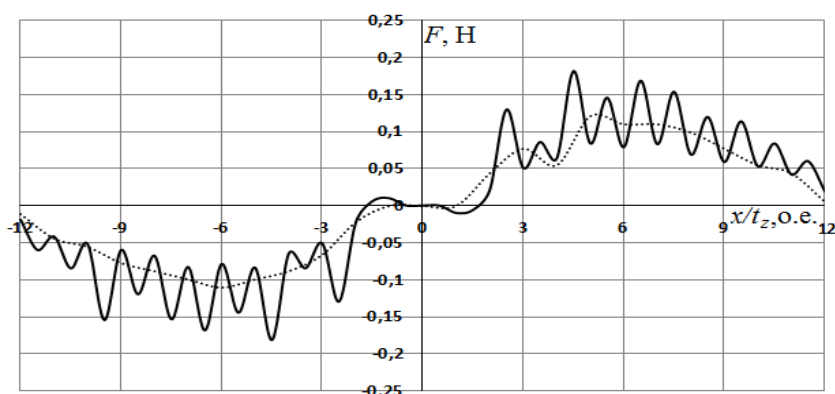


Рисунок 2.6 – Сопоставление усилий для ЛИМ6, создающей РБМП по варианту 1р. Сплошная линия – расчет, пунктир – эксперимент

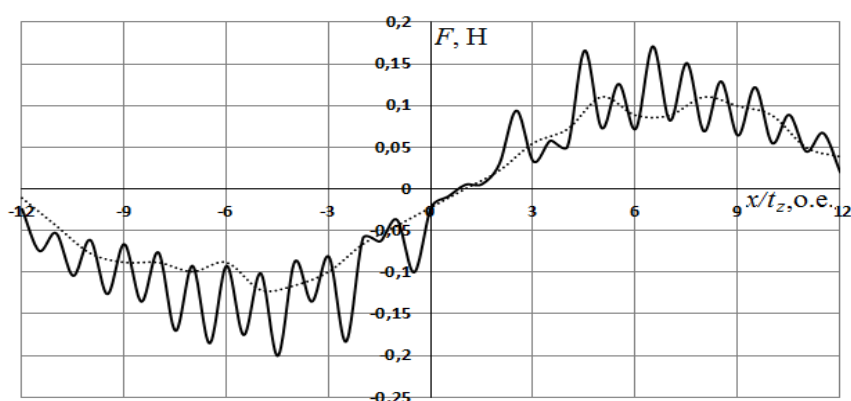


Рисунок 2.7 – Сопоставление усилий для ЛИМ6, создающей РБМП по варианту 2р. Сплошная линия – расчет, пунктир – эксперимент

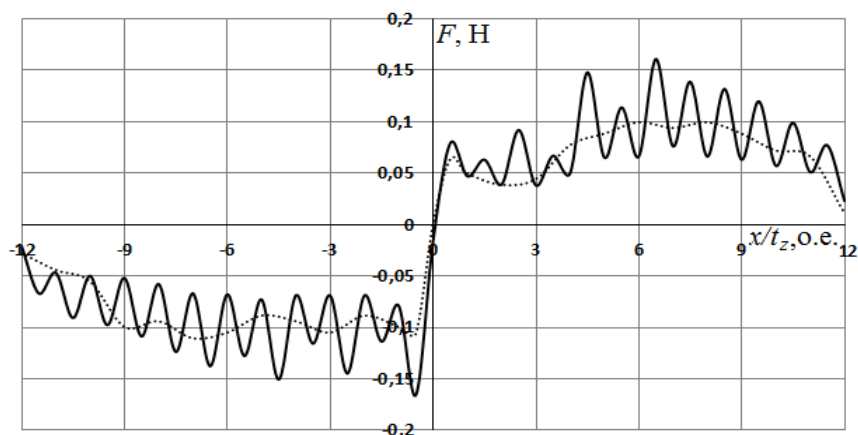


Рисунок 2.8 – Сопоставление усилий для ЛИМ6, создающей РБМП по варианту 3р. Сплошная линия – расчет, пунктир – эксперимент

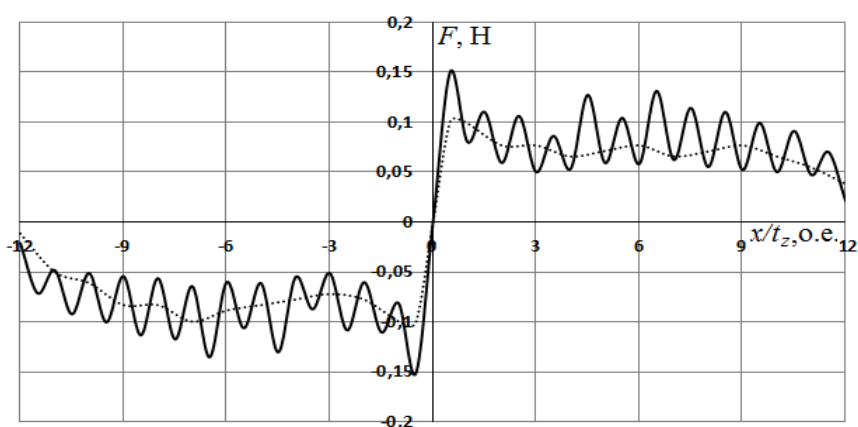


Рисунок 2.9 – Сопоставление усилий для ЛИМ6, создающей РБМП по варианту 4р. Сплошная линия – расчет, пунктир – эксперимент

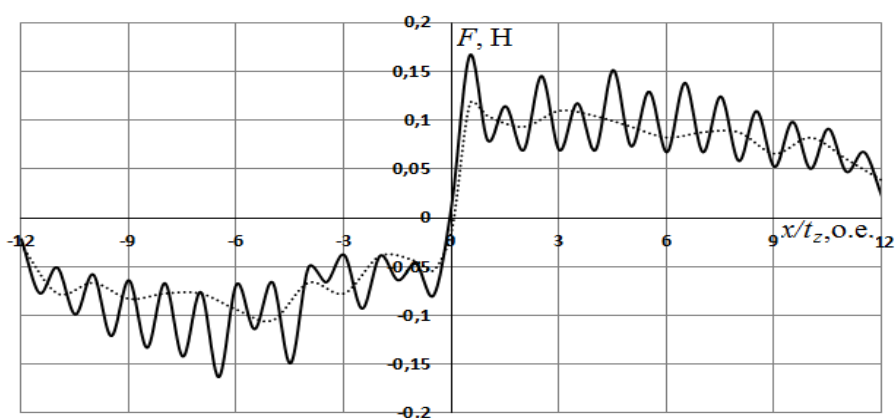


Рисунок 2.10 – Сопоставление усилий для ЛИМ6, создающей РБМП по варианту 5р. Сплошная линия – расчет, пунктир – эксперимент

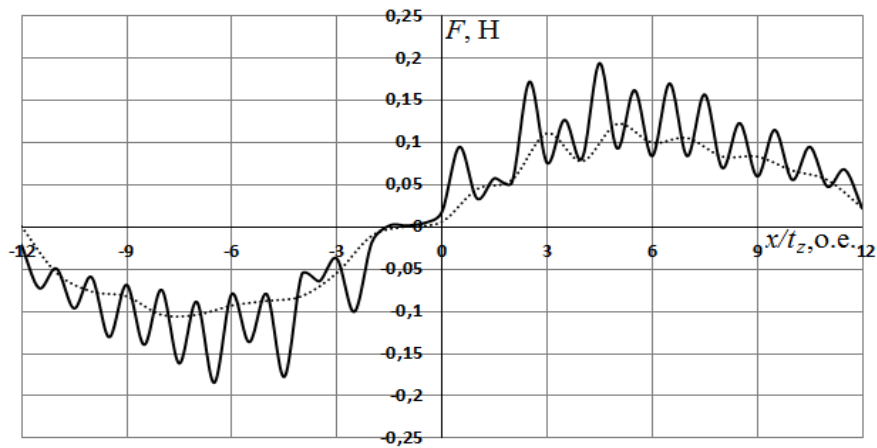


Рисунок 2.11 – Сопоставление усилий для ЛИМб, создающей РБМП по варианту бр. Сплошная линия – расчет, пунктир – эксперимент

Анализируя представленные результаты, можно отметить хорошее совпадение расчетных и экспериментальных зависимостей (поскольку длина ВЭ b превышает длину зубцового деления индуктора t_z , то влияние зубцовых гармоник поля на усилия, полученные в опытах, сглаживается). Расхождение усредненных расчетных усилий (без колебаний, обусловленных зубцовой гармоникой) и данных опыта не превышает 10-15%.

На рис. 2.6-2.11 видно, что характер искажения электромагнитных усилий в центральной зоне индукторов зависит от схемы обмотки индуктора, от порядка чередования фаз на левой и правой его половинах. В ЛИМ по варианту 1р (рис. 2.6) характер изменения усилий на левой и правой половинах индуктора одинаков, что соответствует симметричному расположению катушек отдельных фаз справа и слева от центра индуктора (зеркальная симметрия). Однако в центре индуктора наблюдается «мертвая» зона протяженностью четыре зубцовых деления ($2/3\tau$). Это объясняется тем, что в пазах с 11 по 14 расположены стороны катушек одной и той же фазы (АААА), создающие пульсирующее магнитное поле с тангенциальным направлением потока над поверхностью индуктора. При этом над этими зубцовыми делениями нет бегущей составляющей магнитного поля.

В кривых распределения усилий ЛИМ по варианту 4р (рис. 2.9) «мертвой» зоны нет. Это объясняется тем, что волны бегущего магнитного поля начинаются от оси центрального зубца. Стороны катушек одноименной фазы расположенные в пазах с 11 по 14 (XXAA) создают дополнительное пульсирующее поле в центре индуктора. Дополнительный магнитный поток, ось которого направлена перпендикулярно к поверхности индуктора, складывается с бегущим магнитным полем, увеличивая его амплитуду в центральной зоне. Как видно на рис. 2.9, это приводит к некоторому росту электромагнитных усилий в центре индуктора и росту градиента усилия на оси индуктора.

Варианты ЛИМ с другими схемами соединения обмоток (2р, 3р, 5р, 6р) характеризуются несимметрией кривых распределения усилий (рис. 2.7-2.8 и 2.10-2.11) и смещением оси зоны искажений от оси индуктора. В ЛИМ по варианту 2р пульсирующее поле определяется сторонами катушек AA, расположенными в 13 и 14 пазах. На рис. 2.7 наблюдается «мертвая» зона меньших по сравнению со схемой 1р размеров, причем ось такой мертвой зоны сдвинута направо от оси индуктора. Похожее распределение усилий на рис. 2.11, соответствующее схеме 6р. В этом случае пульсирующая составляющая поля определяется сторонами катушек YY, расположенными в 11 и 12 пазах, и ось зоны искажений смещена влево от оси индуктора. В ЛИМ по варианту 3р искажения кривой усилий определяются сторонами катушек, расположенных в пазах с 13 по 16 (AAZZ), и ось зоны искажений находится на расстоянии $2t_z$ правее оси индуктора (рис. 2.8). Аналогичная картина на рис. 2.10, где зона искажений находится над пазами 9-12, занятыми сторонами катушек YYCC. При этом ось зоны искажений смещена влево от оси индуктора.

Для той же четырехполюсной машины ЛИМ6 выполнены исследования характеристик при возбуждении сбегающихся магнитных полей (СБМП). Варианты схем обмоток, создающих такие поля, приведены в табл. 2.3, а результаты исследований распределения электромагнитных усилий по длине ЛИМ показаны на рис. 2.12-2.17.

Таблица 2.3 – Схемы укладки катушек ЛИМ6, создающей сбегающиеся магнитные поля

Вид поля	N_{Π}	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
СБМП	1с	A	A	Z	Z	B	B	X	X	C	C	Y	Y	Y	Y	C	C	X	X	B	B	Z	Z	A	A
	2с	A	A	Z	Z	B	B	X	X	C	C	Y	Y	C	C	X	X	B	B	Z	Z	A	A	Y	Y
	3с	A	A	Z	Z	B	B	X	X	C	C	Y	Y	X	X	B	B	Z	Z	A	A	Y	Y	C	C
	4с	A	A	Z	Z	B	B	X	X	C	C	Y	Y	B	B	Z	Z	A	A	Y	Y	C	C	X	X
	5с	A	A	Z	Z	B	B	X	X	C	C	Y	Y	Z	Z	A	A	Y	Y	C	C	X	X	B	B
	6с	A	A	Z	Z	B	B	X	X	C	C	Y	Y	A	A	Y	Y	C	C	X	X	B	B	Z	Z

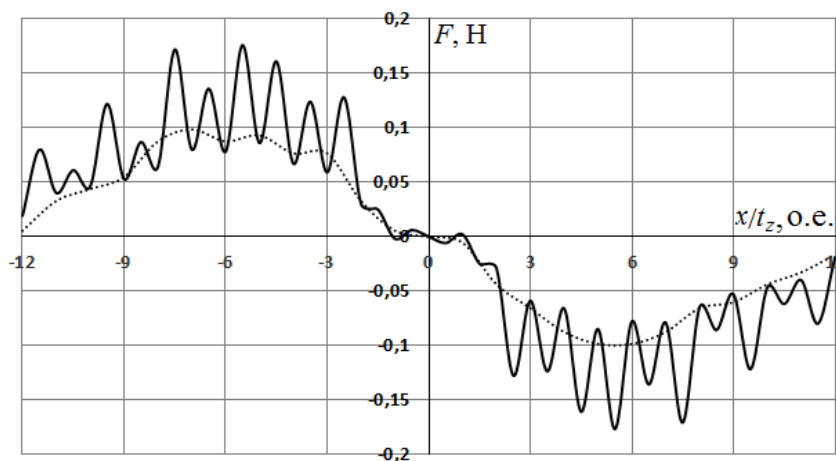


Рисунок 2.12 – Расчетные (сплошная линия) и экспериментальные (пунктир) усилия 4-х полюсной ЛИМ, создающей СБМП по варианту 1с

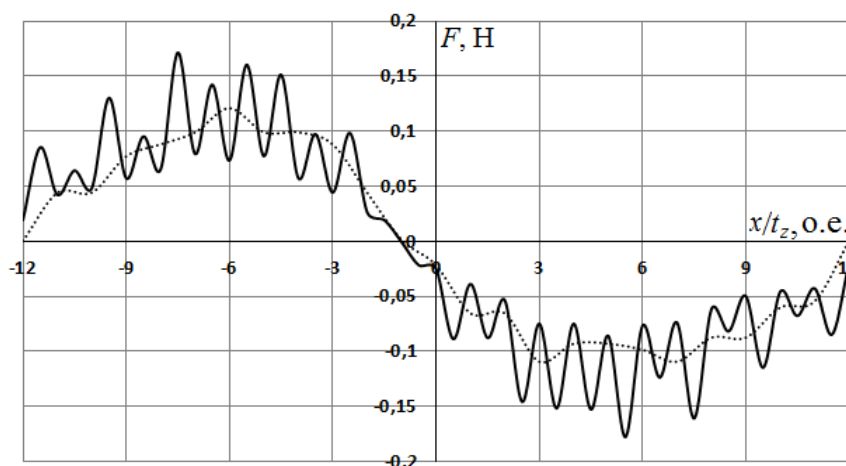


Рисунок 2.13 – Расчетные (сплошная линия) и экспериментальные (пунктир) усилия 4-х полюсной ЛИМ, создающей СБМП по варианту 2с

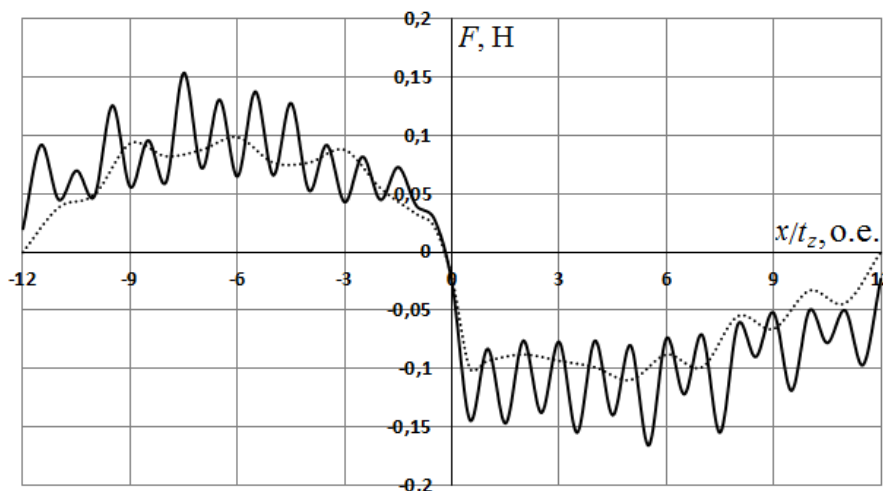


Рисунок 2.14 – Расчетные (сплошная линия) и экспериментальные (пунктир) усилия 4-х полюсной ЛИМ, создающей СБМП по варианту 3с

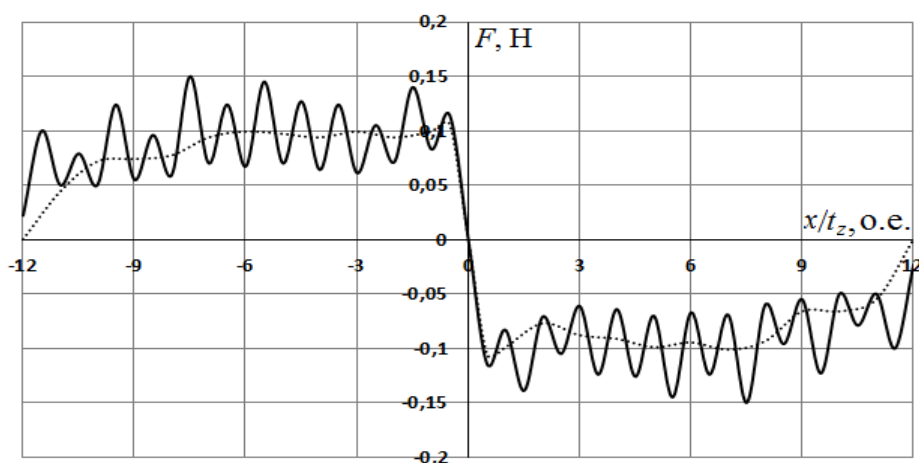


Рисунок 2.15 – Расчетные (сплошная линия) и экспериментальные (пунктир) усилия 4-х полюсной ЛИМ, создающей СБМП по варианту 4с

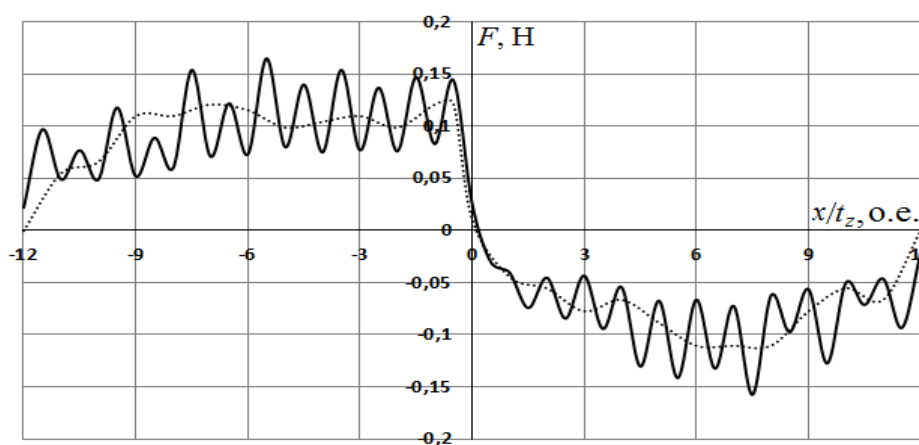


Рисунок 2.16 – Расчетные (сплошная линия) и экспериментальные (пунктир) усилия 4-х полюсной ЛИМ, создающей СБМП по варианту 5с

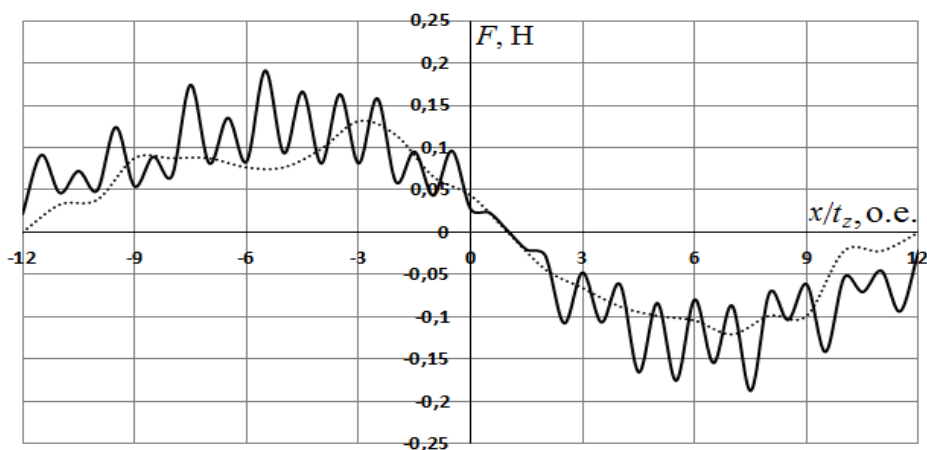


Рисунок 2.17 – Расчетные (сплошная линия) и экспериментальные (пунктир) усилия 4-х полюсной ЛИМ, создающей СБМП по варианту 6с

В табл. 2.3 принята та же логика формирования схем, что и в табл. 2.2. В частности, схема 1с характеризуется зеркальной симметрией расположения катушек отдельных фаз относительно оси индуктора, а в схеме 4с при симметричном расположении катушек одноименных фаз в левой и в правой половинах обмотки токи этих фаз имеют противоположное направление («антисимметрия»). Как и в табл. 2.2 в центральной части индуктора выделены пазы, с катушками участвующими в создании пульсирующих полей. На кривых распределения усилий над этими пазами появляются зоны искажения усилий.

В целом можно отметить, что закономерности изменения электромагнитных усилий по длине ЛИМ в случае СБМП совпадают с характеристиками ЛИМ, создающей РБМП. В частности, ЛИМ по варианту 1с характеризуется появлением «мертвой» зоны в центре индуктора, а ЛИМ по варианту 4с – ее отсутствием. В случае других вариантов схем обмоток СБМП, как и в случае РБМП, наблюдается несимметричное распределение в левой и правой частях ЛИМ, и смещение зон искажения усилий от оси индуктора.

После анализа процессов в ЛИМ6 с простой однослойной обмоткой, создающей встречно бегущие магнитные поля, выполнено исследование ЛИМ4, индуктор которой имеет двухслойную обмотку. При четном числе катушек отдельных фаз, необходимом для создания двух одинаковых половин обмотки, на длине индуктора образуется 5 полюсных делений (пазы крайних полюсных де-

лений являются полузаполненными). Для усиления магнитных полей и увеличения электромагнитных усилий в ЛИМ4 использован обратный магнитопровод. Основные данные машины: полюсное деление $\tau = 39$ мм, ширина активной зоны $L_{и} = 40$ мм, зазор $\delta = 6,1$ мм. В качестве ВЭ использована алюминиевая пластина с размерами $20 \times 20 \times 3$ мм. Частота питающей сети $f = 50$ Гц. При расчетах использовались значения токов, полученные в опытах (среднее значение ампер-витков катушки 225 А). Варианты схем обмоток ЛИМ4, приведены в табл. 2.4.

Таблица 2.4 – Схемы укладки катушек ЛИМ4 с двухслойной обмоткой, создающей встречно бегущие магнитные поля

Вид поля	№ пазов	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
РБМП	1р				Y	C	X	B	Z	A	x	c	y	a	z	b
		B	Z	A	Y	C	X	a	z	b	x	c	y			
	2р				A	Y	C	X	B	Z	x	c	y	a	z	b
		X	B	Z	A	Y	C	a	z	b	x	c	y			
	3р				Z	A	Y	C	X	B	x	c	y	a	z	b
		C	X	B	Z	A	Y	a	z	b	x	c	y			
4р				B	Z	A	Y	C	X	x	c	y	a	z	b	
	Y	C	X	B	Z	A	a	z	b	x	c	y				
5р				X	B	Z	A	Y	C	x	c	y	a	z	b	
	A	Y	C	X	B	Z	a	z	b	x	c	y				
6р				C	X	B	Z	A	Y	x	c	y	a	z	b	
	Z	A	Y	C	X	B	a	z	b	x	c	y				
СБМП	1с				X	C	Y	A	Z	B	y	c	x	b	z	a
		A	Z	B	X	C	Y	b	z	a	y	c	x			
	2с				X	C	Y	A	Z	B	a	y	c	x	b	z
		A	Z	B	X	C	Y	x	b	z	a	y	c			
	3с				X	C	Y	A	Z	B	z	a	y	c	x	b
		A	Z	B	X	C	Y	c	x	b	z	a	y			
4с				X	C	Y	A	Z	B	b	z	a	y	c	x	
	A	Z	B	X	C	Y	y	c	x	b	z	a				
5с				X	C	Y	A	Z	B	x	b	z	a	y	c	
	A	Z	B	X	C	Y	a	y	c	x	b	z				
6с				X	C	Y	A	Z	B	c	x	b	z	a	y	
	A	Z	B	X	C	Y	z	a	y	c	x	b				

Сопоставление расчетных и экспериментальных усилий для некоторых вариантов схем, показанных в табл. 2.4, представлено на рис. 2.18-2.23.

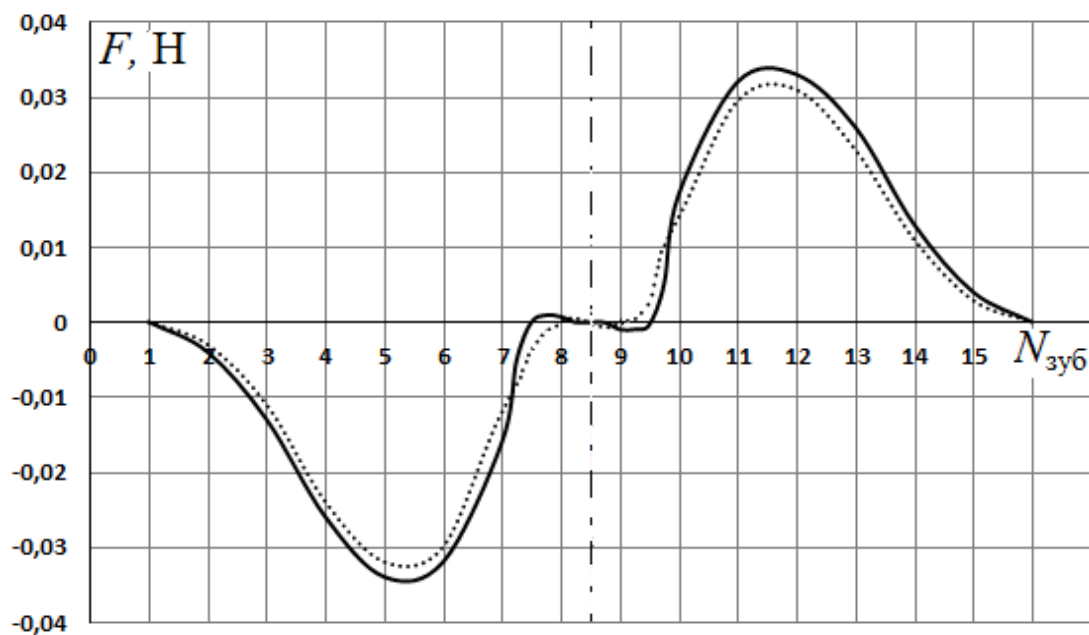


Рисунок 2.18 – Распределение усилий по длине ЛИМ4, создающей РБМП по варианту 1р. Сплошная линия – расчет, пунктир – эксперимент

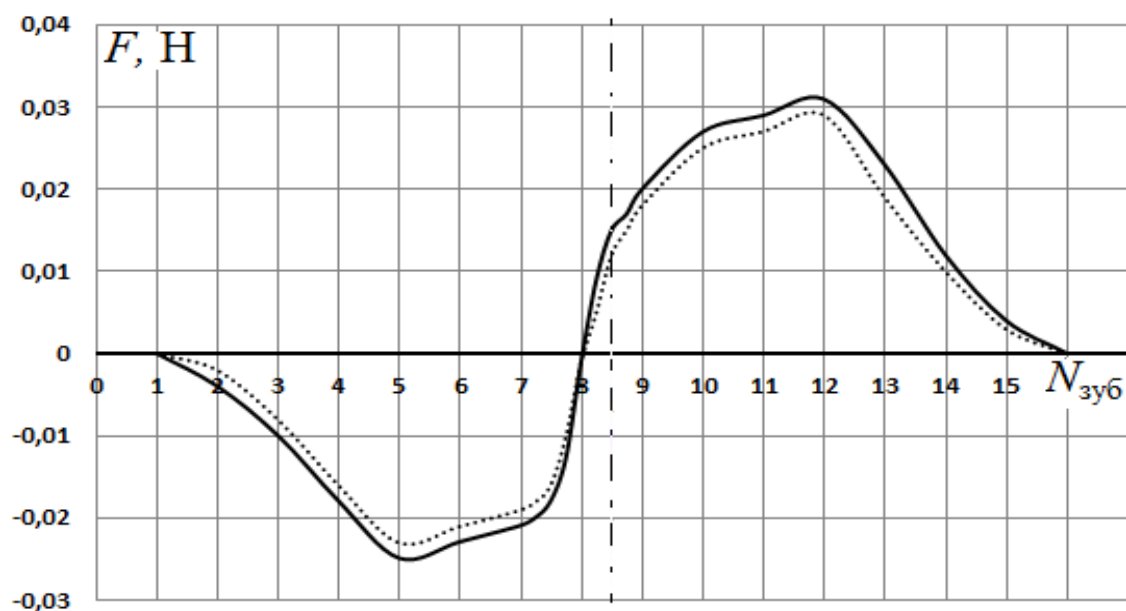


Рисунок 2.19 – Распределение усилий по длине ЛИМ4, создающей РБМП по варианту 3р. Сплошная линия – расчет, пунктир – эксперимент

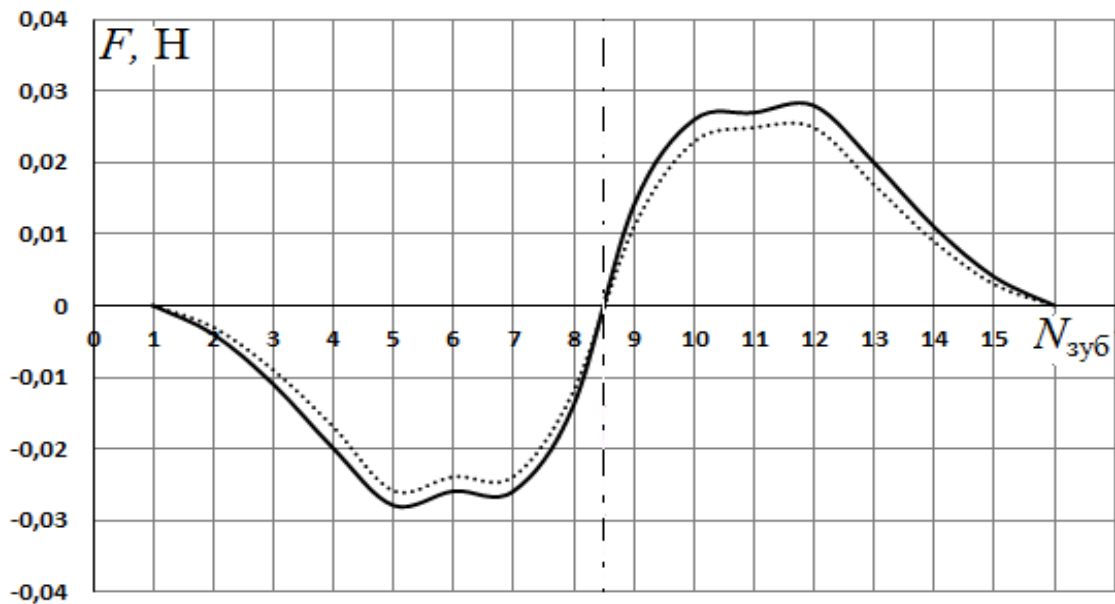


Рисунок 2.20 – Распределение усилий по длине ЛИМ4, создающей РБМП по варианту 4р. Сплошная линия – расчет, пунктир – эксперимент

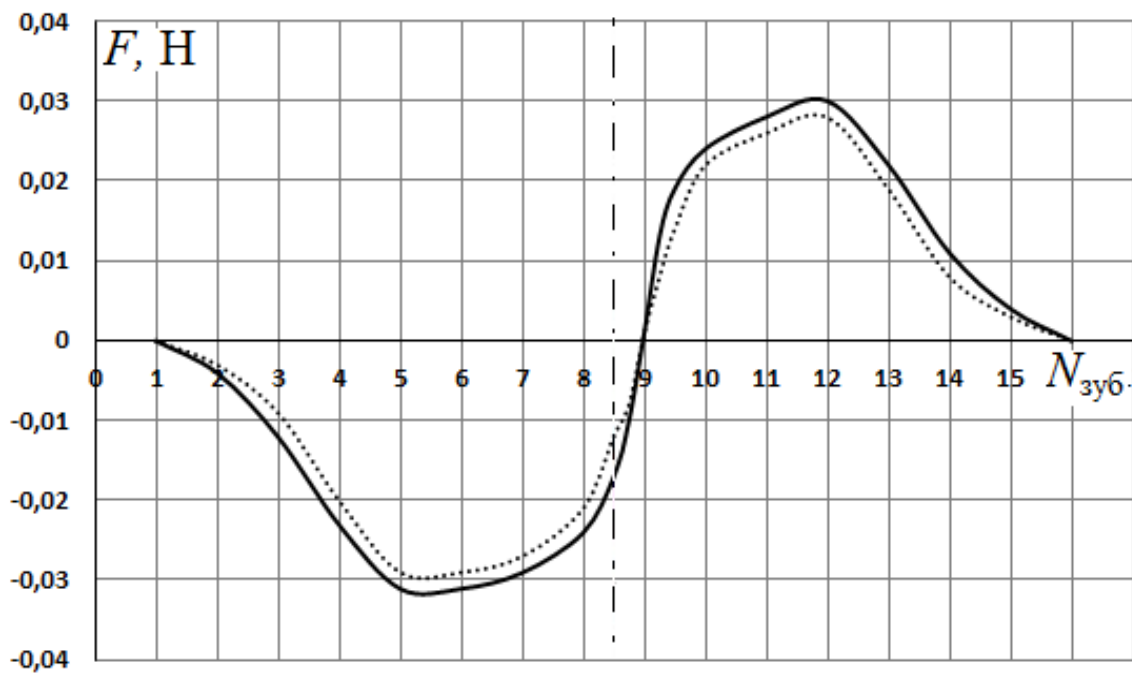


Рисунок 2.21 – Распределение усилий по длине ЛИМ4, создающей РБМП по варианту 5р. Сплошная линия – расчет, пунктир – эксперимент

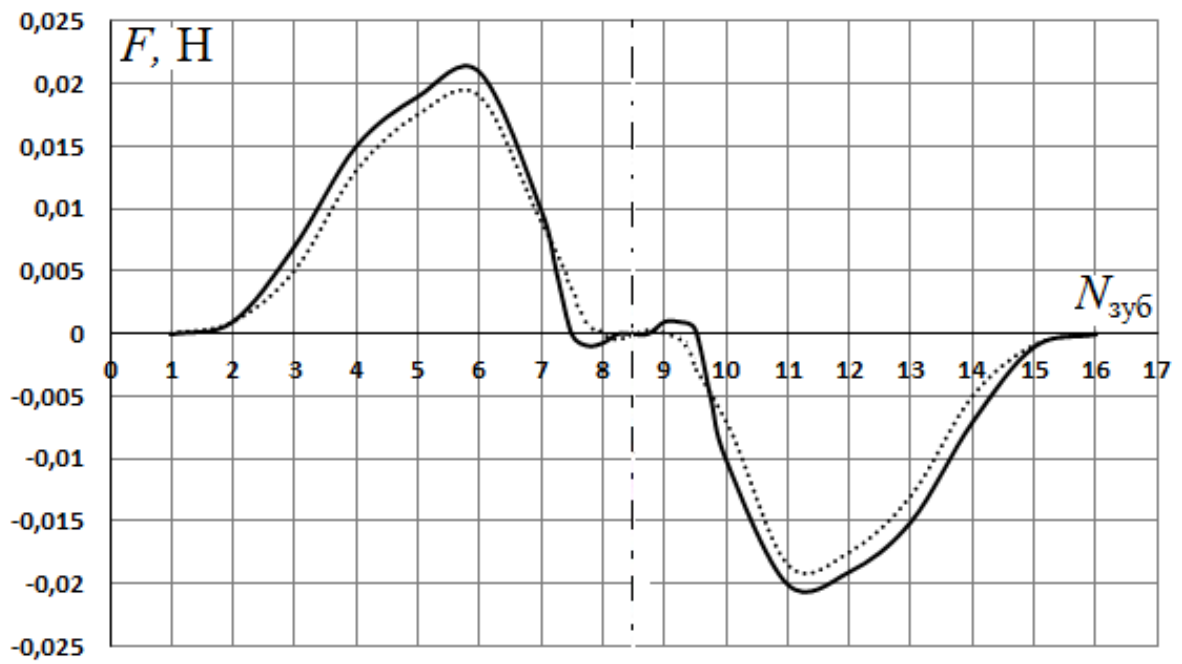


Рисунок 2.22 – Распределение усилий по длине ЛИМ4, создающей СБМП по варианту 1с. Сплошная линия – расчет, пунктир – эксперимент

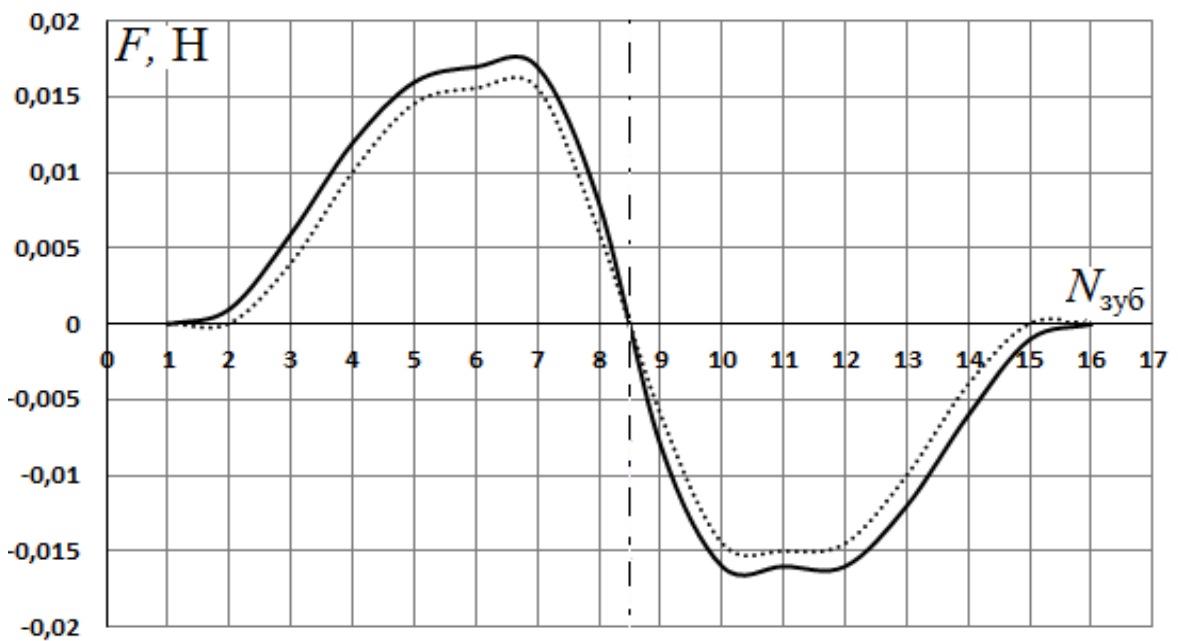


Рисунок 2.23 – Распределение усилий по длине ЛИМ4, создающей СБМП по варианту 4с. Сплошная линия – расчет, пунктир – эксперимент

Как видно на представленных рисунках характер кривых распределения электромагнитных усилий по длине ЛИМ4 в целом соответствует данным, полученным для ЛИМ6. Как и в случае ЛИМ6, наибольшее искажение усилий наблюдается в ЛИМ4 со схемами обмоток 1р и 1с. В табл. 2.4 выделены 3 паза в центре таких ЛИМ (с 7 по 9), над которыми наблюдается «мертвая» зона. Нетрудно видеть, что стороны катушек разных фаз, расположенные в этих пазах, создают поле, равнозначное полю сторон катушек ZZZ. Как показано ранее, при этом над поверхностью индуктора возникает тангенциальный пульсирующий магнитный поток, а бегущая составляющая поля отсутствует. Наилучшее распределение усилий (без «мертвой» зоны) получается в ЛИМ4 со схемами обмоток 4р и 4с. При этом волны бегущего магнитного поля начинаются непосредственно от центрального паза. Однако в отличие от ЛИМ6 с однослойной обмоткой в ЛИМ4 при схемах 4р и 4с в центре не создается дополнительное пульсирующее поле (суммарный ток в центральном пазу равен нулю), и увеличение электромагнитных усилий не наблюдается. При других схемах обмоток ЛИМ4 (2р, 3р, 5р, 6р и 2с, 3с, 5с, 6с) картина распределения усилий по длине индукторов носит промежуточный характер между двумя описанными вариантами.

Таким образом, выводы, сделанные ранее для ЛИМ6 с однослойной обмоткой, касающиеся влияния чередования фаз на характер распределения кривых усилий, подтвердились при исследовании 5-ти полюсной машины с двухслойной обмоткой. Выявленные закономерности протекания электромагнитных процессов в ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями позволяют управлять структурой магнитного поля в центральной зоне индуктора и распределением электромагнитных усилий в рассматриваемых машинах за счет рационального выбора обмоток.

Можно отметить, что результаты, полученные при исследовании ЛИМ с длиной ВЭ 20 мм, в целом подтвердились при анализе машин с другими размерами ВЭ. Примеры анализа таких машин показаны в Приложении 1.

2.3. Анализ электромагнитных процессов в ЛИМ со встречно бегущими полями на основе построения диаграмм намагничивающих сил

В общем случае при учете несимметрии рассматриваемых ЛИМ и сложности распределения вторичных токов необходимы расчеты электромагнитных процессов численными методами в трехмерной постановке, что делает теоретические исследования ресурсо- и трудоемкими. Например, создание геометрических моделей, подобных показанным на рис. 2.4, для опытно-промышленных ЛИМ, в которых применяются сложные схемы обмоток, уложенных в десятки пазов (иногда более 100 пазов), вызывает значительные трудности. Несмотря на это, на первом этапе исследования, для оценки корреляции распределения индукции магнитного поля и электромагнитных усилий, для ЛИМб были проведены соответствующие расчеты в пакете ELCUT. Результаты расчетов огибающих кривых индукции для схем 2с и 4с приведены на рис. 2.24. Сопоставление кривых распределения поля с кривыми распределения электромагнитных усилий по длине ЛИМ, представленных в разделе 2.2 на рис. 2.13 и 2.15, показывает, что по картине поля нельзя прогнозировать характер распределения электромагнитного усилия, поскольку в огибающих кривых магнитной индукции на рис. 2.24 наряду с бегущим полем учитываются пульсирующие составляющие. Это подтвердилось и в ходе экспериментальных исследований (раздел 5.2.2).

Не менее трудоемки экспериментальные оценки вариантов, рассматриваемых ЛИМ, требующие создания физических моделей машин с разными схемами укладки трехфазных обмоток. С учетом сказанного автором предложен метод анализа электромагнитных процессов в ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями и выбора схем их обмоток на основе построения диаграмм намагничивающих сил (н.с.).

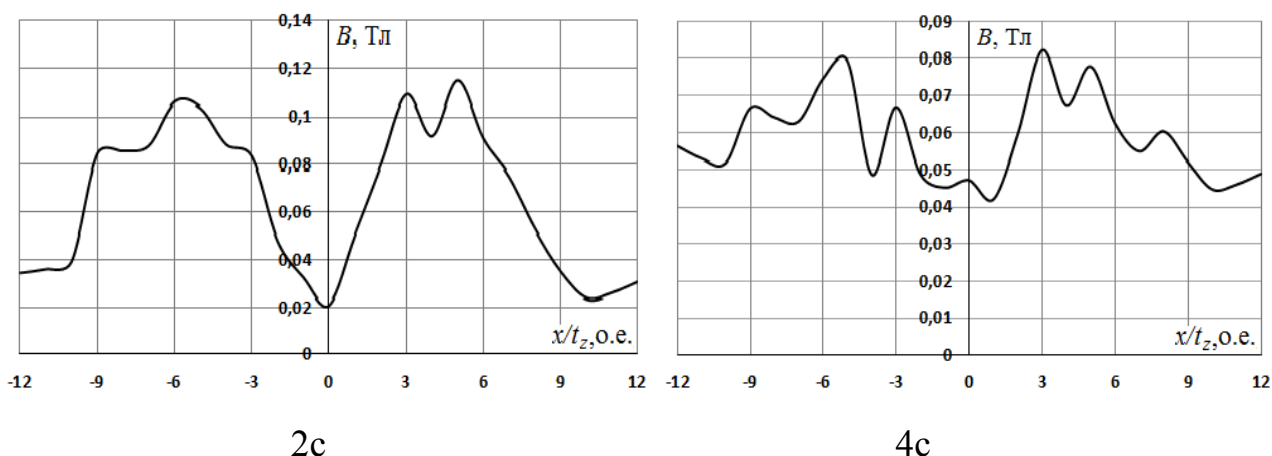


Рисунок 2.24 – Распределение индукции в ЛИМб

Известен классический метод графического построения кривых н.с. (интегральный метод), создаваемых многофазными обмотками [66], заключающийся в пошаговом сложении намагничивающих сил (ампер-витков) катушек с учетом их распределения по пазам для значений токов в фазах, соответствующих конкретным моментам времени. Автором разработана модификация указанного метода, реализованная в программной среде Excel. Использование возможностей электронных таблиц позволяет автоматизировать построение кривых намагничивающих сил обмоток, существенно снижая трудоемкость анализа.

Построение кривых н.с. и сопоставление схем различных обмоток целесообразно вести в относительных единицах, приняв за единицу намагничивающую силу катушки с максимальным током. В случае однослойной обмотки ампер-витки паза совпадают с н.с. катушки, при двухслойной обмотке – определяются суммированием н.с. катушек, лежащих в одном пазу. С учетом этого алгоритм расчета предполагает задание в относительных единицах н.с. катушек разных фаз для различных моментов времени.

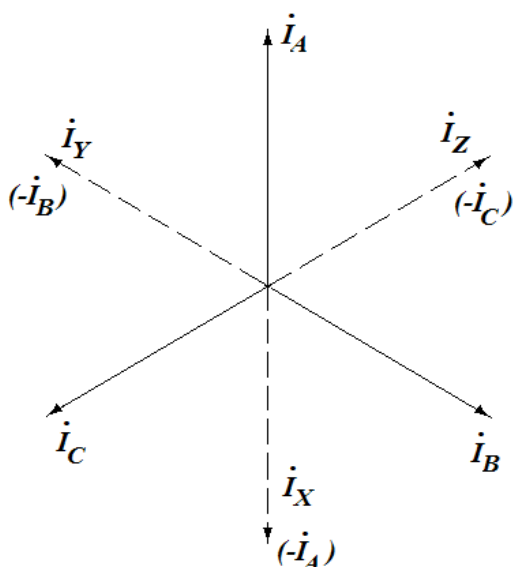


Рисунок 2.25 – Векторная диаграмма токов обмотки с фазной зоной 60°

При использовании трехфазных обмоток с шестидесятиградусной фазной зоной (как показано на рис. 2.25) удобно выбрать интервал времени (или электрический угол ωt) равным $1/6$ части периода. Значения токов в катушках отдельных фаз для такого случая приведены в табл. 2.5 (при необходимости интервал может быть уменьшен).

Таблица 2.5 – Значения токов в катушках отдельных фаз (о.е.) для разных моментов времени

№ п/п	$\omega t,^\circ$	A	Z	B	X	C	Y
1	0,00	1,00	0,50	-0,50	-1,00	-0,50	0,50
2	60,00	0,50	1,00	0,50	-0,50	-1,00	-0,50
3	120,00	-0,50	0,50	1,00	0,50	-0,50	-1,00
4	180,00	-1,00	-0,50	0,50	1,00	0,50	-0,50
5	240,00	-0,50	-1,00	-0,50	0,50	1,00	0,50
6	300,00	0,50	-0,50	-1,00	-0,50	0,50	1,00

Ввод данных в программу заключается только в задании схемы укладки катушек разных фаз по пазам индуктора. Дальнейшее суммирование н.с. в таблицах Excel и построение диаграмм производится автоматически. Результаты расчетов могут быть представлены в виде столбчатых диаграмм, полностью соответствующих виду кривых н.с. при графическом построении диаграмм классическим методом. Однако в этом случае теряется наглядность результатов при наложении ряда диаграмм н.с. для разных моментов времени. Поэтому отдано предпочтение представлению результатов в виде графиков распределения н.с. по длине линейного индуктора.

На первом этапе методика оценки электромагнитных процессов в ЛИМ на основе анализа диаграмм намагничивающих сил была опробована на лабораторных образцах ЛИМ, рассмотренных в разделе 2.2. В табл. 2.6 представлены варианты схем обмоток четырехполюсной ЛИМ6 с однослойной обмоткой. В зависимости от схемы линейный индуктор такой машины позволяет возбуждать как бегущее магнитное поле (БМП), так и встречно бегущие поля: разбегающиеся (РБМП) и сбегающиеся (СБМП).

Таблица 2.6 – Основные варианты схем укладки катушек четырехполюсной ЛИМ6 с однослойной обмоткой, создающей встречно бегущие

магнитные поля

Вид поля	№ пазов	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
БМП		A	A	Z	Z	B	B	X	X	C	C	Y	Y	A	A	Z	Z	B	B	X	X	C	C	Y	Y
РБМП	1р	Y	Y	C	C	X	X	B	B	Z	Z	A	A	A	A	Z	Z	B	B	X	X	C	C	Y	Y
	2р	A	A	Y	Y	C	C	X	X	B	B	Z	Z	A	A	Z	Z	B	B	X	X	C	C	Y	Y
	3р	Z	Z	A	A	Y	Y	C	C	X	X	B	B	A	A	Z	Z	B	B	X	X	C	C	Y	Y
	4р	B	B	Z	Z	A	A	Y	Y	C	C	X	X	A	A	Z	Z	B	B	X	X	C	C	Y	Y
	5р	X	X	B	B	Z	Z	A	A	Y	Y	C	C	A	A	Z	Z	B	B	X	X	C	C	Y	Y
	6р	C	C	X	X	B	B	Z	Z	A	A	Y	Y	A	A	Z	Z	B	B	X	X	C	C	Y	Y
СБМП	1с	A	A	Z	Z	B	B	X	X	C	C	Y	Y	Y	Y	C	C	X	X	B	B	Z	Z	A	A
	2с	A	A	Z	Z	B	B	X	X	C	C	Y	Y	C	C	X	X	B	B	Z	Z	A	A	Y	Y
	3с	A	A	Z	Z	B	B	X	X	C	C	Y	Y	X	X	B	B	Z	Z	A	A	Y	Y	C	C
	4с	A	A	Z	Z	B	B	X	X	C	C	Y	Y	B	B	Z	Z	A	A	Y	Y	C	C	X	X
	5с	A	A	Z	Z	B	B	X	X	C	C	Y	Y	Z	Z	A	A	Y	Y	C	C	X	X	B	B
	6с	A	A	Z	Z	B	B	X	X	C	C	Y	Y	A	A	Y	Y	C	C	X	X	B	B	Z	Z

В качестве базы для сравнения вариантов на рис. 2.26 представлена диаграмма н.с. для ЛИМ, создающей БМП: распределение н.с. F по длине ЛИМ ($N_{зуб}$ – номера зубцов индуктора) в разные моменты времени.

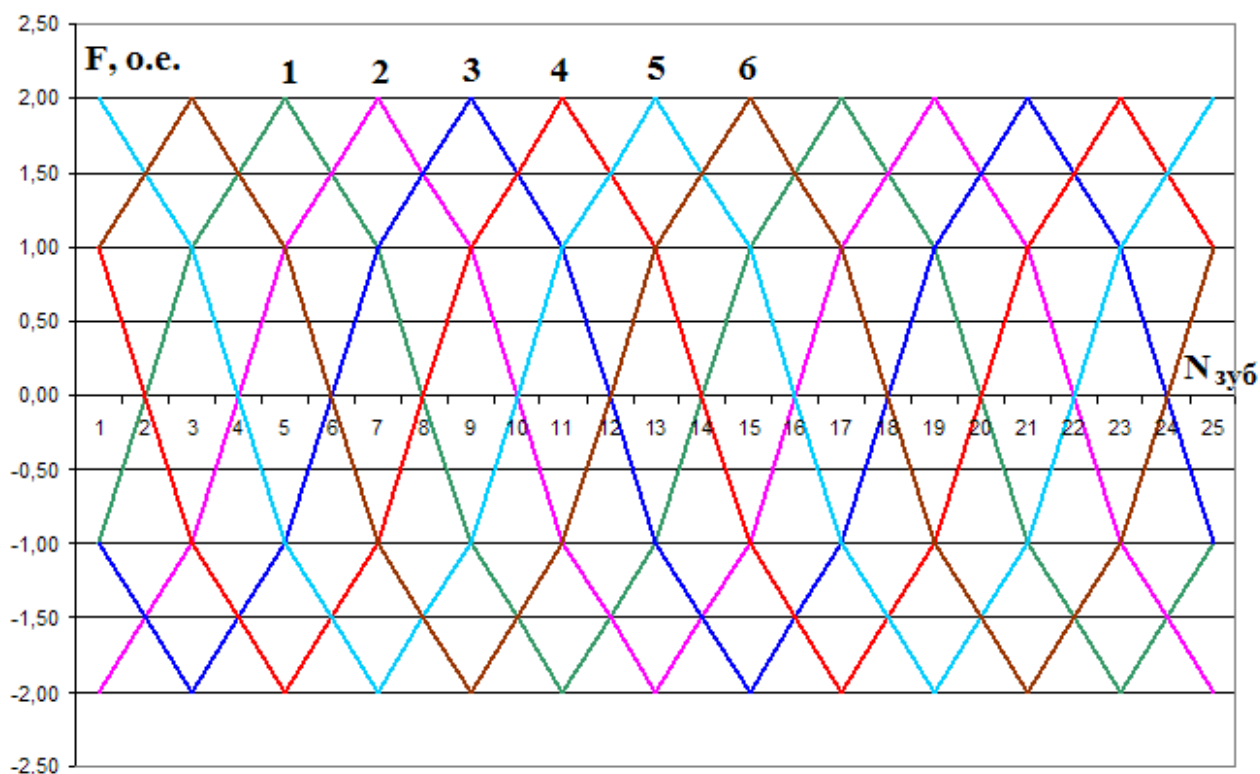


Рисунок 2.26 – Диаграмма н.с. ЛИМ, создающей БМП, для моментов времени, соответствующих табл. 2.1

На рис. 2.26 каждая кривая включает четыре полуволны, что соответствует четырем полюсам ЛИМ. Нетрудно видеть перемещение волн н.с. и появление пульсаций н.с. на краях линейного индуктора (над 1 и 25 зубцами). Как известно [1], такие пульсации н.с. обуславливают появление пульсирующих составляющих магнитного поля в активной зоне ЛИМ. В простейшем случае распределение индукции магнитного поля по длине ЛИМ описывается выражением:

$$B = B_{\delta} \sin(\omega t - \alpha x) - (-1)^p B_c \sin \omega t \quad (2.7)$$

где B_{δ} и B_c – амплитуды бегущей и пульсирующей составляющей индукции магнитного поля в зазоре ЛИМ.

Предлагаемая методика позволяет в пакете Excel легко получить из диа-

грамм н.с. кривые распределения индукции магнитного поля. В относительных единицах для случая $B_{\delta} = 1,0$ и $B_c = 0,2$ подобные кривые поля представлены на рис. 2.27. Вид кривых распределения магнитного поля вполне соответствует классическим представлениям о магнитном поле в ЛИМ [1].

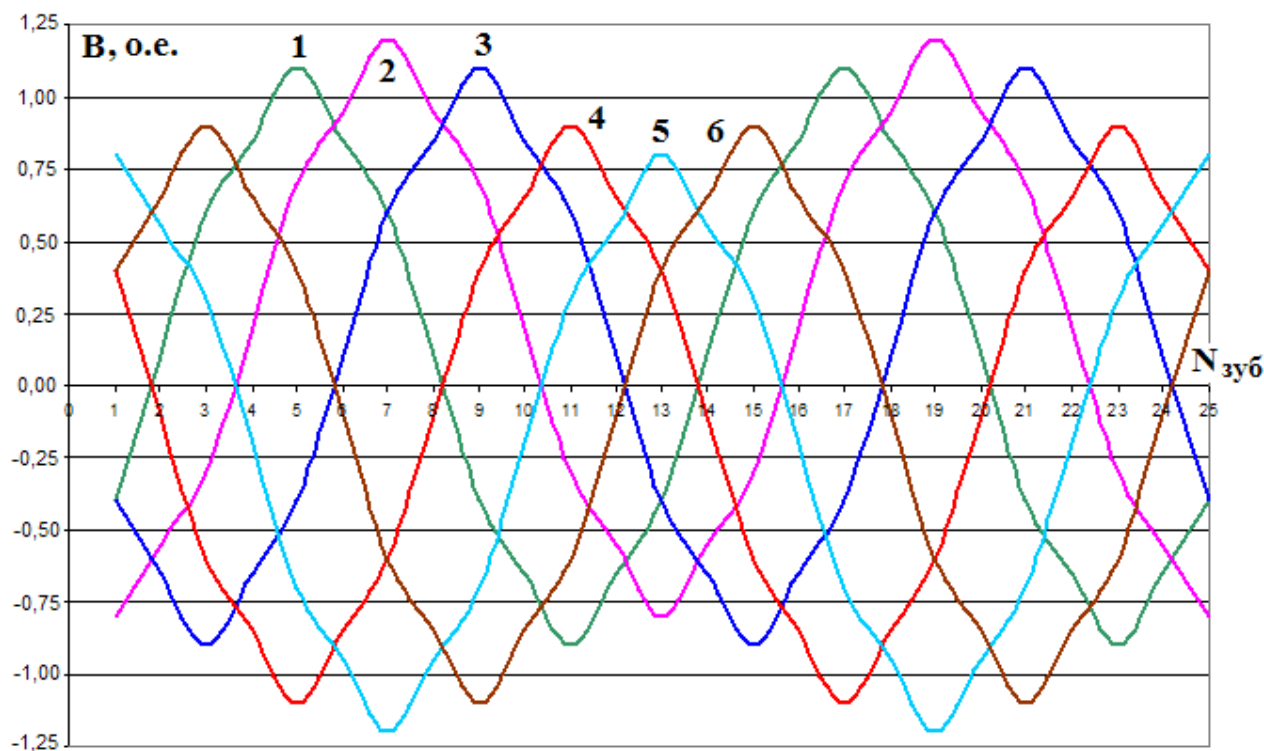


Рисунок 2.27 – Кривые распределения магнитной индукции для ЛИМ с БМП в различные моменты времени

Результаты, полученные при анализе ЛИМ, индуктор которой создает БМП, подтверждают возможности использования предлагаемой методики для анализа процессов в ЛИМ.

На рис. 2.28-2.33 показаны диаграммы намагничивающих сил для рассматриваемой ЛИМ6 с однослойной обмоткой, создающей магнитные поля, разбегающиеся от центра линейного индуктора (РБМП).

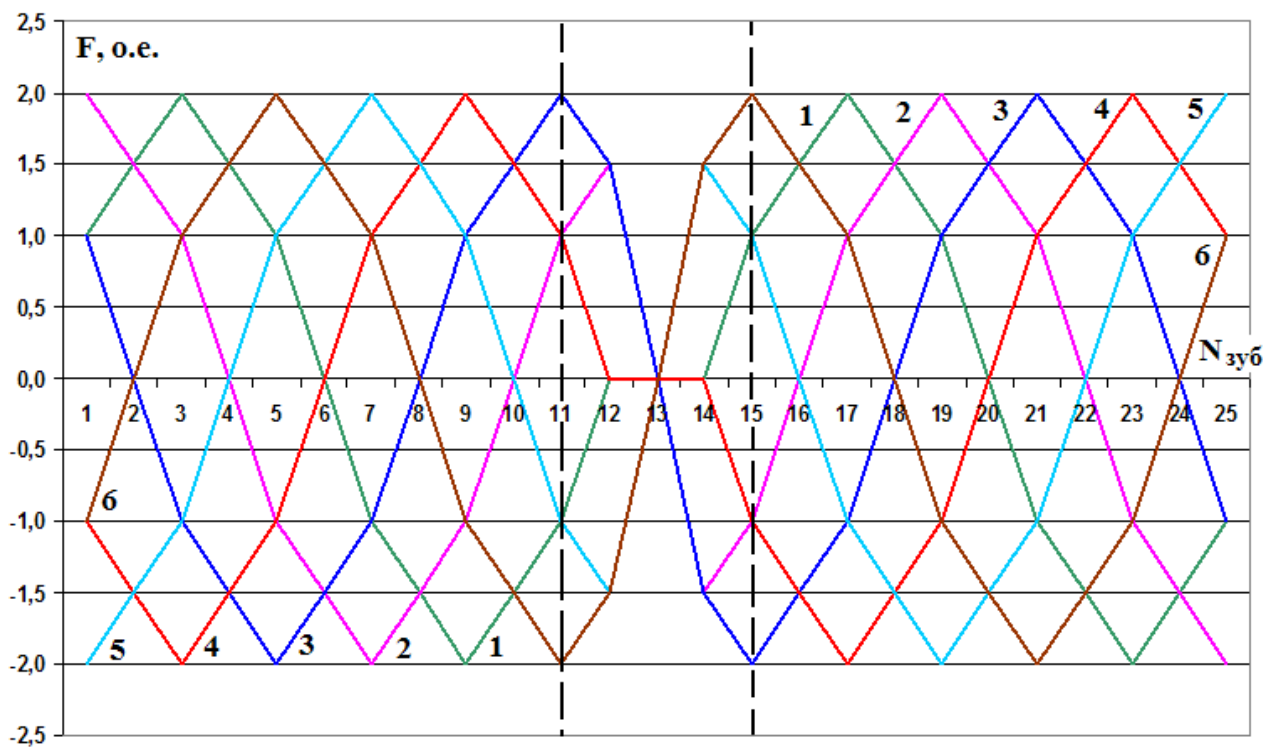


Рисунок 2.28 – Диаграмма н.с. ЛИМ6 с однослойной обмоткой варианту 1р

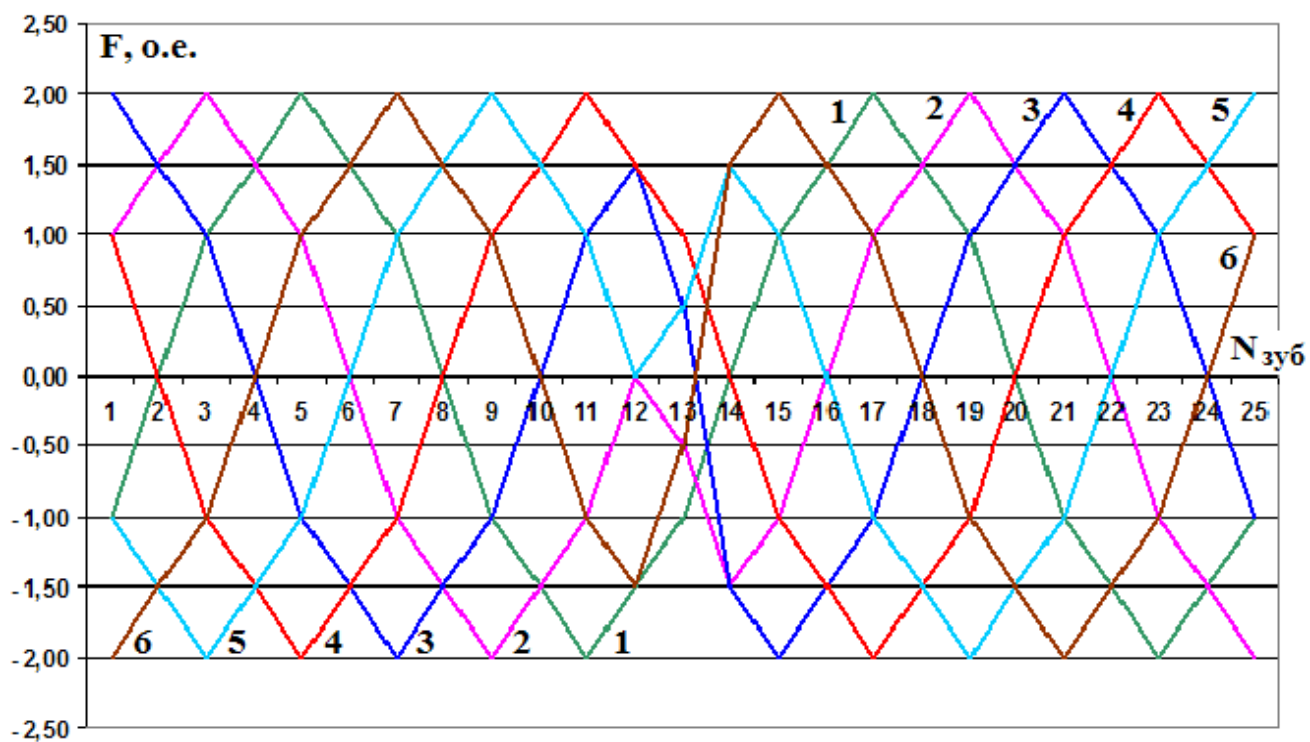


Рисунок 2.29 – Диаграмма н.с. ЛИМ6 с однослойной обмоткой по варианту 2р

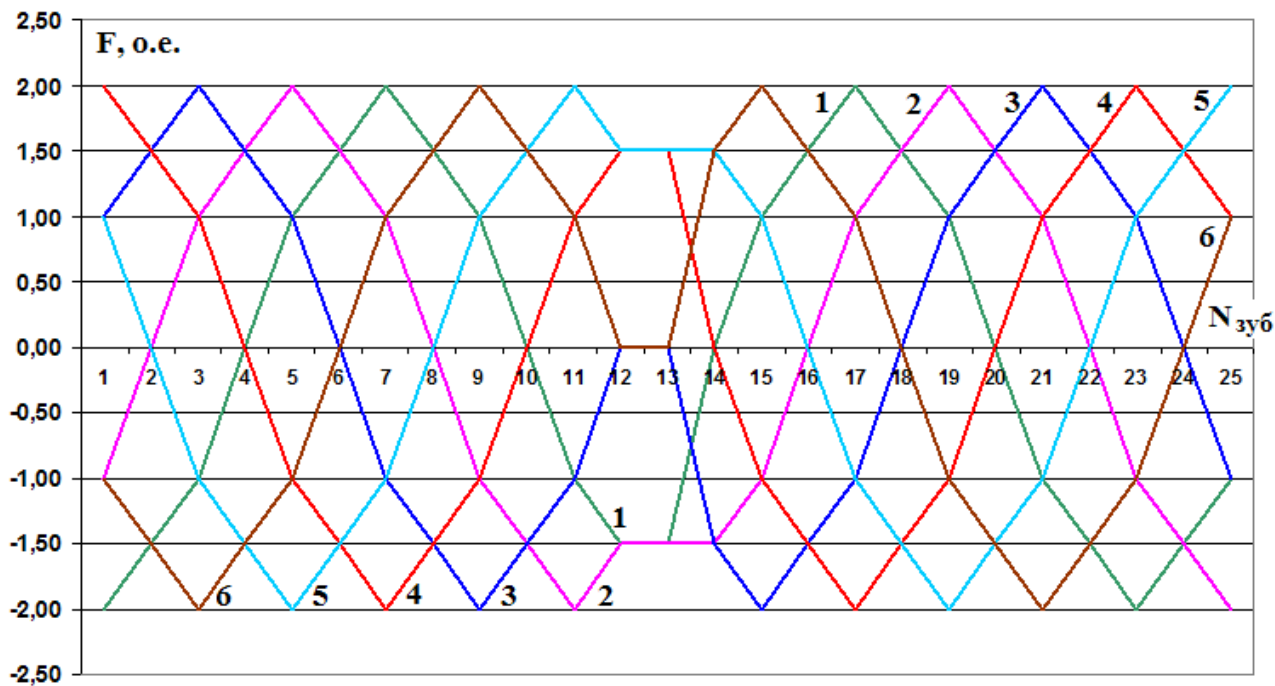


Рисунок 2.30 – Диаграмма н.с. ЛИМ6 с однослойной обмоткой по варианту 3р

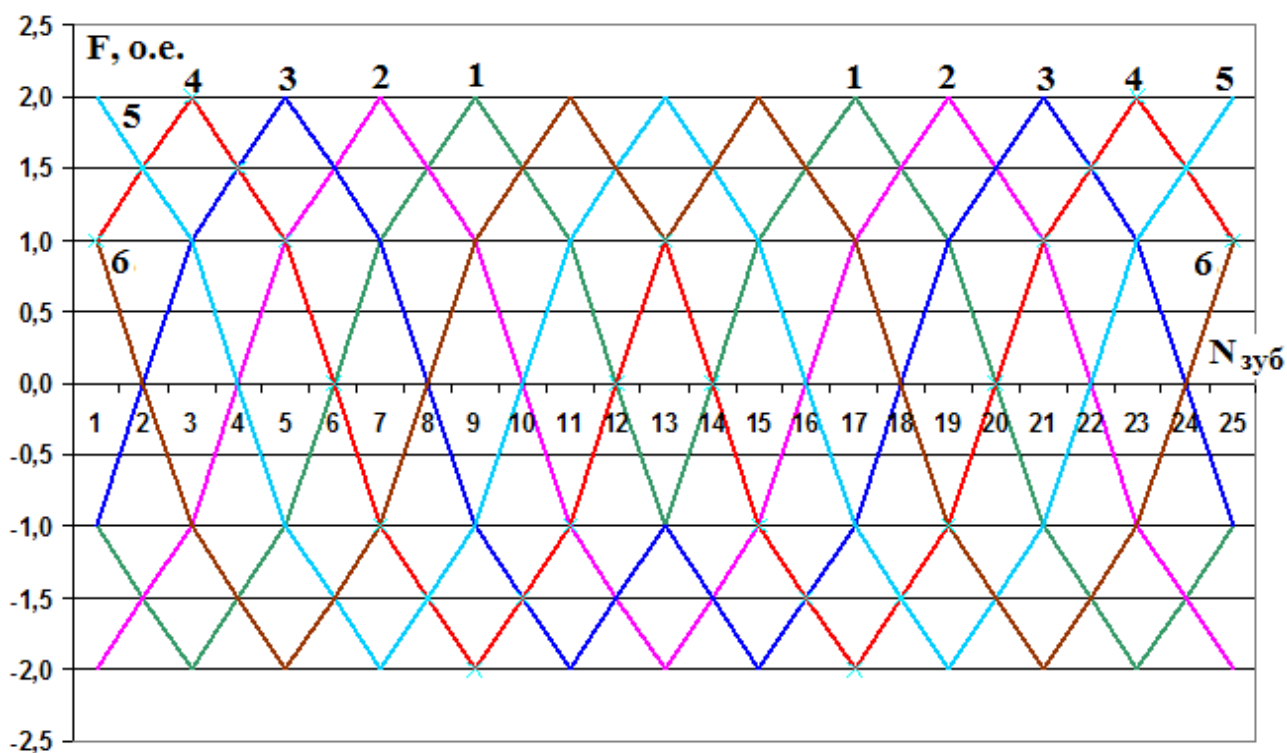


Рисунок 2.31 – Диаграмма н.с. ЛИМ6 с однослойной обмоткой по варианту 4р

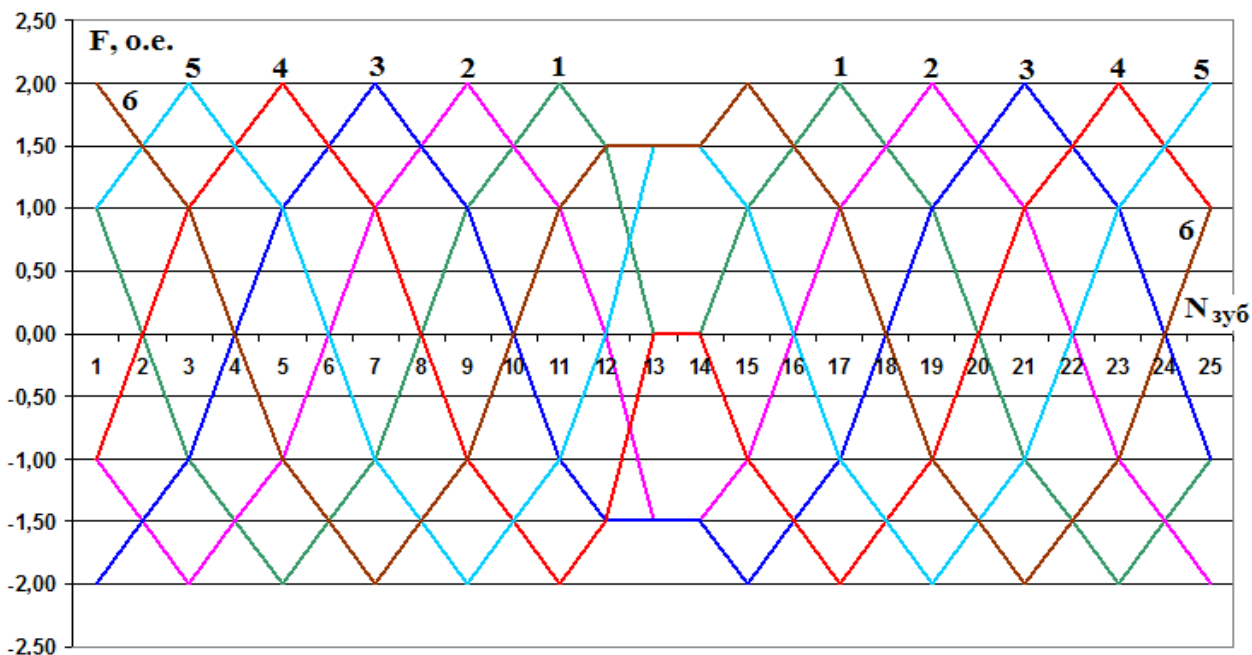


Рисунок 2.32 – Диаграмма н.с. ЛИМ6 с однослойной обмоткой по варианту 5р

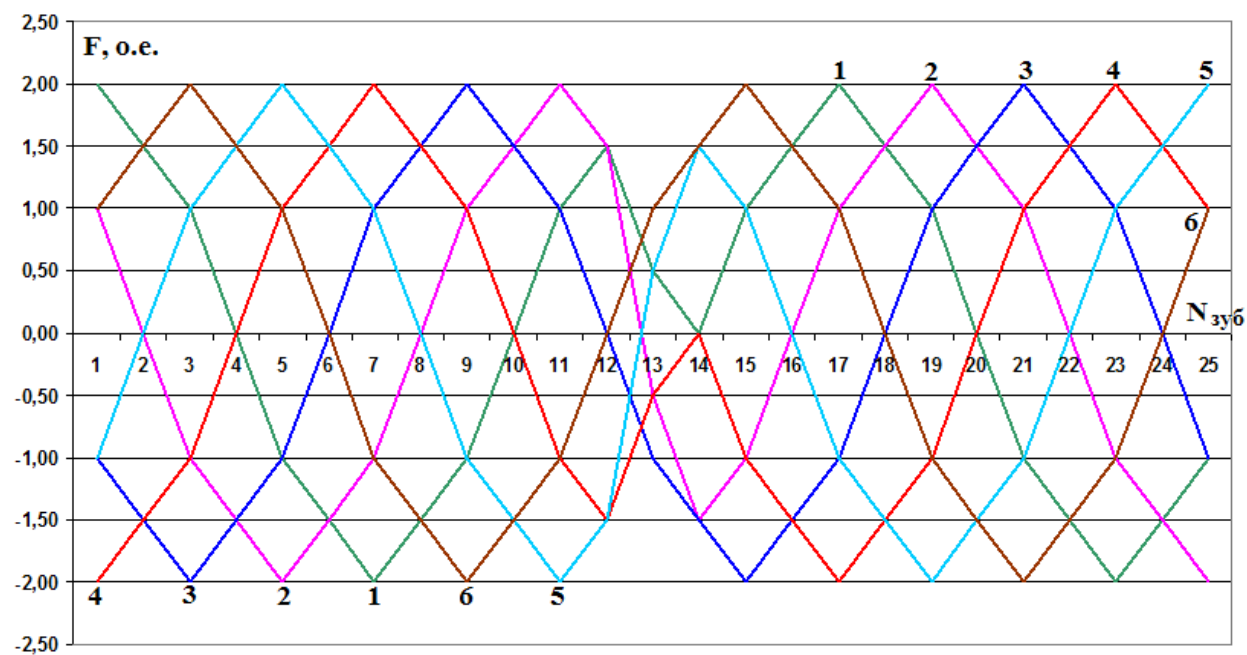


Рисунок 2.33 – Диаграмма н.с. ЛИМ6 с однослойной обмоткой по варианту 6р

Как видно на приведенных рисунках, в пяти случаях из шести в центре активной зоны индуктора возникает искажение диаграмм н.с. Искажения отсутствуют только на диаграмме, соответствующей варианту 4р (рис. 2.31). В этом случае в пазах, прилегающих к оси индуктора, которая совпадает с осью 13 зубца, располагаются стороны катушек одноименной фазы с токами противоположного направления (в данном случае А и Х). Бегущие волны н.с. такой об-

мотки начинают движение непосредственно от оси индуктора. ЛИМ с обмоткой по варианту 4р не имеет «мертвой зоны», что согласуется с представленными ранее результатами (рис. 2.9 раздела 2.2). Сказанное подтверждается при анализе картин распределения вторичных токов при расположении ВЭ в центре индуктора. Результаты расчета вторичных токов, полученные при анализе ЛИМ в трехмерной постановке в пакете Comsol Multiphysics, представлены в Приложении 2 на рис. П.2.13-2.15.

Наибольшие искажения н.с. в центре индуктора возникают в ЛИМ с обмоткой по варианту 1р (рис. 2.28). Укладка такой обмотки обладает свойством зеркальной симметрии, то есть в пазах, равноудаленных от оси индуктора, расположены стороны катушек одноименной фазы с токами одного направления. В частности, в схеме 1р, приведенной в табл. 2.6, в четырех центральных пазах расположены катушки фазы А, создающие над этими пазами пульсирующее магнитное поле. Пульсации н.с. на протяжении 4 зубцовых делений четко видны на диаграмме н.с., показанной на рис. 2.28. Это приводит к тому, что в центре индуктора появляется «мертвая» зона, в которой усилие близко к нулю. Такая зона обнаружена ранее при теоретических и экспериментальных оценках усилий (рис. 2.6 разд. 2.2).

В остальных вариантах ЛИМ (2р, 3р, 5р, 6р) в центре индуктора существуют как бегущие, так и пульсирующие составляющие н.с. Зона искажений н.с. в центре немного сужается по сравнению с вариантом 1р. Однако оси таких зон смещаются от оси 13 паза (от оси индуктора): для вариантов 3р и 6р – влево, для вариантов 2р и 5р – вправо. Это объясняется несимметричным расположением катушек отдельных фаз секций обмоток, занимающих левую и правую половины индуктора. Подобная не симметрия кривых н.с. хорошо объясняет не симметрию распределения электромагнитных усилий, обнаруженную ранее при исследованиях ЛИМ с подобными схемами обмоток (рис. 2.7-2.8 и рис. 2.10-2.11 раздела 2.2).

Закономерности, отмеченные при исследовании диаграмм н.с. ЛИМ6 с обмотками, создающими разбегающиеся магнитные поля (РБМП), подтверди-

лись при исследованиях ЛИМ6 с магнитными полями, сбегающимися к центру индуктора (СБМП). Примеры диаграмм таких ЛИМ для обмоток по вариантам 1с и 4с показаны на рис. 2.34-2.35. Варианты схем 2с, 3с, 5с и 6с представлены в Приложении на рис. П.2.1-2.6. Картины распределения вторичных токов, полученные при расчетах в пакете Comsol Multiphysics, представлены в Приложении на рис. П.2.16-2.17.

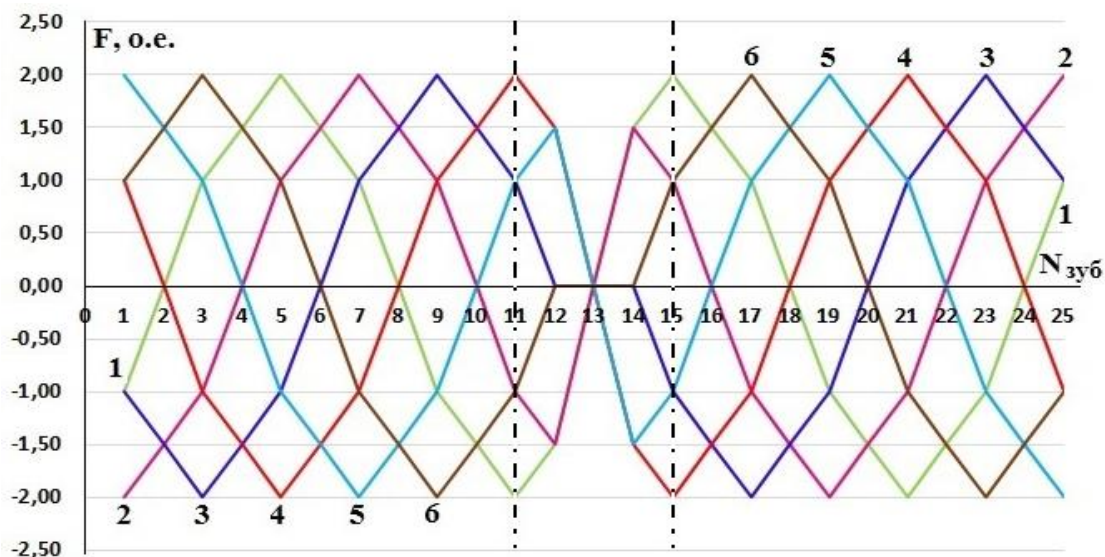


Рисунок 2.34 – Диаграмма н.с. ЛИМ6 с однослойной обмоткой по варианту 1с

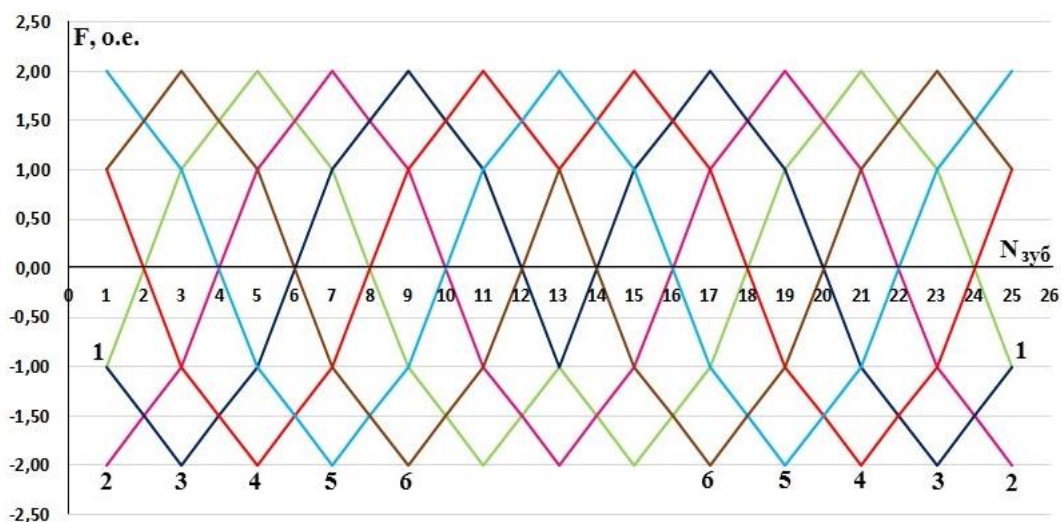


Рисунок 2.35 – Диаграмма н.с. ЛИМ6 с однослойной обмоткой по варианту 4с

Предложенная методика анализа процессов в ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями на основе построения диаграмм н.с. была использована

также для исследования ЛИМ с более сложными обмотками. В частности, исследовалась пятиполюсная ЛИМ4 с двухслойной обмоткой, основные варианты схем которой представлены в табл. 2.7.

Таблица 2.7 – Основные варианты схем обмоток пятиполюсной ЛИМ4 с двухслойной обмоткой, создающей встречно бегущие магнитные поля

Вид поля	№ пазов	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
БМП		A	Z	B	X	C	Y	A	Z	B	x	c	y	a	z	b
РБМП	1p	B	Z	A	Y	C	X	B	Z	A	x	c	y	a	z	b
	2p	X	B	Z	A	Y	C	X	B	Z	x	c	y	a	z	b
	3p	C	X	B	Z	A	Y	C	X	B	x	c	y	a	z	b
	4p	Y	C	X	B	Z	A	Y	C	X	x	c	y	a	z	b
	5p	A	Y	C	X	B	Z	A	Y	C	x	c	y	a	z	b
	6p	Z	A	Y	C	X	B	Z	A	Y	x	c	y	a	z	b
СБМП	1c	A	Z	B	X	C	Y	A	Z	B	y	c	x	b	z	a
	2c	A	Z	B	X	C	Y	A	Z	B	a	y	c	x	b	z
	3c	A	Z	B	X	C	Y	A	Z	B	z	a	y	c	x	b
	4c	A	Z	B	X	C	Y	A	Z	B	b	z	a	y	c	x
	5c	A	Z	B	X	C	Y	A	Z	B	x	b	z	a	y	c
	6c	A	Z	B	X	C	Y	A	Z	B	c	x	b	z	a	y

Диаграммы н.с. для ЛИМ4, создающей РБМП, показаны на рис. 2.36-2.41.

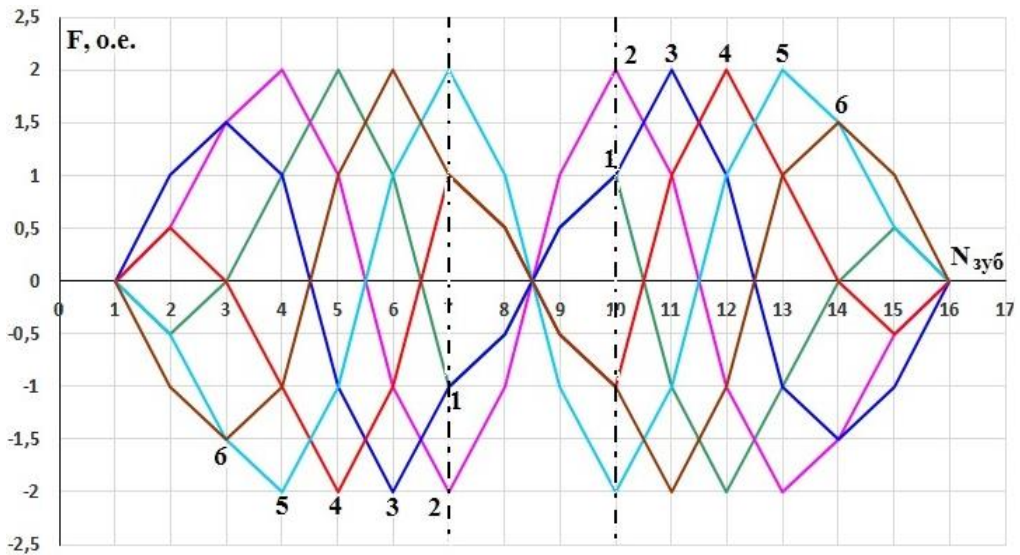


Рисунок 2.36 – Диаграмма н.с. ЛИМ4 с двухслойной обмоткой по варианту 1р

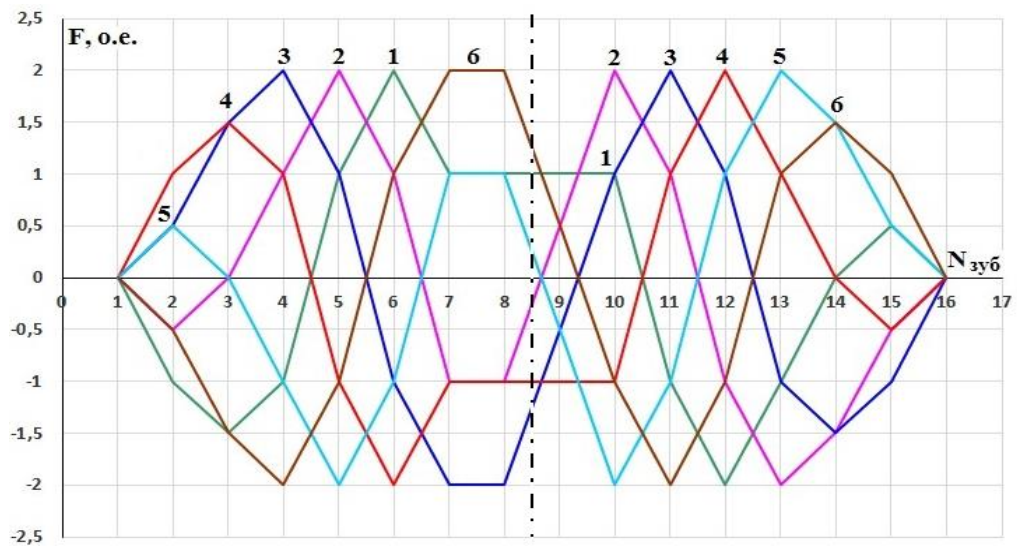


Рисунок 2.37 – Диаграмма н.с. ЛИМ4 с двухслойной обмоткой по варианту 2р

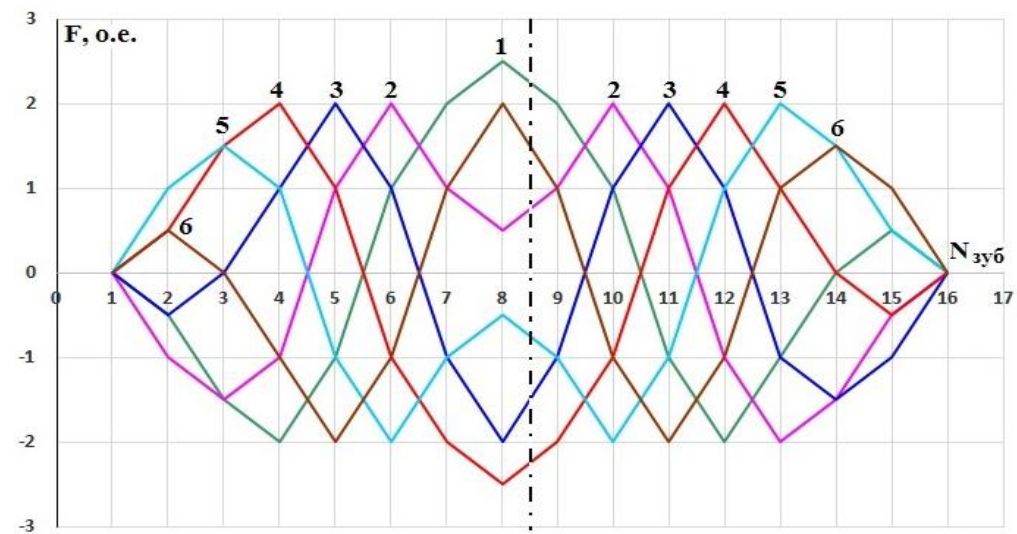


Рисунок 2.38 – Диаграмма н.с. ЛИМ4 с двухслойной обмоткой по варианту 3р

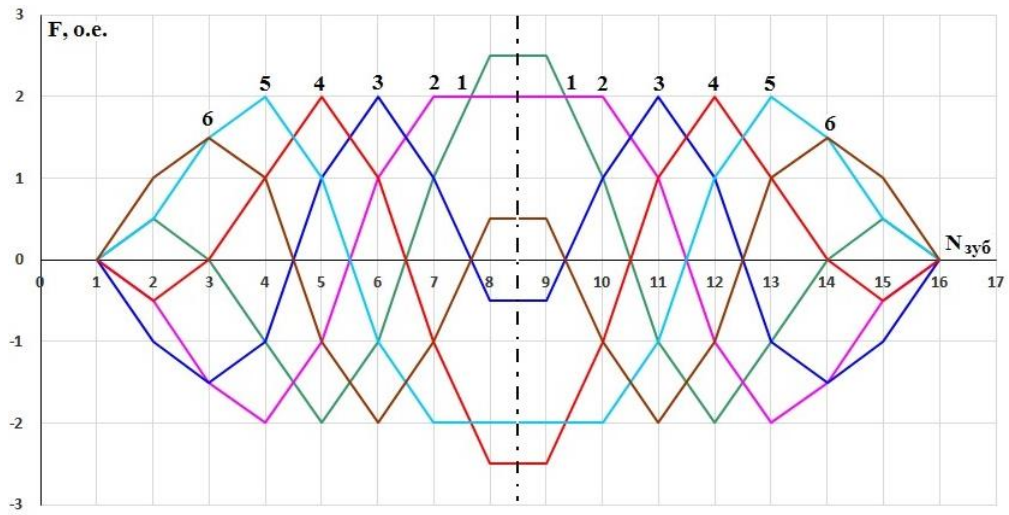


Рисунок 2.39 – Диаграмма н.с. ЛИМ4 с двухслойной обмоткой по варианту 4р

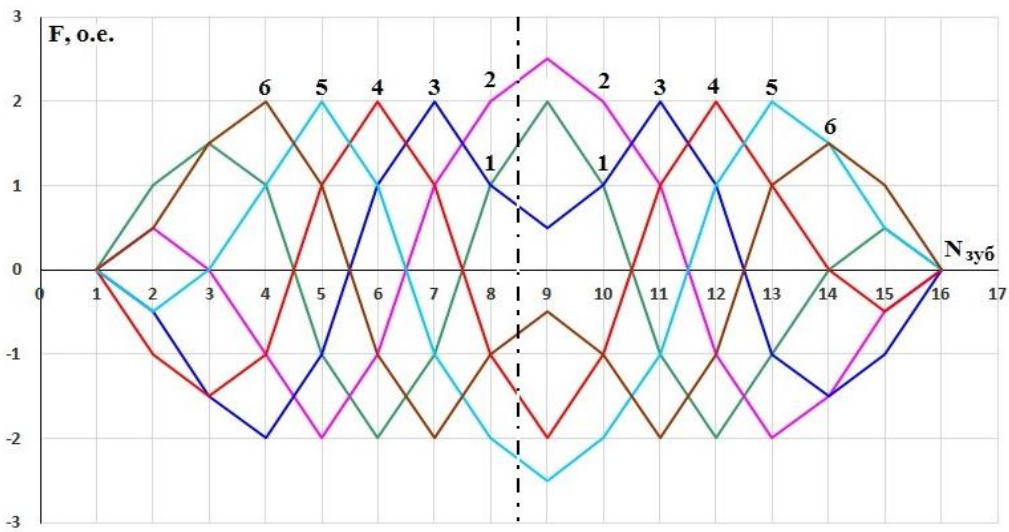


Рисунок 2.40 – Диаграмма н.с. ЛИМ4 с двухслойной обмоткой по варианту 5р

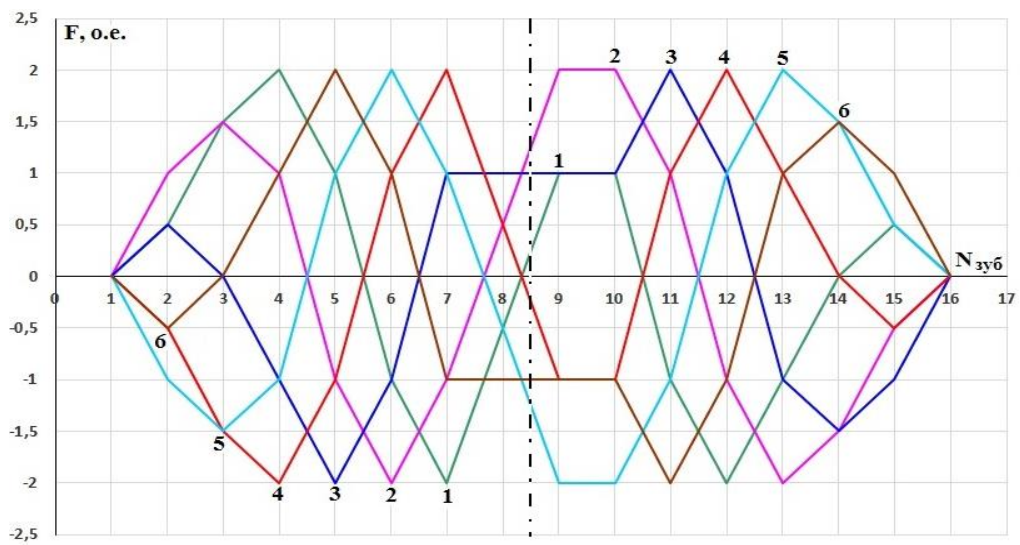


Рисунок 2.41 – Диаграмма н.с. ЛИМ4 с двухслойной обмоткой по варианту 6р

При исследовании пятиполюсной ЛИМ4 с двухслойной обмоткой, создающей РБМП, были выявлены такие же закономерности, что и при исследовании диаграмм н.с. ЛИМ6 с однослойной обмоткой. В частности, схема 1р представленная в табл. 2.7, дает похожую по характеру диаграмму н.с., что и схема 1р для однослойной обмотки. Это объясняется тем что, в центральных пазах ЛИМ, уложены одноименные фазы. В пазу между зубцами 7-8 (9-10), находятся фазы В-а (А-в), их сумма дает вектор, совпадающий по углу с вектором тока фазы Z. Таким образом, над тремя зубцовыми делениями в центре отсутствует бегущее и создается только пульсирующее магнитное поле. Пульсации н.с. на протяжении 3 зубцовых делений четко видны на диаграмме н.с., показанной на рис. 2.36. Такая диаграмма н.с. соответствует наличию «мертвой» зоны в кривой распределения усилий (рис. 2.18).

Как видно на рис. 2.39, в случае ЛИМ4 по варианту 4р бегущие волны н.с. начинаются непосредственно от центра индуктора, а пульсирующая составляющая магнитного поля, создаваемая катушками Y-a и X-b, охватывающими центральное зубцовое деление, накладывается на бегущую волну поля. В кривой распределения усилий, соответствующей этому варианту (рис. 2.20) «мертвая» зона отсутствует.

В остальных вариантах ЛИМ4 (2р, 3р, 5р, 6р) в центре индуктора существуют как бегущие, так и пульсирующие составляющие н.с. При этом зоны искажений н.с. в центре немного сужаются по сравнению с вариантом 1р. Однако оси таких зон смещаются от оси индуктора: для вариантов 2р и 3р – влево, для вариантов 5р и 6р – вправо. Аналогичные смещения зон искажений наблюдались в кривых распределения электромагнитных усилий (рис. 2.19 и рис. 2.21). Отмеченные наложения бегущих и пульсирующих составляющих магнитного поля наглядно иллюстрируется на примерах диаграмм н.с., показанных на рис. 2.42 и рис. 2.43. В центральной зоне волны бегущих составляющих магнитных полей показаны пунктирными линиями.

Примеры диаграмм н.с. для ЛИМ4, создающей сбегаящиеся (СБМП) поля показаны на рис. 2.44 и рис. 2.45.

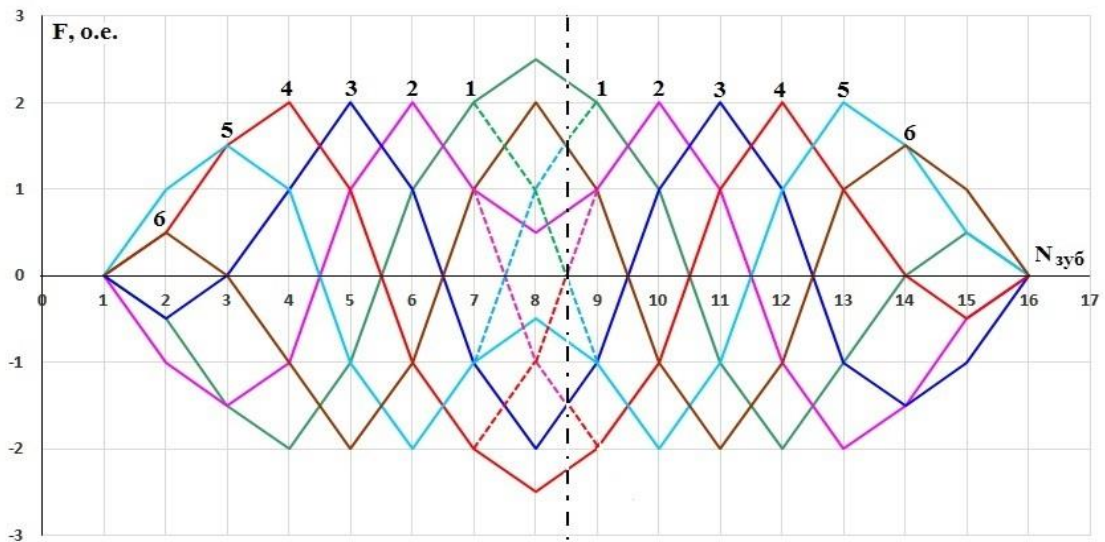


Рисунок 2.42 – Диаграмма н.с. ЛИМ4 с обмоткой по варианту 3р с выделением волн БМП

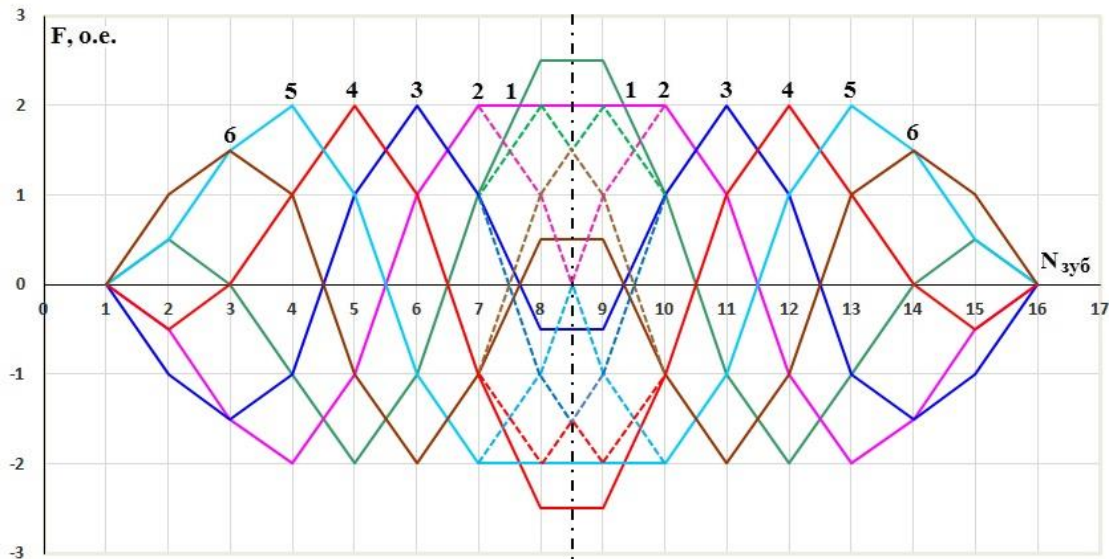


Рисунок 2.43 – Диаграмма н.с. ЛИМ4 с обмоткой по варианту 4р с выделением волн БМП

Как и в случае ЛИМ6, имевшей однослойную обмотку, в рассматриваемой ЛИМ4 характер диаграмм н.с., соответствующих одноименным вариантам РБМП и СБМП, совпадает. В этом нетрудно убедиться, сопоставив диаграммы н.с. для вариантов 1р и 1с, показанные на рис. 2.36 и рис. 2.44, а также для вариантов 4р и 4с – на рис. 2.39 и рис. 2.45. Варианты схем 2с, 3с, 5с и 6с представлены в Приложении на рис. П.2.7-2.12.

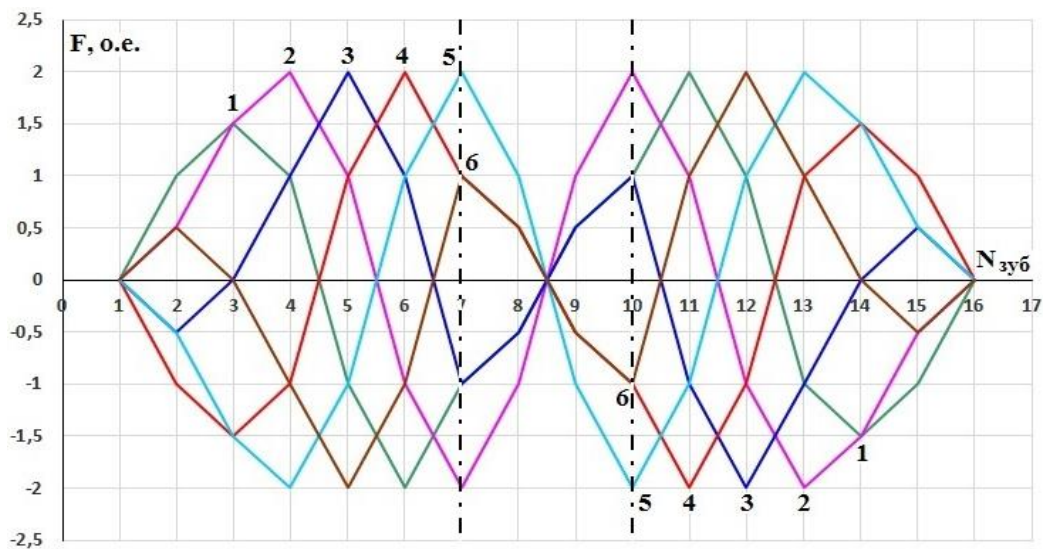


Рисунок 2.44 – Диаграмма н.с. ЛИМ4 с двухслойной обмоткой, создающей СБМП по варианту 1с

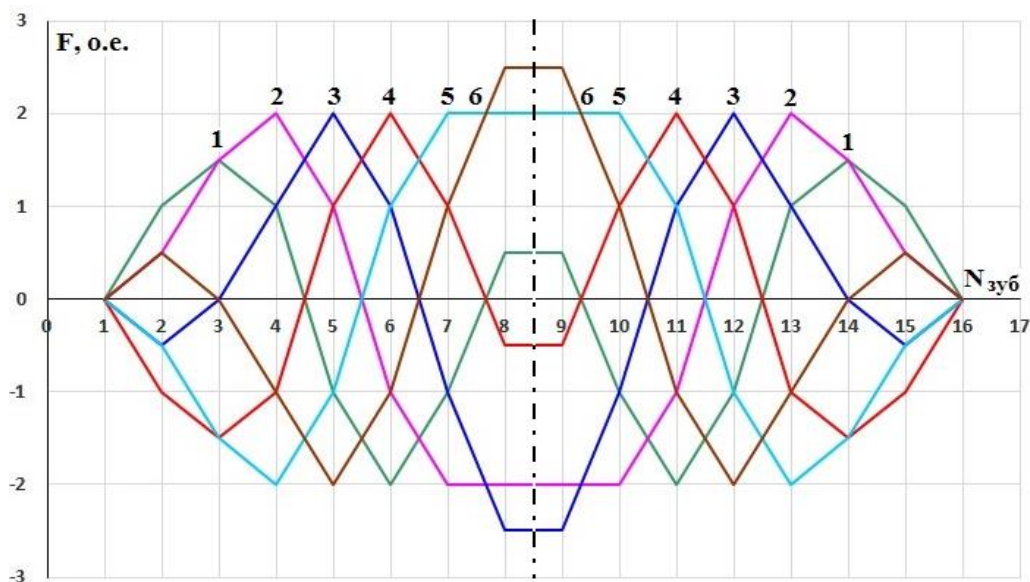
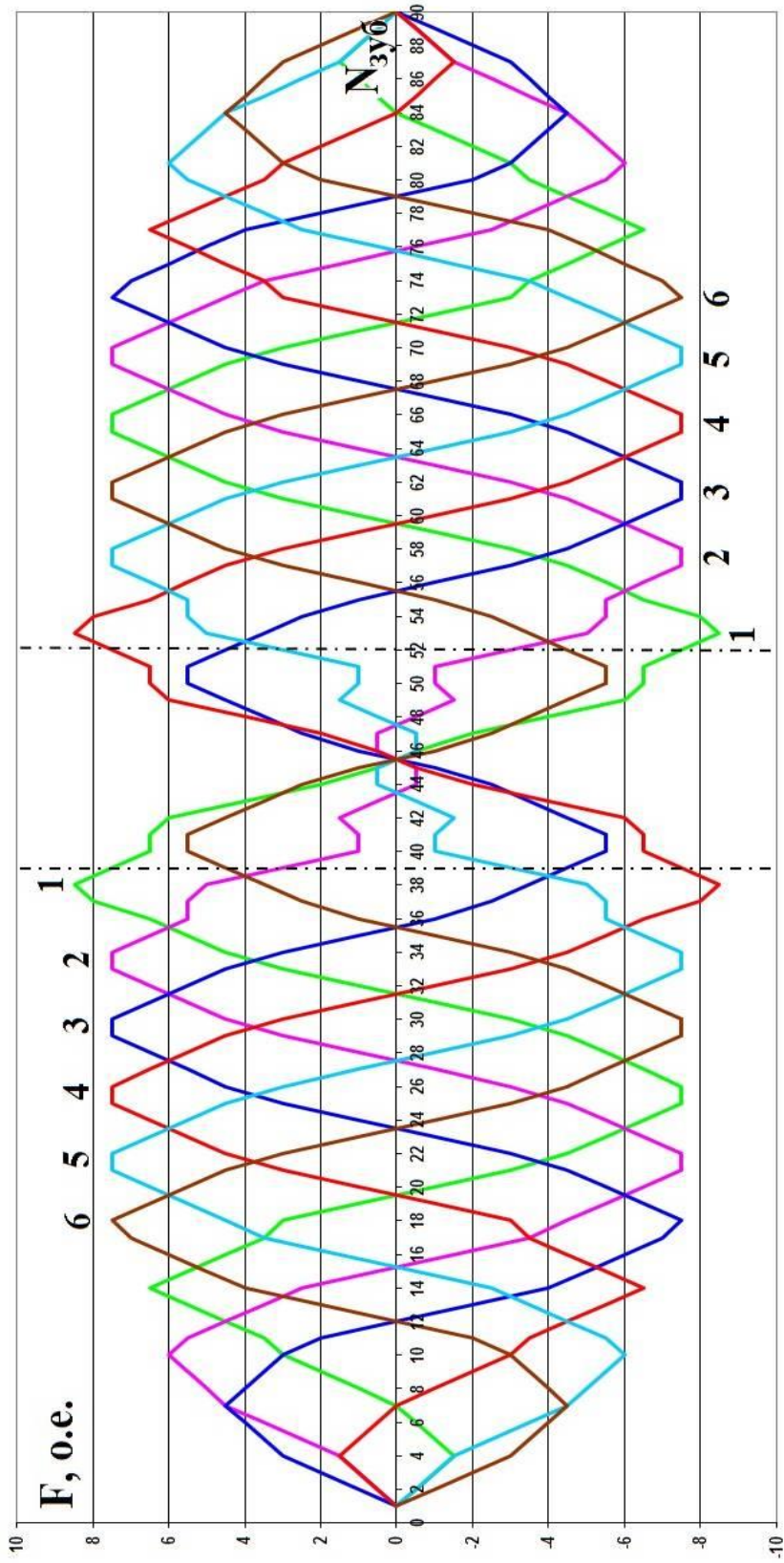


Рисунок 2.45 – Диаграмма н.с. ЛИМ4 с двухслойной обмоткой, создающей СБМП по варианту 4с

Успешная апробация методики оценки электромагнитных процессов в ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями на лабораторных образцах машин позволила применить ее для анализа процессов в ЛИМ промышленного электродинамического сепаратора КМ203-М. Результаты анализа, соответствующие схемам обмоток, подобных рассмотренным ранее вариантам 1р и 4р представлены на рис. 2.46 и 2.47.



УУУССС XXXVВВZZZZAAAYYYCCSXXXVВxxZZcсAAуаааzzzzbbbbbxxxxccssууууаааazzzzbbb

ВВZZZZAAAYYYCCSXXXVВВZZZZAAAYYааССzzXXbbxxxxccssууууаааazzzzbbbbbxxxx cccууу

Рисунок 2.46 – Схема укладки обмотки и диаграмма н.с. ЛИМ промышленного сепаратора по варианту 1р

Как видно на рис. 2.46, применение обмотки по варианту 1р приводит к появлению в центре индуктора пульсирующей составляющей и отсутствию бегущей составляющей магнитного поля. Указанное искажение поля распространяется на длину полюсного деления и обуславливает появление «мертвой» зоны с усилием, близким к нулю. Электродинамический сепаратор с такой обмоткой окажется неработоспособным, поскольку металл из части потока отходов, расположенной в середине ленты, извлекаться не будет.

Анализ диаграммы н.с. на рис. 2.47 показывает, что при использовании обмотки по варианту 4р волны бегущего магнитного поля начинают свое движение от оси ЛИМ. Появление в центральной зоне пульсирующих составляющих поля лишь немного искажает амплитуды бегущих волн. ЛИМ с такой обмоткой характеризуется отсутствием «мертвой» зоны, что подтвердилось при приемо-сдаточных испытаниях промышленной установки [28].

2.4. Выводы по разделу 2

1. Неравномерность распределения магнитного поля по длине линейного индуктора и ограниченность размеров массивного ВЭ требуют моделирования ЛИМ в трехмерной постановке. Однако такой подход характеризуется повышенной трудоемкостью и требует существенных вычислительных ресурсов, что затрудняет его использование при выполнении многовариантных расчетов в исследовательской и инженерной практике.

2. Для исследования ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями разработана методика расчета в рамках «квазитрехмерного» подхода на основе развития аналитической и численной моделей ЛИМ в двухмерной постановке. Предлагаемая методика, сочетая достоинства каждой из названных моделей, позволяет учесть основные особенности рассматриваемых ЛИМ. Выполнение тестовых расчетов электромагнитных усилий опытных ЛИМ показало соответствие результатов, полученных по предлагаемой методике, данным экспериментов и результатам расчетов в трехмерной постановке.

3. Исследование нескольких вариантов опытных ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями показали, что в центре индуктора возникают искажения поля. В частности, возникают пульсирующие составляющие, характер и интенсивность которых зависят от схем трехфазных обмоток на левой и правой половинах индуктора.

4. Показано, что худшие результаты получаются при использовании обмоток, характеризующихся зеркальным расположением катушек отдельных фаз относительно оси индуктора. В этом случае в центре активной зоны отсутствует бегущее магнитное поле и создается пульсирующее поле с тангенциальным направлением магнитного потока над поверхностью индуктора. Это приводит к появлению в центре индуктора «мертвой» зоны, в которой электромагнитное усилие отсутствует или близко к нулю.

5. Выявлены схемы трехфазных обмоток ЛИМ, в которых волны бегущих магнитных полей начинаются непосредственно от оси индуктора, и «мертвая» зона отсутствует. В таких схемах при симметричном расположении катушек одноименных фаз относительно оси индуктора токи этих катушек имеют противоположное направление (схема обмотки обладает свойством «антисимметрии»).

6. Показано, что варианты обмоток ЛИМ, соответствующие неблагоприятному (с «мертвой» зоной) и благоприятному (без «мертвой» зоны) распределению магнитных полей и усилий, в случаях разбегающихся и сбегающихся полей характеризуются подобным расположением катушек (зеркальная симметрия и «антисимметрия»).

7. Предложена методика оценки характера электромагнитных процессов в ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями на основе построения и анализа диаграмм н.с. обмоток. Методика, реализованная в программной среде Excel, позволяет выявлять благоприятные и неблагоприятные варианты обмоток ЛИМ, не прибегая к электромагнитным расчетам численными методами.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ СЕПАРАТОРОВ НА ОСНОВЕ ЛИМ СО ВСТРЕЧНО БЕГУЩИМИ МАГНИТНЫМИ ПОЛЯМИ

3.1. Электродинамические сепараторы для извлечения цветных металлов из потоков металлосодержащих отходов

В настоящее время одной из актуальных эколого-экономических задач для нашей страны является развитие промышленной переработки твердых отходов. Являясь альтернативой захоронению отходов, промышленная переработка позволяет уменьшить загрязнение окружающей среды и решить вопросы утилизации материалов, находящихся в отходах. Например, в составе твердых коммунальных отходов (ТКО) и близких к ним смешанных промышленных отходов присутствуют фракции, которые могут использоваться в качестве вторичного сырья: бумага, металлы, стекло, пластмассы и т.д. [30]. В большинстве случаев технологические схемы переработки отходов предполагают хотя бы частичную сортировку отходов. При этом чаще всего выделяются металлические включения, как наиболее ценные компоненты отходов. Реализация металлов в качестве вторичного сырья позволяет существенно улучшить экономические показатели переработки отходов [30]. Помимо этого, удаление металлов из отходов является необходимым условием безаварийной работе технологического оборудования и способствует повышению качества продуктов переработки. Для выделения черных металлов используются серийно выпускаемые магнитные сепараторы - железоотделители. Для извлечения цветных металлов из твердых отходов в мировой практике применяются электродинамические сепараторы на основе линейных индукторов, либо на основе индукторов с вращающимися магнитами (электромагнитами), схематично показанные на рис. 3.1 [21-30, 59, 67-70]. Подаваемые по ленте конвейера 1 сыпучие отходы (с частицами неметаллов 2 и металлов 3) попадают в активную зону линейного индуктора 4. Под действием электромагнитных сил частицы металлов выносятся в попереч-

ном направлении и собираются в приемник 5, неметаллические частицы перемещаются в приемник 6.

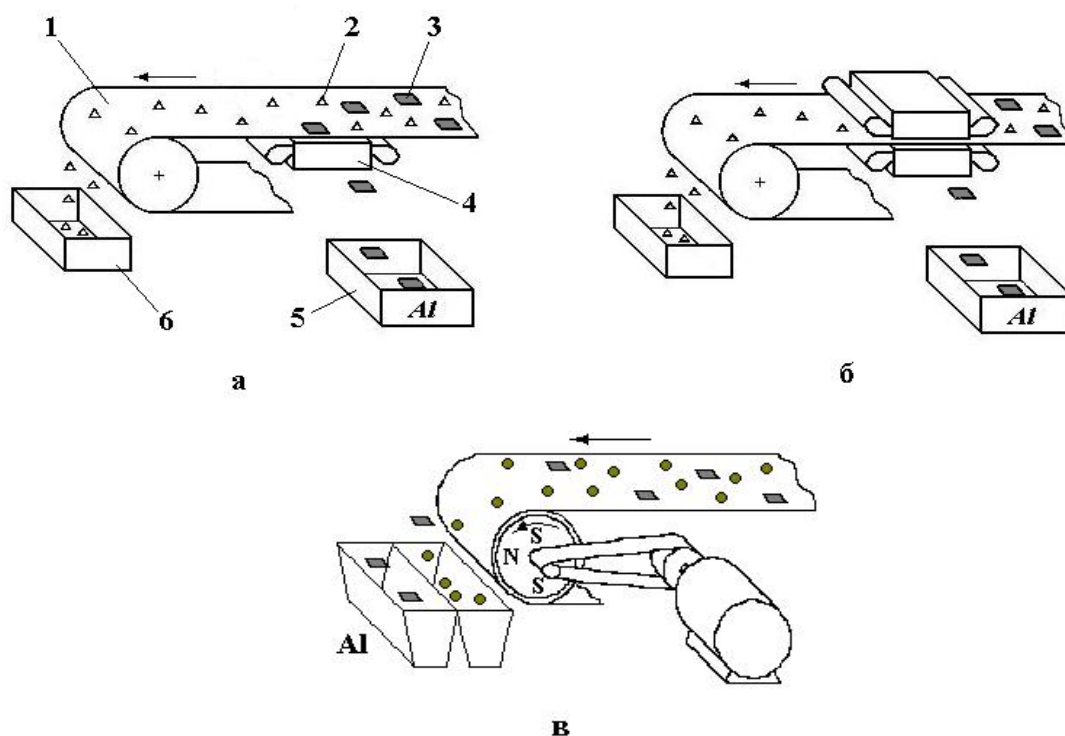


Рисунок 3.1 – Схемы электродинамических сепараторов с односторонним (а) и двухсторонним (б) линейными индукторами и с вращающимся индуктором на основе постоянных магнитов (в)

Сепараторы с односторонним линейным индуктором (рис. 3.1, а) целесообразны при большой производительности установок. Сепараторы с двухсторонним индуктором (рис. 3.1, б) применяются для обработки мелких фракций отходов. Сепараторы с вращающимися индукторами (рис. 3.1, в) эффективны при подаче материалов монослоем. С помощью рассматриваемых сепараторов могут решаться следующие технологические задачи:

- извлечение лома цветных металлов из твердых коммунальных или смешанных отходов;
- отделение металлической фракции от неметаллической в сложных промышленных отходах (отходы электро- и радиотехнической промышленности, кабельный лом, отходы электролампового производства, автомобильный лом и т.п.);

- очистка сыпучих технологических материалов от металлических включений.

Разработка электродинамических сепараторов с бегущим магнитным полем ведется на кафедре электротехники и электротехнологических систем Уральского федерального университета (ранее УГТУ-УПИ). Первый опытный сепаратор на основе трехфазных линейных индукторов, разработанный на кафедре, был установлен в действующую технологическую линию на Ленинградском опытном заводе по механизированной переработке бытовых отходов [26]. В дальнейшем исследования таких сепараторов продолжились и в содружестве с ОАО «Уралэнергоцветмет» по заказу АО «НИКТИстройкоммаш» (г. Санкт-Петербург) было подготовлено серийное производство электродинамических сепараторов КМ 203М на основе односторонних линейных индукторов [28, 59, 70].

Опыт исследования и эксплуатации электродинамических сепараторов для обработки твердых бытовых отходов, в частности, в действующей технологической линии на Ленинградском опытном заводе по механизированной переработке бытовых отходов [26] позволил выявить определенные недостатки установок. Например, при питании ЛИМ от промышленной сети с частотой 50 Гц сепараторы позволяют извлекать частицы и куски алюминия крупностью более 40 мм (для других цветных металлов крупность извлекаемой частицы еще более увеличивается). При этом потери металлов могут достигать до 20 %, что подтверждается другими исследователями [25, 67]. Другая проблема связана с большими мощностями индукторов. В частности, в высокопроизводительных технологических линиях по переработке ТБО используются конвейеры шириной ленты 1,0–1,2 м при скорости подачи 0,5–1,2 м/с [59]. При этом мощность, потребляемая сепаратором на основе двух односторонних линейных индукторов, превышает 200 кВА, что соизмеримо с установленной мощностью предприятия, перерабатывающего отходы.

Таким образом, перед разработчиками сепараторов стоят задачи увеличения выхода цветных металлов из отходов за счет извлечения мелкой фракции и

уменьшения потребляемой сепаратором мощности. В данной работе рассмотрена возможность решения этих задач за счет использования ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями.

Одной из особенностей электродинамических сепараторов является существенная зависимость развиваемых электромагнитных усилий от крупности извлекаемых частиц металла. Для иллюстрации сказанного выполнены расчеты зависимостей удельного электромагнитного усилия (отношение усилия к массе частицы $F_m = F_{эм}/m$, Н/кг) от размера частиц.

В основу расчетов положены параметры ЛИМ опытно-промышленного сепаратора КМ 203М (полюсное деление $\tau = 186$ мм, амплитуда линейной плотности тока на один индуктор $J_{лм} = 110$ кА/м (при двухстороннем возбуждении плотность тока удваивается), частота $f = 50$ Гц). В качестве вторичного элемента ЛИМ рассматривались квадратные алюминиевые пластины разной крупности (удельная электропроводность $\gamma = 28$ МСм/м, толщина $d = 2$ мм). По результатам построены графики, показанные на рис. 3.2 (цифрами отмечено удаление ВЭ от поверхности индуктора h).

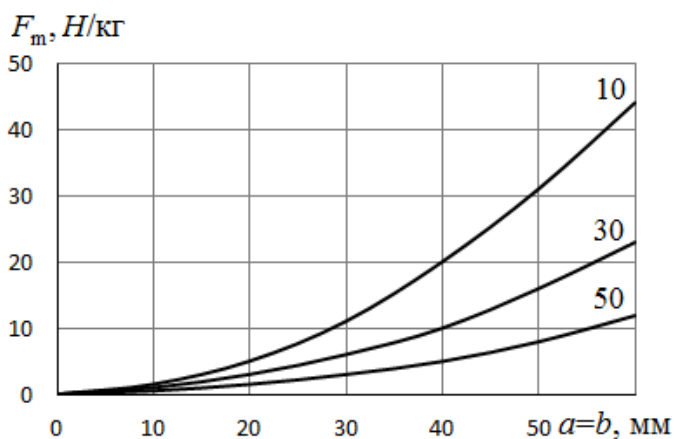


Рисунок 3.2 – Удельные электромагнитные усилия в сепараторе КМ 203М в зависимости от размера ВЭ

Следует отметить, что результаты сепарации зависят не только от электромагнитных сил, но и от конкурирующих с ними механических сил (силы трения, сопротивления среды и др.). В работе [29] была предложена методика оценки требуемых для электродинамической сепарации удельных электромаг-

нитных усилий, основанная на решении уравнений движения извлекаемой металлической частицы с учетом совместного действия на нее электромагнитных и механических сил. Предложено выражение, связывающее требуемое удельное усилие с различными параметрами установки:

$$F_m = \frac{2 \cdot B_k \cdot V_k^2}{L_u^2} + k_{тр} \cdot g, \quad (3.1)$$

где F_m – требуемое удельное усилие (Н/кг или м/с²); B_k и L_u – ширина ленты конвейера и ширина линейного индуктора; V_k – скорость конвейера; $k_{тр}$ – коэффициент трения извлекаемого металла о поверхность конвейерной ленты (увеличение $k_{тр}$ позволяет учесть силы сопротивления среды); g – ускорение свободного падения.

С использованием указанной методики выполнены оценки требуемых для сепарации удельных усилий при разных параметрах установок. Зависимости требуемых для извлечения удельных усилий от скорости подачи отходов показаны на рис. 3.3-3.5. Данные расчеты соответствуют коэффициентам трения (сопротивления движению) – 0,4; 0,6 и 0,8 и трем значениям ширины ленты: B_k – 0,3; 0,8 и 1,2 м (показаны цифрами на графиках). Зависимости, соответствующие одностороннему выходу металла, показаны сплошными линиями.

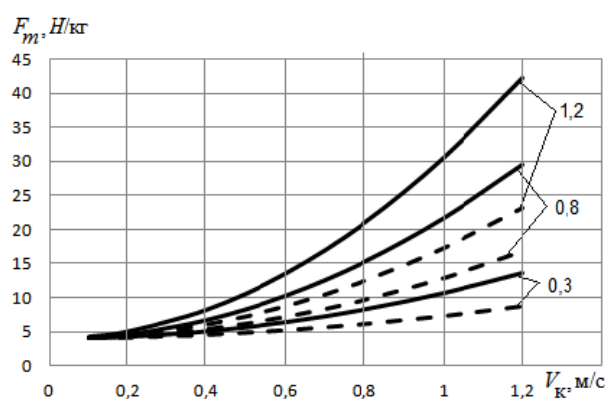


Рисунок 3.3 – Зависимости требуемых удельных усилий F_m от скорости V_k и ширины B_k конвейера, при коэффициенте трения $k_{тр} = 0,4$

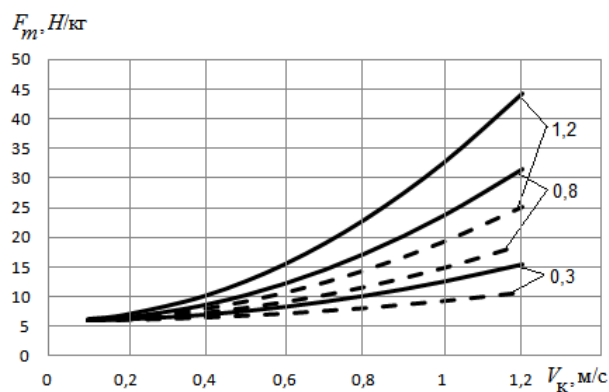


Рисунок 3.4 – Зависимости требуемых удельных усилий F_m от скорости V_k и ширины B_k конвейера, при коэффициенте сопротивления среды $k_{тр} = 0,6$

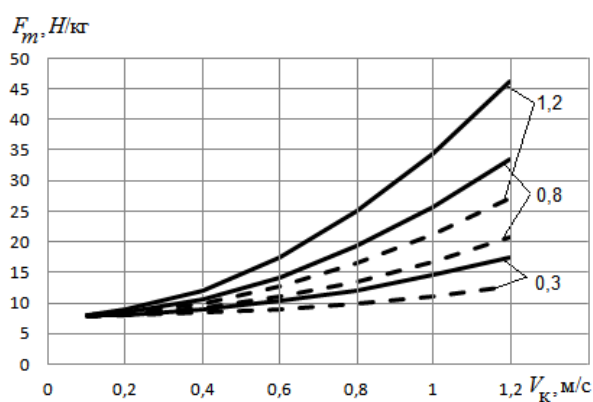


Рисунок 3.5 – Зависимости требуемых удельных усилий F_m от скорости V_k и ширины B_k конвейера, при коэффициенте сопротивления среды $k_{тр} = 0,8$

Нетрудно видеть, что требуемые для сепарации удельные усилия возрастают с увеличением производительности установок (увеличение ширины и скорости конвейера, увеличение толщины слоя отходов и связанное с этим повышение $k_{тр}$). Сравнение полученных требуемых удельных усилий с результатами электромагнитных расчетов, показанными на рис. 3.2, позволяет оценить работоспособность сепаратора КМ 203М при различной крупности металлических включений. Например, при ширине ленты конвейера 1,2 м и скорости подачи отходов 1,0 м/с требуются удельные усилия 30-35 Н/кг. Как видно на рис. 3.2, такие усилия недостижимы при крупности частиц металла менее 50 мм. Расширение диапазона крупности извлекаемых частиц металла в сторону меньшей крупности возможно при уменьшении производительности установок. В част-

ности, при уменьшении ширины ленты до 0,8 м и ограничении скорости подачи отходов до $V_k < 0,5$ м/с появляется возможность сепарации частиц металла крупностью 40 мм.

В рассматриваемой конструкции электродинамического сепаратора извлекаемые металлические частицы совершают сложное движение, формируемое из перемещения частицы на ленте конвейера со скоростью V_k и ускоренного движения ее под действием электромагнитных сил $F_{эм}$, как показано на рис. 3.6, а. В худшем случае частицы металла за время пребывания над индуктором должны преодолеть в поперечном направлении расстояние, равное ширине ленты конвейера B_k .

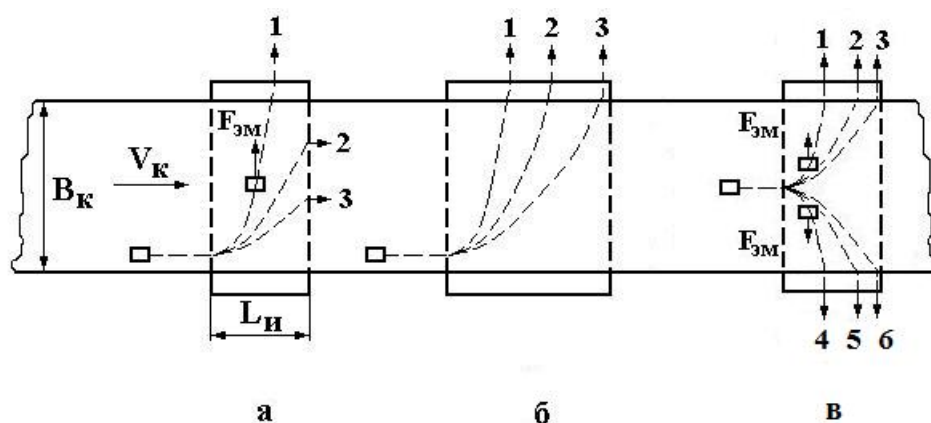


Рисунок 3.6 – Схемы электродинамических сепараторов с односторонним (а, б) и двухсторонним (в) выходом металлических частиц

С учетом оценок, приведенных выше, частицы алюминия крупностью более 40 мм (частицы 1) выносятся с конвейера. Частицы алюминия меньших размеров, либо частицы других металлов (частицы 2-3) не извлекаются. Наиболее простым решением проблемы является увеличение ширины линейного индуктора $L_и$ (рис. 3.6, б). Однако при этом повышается мощность, потребляемая индуктором из сети. Без увеличения габаритов индуктора и потребляемой мощности задачу можно решить при использовании разбегающихся магнитных полей, как показано на рис. 3.6, в. В этом случае в худшем варианте извлекаемой частице надо преодолеть расстояние $B_k/2$.

Результаты расчетов требуемых для сепарации удельных усилий представлены на рис. 3.3-3.5 пунктирными линиями. Видно, что применение разбе-

гающихся магнитных полей во всех случаях позволяет существенно снизить требуемое электромагнитное усилие и соответственно уменьшить мощность, потребляемую линейными индукторами. Эффективность данного решения возрастает с увеличением ширины конвейера и скорости подачи материалов, то есть с увеличением производительности установок.

Применение разбегающихся магнитных полей позволяет расширить диапазон размеров извлекаемых частиц металла при неизменной мощности ЛИМ, либо уменьшить мощность сепаратора при неизменном качестве сепарации. На рис. 3.7 приведены значения коэффициента энергоэффективности k_S (отношение мощностей ЛИМ при одностороннем и двухстороннем выходе металла, равное отношению соответствующих требуемых усилий), показывающие во сколько раз можно уменьшить энергопотребление электродинамического сепаратора.

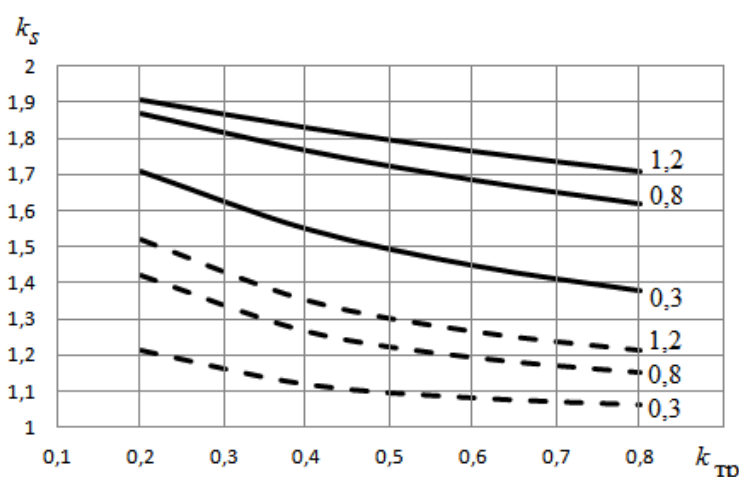


Рисунок 3.7 – Оценка повышения энергоэффективности сепараторов, использующих линейные индукторы с разбегающимися бегущими полями

На рис. 3.7 сплошными линиями представлены графики для скорости движения конвейера $V_k = 1,2$ м/с; пунктиром для $V_k = 0,4$ м/с при заданной ширине конвейера $B_k = 0,3; 0,8; 1,2$ м. Проанализировав данный график можно отметить, что эффективность применения ЛИМ с разбегающимися магнитными полями повышается с ростом скорости конвейера V_k , и увеличением ширины ленты B_k , то есть с ростом производительности установок. Полученные резуль-

таты позволяют рекомендовать применение ЛИМ с разбегающимися магнитными полями в технологиях сепарации отходов. При этом появление в средней части индуктора «мертвой» зоны может приводить к потере металла. Поэтому следует выбирать схему обмотки индуктора ЛИМ с учетом рекомендаций, полученных в разделе 2.

3.2. Электродинамические сепараторы для индукционной сортировки цветных металлов

Помимо извлечения цветных металлов из потока неметаллов с помощью электродинамических сепараторов можно решать задачи индукционной сортировки цветных металлов и сплавов. Такая сортировка необходима при обработке сложных металлосодержащих отходов (электронный и кабельный лом, автомобильный лом, лом электротехнического оборудования и т.п.), а также при подготовке лома цветных металлов к металлургическому переделу [21-23, 25, 27-28, 65, 71]. Задачи сортировки металлов являются более сложными, чем извлечение металлических включений из потока неметаллов, поскольку на первый план выходят показатели селективности, определяющие качество сепарации. Например, при переработке дробленого кабельного лома предъявляются высокие требования к получаемым концентратам металлов (меди или алюминия), которые могут повторно использоваться для производства кабельной и проводниковой продукции. Как известно, примеси других металлов существенно влияют на физические свойства меди или алюминия, поэтому при переработке кабельного лома стоит задача полного удаления примесей [72-74]. В случае переработки электронного лома важной задачей является отделение алюминиевых сплавов от сплавов меди. Это является необходимым условием для извлечения из электронного лома драгоценных металлов (золото, серебро и др.) [23,75-77].

Для селективного разделения цветных металлов и сплавов целесообразно использовать электродинамические сепараторы на основе двухсторонних ЛИМ с трехфазными линейными индукторами с подачей материалов по наклонной

плоскости. Такой сепаратор, схематично показанный на рис. 3.8, позволяет формировать необходимые траектории движения частиц дробленого лома с разными физическими свойствами и селективно собирать их в приемники продуктов разделения в конце плоскости подачи. Например, при обработке электронного лома дробленые отходы направлялись вдоль линии подачи. Неметаллические фракции (преимущественно изоляция) двигались вдоль линии подачи, а частицы металлов отклонялись от нее под действием электромагнитных сил. При этом частицы алюминиевых сплавов перемещались в более удаленные приемники, чем частицы медных сплавов. Подобные же установки применялись при обработке дробленого кабельного лома. Более подробное описание опытных установок электродинамической сепарации приведено в разделе 5.

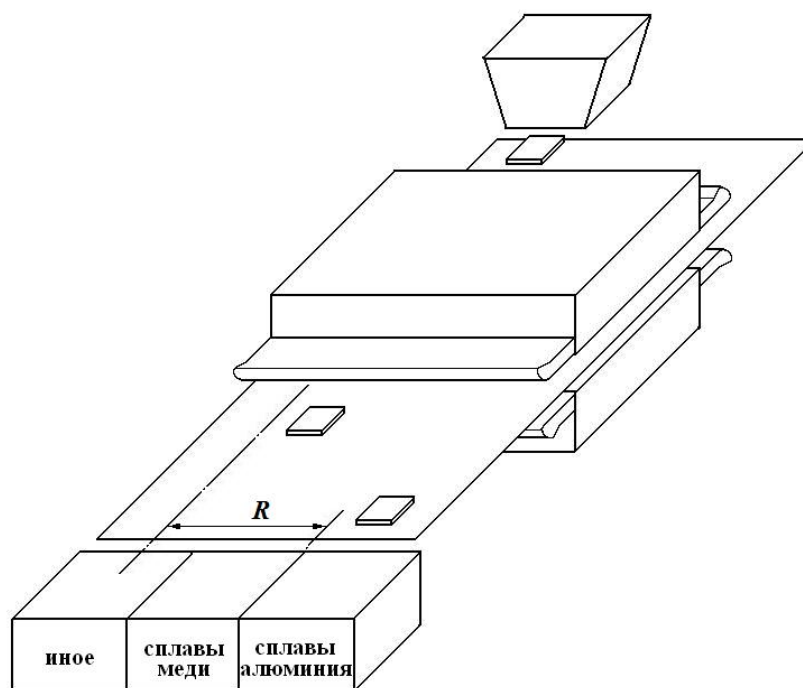


Рисунок 3.8 – Электродинамический сепаратор для индукционной сортировки дробленого лома цветных металлов

Принципиальная возможность индукционной сортировки дробленого лома электротехнического и электронного оборудования показана на рис. 3.9. Расчеты удельных электромагнитных усилий в зависимости от крупности частиц разных металлов (1 – деформируемые сплавы алюминия, 2 – литейные

сплавы алюминия, 3 – проводниковая медь, 4 – сплавы меди, 5 - свинец) произведены для опытной установки на основе ЛИМ8 (полюсное деление $\tau = 66$ мм, зазор $\delta = 10$ мм). На рис.5.9, а видно, что при требуемом усилии извлечения 10 Н/кг, определяемом, в частности, удалением разделителя потока от линии подачи R , за разделитель будут перемещаться практически все частицы алюминиевых сплавов крупнее 5 мм и крупные частицы проводниковой меди (в электронном ломе такие частицы практически отсутствуют). Частицы медных сплавов из-за малых электромагнитных усилий извлекаться не будут. Зависимости на рис. 3.9, б демонстрируют возможность разделения частиц меди и свинца при доочистке концентрата меди.

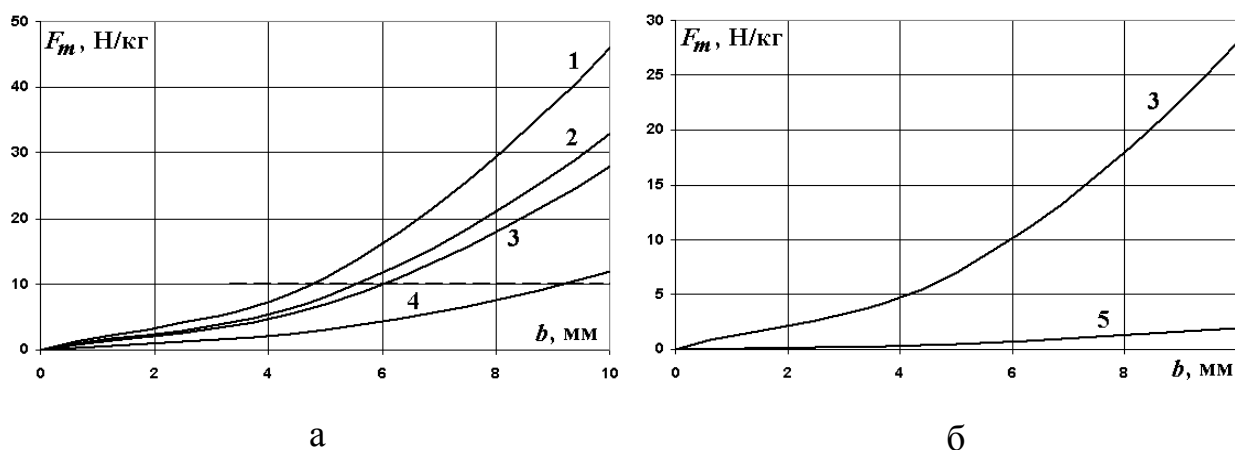


Рисунок 3.9 – Зависимости удельных усилий извлечения от крупности металлических частиц: а – электронный лом; б – лом медного кабеля

Хорошее качество сепарации дробленого электронного лома и дробленого кабельного лома подтвердилось при испытаниях установок на основе ЛИМ7 и ЛИМ8 в действующих технологических линиях предприятий – заказчиков. Основным замечанием по результатам таких испытаний явилось пожелание увеличения производительности установки. На это и были направлены исследования в лаборатории УрФУ.

В разработанных ранее установках для повышения селективности сепарации дробленый лом подавался в зону сепарации вдоль линии подачи узким потоком, ширина которого определялась максимальной крупностью частиц.

Например, для частиц, представленных на рис. 3.9, ширина потока составляла $b_{ж} = 10$ мм. На опытных установках электродинамической сепарации, схематично показанных на рис. 3.10, оценивалась возможность повышения производительности установок за счет увеличения ширины потока материала, определяемой шириной желоба на входе в сепаратор $b_{ж}$.

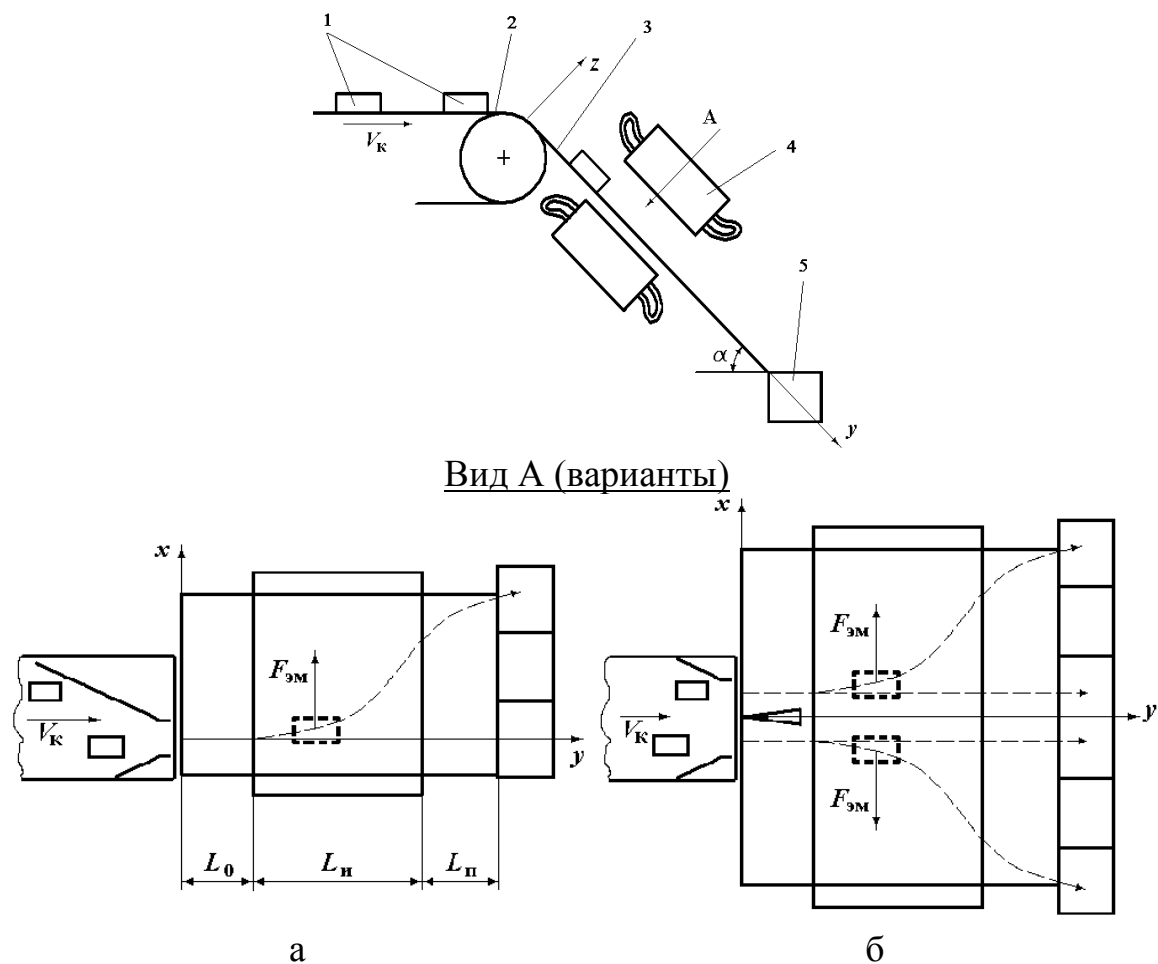


Рисунок 3.10 – Схема опытных установок для сортировки цветных металлов

Суть исследований заключалась в оценке изменений технологических показателей сепарации (ϵ – извлечение целевого металла в концентрат, β – содержание целевого металла в концентрате) при изменении ширины потока $b_{ж}$. При этом оценивалась возможность увеличения ширины потока исходного материала на входе в сепаратор, как самого простого способа увеличения производительности установок по отходам. Эксперименты проводились на установке, подобной показанной на рис. 3.10, а, состоящей из двухсторонней ЛИМ5, описан-

ной в табл. 5.2 раздела 5. Воздушный зазор составлял $\delta = 20$ мм, с выходом сепарируемых металлических частиц в одну сторону. Для удобства измерений сепарируемый материал представлял собой искусственную смесь алюминиевых и текстолитовых частиц квадратной формы одинаковых размеров (сторона квадрата 10 мм, толщина частиц 3,8 мм). Такая смесь имитирует дробленые отходы электротехнических изделий (например, кабельный лом). Подача исходной смеси материалов в зону сепарации последовательно осуществлялась по желобам разной ширины $b_{жс} = 10, 20$ и 30 мм. По результатам многократно повторенных опытов с использованием методов математической статистики оценивались технологические показатели сепарации в зависимости от положения разделителя потока в конце наклонной плоскости (R – расстояние от линии подачи до разделителя; в концентрат попадали частицы, вышедшие за разделитель). Некоторые результаты экспериментов приведены на рис. 3.11, а. Сплошными линиями на графиках показаны значения уровня извлечения алюминия в концентрат ϵ , а пунктирными – содержания его в концентрате β . Как видно из рис. 3.11, а, при ширине подающего желоба $b_{ж} = 10$ мм удается достичь высоких технологических показателей сепарации (например, при $R = 75$ мм получены идеальные показатели $\epsilon = \beta = 100\%$). При увеличении ширины желоба показатели сепарации существенно ухудшаются (уменьшается выход алюминия в концентрат, увеличивается взаимозасорение разделяемых фракций, то есть снижается β).

На рис. 3.11, б, показаны результаты обработки дробленого электронного лома, предоставленного заинтересованным предприятием. Эксперименты проводились на базе двухстороннего ЛИМ8, воздушный зазор составлял $\delta=10$ мм. В исследовании использовалась проба электронного лома, которая представляла смесь из частиц алюминиевых и медных сплавов, а также немагнитных, непроводящих включений. Преобладающие размеры частиц от 3 до 8 мм. Подача исходного материала в зону сепарации осуществлялась по желобам разной ширины $b_{жс} = 10, 20$ и 40 мм. Как мы можем видеть из рис. 3.11, б, при наименьшей ширине подающего желоба $b_{ж} = 10$ мм, также, как и при сепарации кабель-

ного лома, удается достичь наибольших технологических показателей сепарации. При использовании ширины желоба $b_{ж} = 20-40$ мм показатели сепарации ухудшаются.

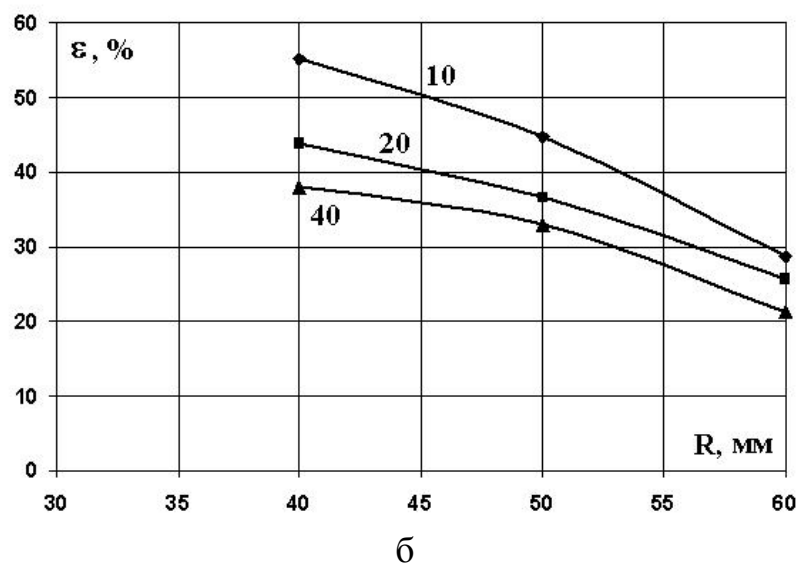
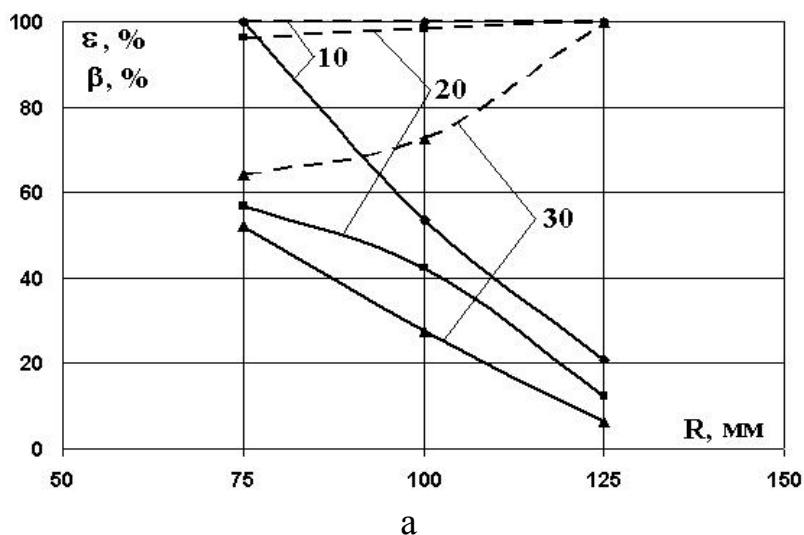


Рисунок – 3.11. Зависимости технологических показателей сепараторов от положения разделителя потока для разной ширины подающего желоба (цифры на графиках) при обработке искусственной смеси (а) и при обработке реального электронного лома (б)

Полученные результаты показывают, что повышение производительности электродинамических сепараторов за счет увеличения ширины подающего желоба и соответствующего увеличения объема подаваемых исходных материалов нецелесообразно. С учетом сказанного для повышения производительности

установок, предназначенных для индукционной сортировки лома и отходов цветных металлов, предложено использовать линейные индукторы с разбегающимися магнитными полями (движущимися от центра к краям индуктора). Пример конструкции такого сепаратора представлен на рис. 3.10, б. В этом случае линия подачи сепарируемого материала проходит через центр индуктора, а выход сепарируемых фракций осуществляется в обе стороны от линии подачи. При таком исполнении электродинамического сепаратора ширина потока материалов на входе может быть увеличена в два раза по сравнению с сепаратором, в котором сепарируемые материалы выходят в одну сторону (рис. 3.10, а). В предлагаемой установке на входе в активную зону линейного индуктора поток материала разделяется на два ручья, частицы которых не могут взаимодействовать в процессе сепарации. При этом ширина разделителя потока может выбираться с учетом снижения электромагнитных усилий в центральной зоне ЛИМ при применении схем обмоток с симметричным расположением катушек отдельных фаз относительно оси индуктора. Схемы с несимметричным расположением катушек в таких сепараторах недопустимы.

Для подтверждения достоинств сепаратора на основе ЛИМ с РБМП были проведены исследования на базе ЛИМ6, которая позволяет создавать как одностороннее, так и встречно бегущее движение МП, в зависимости от схемы соединения обмоток индуктора. Для имитации сепарируемых отходов в экспериментах использовалась смесь алюминиевых частиц и частиц изоляции крупностью менее 10 мм. Смесь подавалась в рабочую зону устройства вдоль линии подачи по желобам разной ширины ($b_{ж} = 10, 20$ и 30 мм). Варьируемым в ходе опытов параметром являлось расстояние от линии подачи до разделителя потока R . Для трехфазной обмотки четырехполюсного ЛИМ6, создающей магнитное поле, бегущее в одном направлении, использована схема укладки катушек БМП согласно табл. 2.6 раздела 2.3. При испытаниях большая часть алюминиевых частиц под действием электромагнитных сил перемещалась за разделитель, попадая в концентрат целевого продукта, большая часть частиц изоляции не доходила до разделителя потока, попадая в хвосты обогащения. Пример резуль-

татов экспериментов приведен на рис. 3.12. Нетрудно видеть, что при подаче исходного материала по узкому желобу ($b_{ж} = 10$ мм) достигались высокие технологические показатели (степень извлечения металла в концентрат (сплошные линии) и содержание его в концентрате (пунктир) на уровне 95-100%).

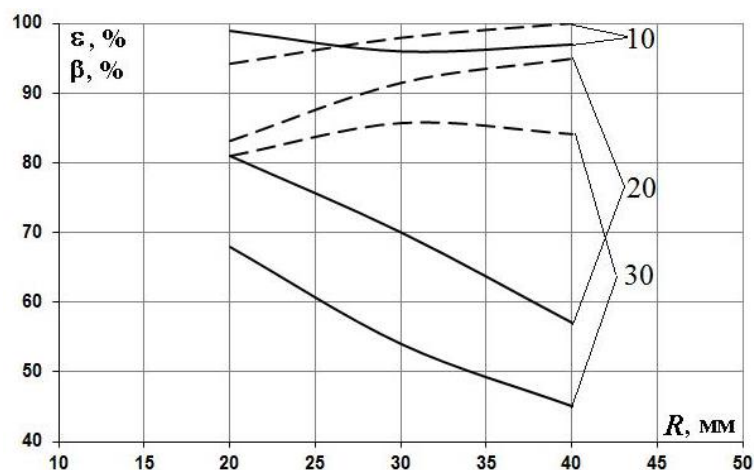


Рисунок – 3.12. Зависимость технологических показателей опытного сепаратора от положения разделителя потока при разной ширине желоба (цифры на графиках, мм)

При увеличении ширины желоба ($b_{ж} = 20$ или 30 мм) технологические показатели экспериментальной установки заметно ухудшались. Подобные же результаты получены выше на установке ЛИМ5 на рис. 3.11. В целом результаты экспериментов показали, что увеличение производительности сепараторов за счет увеличения объема, подаваемого в рабочую зону сепарируемого материала, приводит к снижению технологических показателей сепарации, ухудшению качества разделения материала. Это объясняется увеличением сил сопротивления движению металлических частиц при увеличении ширины потока и увеличением числа столкновений частиц.

Для повышения производительности установки без потери качества сепарации на установке ЛИМ6 была использована схема соединения обмоток, создающая РБМП по варианту 4р, согласно табл. 2.2 раздела 2. Такая схема обмотки обеспечивает движение разбегающихся магнитных полей непосредственно от оси индуктора. При этом поток входящего в сепаратор материала

автоматически делится пополам и частицы металла отклоняются от линии подачи в разные стороны. Технологические показатели сепарации, достигнутые при испытаниях такого варианта установки, для ширины желоба $b_{ж} = 20$ мм показаны на рис. 3.13. Нетрудно видеть, что применение линейных индукторов со встречно бегущими магнитными полями и двухсторонним выходом металлических частиц позволило достичь высоких технологических показателей (на уровне 95-100%), существенно лучших, чем в случае сепараторов с однонаправленным бегущим магнитным полем (с односторонним выходом сепарируемых частиц).

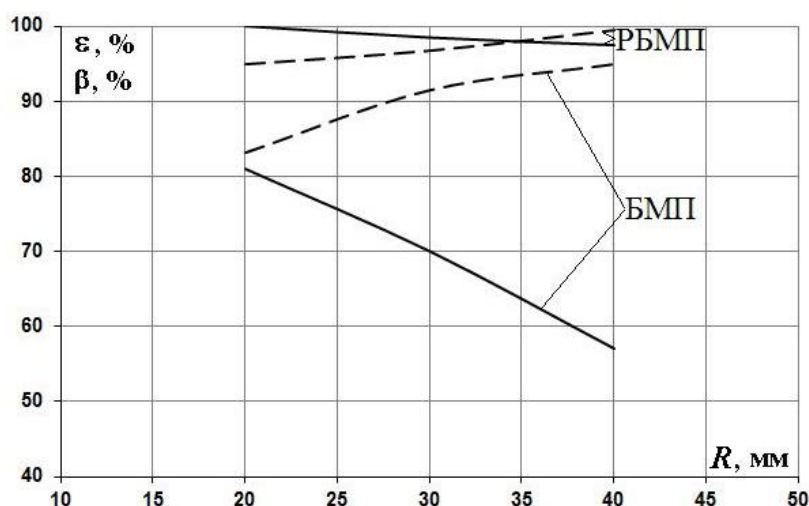


Рисунок – 3.13. Сравнение технологических показателей опытного сепаратора при ширине желоба $b_{ж} = 20$ мм для случаев однонаправленного (БМП) и разбегающихся (РБМП) магнитных полей

3.3. Выводы по разделу 3

1. Показано, что при извлечении цветных металлов из различных видов твердых отходов, а также при индукционной сортировке сложного лома могут применяться электродинамические сепараторы на основе ЛИМ, в том числе ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями.

2. В случае подачи сепарируемых материалов в рабочую зону по ленте конвейера целесообразно применение разбегающихся магнитных полей, обеспечивающее выход сепарируемых частиц металла в обе стороны от конвейера.

Такое решение позволяет существенно снизить требуемое для сепарации электромагнитное усилие. При этом можно расширить диапазон размеров извлекаемых частиц металла при неизменной мощности ЛИМ, либо уменьшить мощность сепаратора при неизменном качестве сепарации. Эффективность данного решения возрастает с увеличением ширины конвейера и скорости подачи материалов, то есть с увеличением производительности установок.

3. Поскольку в рассматриваемой технологической задаче недопустимо появление в средней части индуктора «мертвой» зоны, следует выбирать схему обмотки индуктора ЛИМ с учетом рекомендаций, полученных в разделе 2.

4. Показано, что в электродинамических сепараторах на основе ЛИМ с подачей материалов по наклонной плоскости, применяемых для индукционной сортировки сложного лома цветных металлов, увеличение производительности установок за счет расширения питающего желоба нецелесообразно из-за снижения качества сепарации. Предлагается для увеличения производительности сепаратора при сохранении высоких технологических показателей (извлечение целевого металла в концентрат и содержание его в концентрате) использовать ЛИМ с разбегающимися магнитными полями, создаваемыми обмотками с симметричным расположением катушек отдельных фаз относительно оси индуктора.

4. ЛИНЕЙНЫЕ ИНДУКЦИОННЫЕ МАШИНЫ СО ВСТРЕЧНО БЕГУЩИМИ МАГНИТНЫМИ ПОЛЯМИ ДЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ, ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ И ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК

4.1. ЛИМ для перемещения и позиционирования заготовок

Как отмечалось в разделе 1, основные достоинства ЛИМ связаны с бесконтактной передачей усилия обрабатываемым металлическим заготовкам и изделиям, которые выполняют функции вторичного элемента индукционной машины. В случае использования ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями появляются дополнительные возможности управления параметрами движения заготовок и изделий. В зависимости от схем и режимов питания обмоток ЛИМ, создающих встречно бегущие магнитные поля, возможно создание возвратно-поступательного движения заготовок, движения их на пониженной скорости, позиционирование заготовок.

Указанные возможности ЛИМ со встречно бегущими полями позволяют создавать на их основе загрузочно-подающие устройства для подачи заготовок в рабочую зону в металлообрабатывающем производстве, для подачи деталей под схват робота на сборочных операциях в машиностроении и приборостроении и др. Отметим, что для таких вспомогательных технологических операций режим позиционирования заготовок может оказаться наиболее востребованным, поскольку за счет эффекта самоцентрирования можно добиться высокой точности позиционирования без применения датчиков.

Оценка эффекта самоцентрирования заготовок при вводе их в рабочую зону рассматриваемых ЛИМ выполнена экспериментально с применением одностороннего четырехполюсного индуктора ЛИМ6. В качестве заготовок использовались алюминиевые пластины с удельной электропроводностью $\gamma = 32$ МСм/м, размеры которых приведены в табл. 4.1 (b – длина в направлении движения магнитного поля, a – в поперечном направлении, d – толщина).

Таблица 4.1 – Характеристики заготовок в опытах позиционирования

№ заготовок	Размеры, мм			Ток трогания, А
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>d</i>	
1	100	20	10	1,1-1,2
2	100	49	10	0,5-0,6
3	100	69	10	0,4-0,5
4	100	134	10	0,4

В исходном положении поперечная ось заготовки совпадала с краем магнитопровода индуктора. После включения ЛИМ заготовка начинала движение и, совершив несколько колебаний (от 1 до 3), останавливалась в центральной части индуктора. Можно отметить, что минимальный ток трогания зависел от размера заготовок. В табл. 4.1 приведены значения тока трогания заготовок при зазоре $\delta = 3$ мм.

Опыты проводились при различных значениях тока с шагом 0,2 А. Для достоверности оценок опыты повторялись несколько раз для каждого из значений тока. Зависимости погрешности позиционирования Δx от тока ЛИМ для разных размеров заготовок при различных вариантах схем соединения обмоток приведены в Приложении 3 (варианты схем обмоток соответствуют приведенным в табл. 2.3). Пример зависимости $\Delta x(I)$ при $b = 49$ мм для схемы обмотки по варианту 4с показаны на рис. 4.1. При малых токах индуктора электромагнитные усилия, действующие на заготовку соизмеримы с силами сопротивления движению, что приводит к остановке заготовки с отклонением от оси индуктора. С увеличением тока ЛИМ число колебаний заготовки увеличивалось, а ошибка позиционирования уменьшалась. При токе $I > 1,2$ А для данной схемы обмотки (4с) достигается позиционирование заготовки строго по оси индуктора. Полученный результат хорошо согласуется с приведенными в разделе 2.2 кривыми распределения электромагнитных усилий по длине ЛИМ. Как показано на рис. 2.15, в случае схемы обмотки 4с, создающей сбегаящиеся магнитные поля (СБМП), распределение усилий симметрично относительно оси индуктора. При этом в центре ЛИМ наблюдается резкий переход усилия через ноль, а

градиент усилия растет с увеличением тока. Тем самым обеспечиваются условия самоцентрирования заготовки.

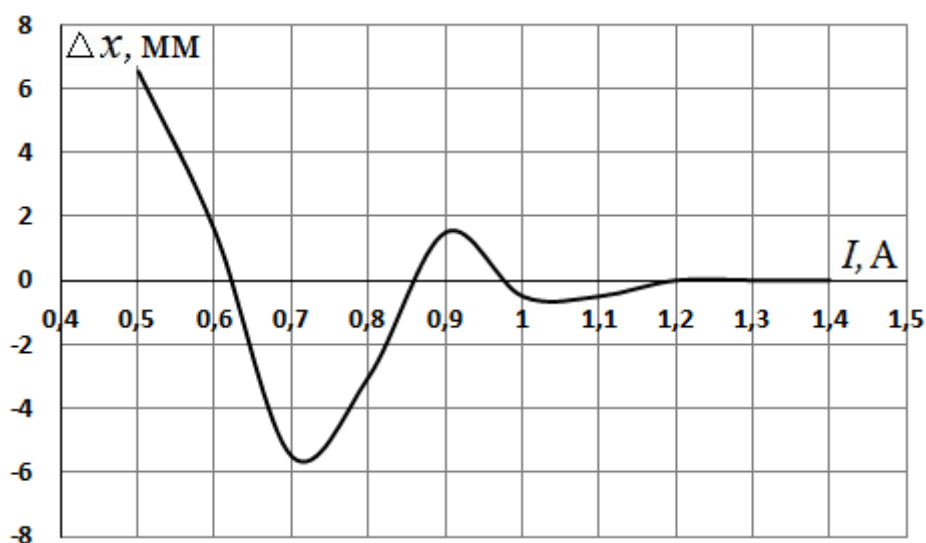


Рисунок 4.1 – Зависимость погрешности позиционирования от тока ЛИМ6 при размере $b = 49$ мм для схемы обмотки по варианту 4с

Зависимости, характеризующие изменение погрешности позиционирования заготовки от тока ЛИМ для алюминиевых заготовок различной длины, приведены на рис. 4.2 (длины заготовок показаны числами на графиках, мм). Для данного варианта схемы обмотки ЛИМ (4с) при изменении размеров заготовок характер зависимостей ошибки позиционирования от тока не меняется. Важно отметить, что при использовании схемы обмотки 4с самоцентрирование достигается при любых размерах заготовок. При этом с увеличением размера заготовки в направлении движения поля b уменьшаются значения токов, при которых достигается $\Delta x = 0$. Такие значения токов показаны на рис. 4.3.

Как и ожидалось по результатам анализа кривых распределения усилий, показанных на рис. 2.12-2.17, при других вариантах схем обмоток, приведенных в табл. 2.3, невозможно обеспечить центрирование заготовок без ошибки позиционирования.

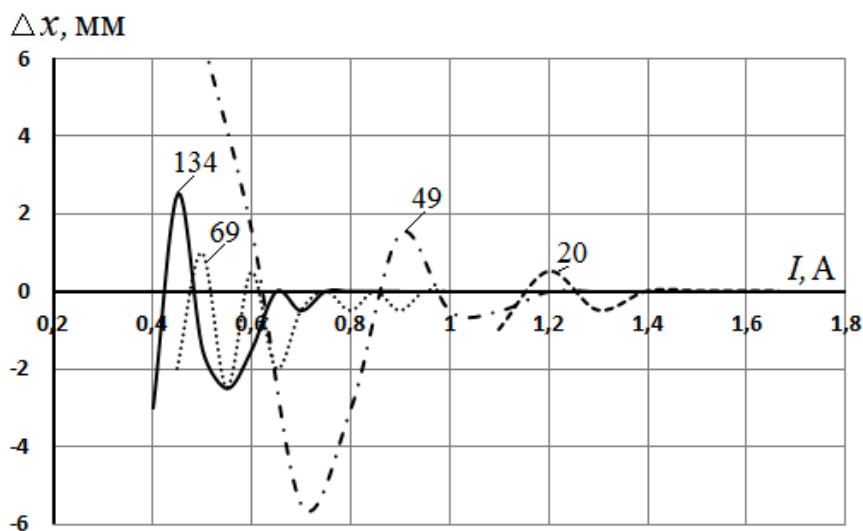


Рисунок 4.2 – Зависимость ошибки позиционирования заготовки от тока ЛИМ для заготовок разной длины для СБМП по варианту 4с

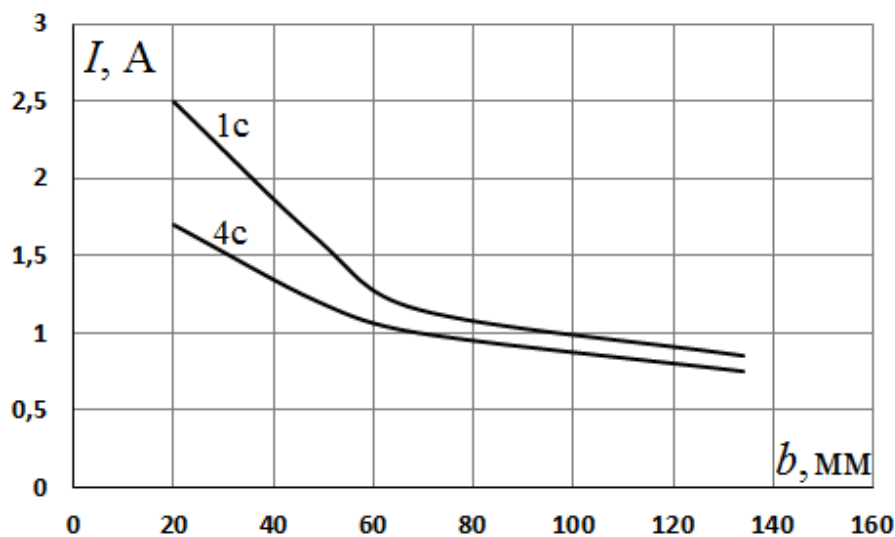


Рисунок 4.3 – Значения токов индуктора, при которых обеспечивается позиционирование заготовок разной длины

Сравнение результатов опытов для разных схем обмоток ЛИМ при размере заготовки $b = 49$ мм представлено на рис. 4.4. Как видно на рисунке, в случае схем по вариантам 2с, 3с, 5с, 6с заготовки останавливаются в центральной части ЛИМ с отклонением от оси индуктора $\Delta x = 13-14$ мм. Это хорошо согласуется с расположением зон искажения электромагнитных усилий слева от оси индуктора (схемы 2с и 3с, рис. 2.13-2.14) и справа от оси (схемы 5с и 6с, рис. 2.16-2.17). В случае обмотки по варианту 1с, характеризующейся зеркаль-

ным расположением катушек одноименных фаз относительно центра индуктора, в кривой электромагнитных усилий появляется «мертвая» зона. Это приводит к снижению эффекта самоцентрирования и появлению ошибки позиционирования даже при больших токах.

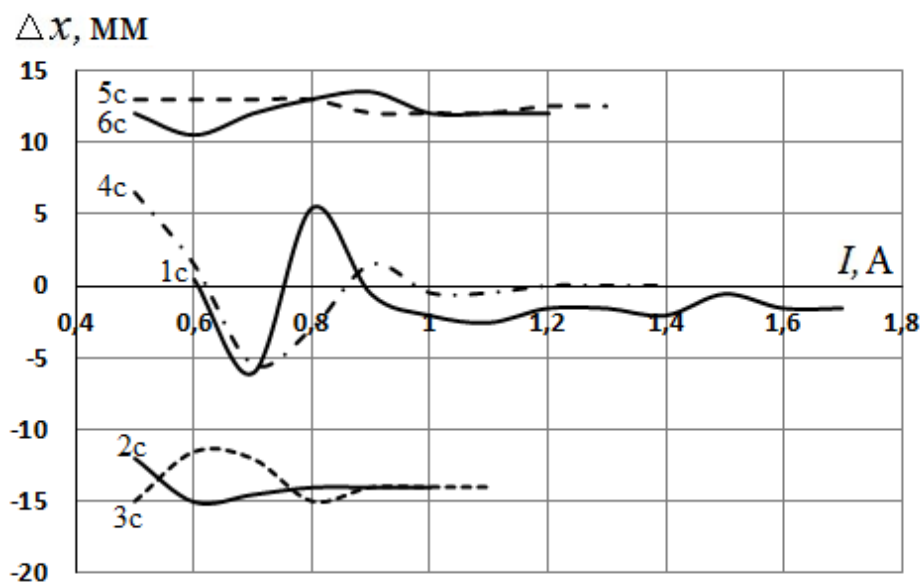
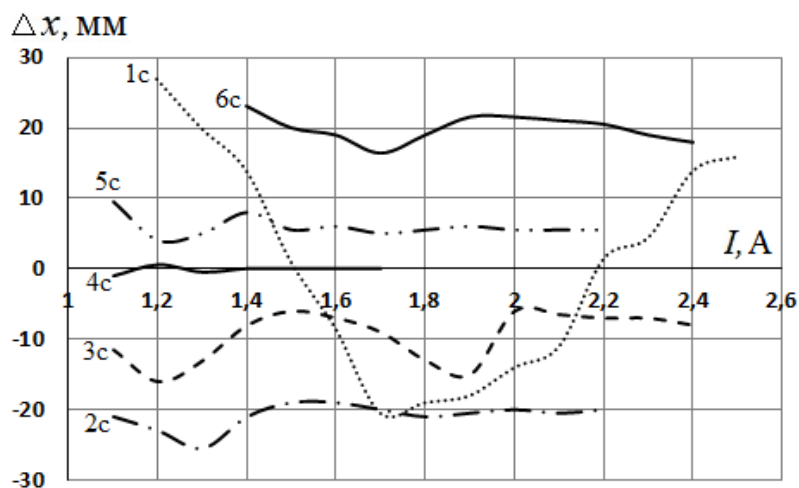
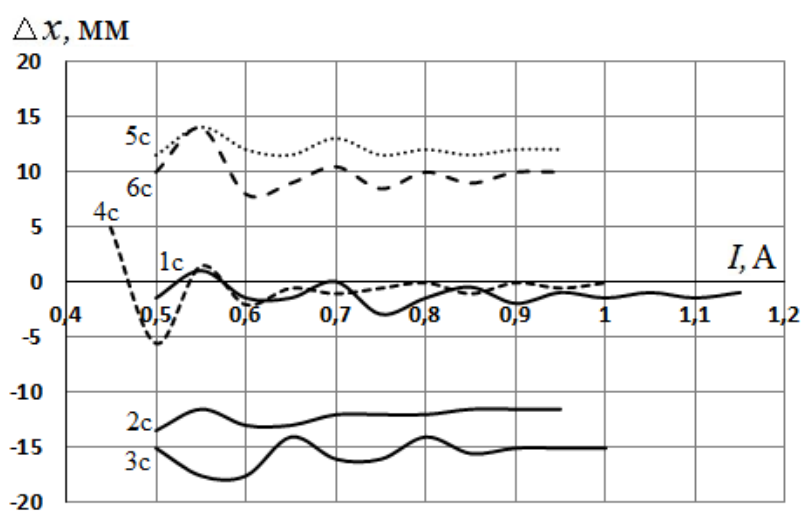


Рисунок 4.4 – Сравнение результатов позиционирования образца размером $b = 49$ мм при разных схемах обмоток, создающих СБМП

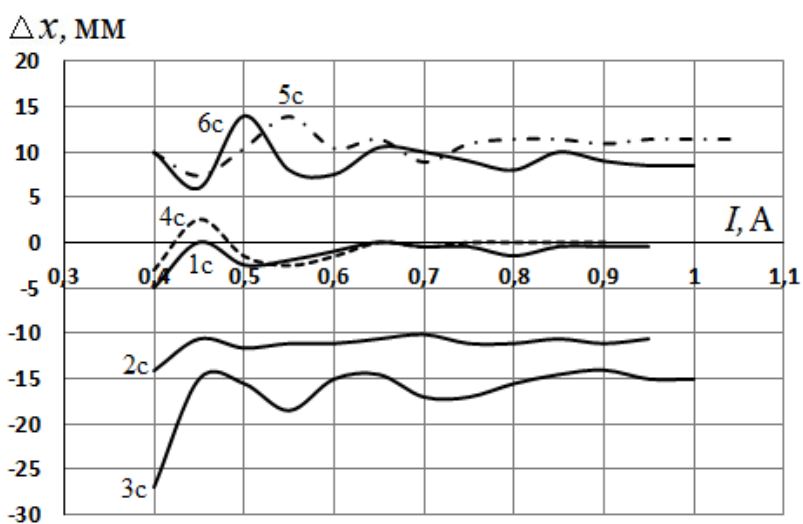
Сводные результаты исследований режимов позиционирования для других размеров заготовок представлены на рис. 4.5. В целом эти результаты подтверждают закономерности, выявленные для случая $b = 49$ мм. Как видно на рис. 4.5, в, при больших размерах заготовок ($b > \tau$), превышающих ширину «мертвой» зоны, самоцентрирование может наблюдаться не только в случае схемы 4с, но и для ЛИМ с обмоткой по варианту 1с. При этом влияние «мертвой» зоны сказывается на увеличении тока, при котором достигается самоцентрирование (см. рис. 4.3).



а



б



в

Рисунок 4.5 – Сравнение результатов позиционирования при разных схемах обмоток для образцов размером $b = 20$ мм (а), 69 мм (б) и 134 мм (в)

На практике при совмещении в ЛИМ функций перемещения и индукционного нагрева заготовок полученная закономерность уменьшения погрешности позиционирования с ростом тока индуктора может быть эффективно использована. Для перемещения заготовок требуются небольшие мощности и небольшие токи индуктора, которые могут обеспечить подачу заготовок и первый этап позиционирования. На втором этапе после входа заготовки в центральную зону индуктора установка (ЛИМ – индукционный нагреватель) включается на полную мощность, соответствующую режиму нагрева. При такой мощности (при больших токах индуктора) обеспечиваются необходимая точность позиционирования и высокая скорость нагрева.

4.2. Использование ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями в установках индукционного нагрева металлических заготовок

Режим позиционирования заготовок может быть востребован в установках индукционного нагрева при создании автоматизированных линий непрерывного или периодического действия. Установки индукционного нагрева находят широкое применение в металлообрабатывающей промышленности, в первую очередь, при нагреве заготовок или изделий под пластическую деформацию и термообработку. Совершенствование таких установок связано с механизацией и автоматизацией процессов, которые позволяют увеличить точность поддержания режимов нагрева с максимально возможным выравниванием температурного поля, а также повысить производительность и экономичность установок. Автоматизированные линии индукционного нагрева характеризуются модульным построением индукционных нагревателей, поступательным или возвратно-поступательным перемещением металла, использованием в одной линии нагревателей разной конструкции [78-80]. С учетом указанных особенностей в ряде случаев целесообразно применение установок индукционного нагрева с бегущими магнитными полями, в которых полезно используется как тепловое, так и механическое действие поля. Важно отметить, что достоинства индукционного нагрева в бегущих магнитных полях отмечаются ведущими

специалистами в области электротермии [38-42, 81]. Основные достоинства заключаются в следующем:

1. Электромагнитная мощность в нагреваемом металле в случае бегущего магнитного поля распределяется более равномерно, чем в случае пульсирующего поля, что обуславливает выравнивание температур.
2. Появляется возможность целенаправленного использования электромагнитных сил для создания поточных технологических линий.
3. Имеется дополнительная возможность регулирования параметров нагрева за счет изменения характера и скорости перемещения изделий.
4. При использовании трехфазных индукторов улучшается работа системы электроснабжения.
5. Снижается уровень акустического шума и вибраций.

В УрФУ (ранее УПИ) в содружестве с Уральским научно-исследовательским технологическим институтом исследовались возможности создания гибкой автоматизированной линии низкотемпературного индукционного отпуска стальных полос с использованием трехфазных ЛИМ, работающих на промышленной частоте [34]. В ходе работ была создана полномасштабная установка, включавшая в себя несколько секций рольганга с плоскими роликами, в промежутках между которыми устанавливались двухсторонние линейные индукторы, схематично показанная на рис. 4.6.

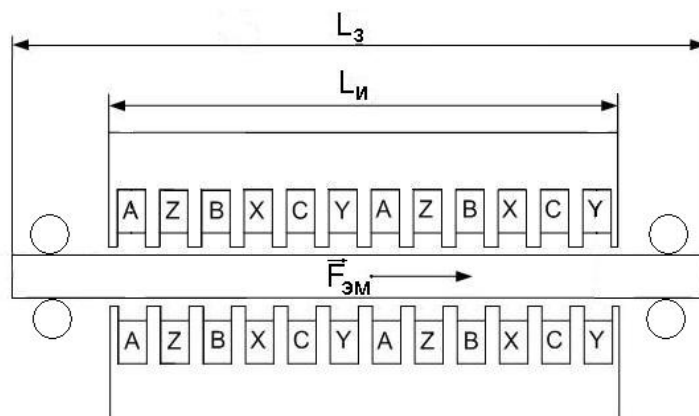


Рис. 4.6 – Схема устройства индукционного нагрева на основе трехфазного линейного индуктора

Испытания установки подтвердили указанные преимущества индукционного нагрева в бегущем магнитном поле. В частности, было показано, что при использовании двухстороннего линейного индуктора появляется возможность управления распределением тепловой мощности по поверхности нагреваемой стальной полосы за счет переключения обмоток отдельных секций индуктора, изменяющего конфигурацию магнитных потоков в полосе. Испытания установки в режиме поточной линии показали, что создаваемые линейным индуктором электромагнитные усилия $F_{эм}$, обеспечивающие поступательное перемещение полосы, являются избыточными. Это потребовало создания системы стабилизации скорости движения полосы, включающей приводные нажимные ролики. В целом, выполненные исследования показали перспективность использования бегущих магнитных полей для индукционного нагрева протяженных изделий и заготовок (лент, полос), в которых длина заготовок L_3 существенно превышает длину индуктора $L_{и}$ [34].

В развитие работы [34] в научной лаборатории кафедры «Электротехника и электротехнологические системы» УрФУ продолжаются исследования процессов индукционного нагрева в бегущих магнитных полях. Например, показано, что новые возможности по управлению распределением мощности тепловыделения и температурными полями появляются при двухтоковом питании линейных индукторов с совмещенными обмотками, обеспечивающими наложение бегущего и пульсирующего магнитного полей [81-82]. В то же время выявляются и недостатки индукционного нагрева в бегущем магнитном поле. В частности, показаны трудности, возникающие при нагреве в бегущем магнитном поле мерных заготовок из немагнитных металлов (в указанном случае длина заготовок меньше длины индуктора $L_3 < L_{и}$).

Одним из недостатков устройств индукционного нагрева мерных заготовок в бегущем магнитном поле является большое электромагнитное усилие, действующее на заготовку и приводящее к саморазгрузке индукторов. Например, при исследовании одной из опытных установок на основе линейного индуктора, имеющего длину $L_{и} = 415$ мм и потребляемую мощность (при частоте

50 Гц) около 5 кВА, для алюминиевой заготовки длиной $L_3 = 380$ мм (сечение 100×10 мм) получено усилие $F_{эм} = 245$ Н.

Другой недостаток рассматриваемых устройств, связан с неравномерностью тепловыделения по длине заготовки, обусловленной неравномерностью распределения бегущего магнитного поля. При этом в средней части заготовки температурное поле выравнивается по сравнению с нагревом в пульсирующем поле, а на краях заготовки наблюдаются отклонения температуры от среднего значения: выходящий край (по направлению движения поля) оказывается перегретым, а входящий – недогретым. Такое распределение температурного поля по длине заготовки приводит к увеличению времени термостатирования, используемого для выравнивания температур, по сравнению со случаем нагрева в пульсирующем поле.

Одним из факторов, увеличивающих неравномерность распределения температуры по длине мерных заготовок, является смещение их от симметричного положения по отношению к оси индуктора. Для оценки такого явления были выполнены исследования ряда опытных установок на основе ЛИМ. Для расчета сопряженных электромагнитных и тепловых процессов в установке использовался метод конечных элементов. Например, на рис. 4.7 приведены зависимости относительного размаха колебаний температуры по длине заготовки $\delta\Theta$, нагреваемой в двухстороннем линейном индукторе, от ошибки позиционирования Δx (отклонения оси заготовки от оси индуктора). Исследованная четырехполюсная ЛИМ имеет полюсное деление $\tau = 102$ мм и ширину активной зоны $B_{и} = 105$ мм. При питании от стандартной сети (380 В, 50 Гц) достигалась линейная токовая нагрузка $A_1 = 750$ А/см (на одну сторону), обеспечивающая за 3 минуты нагрев заготовки до $\Theta = 250-300^\circ\text{C}$. Результаты, приведенные на рис. 4.7, соответствуют алюминиевой заготовке с размерами $380 \times 100 \times 10$ мм и удельной электропроводностью $\gamma = 32$ МСм/м. Размах колебаний температуры $\delta\Theta$ определялся по выражению:

$$\delta\Theta = 100 \times (\Theta_{\max} - \Theta_{\min}) / \Theta_{cp}, \quad (4.1)$$

где Θ_{\max} , Θ_{\min} и $\Theta_{\text{ср}}$ – соответственно максимальное минимальное и среднее значения температуры по длине заготовки.

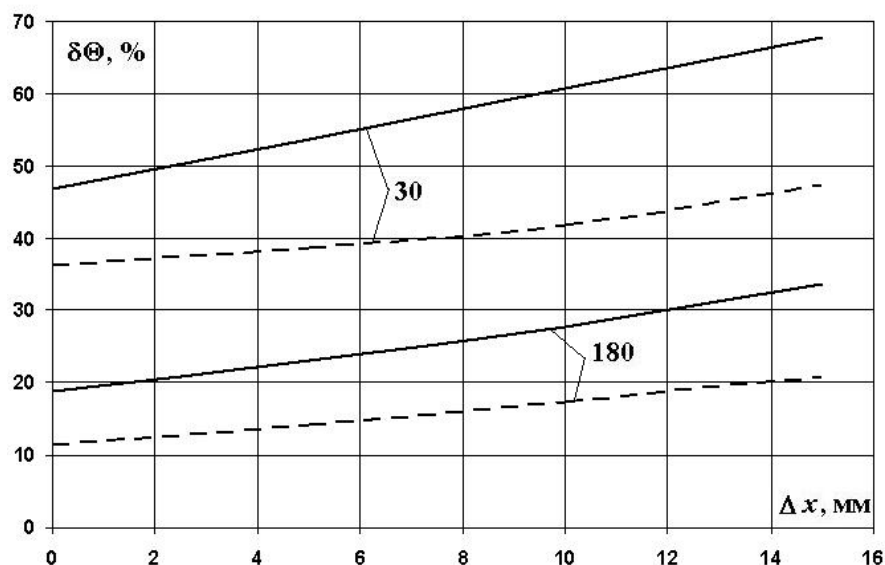


Рисунок 4.7 – Относительный размах колебаний температуры по длине заготовки при ее несимметричном расположении в индукторе

Зависимости, приведенные на рис. 4.7, получены для разных значений времени нагрева: 30 и 180 секунд (цифры на графиках). Сплошные линии соответствуют режиму нагрева в бегущем магнитном поле одного направления, пунктирные – нагреву с применением СБМП. Нетрудно видеть, что неравномерность нагрева заготовок существенно возрастает при смещении ее относительно центра индуктора (Δx), что подтверждает необходимость позиционирования заготовок по оси индуктора. В существующих установках индукционного нагрева подача заготовок в индуктор осуществляется чаще всего с помощью механических толкателей, а позиционирование в зоне нагрева – с помощью упоров, которые предотвращают также эффект саморазгрузки заготовок под действием электромагнитных сил.

Возможность эффективного совмещения режимов перемещения, позиционирования и индукционного нагрева появляется при использовании для нагрева мерных заготовок ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями. Такая установка схематично показана на рис. 4.8.

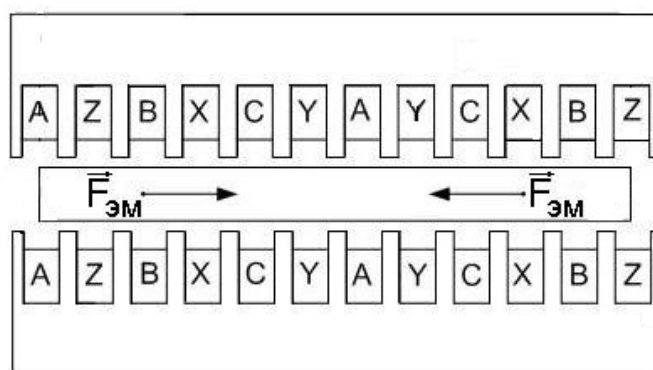


Рисунок 4.8 – Схема устройства индукционного нагрева во встречно бегущих магнитных полях

В рассматриваемой установке электромагнитные силы, создаваемые отдельными секциями индуктора, направлены навстречу друг другу. Это позволяет обеспечить управляемое перемещение заготовки и её позиционирование в рабочей зоне. При симметричном расположении заготовки в рабочей зоне электромагнитные усилия, создаваемые каждым из встречно бегущих магнитных полей, компенсируют друг друга, что исключает эффект саморазгрузки индуктора и обеспечивает самоцентрирование заготовки. При этом точность позиционирования заготовок увеличивается с увеличением токов в индукторе. Как показано в разделе 4.1, при электромагнитных нагрузках индукторов, характерных для индукционного нагрева, достигается идеальное совпадение осей индуктора и заготовки.

Как показано ранее, встречно направленные бегущие магнитные поля могут быть созданы при различных способах укладки катушек трехфазных обмоток. В табл. 4.2 приведены варианты обмоток, создающих сбегающиеся магнитные поля (варианты 3-8) для четырехполюсной цилиндрической ЛИМ, характеризующейся следующими данными: полюсное деление 132мм, внутренний диаметр индуктора 120 мм, амплитуда суммарного тока в его пазу 8000 А. Для сравнения в табл. 4.2 показаны схемы обмоток, создающих пульсирующее магнитное поле (ПП - вариант 1) и бегущее магнитное поле (БМП), перемещающееся в одну сторону (вариант 2).

Таблица 4.2 – Варианты схем укладки обмоток линейного индуктора

Пульсирующее поле (ПП)	1	AAAXXXAAAXXX
Бегущее магнитное поле (БМП)	2	AZBXCYZAZBXCZY
Сбегающиеся магнитные поля (СБМП)	3	AZBXCZYCXBZAZ
	4	AZBXCZYCXBZAY
	5	AZBXCZYXBZAYC
	6	AZBXCZYBZAYCX
	7	AZBXCZYZAYCXB
	8	AZBXCZYAYCXBZ

Для сопоставления вариантов индукционного нагрева в различных магнитных полях выполнены расчеты электромагнитных и тепловых процессов при нагреве алюминиевых заготовок при различном заглублении их в линейный индуктор ($\Delta L = (L_3 - L_n)/2$). Для расчета сопряженных электромагнитных и тепловых процессов в установке использовался метод конечных элементов. На рис. 4.9 и 4.10 представлены примеры зависимостей максимальных относительных колебаний температуры δ_Θ по длине цилиндрической алюминиевой заготовки диаметром 108 мм от заглубления ΔL для описанной выше ЛИМ. Цифры на графиках соответствуют номерам вариантов в табл. 4.2.

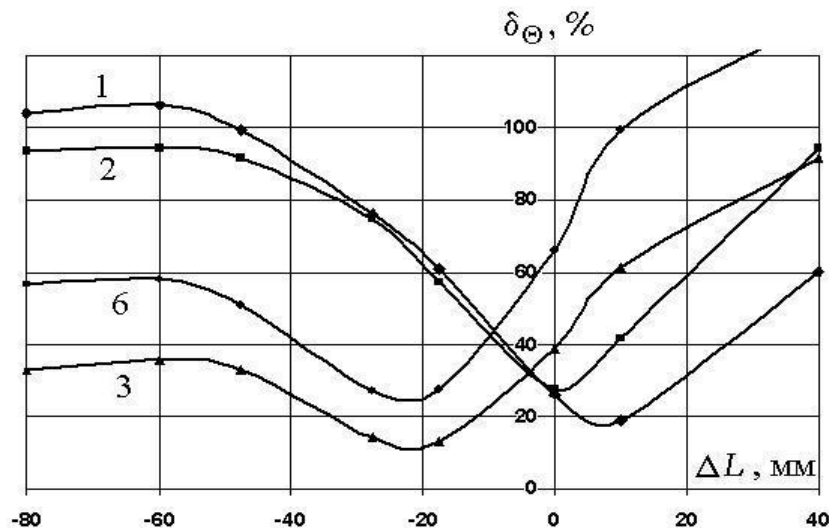


Рисунок 4.9 – Зависимости относительного колебания температуры по длине заготовки от её заглубления в индуктор при 30 секундном нагреве

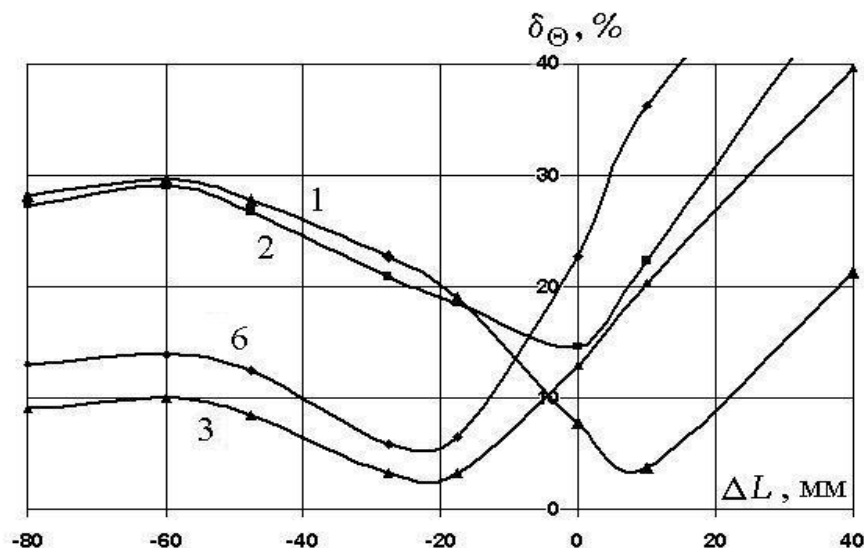


Рисунок 4.10 – Зависимости относительного колебания температуры по длине заготовки от её заглубления в индуктор при 180 секундном нагреве

Как видно на рис. 4.9 отклонения температуры от среднего значения по длине заготовок существенно зависит от заглубления заготовок в индуктор ΔL и для случаев пульсирующего и бегущего (в одном направлении) магнитных полей (варианты 1 и 2) может достигать 100%. При более длительном нагреве (рис. 4.10) температурное поле выравнивается за счет теплопередачи, но в указанных случаях остается на уровне 20-30 %.

При использовании встречно направленных бегущих магнитных полей неравномерность нагрева существенно снижается. Лучший результат получен для варианта укладки обмоток 3 (по табл. 4.2), в котором трехфазная обмотка индуктора, состоящая из двух секций, занимающих левую и правую половины индуктора, характеризуется зеркальным расположением катушек отдельных фаз относительно поперечной оси индуктора. В этом случае при $L_3 < L_{и}$ неравномерность распределения температуры по длине заготовки в начале нагрева не превышает 40%. С увеличением времени нагрева преимущество предлагаемого способа нагрева сохраняется, а за счет теплопередачи внутри нагреваемой заготовки неравномерность распределения температуры для варианта 3 обмотки, создающей встречно бегущие магнитные поля, уменьшается до уровня $\delta_{\Theta} = 3-$

10 %. Можно отметить, что результаты получены при длине заготовок, превышающей ширину «мертвой» зоны, характерной для данного типа обмоток. Как было показано ранее в разделе 4.1, при этом сохраняется эффект самоцентрирования заготовок. Для ЛИМ с обмоткой по варианту 6 (по табл. 4.2), в которой «мертвая» зона отсутствует, получены несколько большие значения колебаний температуры ($\delta_{\Theta} = 5-15\%$), но преимущества перед нагревом в пульсирующем поле и в бегущем магнитном поле одного направления сохраняется.

Можно отметить, что аналогичные результаты получены при расчетах процессов нагрева плоских заготовок в двухсторонней ЛИМ, размеры индукторов которой соответствуют данным ЛИМ6 (табл. 5.2). По результатам исследований можно сделать вывод о том, что устройство индукционного нагрева на основе линейных индукторов, создающих встречно направленные (сбегающиеся) бегущие магнитные поля, не только исключает явление саморазгрузки индуктора, но и обеспечивает позиционирование заготовок по оси индуктора, а также уменьшение неравномерности нагрева по длине заготовок по сравнению с нагревом в пульсирующем или бегущем магнитных полях.

Исследование электромагнитных и тепловых процессов в рассматриваемых устройствах индукционного нагрева позволило выявить дополнительные возможности улучшения их характеристик. Например, на рис. 4.11 (кривая 1) показано распределение удельной мощности тепловыделения по длине алюминиевой заготовки для одного из вариантов расчетов, соответствующих схеме укладки трехфазной обмотки 1с (для ЛИМ6 при длине заготовки $L_3 = 380$ мм). Видно, что максимум тепловыделения наблюдается в центре индуктора. Исходя из этого, предложена конструкция линейного индуктора с разъемным магнитопроводом, схематично показанная на рис. 4.12. Наличие немагнитного зазора d обеспечивает ослабление магнитного поля в центральной части индуктора и, как следствие, уменьшение мощности тепловыделения в центральной зоне заготовки. Это подтверждает кривая 2 на рис. 4.11, соответствующая значению немагнитного зазора $d = 4$ мм.

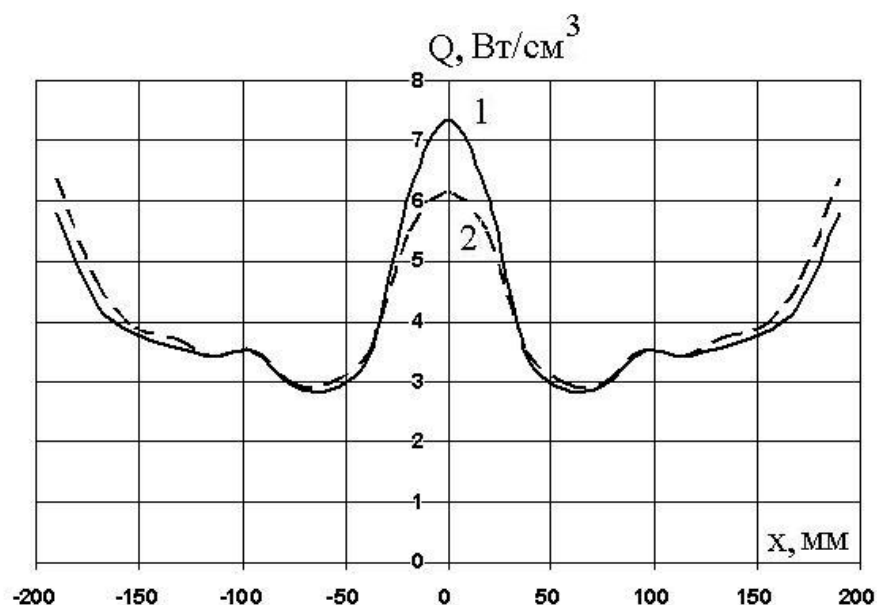


Рисунок 4.11 – Распределение мощности тепловыделения по длине заготовки при отсутствии зазора в магнитопроводе (1) и при зазоре $d = 4$ мм (2)

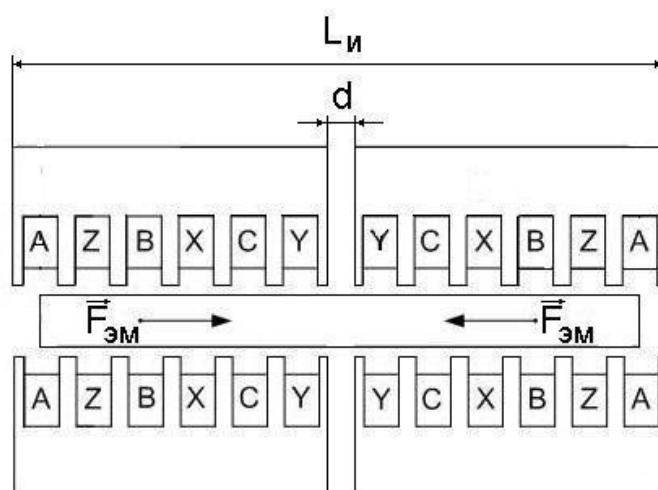


Рисунок 4.12 – Линейный индуктор с разделенным магнитопроводом

Изменяя величину немагнитного зазора в индукторе с разделенным магнитопроводом, можно влиять на характер распределения мощности тепловыделения и на распределение температуры по длине заготовок. Расчеты, представленные на рис. 4.13 показывают, что для исследованного случая при немагнитном зазоре в магнитопроводе $d = 4$ мм удастся существенно снизить колебания температур. Отклонения температуры от среднего значения уменьшились с $\delta_{\Theta} = 27\%$ при отсутствии зазора до 16% через 30 секунд нагрева и с $\delta_{\Theta} = 6,5\%$ до $3,5\%$ соответственно – через 180 секунд нагрева.

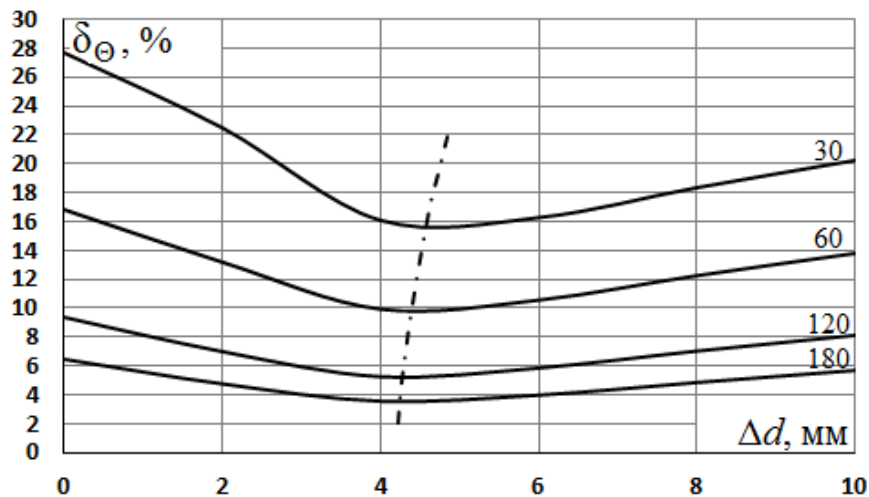


Рисунок 4.13 – Зависимость характера распределения мощности тепловыделения от ширины немагнитного зазора между индукторами d

Зависимости относительного отклонения температур по длине заготовки от среднего значения δ_{Θ} от немагнитного зазора между индукторами d , представленные на рис. 4.13, имеют нелинейный характер. При этом местоположение минимума δ_{Θ} также изменяется от времени нагрева, что можем наблюдать на нанесенной пунктирной линии.

Предложенные технические решения, описанные в данном разделе, закреплены патентом РФ на полезную модель [83].

4.3. Выводы по разделу 4

1. Показаны возможности применения ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями в загрузочно-подающих устройствах для подачи заготовок в рабочую зону в металлообрабатывающем производстве, в устройствах подачи деталей под схват робота на сборочных операциях в машиностроении и приборостроении и др. В таких вспомогательных технологических операциях востребован режим позиционирования заготовок, который при использовании рассматриваемых ЛИМ достигается за счет эффекта самоцентрирования без применения датчиков.

2. Эффект самоцентрирования заготовок в ЛИМ, создающей сбегаящиеся магнитные поля (СБМП), обеспечивается при использовании обмоток с симметричным расположением катушек отдельных фаз относительно оси индуктора (4с, 1с). В этих случаях распределение электромагнитных усилий симметрично относительно оси индуктора, что является одним из условий самоцентрирования заготовки. При использовании схемы обмотки 4с самоцентрирование достигается при любых размерах заготовок. В случае ЛИМ с обмоткой по варианту 1с, характеризующейся появлением явно выраженной «мертвой» зоны, самоцентрирование возможно при размерах заготовок, существенно больших, чем ширина «мертвой» зоны. При других вариантах схем обмоток невозможно обеспечить центрирование заготовок без ошибки позиционирования.

3. Обоснована целесообразность применения ЛИМ с обмотками, создающими сбегаящиеся магнитные поля в установках индукционного нагрева мерных заготовок. При этом ЛИМ обеспечивают перемещение заготовок в рабочей зоне (в частности, их позиционирование) и непосредственно индукционный нагрев. Расчеты режимов нагрева показали, что отклонения оси заготовок от оси индуктора приводит к увеличению неравномерности распределения температур по длине заготовки при нагреве как в пульсирующих, так и в бегущих магнитных полях, что делает необходимым позиционирование заготовок по оси индуктора.

4. Предложены способы уменьшения неравномерности тепловыделения по длине заготовок по сравнению с вариантами нагрева в пульсирующих и бегущих магнитных полях за счет использования ЛИМ со сбегаящимися магнитными полями, создаваемыми обмотками с симметричным расположением катушек отдельных фаз относительно оси индуктора. Предложенные решения защищены патентом РФ на полезную модель.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РАЗРАБОТОК

5.1. Основные характеристики экспериментальных линейных индукционных машин

При разработке любых технических устройств важную роль играют экспериментальные исследования, задачами которых являются проверка достоверности результатов расчетов и полученных теоретических выводов, оценка влияния на характеристики ЛИМ различных факторов, испытания установок на основе ЛИМ с целью апробации различных технологий. Для проведения экспериментальных исследований, результаты которых представлены в диссертации, были использованы линейные индукционные машины на основе различных индукторов, в том числе созданные при участии автора. Все экспериментальные ЛИМ условно можно разделить на две группы:

- лабораторные образцы ЛИМ на основе индукторов небольших габаритов и малой мощности (до 1 кВт), основные технические характеристики которых представлены в табл. 5.1;

- опытно-промышленные установки на основе индукторов, габариты и мощности которых соответствуют прототипам, созданным по заказам предприятий (основные характеристики в табл. 5.2).

Достоинствами ЛИМ первой группы являются малые затраты на изготовление и возможность быстрого изменения конструктивных параметров индукторов (например, схем обмоток) и установок на их основе, возможность использования маломощных источников питания. Более мощные ЛИМ второй группы позволяют создавать установки с параметрами, близкими к промышленным образцам, что обеспечивает возможность апробации различных технологий с учетом требований предприятий – заказчиков.

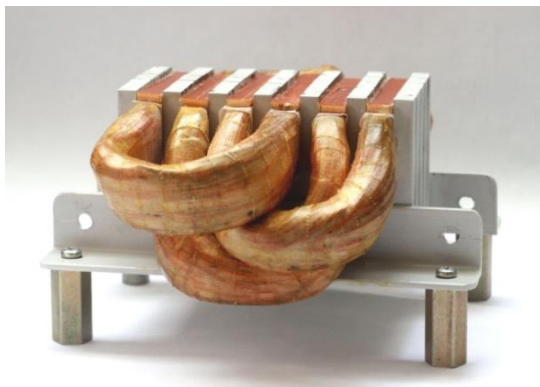
Вид индукторов ЛИМ1 и ЛИМ3 с однослойной обмоткой представлен на рис. 5.1. Наличие двух одинаковых индукторов позволяет создавать двухсторонние варианты машин.

Таблица 5.1 – Технические данные лабораторных образцов ЛИМ

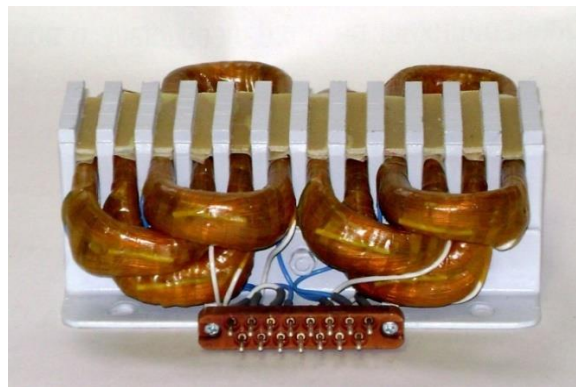
Величина	обозначение	ед. изм.	ЛИМ 1	ЛИМ 2	ЛИМ 3	ЛИМ 4
число фаз	m		3	3	3	3
число полюсов	$2p$	мм	2	2	4	5
полюсное деление	τ	мм	52.5	52.5	39.0	39.0
ширина пакета статора	L_l	мм	56.0	56.0	40.0	40.0
высота ярма	h_A	мм	40.0	40.0	30.0	30.0
зубцовое деление	t_z	мм	17.5	17.5	13.0	13.0
ширина паза	b_{II}	мм	10.5	10.5	7.0	7.0
ширина зубца	b_z	мм	7.0	7.0	6.0	6.0
высота зубца	h_z	мм	30.0	30.0	30.0	30.0
высота коронки зубца	h_K	мм	6.0	6.0	8.0	7.0
число пазов	z_l		6	6	12	15
тип обмотки			однослойная	однослойная	однослойная	двухслойная
шаг обмотки	β		1	1	1	1
число пазов на полюс-фазу	q		1	1	1	1
число параллельных ветвей	a		1	1	1	1
число проводников в катушке	w_K		400	123	650	325
число витков в фазе	w_Φ		420 (400)	430	1300	1300
средняя длина лобовой части (на одну сторону)	$l_{ЛОБ}$	мм	144	144	92	90
средняя длина катушки	l_K	мм	0.724 (0.67)	0.77 (0.71)	264	260
диаметр провода	$d_{ПР}$	мм	0.352	1.19	0.40	0.40
сечение провода	$S_{ПР}$	мм ²	8.8	0.87	0.126	0.126
активное сопротивление катушки	R_K	Ом	1.33	1.33	24.0	11.3
активное сопротивление фазы	R_l	Ом	1.33	1.33	47.2	45.3 / 46.7

Таблица 5.2 – Основные данные индукторов опытно-промышленных образцов ЛИМ

Величина	обозначение	ед. изм.	ЛИМ 5	ЛИМ 6	ЛИМ 7	ЛИМ 8
число фаз	m		3	3	3	3
число полюсов	$2p$	мм	2	4	2	2
полюсное деление	τ	мм	180	102	66	66
ширина пакета статора	L_1	мм	125	105	120,0	150
высота ярма	h_A	мм	35,0	25,0	50,0	50,0
зубцовое деление	t_Z	мм	20,0	17,0	22,0	22,0
ширина паза	b_{Π}	мм	10,0	10,0	14,0	14,0
ширина зубца	b_Z	мм	10,0	7,0	8,0	8,0
высота зубца	h_Z	мм	35,0	25,0	60,0	60,0
высота коронки зубца	h_K	мм	6,0	7,0	5,0	5,0
число пазов	z_1		18 (36)	24,0	6	6 (18)
тип обмотки			однослойная	однослойная	однослойная	однослойная
шаг обмотки	β		1	1	1	1
число пазов на полюс-фазу	q		3	2	1	1
число параллельных ветвей	a		1	1	1	1
число проводников в катушке	w_K		56	450	150	150
число витков в фазе	w_{Φ}		168 (336)	1800	300	150 (450)
средняя длина лобовой части (на одну сторону)	$l_{\text{ЛОБ}}$	мм	-	240	240,0	270
средняя длина катушки	l_K	мм	-	690	720,0	720
диаметр провода	$d_{\text{ПР}}$	мм	1,74	0,50	2×1,18	2*1,18
сечение провода	$S_{\text{ПР}}$	мм ²	2,377	0,196	2×1,094	2*1,094
активное сопротивление катушки	R_K	Ом	0,37	28	0,9	0,9
активное сопротивление фазы	R_1	Ом	1,1(2,2)	112	1,8	0,9 (2,7)



а



б

Рисунок 5.1 – Внешний вид ЛИМ1 (а) и ЛИМ3 (б)

Пятиполюсная ЛИМ4 с двухслойной обмоткой представлена на рис. 5.2, схема ее обмотки - рис. 5.3.

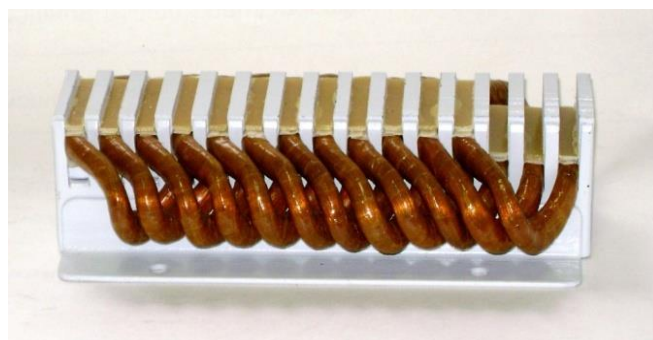


Рисунок 5.2 – Внешний вид индуктора ЛИМ4

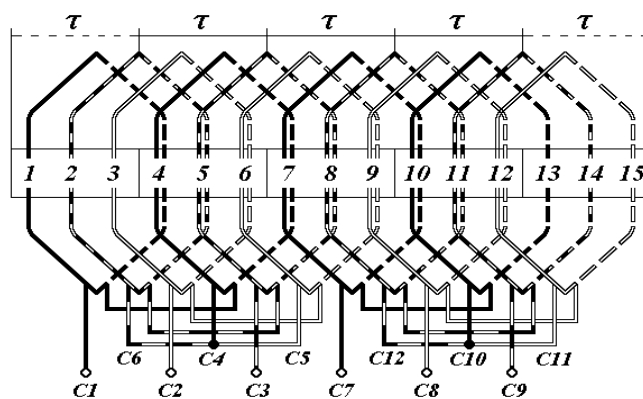


Рисунок 5.3 – Схема обмотки ЛИМ4

Индуктор более мощной четырехполюсной ЛИМ6 показан на рис. 5.4, а схема его обмотки на рис. 5.5.



Рисунок 5.4 – Внешний вид индуктора ЛИМ6

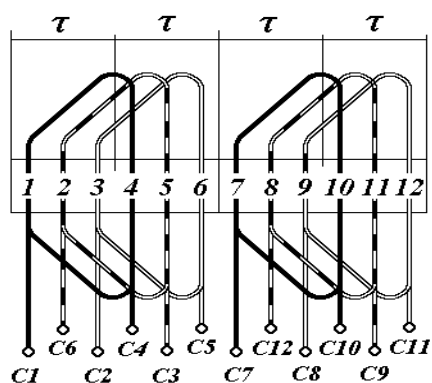


Рисунок 5.5 – Схема обмотки ЛИМ6

Индуктор ЛИМ7, созданный для опытно-промышленной установки представлен на рис. 5.6, схема его обмотки на рис. 5.7.

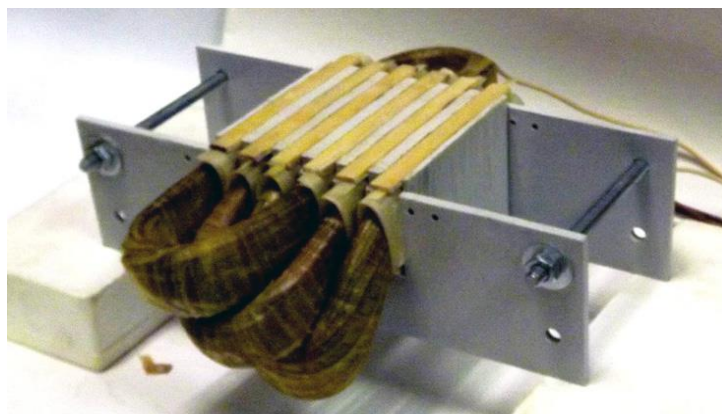


Рисунок 5.6 – Внешний вид индуктора ЛИМ7

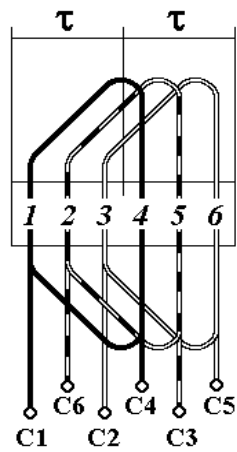


Рисунок 5.7 – Схема обмотки ЛИМ7

Лабораторная установка электродинамической сепарации на основе двух ЛИМ5, представлена на рис. 5.8, схема обмотки ЛИМ5 – на рис. 5.9.

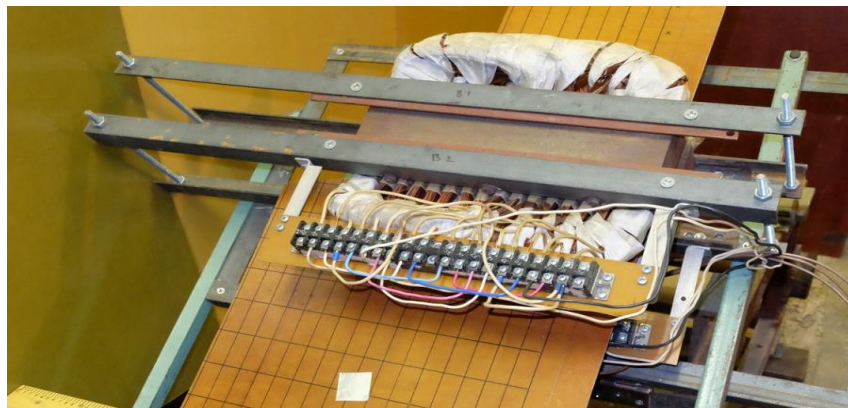


Рисунок 5.8 – Вид установки на основе ЛИМ5

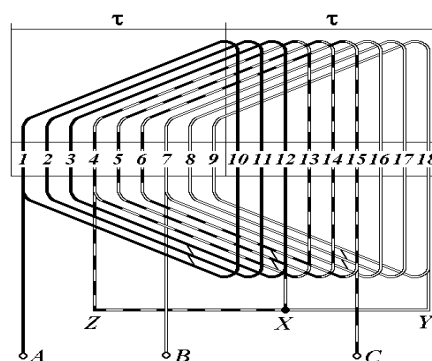


Рисунок 5.9 – Схема обмотки ЛИМ5

5.2. Результаты экспериментальных исследований

5.2.1. Исследование влияния частоты на характеристики ЛИМ

Одной из задач экспериментальных исследований являлась оценка характеристик ЛИМ, работающих на повышенной частоте [84]. Как показано в разделе 3, такие ЛИМ целесообразны при создании электродинамических сепараторов, предназначенных для сепарации металлов крупностью менее 10 мм. В ходе работ использован преобразователь частоты *HYUNDAI N700ESF*, технические данные которого приведены в табл. 5.3. С учетом ограниченной мощности преобразователя для экспериментов использованы линейные машины малой мощности и габаритов (ЛИМ1 – ЛИМ4). Наиболее интересные результаты исследований представлены ниже.

Таблица 5.3 – Технические данные преобразователя частоты

Питание однофазное, В	200-240
Мощность, кВт	1,5
Выходной ток, А	7,0
Проектная производительность, кВА	2,4-2,9
Минимальное подключаемое сопротивление, Ом	50
Выходное напряжение, В	200-230 (± 10 %)
Входная частота, Гц	50/60 (± 5 %)
Диапазон выходных частот, Гц	0,01-400
Аналоговая входная команда	0-5 В постоянного тока, 4-20 мА постоянного тока, 0-1 кОм
Метод контроля	Скалярное управление
Вес, кг	1,5

На первом этапе экспериментальных исследований определялись электрические величины ЛИМ1 и ЛИМ4 в двухсторонних вариантах при различных частотах питания. Электрические параметры для ЛИМ1 приведены в табл. 5.4.

Таблица 5.4 – Электрические параметры ЛИМ1 с двухсторонним индуктором

f , Гц	50	103,6	202,5	400
U_a , В	18	36,25	66,5	130,5
U_b , В	17,2	35,5	66	130
U_c , В	17,3	35,5	65,5	129,5
I_a , А	2,4	2,2	2,15	2,05
I_b , А	3	2,89	2,8	2,72
I_c , А	2,2	2,19	2,13	2,1
P_a , Вт	2,4	-1,0	-2,	-4,0
P_b , Вт	14	15	12,5	10
P_c , Вт	17	25	37,5	65
P_{Σ} , Вт	33,4	39,0	48,0	71,0
$P_{\text{э}}$, Вт	26,1	26,0	24,1	21,2
$P_M = P_{\Sigma} - P_{\text{э}}$, Вт	7,3	13,0	23,9	49,8

В ходе проведения эксперимента для измерения усилий вторичный элемент присоединялся гибкой связью к динамометру и перемещался в зазоре индуктора с шагом в одно зубцовое деление. В качестве ВЭ была использована алюминиевая пластина с размерами $25 \times 25 \times 3$ мм и электропроводностью $\gamma = 32$ МСм/м. Для исключения погрешности обусловленной неточностью положения вторичного элемента эксперименты проводились 5 раз, далее вычислялось среднее значение усилия. При проведении экспериментов обмотки индукторов соединялись параллельно, и величина токов поддерживалась постоянной при изменении частоты, что требовало изменения величины напряжения преобразователя. Результаты измерения электромагнитных усилий для ЛИМ1 при разных частотах представлены на рис. 5.10-5.11. На рис.5.10 показаны распределения усилий по длине ЛИМ1, а на рис. 5.11 – зависимости удельного электромагнитного усилия, действующего на ВЭ, от частоты (график построен для точки 3, представленной на рис. 5.10). На рис. 5.11 цифрой 1 показан идеализированный график линейного роста усилия пропорционально частоте, что могло бы соответствовать действительности в случае постоянства токов и отсутствия магнитных потерь. Экспериментально снятая зависимость удельного усилия от частоты отмечена цифрой 2.

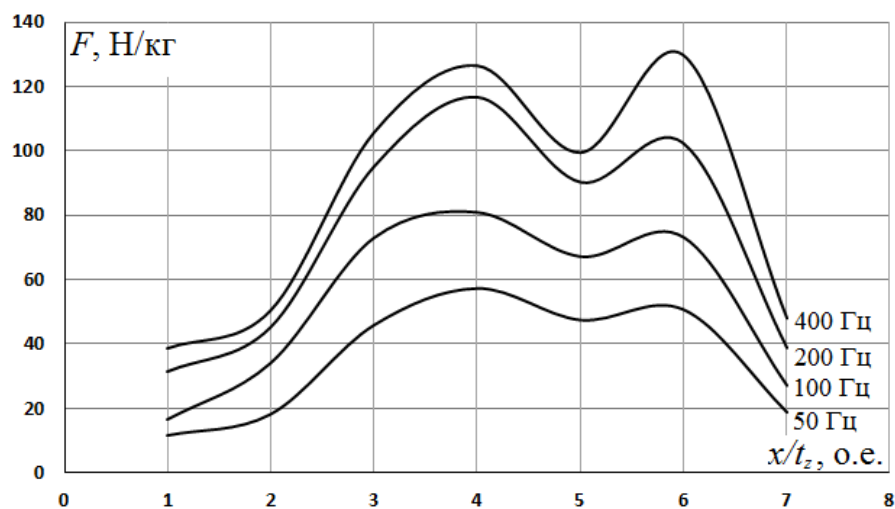


Рисунок 5.10 – Распределение удельных электромагнитных усилий по длине ЛИМ1

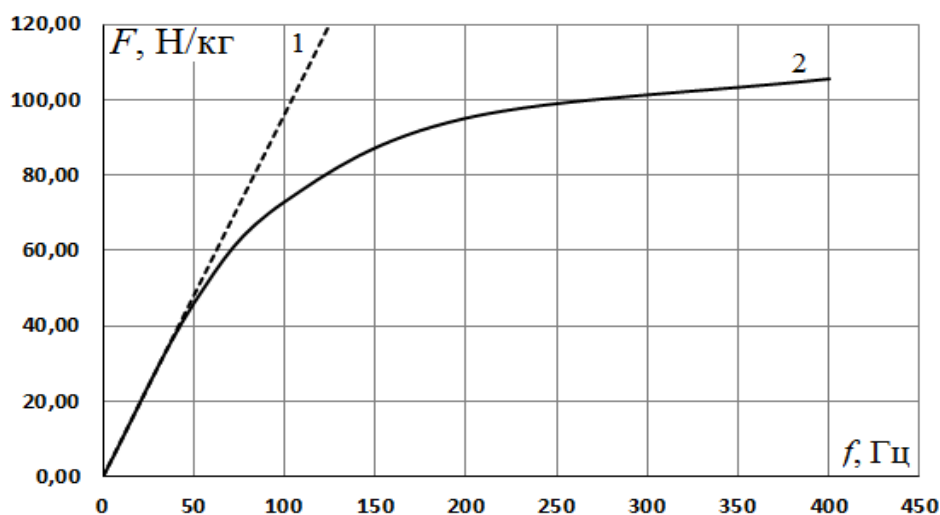


Рисунок 5.11 – Зависимость удельных усилий от частоты

Как видно из рис. 5.10-5.11, с увеличением частоты рост усилия существенно замедляется (не происходит пропорционального роста усилия). Для выявления причин этого явления потребовались вспомогательные исследования. При этом проанализирован ряд факторов.

Для оценки влияния высших гармоник выполнено сопоставление результатов экспериментов при питании ЛИМ от преобразователя и промышленной сети на частоте 50 Гц. Различие измеренных токов и электромагнитных усилий при постоянстве напряжения не превысили 2%. Это означает, что высшие гармоники при питании ЛИМ от преобразователя не влияют на результаты. Вторым фактором, который может влиять на результаты измерений, является

нагрев ВЭ. Для оценки этого явления были проведены измерения температуры вторичного элемента при различных частотах и рассчитана электропроводность ВЭ с учетом повышения температуры. При времени нахождения ВЭ в воздушном зазоре индуктора 3-5 с на частоте 50 Гц максимальная температура ВЭ составила 27 °С, при частоте 400 Гц температура достигла 47 °С. Проведённые расчеты показали, что разница в электропроводности ВЭ с учетом изменения температуры составила 8,5 %. Примерно на такую же величину отличались расчетные усилия. Таким образом, изменение температуры ВЭ также не объясняет указанного снижения экспериментальных усилий в зависимости от частоты.

С ростом частоты увеличиваются потери в стали магнитопровода индуктора, что оказывает влияние на характеристики ЛИМ. Как можно наблюдать на рис. 5.10, усилия растут в меньшей степени, чем увеличивается частота. В табл. 5.4 видно, что потери в магнитопроводе P_m быстро растут с увеличением частоты и при $f > 200$ Гц, превышают электрические потери в обмотках ЛИМ. Отсюда следует вывод, что работа рассматриваемых ЛИМ на повышенных частотах нецелесообразна. Данный вывод соответствует результатам, полученным ранее в работе [57], где отмечалась малоэффективная работа электродинамических сепараторов на основе ЛИМ при частотах более 150-200 Гц.

Результаты экспериментальных исследований для ЛИМ4, обмотка которой создает сбегающиеся магнитные поля, представлены в табл. 5.5 и на рис. 5.12. В качестве ВЭ для данной машины использовалась алюминиевая пластина размерами 20×20×3 мм. Исследования проведены при частотах 50 и 250 Гц. Можно отметить, что показанные результаты соответствуют схеме обмотки по варианту 3с (табл. 2.4). Такая схема создает несимметричные магнитные поля, что сказывается на распределении токов в фазах обмотки и на распределении электромагнитных усилий по длине индуктора.

Таблица 5.5 – Электрические параметры индуктора ЛИМ4

3с	X C Y A Z B z a y c x b					
	A Z B X C Y c x b z a y	I, A (левое плечо)	I, A(правое плечо)	U, В	P, Вт	IΣ, А
50 Гц	A	0,52	0,47	126	4	0,83
	B	0,445	0,445	144	30,5	0,87
	C	0,359	0,42	148	0,2	0,94
250 Гц	A	0,479	0,432	25	7,5	0,78
	B	0,37	0,42	28	12	0,78
	C	0,34	0,4	28,5	8	0,85

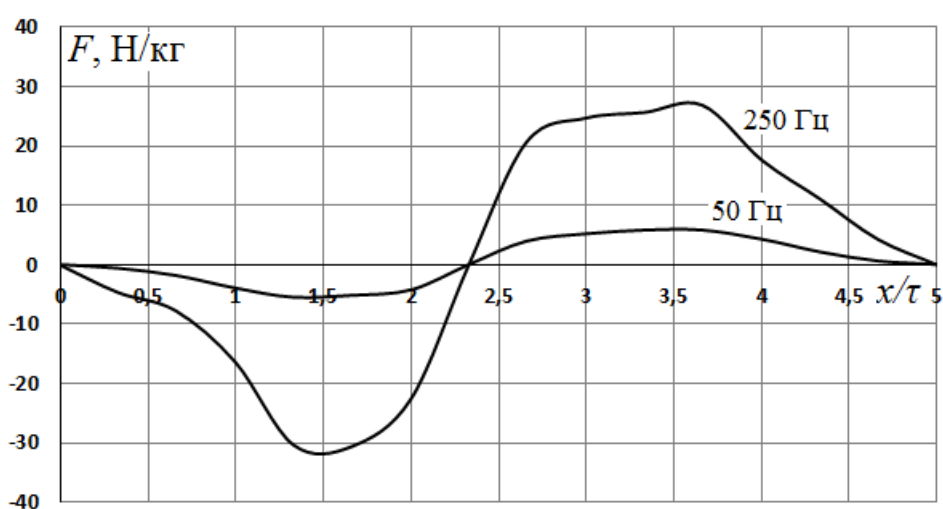


Рисунок 5.12 – Распределение усилий по длине ЛИМ4

Сопоставление зависимостей, приведенных на рис. 12, показывает, что в данном случае рост усилий практически пропорционален частоте.

В целом, исследования ЛИМ при работе от преобразователя частоты не дали однозначного ответа о целесообразности применения устройств, работающих на повышенных частотах. Подобные исследования должны быть продолжены.

5.2.2. Оценка влияния распределения магнитного поля на характер электромагнитных усилий

Для анализа влияния характера распределения магнитного поля на усилия в ЛИМ оценивалась связь между схемами соединения обмоток ЛИМ и распре-

делением индукции в рабочей зоне машины [85-86, 89]. В экспериментах использованы две схемы соединения обмоток ЛИМ4: одна создает однонаправленное бегущее магнитное поле, вторая – сбегаящиеся поля согласно схеме соединения 3с, представленной в табл. 2.4 раздела 2.2. Измерения индукции производились с помощью вольтметра Ф584, осциллографа *INSTEK GDS806S* и специальной измерительной рамки. Результаты измерений для случая однонаправленного магнитного поля представлены на рис. 5.13. Соответствующие измерения усилий для сопоставления с распределением магнитной индукции проведены для ВЭ в виде алюминиевой пластины с размерами 20×20×3 мм и показаны на рис. 5.14.

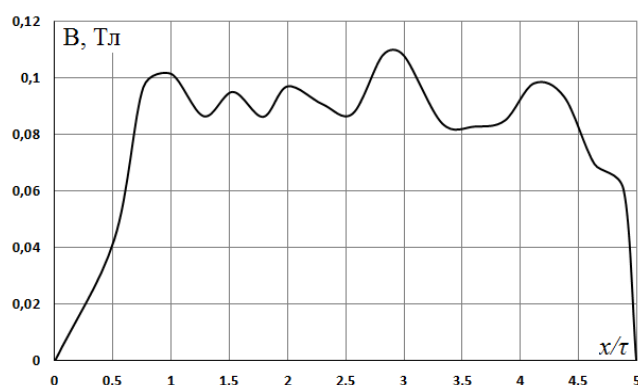


Рисунок 5.13 – Распределение индукции в ЛИМ4 с однонаправленным БМП

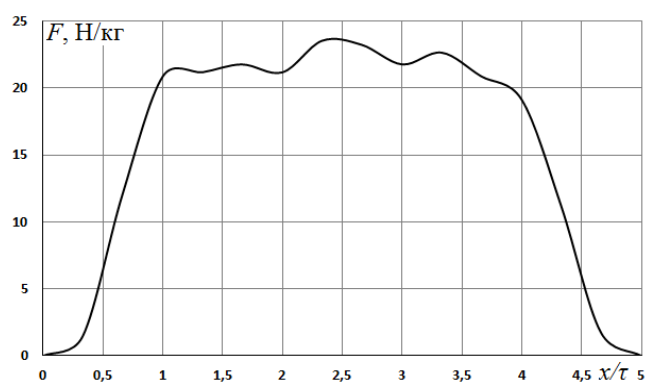


Рисунок 5.14 – Распределение усилия в ЛИМ4 с однонаправленным БМП

Как видно из рис. 5.13-5.14, в случае однонаправленного БМП наблюдается корреляция между характерами распределения магнитного поля и усилий в рабочей зоне ЛИМ4. Наблюдается некоторая неравномерность в огибающей кривых магнитной индукции (рис. 5.13), которая сглаживается в кривой рас-

пределения электромагнитного усилия (рис. 5.14). Это объясняется тем, что размер измерительной катушки (6 мм) меньше зубцового деления ЛИМ4 (13 мм), а размер ВЭ (20 мм) существенно больше его.

Огибающая кривых магнитной индукции для ЛИМ4, создающей встречно бегущие магнитные поля на рис. 5.15, а распределения электромагнитных усилий – на рис. 5.16. Как видно, характерной связи между распределениями поля и усилий не наблюдается.

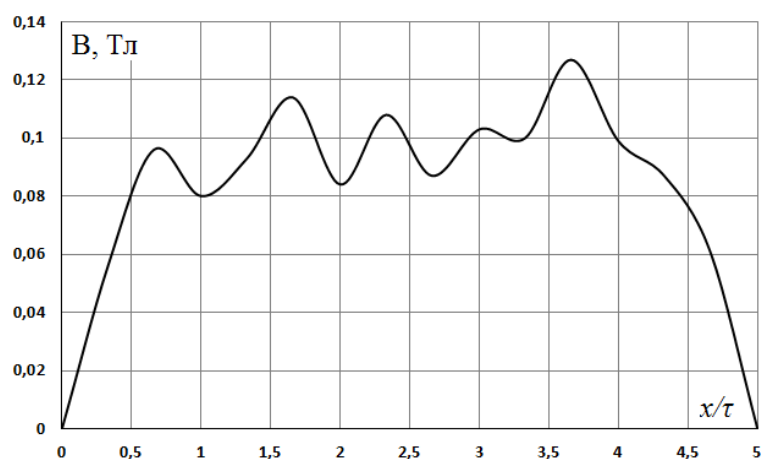


Рисунок 5.18 – Распределение индукции в ЛИМ4 при схеме 3с

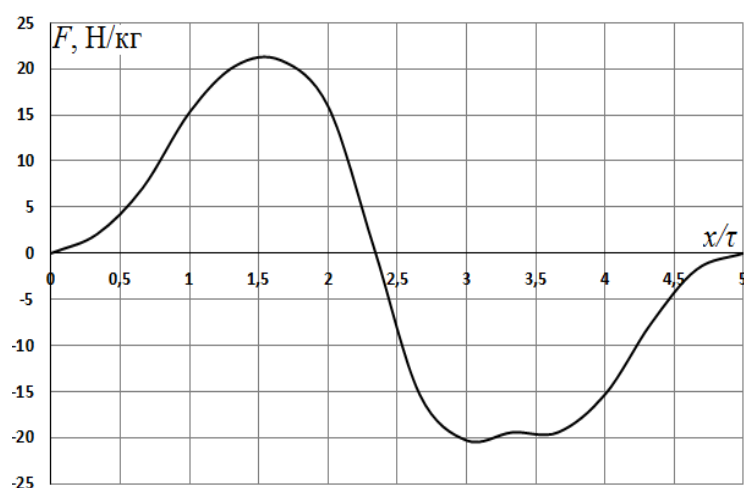


Рисунок 5.19 – Распределение усилия в ЛИМ4 при схеме 3с

Таким образом, можно сделать вывод о том, что по характеру огибающей кривой магнитного поля для ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями, не удастся оценивать распределение электромагнитных усилий. Это является одной из особенностей таких электрических машин.

Некоторые из описанных в разделе 5.1 машин (ЛИМ4, ЛИМ6), в которых удавалось создавать встречно бегущие магнитные поля, использовались для экспериментальной проверки результатов расчетов и теоретических выводов, полученных в ходе исследований [90]. Подобные сопоставления приведены в разделах 2-4.

5.3. Практическое использование результатов исследований ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями

5.3.1. Электродинамические сепараторы для обработки дробленого электронного и кабельного лома

Электродинамические сепараторы исследуются и разрабатываются в УрФУ в интересах ряда уральских предприятий, работающих в сфере утилизации металлосодержащих отходов (документы в Приложении 4) [87, 92-93, 98]. Некоторые результаты исследований, выполненных при участии автора, были представлены в разделе 3.2.

При обработке дробленого электронного лома решалась задача разделения алюминиевых и медных сплавов и отделения их от изоляции. По заказу АО «Южно-Уральский специализированный центр утилизации» (г. Миасс) был спроектирован и изготовлен опытно-промышленный образец сепаратора на основе двухстороннего линейного индуктора [75-76]. Основные параметры сепаратора приведены в табл. 5.6, а внешний вид установки показан на рис. 5.20. Сепаратор был рассчитан на обработку крупной фракции лома с размерами частиц от 8 до 20 мм. Испытания сепаратора показали возможность выделения алюминиевой фракции в концентрат на уровне 90-95 % при содержании алюминия в концентрате 80-90 %, что соответствует требованиям заказчика. Сепаратор передан предприятию – заказчику для опытной эксплуатации.

Таблица 5.6 – Основные данные ЛИМ опытно-промышленного сепаратора

Параметры индукторов		
число фаз	m	3
число полюсов	$2p$	2
полюсное деление	τ	66 мм
немагнитный зазор	δ	18 мм
ширина пакета статора	L_l	120,0 мм
Номинальные данные ЛИМ		
линейное напряжение сети	$U_{л}$	380 В
частота	f	50 Гц
средний ток в фазе	$I_{ф\text{ ср}}$	9,52 А
потребляемая индуктором активная мощность	P	760 Вт
расчетный коэффициент мощности	$\cos \varphi$	0,121

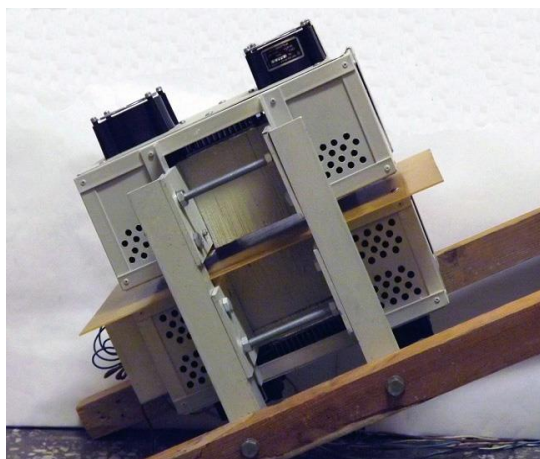


Рисунок 5.20 – Общий вид электродинамического сепаратора для обработки дробленого электронного лома

Подобная описанной установка электродинамической сепарации была разработана для обработки дробленого кабельного лома [74]. С учетом меньшей крупности частиц (3-8 мм) увеличена ширина активной поверхности индуктора до 150 мм и уменьшен рабочий зазор до 10 мм. Созданный сепаратор испытывался как в лаборатории университета, так и в цехах предприятий заказчиков. Основные результаты испытаний, представленные в разделе 3.2, подтвердили возможность существенного улучшения качества концентратов целевого металла (технически чистых алюминия или меди).

По результатам испытаний сепараторов на реальном электронном и кабельном ломе предприятиями высказаны пожелания увеличить производитель-

ность установок. Как один из способов решения задачи предложен и апробирован вариант сепаратора на основе ЛИМ с разбегающимися магнитными полями. Результаты исследований такого варианта сепаратора, показанные в разделе 3.2 и подтвердившие эффективность применения разбегающихся магнитных полей, переданы заказчикам.

5.3.2. Электродинамические сепараторы для извлечения цветных металлов из твердых коммунальных отходов

Электродинамические сепараторы разрабатываются в УрФУ (УГТУ-УПИ) на протяжении многих лет [7, 26, 28, 59,70]. В том числе в установках, созданных в содружестве с ОАО «Уралэнергоцветмет» по заказу АО «НИКТИстройкоммаш» (г. Санкт-Петербург) применялся двухсторонний выход металла за счет установки под лентой конвейера, перемещающего отходы, линейных индукторов с разбегающимися магнитными полями [28, 59,70]. Изучение особенностей таких сепараторов стало одной из задач диссертационной работы [88, 91, 95, 98, 100, 101]. С учетом полученных при исследованиях результатов (раздел 3.1 диссертации) рекомендуется включать в техническую документацию, сопровождающую сепараторы, разделы, касающиеся схемы и порядка подключения трехфазных обмоток линейных индукторов, создающих разбегающиеся магнитные поля, с указанием схем, приводящих к потере работоспособности установок. Ранее такие рекомендации в документацию на сепараторы не включались.

5.3.3. ЛИМ для перемещения и нагрева металлических заготовок и прокатных изделий

ЛИМ рассмотренные в разделе 4, исследовались в рамках продолжения работ, выполняемых ранее в УрФУ по заказу Уральского научно-исследовательского технологического института, связанных с разработкой гибких автоматизированных линий низкотемпературного индукционного нагрева прокатных изделий [7, 34, 84]. Показанные в диссертации достоинства индукционного нагрева в бегущем магнитном поле, в том числе, связанные с применением ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями (возможность управ-

ления параметрами движения заготовок в зоне нагрева, позиционирование, выравнивание температурного поля), создают предпосылки к разработке новых эффективных установок индукционного нагрева с высоким уровнем автоматизации [94, 96-97, 99].

5.3.4. Использование результатов работы в учебном процессе

Результаты научно-исследовательской работы (методики расчета, экспериментальные установки) использовались также в учебном процессе кафедры «Электротехника и электротехнологические системы» УрФУ, прежде всего, при выполнении УИРС и НИРС, в курсовом и дипломном проектировании.

5.4. Выводы по разделу 5

Разработка новых электромеханических устройств, таких как ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями невозможна без экспериментальных исследований. В лаборатории УрФУ при непосредственном участии автора создан целый ряд линейных индукторов и установок на их основе.

Созданные установки на основе трехфазных линейных индукторов, создающих встречно бегущие магнитные поля, позволили экспериментально проверить достоверность расчетных методик, ряда выдвинутых теоретических положений, опробовать различные технологические операции, востребованные промышленными предприятиями. На лабораторных установках выполняются научно-исследовательские работы студентов, а также экспериментальные исследования в рамках выполнения выпускных квалификационных работ.

Созданные опытные устройства на основе ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями могут рассматриваться как прототипы реальных промышленных установок. Разработаны рекомендации по их практическому применению в ряде технологических процессов (электродинамическая сепарация твердых отходов, индукционная сортировка цветных металлов, вспомогательные операции в металлообработке, индукционный нагрев в бегущем магнитном поле).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе анализа литературы выявлены примеры эффективного применения ЛИМ в технологических процессах. Показаны возможности улучшения характеристик устройств на основе ЛИМ за счет использования встречно бегущих магнитных полей.

2. Выявлено, что электромагнитные процессы в ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями характеризуются, прежде всего, искажениями поля в центре активной зоны индуктора. В зависимости от варианта чередования фаз обмоток распределения поля и электромагнитных усилий в таких ЛИМ могут существенно отличаться.

3. Разработана методика расчета ЛИМ в рамках «квазитрехмерного» подхода на основе развития аналитической и численной моделей машины в двухмерной постановке. Предлагаемая методика, сочетая достоинства каждой из названных моделей, позволяет учесть основные особенности рассматриваемых ЛИМ (неравномерность распределения магнитных полей в активной зоне, ограниченность размеров массивного вторичного элемента). Выполнение тестовых расчетов электромагнитных усилий опытных ЛИМ показало соответствие результатов, полученных по предлагаемой методике, данным экспериментов и результатам расчетов в трехмерной постановке.

4. Разработана методика анализа рассматриваемых ЛИМ на основе построения диаграмм намагничивающих сил, реализованная в программной среде Excel, которая позволяет выявлять благоприятные и неблагоприятные варианты обмоток ЛИМ, не прибегая к электромагнитным расчетам машин численными методами.

5. На основе выполненных исследований показано, что в ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями существуют варианты обмоток, при которых искажения поля приводят к появлению зон с электромагнитными усилиями, близкими к нулю («мертвых» зон). Худшие результаты получаются при использовании обмоток, характеризующихся зеркальным расположением катушек отдельных фаз и токов в них относительно оси индуктора. В то же время выявле-

ны схемы обмоток ЛИМ, в которых волны бегущих магнитных полей начинаются непосредственно от оси индуктора и «мертвая» зона отсутствует.

6. Обосновано применение ЛИМ с разбегающимися магнитными полями в электродинамических сепараторах. Такое решение позволяет существенно снизить требуемое для сепарации электромагнитное усилие. При этом можно расширить диапазон размеров извлекаемых частиц металла при неизменной мощности ЛИМ, либо уменьшить мощность сепаратора при неизменном качестве сепарации. При индукционной сортировке металлов применение встречно бегущих полей позволяет увеличить производительность процессов без потери качества сепарации.

7. Обоснована целесообразность применения ЛИМ с обмотками, создающими сбегаящиеся магнитные поля во вспомогательном технологическом оборудовании металлообрабатывающего производства и в установках индукционного нагрева мерных заготовок. Подтверждены возможность бездатчикового позиционирования заготовок и возможность снижения неравномерности нагрева заготовок.

8. Разработаны и созданы установки на основе ЛИМ, на которых выполнены основные экспериментальные исследования, а также апробированы реальные технологии в интересах предприятий – заказчиков. Новые технические решения защищены патентами РФ на полезные модели. Разработанные методики расчетов ЛИМ и опытные установки используются в учебном процессе.

Рекомендации по продолжению исследований по теме диссертации: продолжить моделирование и исследование ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями с учетом особенностей технологических установок, созданных на их основе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вольдек А.И. Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом. – Л.: Энергия, 1970. 272 с.
2. Laitwait E.R. Applications of linear motors in the steel metal industry // Sheet Metal Industry. 1982. Vol. 59. Issue 8. Pp. 612,615-617.
3. Blease J., Bhatia R., Pal R.M. Applying linear motors in material handling // Machine Design. 1989. Pp.91-96.
4. Петленко Б.И., Науменко Б.Ю. Электромагнитный конвейер для стабилизированной подачи металлических листов // Механизация и автоматизация производства, 1983. № 8, с. 26-28.
5. Васильев Л.А., Дудник М.З. Особенности расчета линейных асинхронных двигателей для двухкоординатного манипулирования массивными стальными листами // Электричество, 1986, № 8, с. 60-62.
6. Веселовский О.Н., Коняев А.Ю., Сарапулов Ф.Н. Линейные асинхронные двигатели, - М.: Энергоатомиздат, 1991. 256 с.
7. Коняев А.Ю. Линейные индукционные машины для технологического электромагнитного воздействия на обрабатываемые электропроводящие изделия и материалы: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.09.01 / Екатеринбург, 1996. – 282 с.
8. Кузьменко А.Г., Грачев В.Г., Солодовник Ф.С. Электромагнитные механизмы металлургических машин. – М.: Металлургия, 1996. 508 с.
9. Володин Г.И. Электромагнитные процессы в устройствах с произвольной подвижной частью: диссертация ... доктора технических наук: 05.09.01. – Новочеркасск, Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (Новочеркас. политехн. ин-т), 2009. - 304 с.
10. Полифункциональные электромеханические преобразователи энергии технологического назначения / Н.Н. Заблодский, В.Е. Плюгин, В.Ю. Грицаюк, Г.М. Гринь // Электротехника, 2016, № 3, с. 24-29.
11. Коняев А.Ю., Назаров С.Л. Особенности электродинамических сепараторов на основе линейных индукторов с разбегающимися магнитными полями // Электротехника, 2013, № 3, с. 61-66.

12. Линейные индукционные машины со встречно бегущими магнитными полями для энергоэффективных технологий / А.Ю. Коняев, Б.А. Сокунов, Ж.О. Абдуллаев, Е.Л. Швыдкий // Промышленная энергетика, 2017, № 4, с. 2-7.
13. Резин М.Г. Развитие электромагнитного перемешивания жидких металлов // Магнитная гидродинамика, 1965, № 2, с.130-138.
14. Тийсмус Х.А., Лаугис Ю.Я. Автоматизированный МГД-привод. – М.: Энергия, 1980. 160 с.
15. Электромагнитное перемешивание жидкой стали в металлургии / Р.С. Айзатулов, А.Г. Кузьменко, В.Г. Грачев и др. – М.: Металлургия, 1996, 184 с.
16. Верте Л.А. МГД-технология в производстве черных металлов. – М.: Металлургия, 1990. 120 с.
17. Гельфгат Ю.М. Металлургические применения магнитной гидродинамики // Магнитная гидродинамика, 1987, № 3, с. 120-137.
18. Тир Л.Л., Столов М.Я. Электромагнитные устройства для управления циркуляцией металла в печах. – М.: Металлургия, 1991, 280 с.
19. Схемы питания индукторов для электромагнитного воздействия на жидкие металлы / В.А. Бегалов, Ф.Н. Сарапулов, Б.А. Сокунов // Труды международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы индукционного нагрева» – АРІН-05. - Санкт-Петербург, 2005, с. 138-144.
20. Индукционный плавильно-заливочный комплекс для получения слитков с тиксотропной структурой / В.И. Лузгин, С.Е. Миронов, В.Э. Фризен, С.М. Фаткуллин, А.Ю. Петров // Промышленная энергетика, 2015, № 7, с. 12-15.
21. Schloemann E. Eddy current techniques for segregating nonferrous metals from waste // Resources, Conservation and Recycling. 1982, № 5, pp. 149-162.
22. Wilson R.J., Veasey T.J., Squires D.M. Application of mineral processing techniques for the recovery of metal from post-consumer wastes / Minerals Engineering, 1994, № 7, pp. 975-984.
23. Zhang S., Forssberg E., Arvidson B., Moss W. Aluminium recovery from electronic scrap by High-Force eddy-current separators / Resources, Conservation and Recycling, 1998, No 23, pp. 225-241.

24. Электродинамическая сепарация. Метод и тенденции развития / Г.Б. Кривцова, А.И. Ратникова // Совершенствование процессов электросепарации и конструкций электросепараторов: Сб. научн. трудов. – Л.: Механобр, 1987, с. 58-68.
25. Колобов Г.А., Бредихин В.Н., Чернобаев В.М. Сбор и обработка вторичного сырья цветных металлов. - М.: Metallurgia, 1993. – 288 с.
26. Линейные асинхронные двигатели в электромагнитных сепараторах для извлечения алюминия из бытовых отходов / А.Ю. Коняев, А.А. Жуков, Б.П. Ширшов // Электротехническая промышленность. Электрические машины, 1981, № 9, с. 16-18.
27. Коняев А.Ю., Назаров С.Л., Ширшов Б.П. Опыт разработки и применения электродинамической сепарации лома и отходов цветных металлов // Цветные металлы, 1995, № 11, с. 63-66.
28. Устройства для электродинамической сепарации лома и отходов цветных металлов / А.А. Патрик, Н.Н. Мурахин, Т.Н. Дерендяева, А.Ю. Коняев, С.Л. Назаров // Промышленная энергетика, 2001, № 6, с. 16-19.
29. Электродинамические сепараторы с бегущим магнитным полем: основы теории и расчета / А. Ю. Коняев, И. А. Коняев, Н. Е. Маркин, С. Л. Назаров. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. 104 с.
30. Технология твердых бытовых отходов / Л.Я. Шубов, М.Е. Ставровский, А.В. Олейник – М.: Альфа-М, Инфра-М, 2011. 400 с.
31. Индукционный метод нагрева проката из цветных металлов и сплавов / А.П. Рашепкин, В.А. Крутилин, П.А. Виштак и др. // Цветные металлы, 1989, № 1, с. 104-107.
32. Певзнер М.З., Широков Н.М., Хаютин С.Г. Непрерывная индукционная обработка лент и полос. – М.: Metallurgia, 1994. – 128 с.
33. Шабалин Ю.А. Разработка и исследование электромашинных индукционных нагревателей промышленной частоты: Автореферат дисс... канд. техн. наук. – Свердловск, 1981. 20 с.

34. Вопросы применения линейных асинхронных двигателей для индукционного нагрева стальных листов / А.Ю. Коняев, С.Л. Назаров, В.Н. Удинцев и др. // Электрические машины с разомкнутым магнитопроводом в технологии и приводе: Межвуз. сборник научных трудов. – Свердловск: УПИ, 1988, с. 45-50.

35. Васильев Л.А., Самарец Е.В., Шпак А.Н. Линейные асинхронные двигатели в устройствах индукционного нагрева // Бесконтактные регулируемые электрические машины: сборник научн. трудов ВНИИЭлектромаша. – Л., 1991. С. 93-102.

36. Карусельная машина с линейным электроприводом / Р.Б. Каск, Ю.Я. Лаугис, Х.А. Тийсмус, Р.А. Тээметс // Литейное производство, 1980, № 11, с. 12-14.

37. Лаугис Ю.Я. Вопросы теории и практики двухцелевого линейного электропривода // Электротехника, 1981, № 6, с. 26-28.

38. Dughiero F., Lupi S., Siega P. Calculation of forces in traveling wave induction heating system // IEEE Transactions Magnetics, 1995, vol. 31, No. 6, pp. 3560–3562.

39. Lupi S., Forzan M., Dughiero F., Zenkov A. Comparison of edgeeffects of transverse flux and travelling wave induction heating inductors // IEEE Transactions Magnetics, 1999, vol. 35, No. 5, pp. 3556–3558.

40. Pang L., Wang Y., Chen T. New development of traveling wave induction heating/ // IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 20, No. 3, june 2010, pp. 1013-1016.

41. Frogner K., Cedell T., Andersson M. Induction heating using a two-phase travelling wave setup // International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2014, vol.44, pp. 217–226.

42. Sekine T., Tomita H., Obata S., Saito Y. An induction heating method with traveling magnetic field for long structure metal // Electr. Eng. Japan, vol. 168(4), september 2009, pp. 32–39.

43. Давиденко Э.П., Канаев А.С. Автоматизация производства средствами ЭМАГО. – Рига: Зинатне, 1984. 224 с.

44. Полис А.В. Электромагнитные средства ориентации деталей для гибких производственных систем: обзор. – Рига: ЛатНИИНТИ, 1989. 45 с.

45. Вспомогательные устройства электромагнитного типа для линий обработки стальных листов / А.Ю. Коняев, Д.А. Звездунов, А.В. Остапенко, В.С. Проскуряков, М.В. Юрченко // Кузнечно-штамповочное производство. 1993. № 11. С. 23-25.

46. Линейные асинхронные двигатели для линий обработки стальных листов / А.Ю. Коняев, С.Л. Назаров, М.В. Пегашкин, С.В. Соболев // Труды 12-й Всероссийской научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока». – Екатеринбург, 2001, с. 19-22.

47. Юревич Е.И. Основы робототехники. – СПб.: изд-во БХВ, 2005. 304 с.

48. Козырев Ю.Г. Применение промышленных роботов. – М.: КНОРУС, 2011. 488 с.

49. Промышленные роботы: основные типы и технические характеристики: учебное пособие / Ю.Г. Козырев. – М.: КНОРУС, 2015. – 560 с.

50. Технологические основы гибких производственных систем / под ред. Ю.М. Соломенцева : 2-е изд. М.: Высшая школа, 2000. 255 с.

51. Для транспортировки токсичных и агрессивных материалов // Ю.Г. Вовкотруб, В.С. Замараев, А.Л. Колыгин, Ю.В. Иванов // Промышленный транспорт, 1980, № 9, с.13-15.

52. Полевский В.И. Электромагнитный момент специального линейного асинхронного двигателя с катящимся ротором // Электротехника, 1990, № 5, с. 27-32.

53. Полевский В.И. Электромеханизмы для технологических сверхвысоковакуумных систем на основе специальных линейных асинхронных двигателей: дисс... д-ра техн. наук: 05.09.01 / Новосибирск, НГТУ, 1994. 256 с.

54. Юрченко М.В. Формирование характеристик линейных асинхронных двигателей путем совмещения режимов и конструкций: дисс... канд. техн. наук. – Свердловск, УПИ, 1987. 132 с.

55. Назаров С.Л. Линейные асинхронные машины с повышенными электромагнитными нагрузками на вторичном элементе с массивным ферромагнитным сердечником: дисс... канд. техн. наук. – Свердловск, УПИ, 1990. 255 с.

56. Удинцев В.Н. Разработка и исследование линейных индукционных машин для электродинамической сепарации: дисс... канд. техн. наук. – Екатеринбург, УГТУ-УПИ, 1997. 187 с.

57. Кожемякин М.Ю. Исследование линейных индукционных машин для электродинамической сепарации мелкой фракции твердых отходов: дисс... канд... техн. наук. – Екатеринбург, УГТУ-УПИ, 2001. 140 с.

58. Пегашкин М.В. Линейные асинхронные двигатели для торможения прокатных изделий: дисс... канд. техн. наук. – Екатеринбург, УГТУ-УПИ, 2003. 139 с.

59. Особенности электродинамической сепарации мелкой фракции твердых бытовых отходов / А.Ю. Коняев, Ж.О. Абдуллаев, Д.Н. Багин, И.А. Коняев // Экология и промышленность России, 2017, т. 21, № 6, с. 4-9.

60. Кузнецов В.Л., Крапильская Н.М., Юдина Л.Ф. Экологические проблемы твердых бытовых отходов (сбор, ликвидация, утилизация). – М.: ИПЦ МИКХиС, 2005. – 53 с.

61. Исследование двухцелевых линейных индукционных машин / А.Ю. Коняев, Ж.О. Абдуллаев, М.Е. Зязев, И.А. Коняев // Вестник Пермского национального исследовательского университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2018. № 28. С. 108-121.

62. Исследования характеристик электродинамических сепараторов на основе двумерной модели / А.Ю. Коняев, С.Л. Назаров // Электротехника, 1998, №5, с. 52-57.

63. Оценка характеристик линейных индукционных машин при ограничении размеров вторичного элемента / А.Ю. Коняев, И.А. Коняев, Н.Е. Маркин, С.Л. Назаров // Электричество, 2010, №4, С. 32-36.

64. Коняев А.Ю. Расчет и исследование электродинамических сепараторов на основе линейных асинхронных двигателей // Электротехника, 1994, 2, с. 59-63.

65. Багин Д.Н. Электродинамические сепараторы на основе линейных индукционных машин для обработки мелких фракций лома цветных металлов: дисс. канд. техн. наук. – Екатеринбург, УрФУ, 2016. 137 с.

66. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. В 2-х ч., ч. 2. – Машины переменного тока. – Л.: Энергия, 1973. 648 с.

67. Технология извлечения металлов из твердых бытовых отходов / С.В. Дуденков, Л.Я. Шубов, С.И. Хворостяной и др. // Цветные металлы, 1984, № 9, с. 91-96.

68. Володин Г.И. Металлоуловитель цветных металлов на основе двухстороннего линейного асинхронного электродвигателя // Изв. вузов. Электромеханика, 1999, № 4, с. 16-18.

69. Design and development of a low cost technique for sorting household wastes using eddy current separation process / Merahi A., Medles K., Bardadi B., Tilmatine A. // International Journal of Environmental Studies, 2016, No. 2, pp. 2-11.

70. Коняев А.Ю., Абдуллаев Ж.О., Коняев И.А. Сепараторы для извлечения цветных металлов из твердых коммунальных отходов // Твердые бытовые отходы, 2017, № 3, с. 36-39.

71. Индукционная сортировка цветных металлов в бегущем магнитном поле / А.Ю. Коняев, Ж.О. Абдуллаев, Д.Н. Багин, И.А. Коняев, С.Л. Назаров // Вопросы электротехнологий, 2015, № 3 (8), с. 42-49.

72. Overview of the recycling technology for copper-containing cables / Liquean Li, Gongqi Liu, Dean Pan, Wei Wang, Yufeng Wu, Tiejong Zuo // Resources, Conservation & Recycling, 2017, Issue 126, Pages 132–140.

73. Zhang S., Forssberg E. Cable and wire scrap recycling by physical separation technologies // Environmental and Waste Management, Volume 1, Issue 3, 1998, Pages 189-202.

74. Повышение эффективности переработки лома и отходов кабельной продукции / Ж.О. Абдуллаев, И.А. Коняев, Е.Ю. Обвинцева, А.Ю. Коняев // Система управления экологической безопасностью: сборник трудов XI заочной международной научно-практической конференции. – Екатеринбург: УрФУ, 2017, с. 120-125. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://study.urfu.ru/Aid/Publication/13602/1/%D0%A1%D0%A3%D0%AD%D0%91-2017.pdf> .

75. Переработка электронного лома: применение электродинамических сепараторов / А.Ю. Коняев, С.Л. Назаров, Р.О. Казанцев, В.В. Воскобойников, А.А. Дистанов // Твердые бытовые отходы, 2014, № 2, с. 26-30.

76. Характеристики электродинамических сепараторов для утилизации электронного лома / А.Ю. Коняев, Ж.О. Абдуллаев, А.В. Макаров, Е.Ю. Обвинцева // Система управления экологической безопасностью: сб. трудов IX международной научно-практической конференции. – Екатеринбург: УрФУ, 2015, с. 118-123. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://study.urfu.ru/view/aidview.aspx?AidId=13253>.

77. Электродинамические сепараторы с вращающимся магнитным полем для обработки измельченного электронного лома / А.Ю. Коняев, И.А. Коняев, С.Л. Назаров, Н.С. Якушев // Промышленная энергетика, 2015, № 7, с. 44-47.

78. Васильев А.С., Демидович В.Б. Перспективы применения индукционного нагрева в металлургической промышленности // Электротехника, 2003, № 5, с. 61-64.

79. Автоматизированный комплекс электротехнического оборудования нагрева и транспортировки заготовок в пресс / Е.А. Григорьев, В.Б. Демидович, Г.И. Прокофьев, И.И. Растворова // Электричество, 2013, № 12, с. 30-36.

80. Индукционный нагрев алюминиевых заготовок: состояние и перспективы / В.С. Немков, В.Б. Демидович, И.И. Растворова, П.А. Ситько // Электроталлургия, 2013, № 2, с. 12-19.

81. Абдуллаев Ж.О., Коняев А.Ю. Исследование установок индукционного нагрева в бегущем магнитном поле // Вопросы электротехнологии, 2018, № 3 (12), с. 28-35.

82. Abdullaev Zh. O., Konyaev A. Yu. Possibilities of induction heating installations based on three-phase linear inductors // Актуальные проблемы электромеханики и электротехнологий: сборник научных трудов. – Екатеринбург: ФГАОУ ВПО УрФУ, 2017, с. 17-20.

83. Патент 182858, МКИ 6 Н05В 6/36, Российская Федерация. Устройство индукционного нагрева в бегущем магнитном поле / Ж.О. Абдуллаев, А.Ю. Коняев.– № 2018117009; заявл. 07.05.2018; опубл. 05.09.2018. Бюл. №25. – 10 с.

84. Абдуллаев Ж.О., Коняев А.Ю., Назаров С.Л. Исследование электродинамического сепаратора с линейным индуктором при повышенных частотах питания // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции, 16-19 декабря 2014 г. – Екатеринбург, 2014, с. 269-271.

85. Абдуллаев Ж.О., Батенев А.О., Назаров С.Л. Экспериментальная оценка простых методов расчета электромагнитного ядра электродинамических сепараторов с бегущим магнитным полем // Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий: сб. научн. трудов. – Екатеринбург: УрФУ, 2014, с. 207-210.

86. Абдуллаев Ж.О., Коняев А.Ю., Назаров С.Л., Багин Д.Н. Анализ электромеханических процессов, определяющих эффективность работы электродинамического сепаратора // Промышленная энергетика, 2015, № 7, с. 48-53.

87. Абдуллаев Ж.О., Коняев А.Ю., Назаров С.Л., Багин Д.Н. Особенности расчета линейных индукционных машин для сепарации измельченных отходов // Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике: материалы I международной НТК. – Пермь: изд-во ПНИПУ, 2015, с. 196-202.

88. Абдуллаев Ж.О., Коняев А.Ю., Бубнова М.А. Повышение эффективности электродинамических сепараторов для извлечения цветных металлов из

твердых бытовых отходов // Эффективное и качественное снабжение и использование электроэнергии: сб. докладов 5-й международной научно-практической конференции. – Екатеринбург: изд. УМЦ УПИ, 2016, с. 99-102.

89. Абдуллаев Ж.О., Коняев А.Ю., Назаров С.Л. Перспективы применения линейных индукционных машин со встречно бегущими магнитными полями // Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике: материалы II международной НТК. – Пермь: изд-во ПНИПУ, 2016, с. 194-199.

90. Абдуллаев Ж.О., Коняев А.Ю. Применение линейных индукционных машин со встречно бегущими магнитными полями // Федоровские чтения – 2016: материалы XLVI Международной научно-практической конференции. – М.: Изд-во МЭИ, 2016, с. 136-138.

91. Abdullaev Zh. O. Konyaev, A.Yu., Konyaev, I.A., Bagin D. N. Features of electrodynamic separation the fine fraction of municipal solid waste // Ecology and Industry of Russia Volume 21, Issue 6, 2017, Pages 4-8.

92. Абдуллаев Ж.О., Коняев А.Ю. Экспериментальное исследование электродинамических сепараторов для сортировки мелких фракций лома цветных металлов // Эффективное и качественное снабжение и использование электроэнергии: сб. докладов 6-й международной научно-практической конференции. – Екатеринбург: изд. УМЦ УПИ, 2017, с. 152-155.

93. Абдуллаев Ж.О., Коняев И.А., Назаров С.Л., Багин Д.Н. Опыт применения электродинамической сепарации в технологиях переработки твердых металлосодержащих отходов // Труды конгресса с международным участием «Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований. – Екатеринбург: УрО РАН, 2017, с. 368-372.

94. Abdullaev Zh. O. Konyaev, A.Yu., Linear Induction Machines with the Opposite Direction Travelling Magnetic Fields for Induction Heating // Proceeding of the 2018 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (January 29 – February 1, 2018 EIconRus), 2018 IEEE Conference of Russian. St/ Petersburg, Russia, 2018, pp. 555-557.

95. Абдуллаев Ж.О., Коняев А.Ю., Коняев И.А., Бубнова М.А., Кирпичникова Е.С. Возможности и проблемы промышленной переработки твердых коммунальных отходов // Система управления экологической безопасностью: сборник трудов XII заочной международной научно-практической конференции (Екатеринбург, 30–31 мая 2018 г.) Министерство образования и науки Российской Федерации, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. — Екатеринбург: УрФУ, 2018. с.126-131.

96. Абдуллаев Ж.О., Коняев А.Ю., Гапоненко Е.В. Использование линейных индукторов со встречно бегущими магнитными полями в установках индукционного нагрева // Материалы XVII международной конференции «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты». – М.: Знак, 2018, с. 353-355.

97. Абдуллаев Ж.О., Коняев А.Ю., Зязев М.Е. Оценка эффективности позиционирования заготовок в линейных индукционных машинах со встречно бегущими магнитными полями // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика: сборник трудов Международной научно-практической конференции. - Екатеринбург: УрФУ, 2018, с. 211-215. [Электронный ресурс]. URL: <https://cloud.mail.ru/public/MTbt/nmHpzrkUb>.

98. Абдуллаев Ж.О., Коняев А.Ю., Зязев М.Е., Гапоненко Е.В. Способы повышения эффективности электродинамических сепараторов для обработки твердых металлосодержащих отходов // Экология промышленного производства, 2019, № 1, с. 2-6.

99. Abdullaev Zh. O. Konyaev, A.Yu., Mikhail E. Z. Investigation of Double-Purpose Linear Induction Motors // Proceedings of the 2019 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (28-31 January, 2019 ElConRus). - St. Petersburg, Russia, 2019, pp. 921 – 923.

100. Абдуллаев Ж.О., Коняев А.Ю., Лутошкина Е.А. Технологические преимущества концепции «двух баков» при механизированной переработке твердых коммунальных отходов // Система управления экологической безопасно-

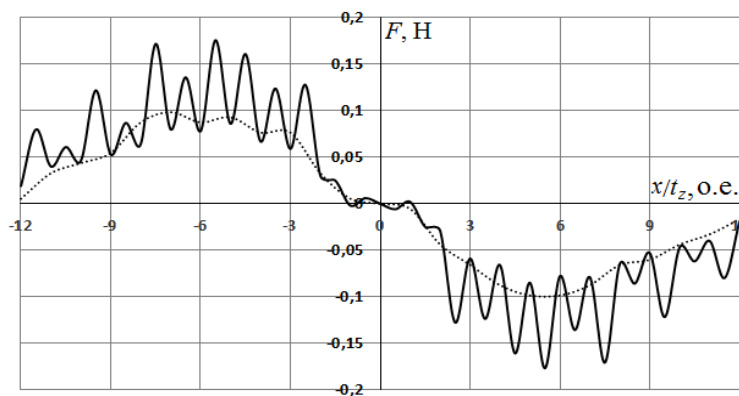
стью: сборник трудов XIII международной научно-практической конференции (Екатеринбург, 31 мая 2019 г.). — Екатеринбург: УрФУ, 2019. — С. 129-134. [Электронный ресурс]. URL: <http://hdl.handle.net/10995/72329>

101. Абдуллаев Ж.О., Коняев А.Ю., Зязев М.Е., Багин Д.Н. Применение линейных индукторов со встречно бегущими магнитными полями в электродинамических сепараторах // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления, 2019, № 32, с. 22-37.

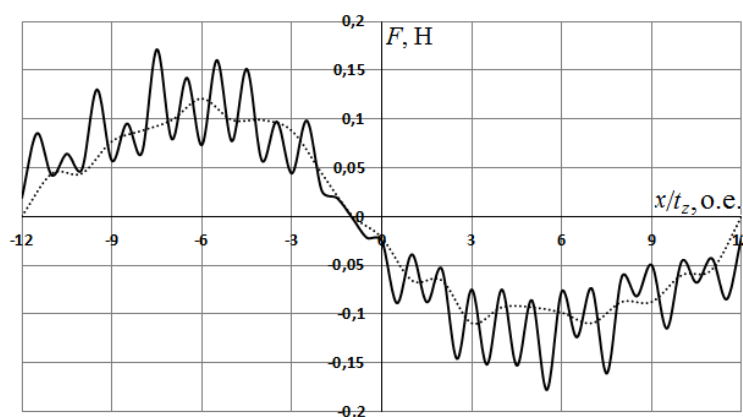
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ УСИЛИЙ

П 1.1. Распределения усилий по длине индуктора для ЛИМ6

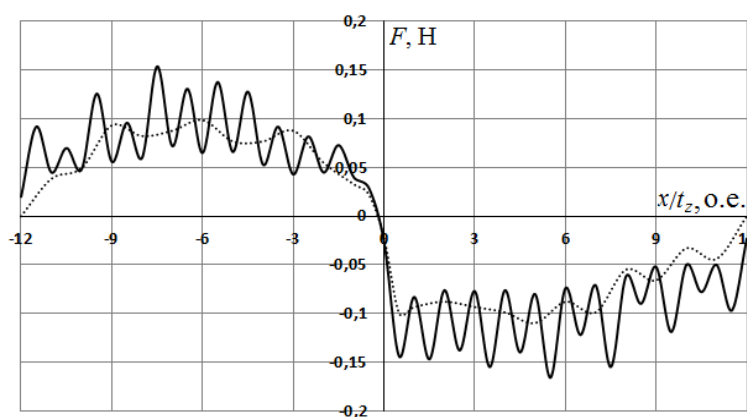
Приведены результаты исследований ЛИМ6 для алюминиевого ВЭ с размерами $20 \times 100 \times 6$ мм, не вошедшие в раздел 2.2.



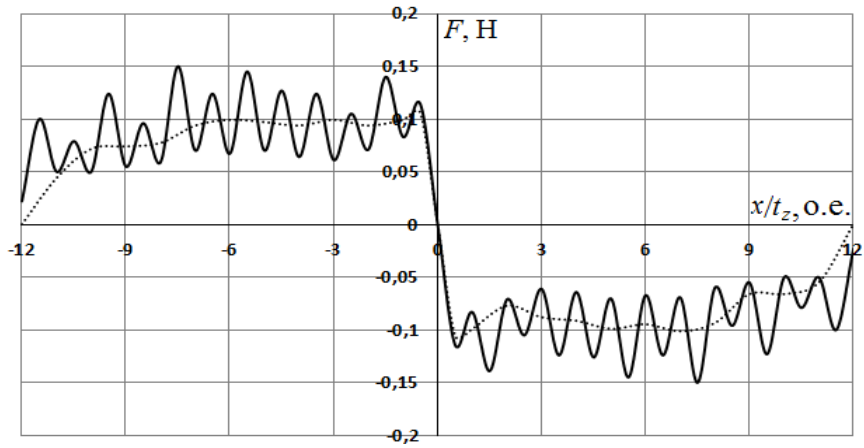
П 1.1. СБМП по варианту 1с



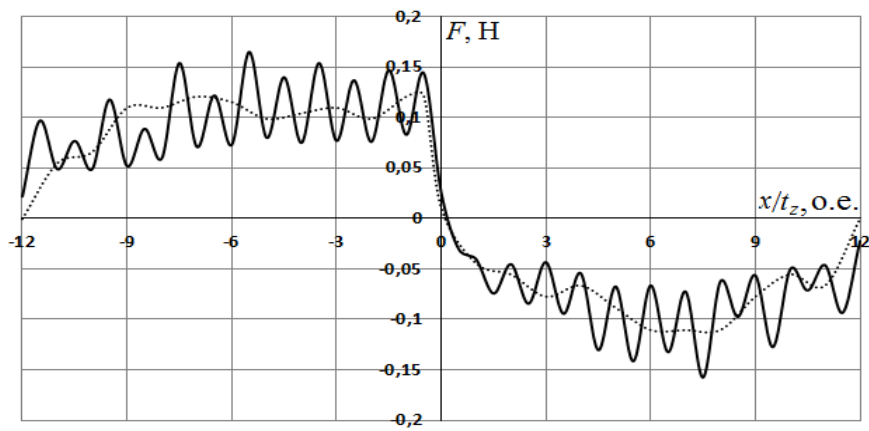
П 1.2. СБМП по варианту 2с



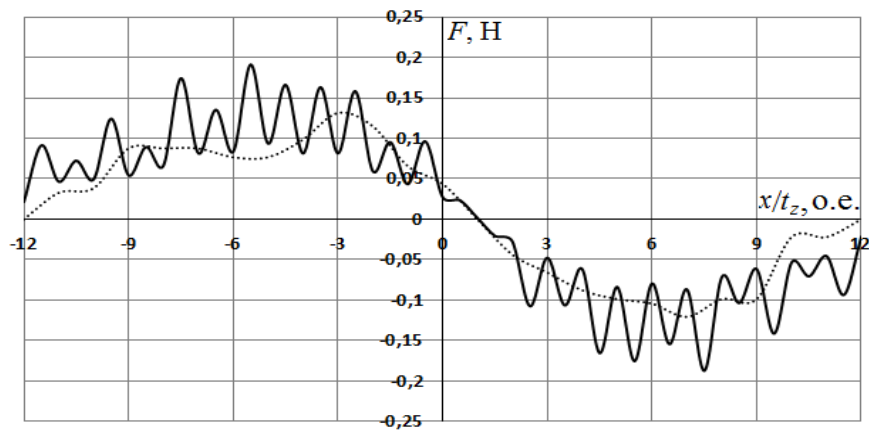
П 1.3. СБМП по варианту 3с



П 1.4. СБМП по варианту 4с



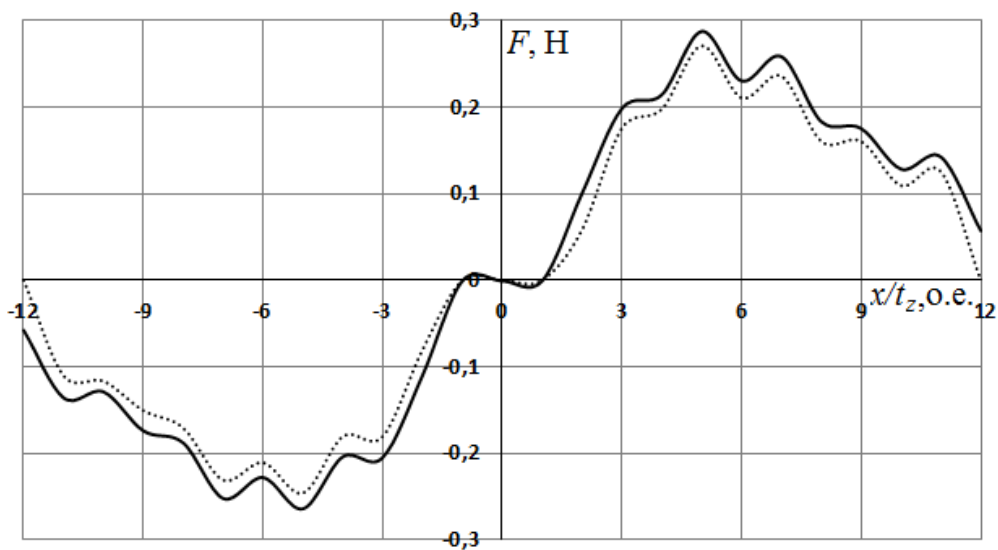
П 1.5. СБМП по варианту 5с



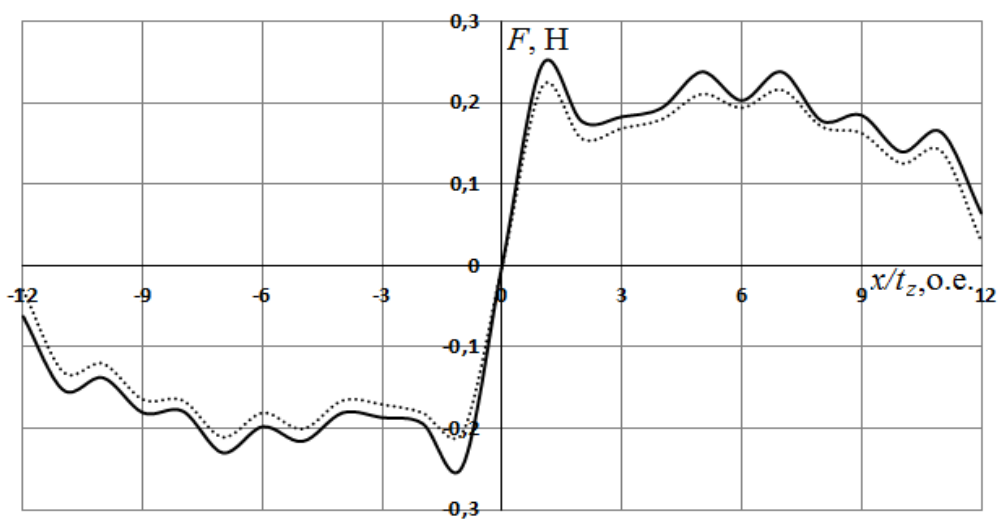
П 1.6. СБМП по варианту 6с

Как отмечалось в разделе 2.2, распределение усилий в вариантах СБМП аналогично распределению усилий в ЛИМ с разбегающимися полями (РБМП).

П.1.2. Сопоставление расчетных и экспериментальных распределений усилий для ЛИМ6 с другими размерами ВЭ (алюминий, 40×40×3 мм)



П 1.7. СБМП по варианту 1р



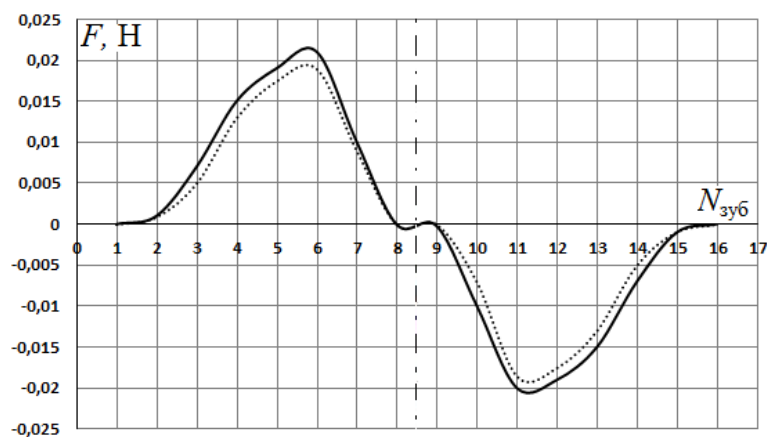
П 1.8. СБМП по варианту 4р

В целом, характер кривых соответствует распределению усилий по длине ЛИМ в меньшей длиной ВЭ. Можно отметить только сглаживание колебаний усилий, обусловленных зубцовыми гармониками поля.

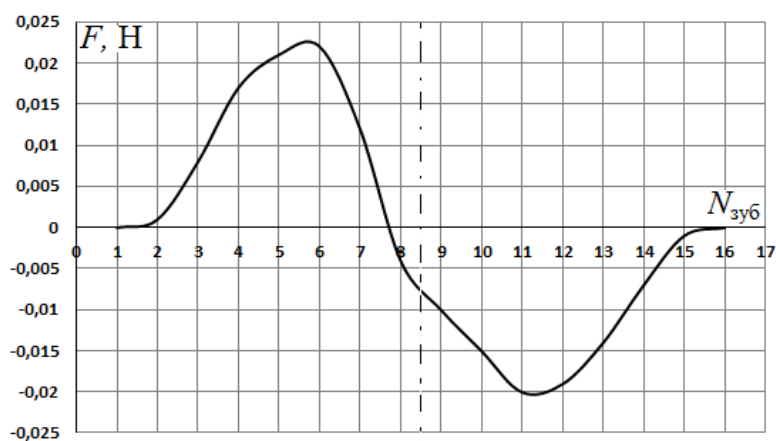
П.1.3. Сопоставление расчетных и экспериментальных усилий

5-ти полюсной ЛИМ 4

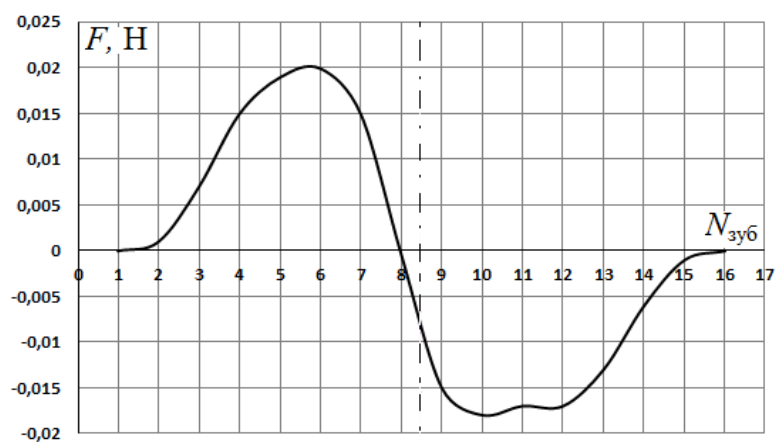
Приведены результаты исследований, соответствующие схемам, создающим СБМП, не вошедшие в раздел 2.2, для алюминиевого ВЭ – 20×20×3 мм .



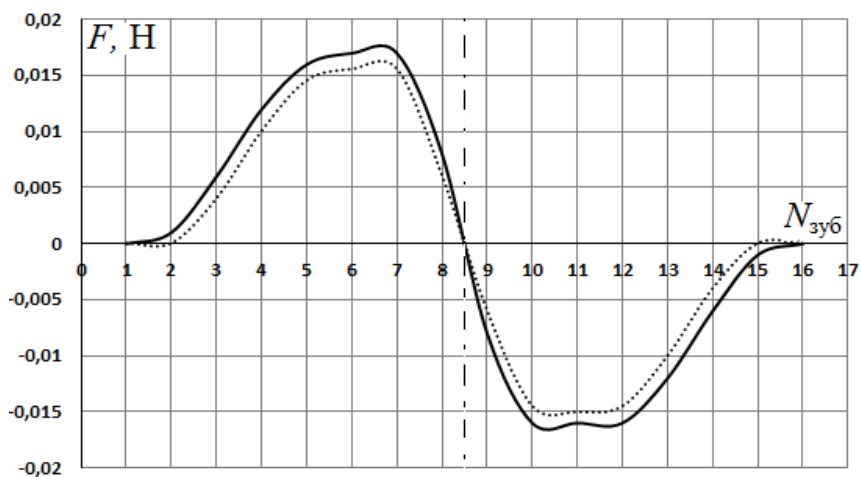
П 1.9. СБМП по варианту 1с



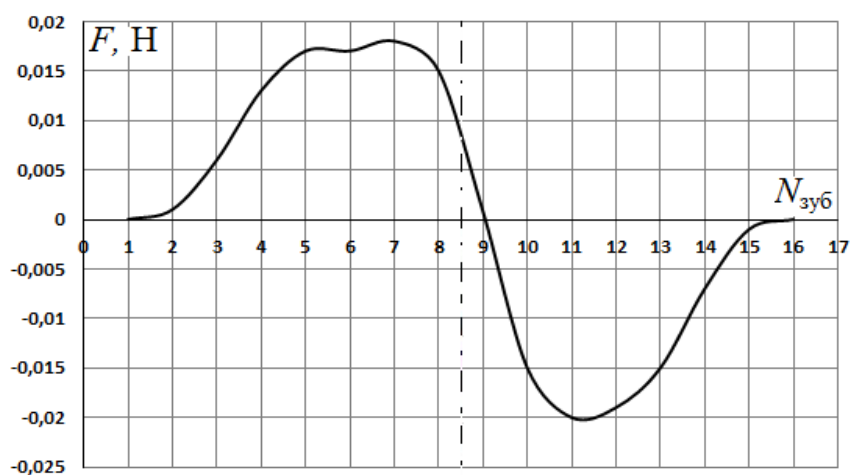
П 1.10. СБМП по варианту 2с



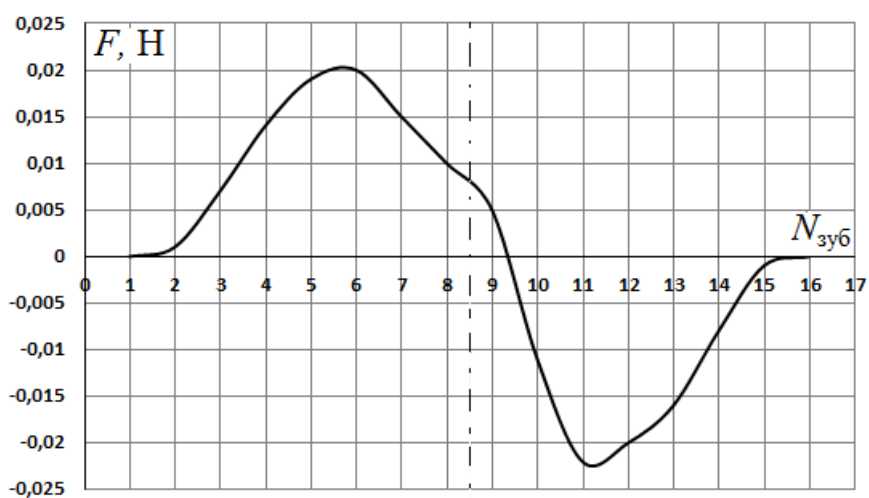
П 1.11. СБМП по варианту 3с



П 1.12. СБМП по варианту 4с



П 1.13. СБМП по варианту 5с

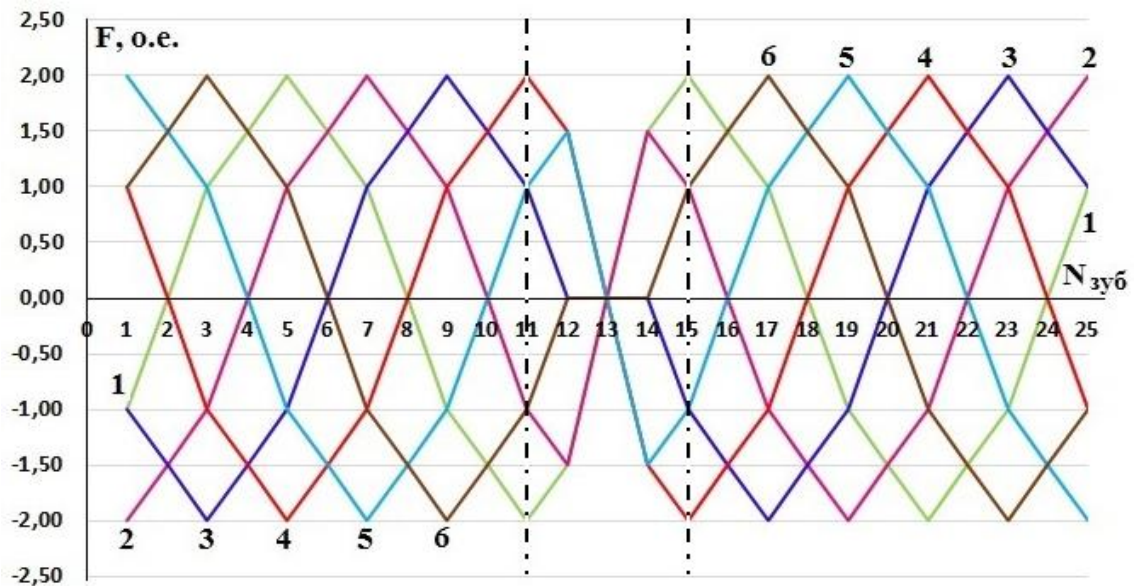


П 1.14. СБМП по варианту 6с

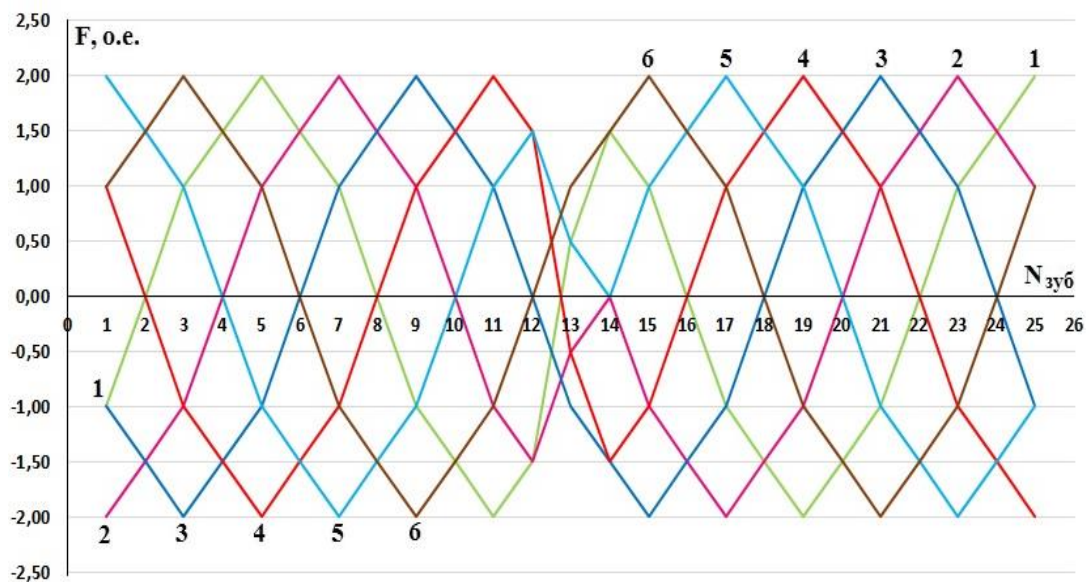
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. ДИАГРАММЫ НАМАГНИЧИВАЮЩИХ СИЛ

П 2.1. Диаграммы н.с. ЛИМ6 с однослойной обмоткой

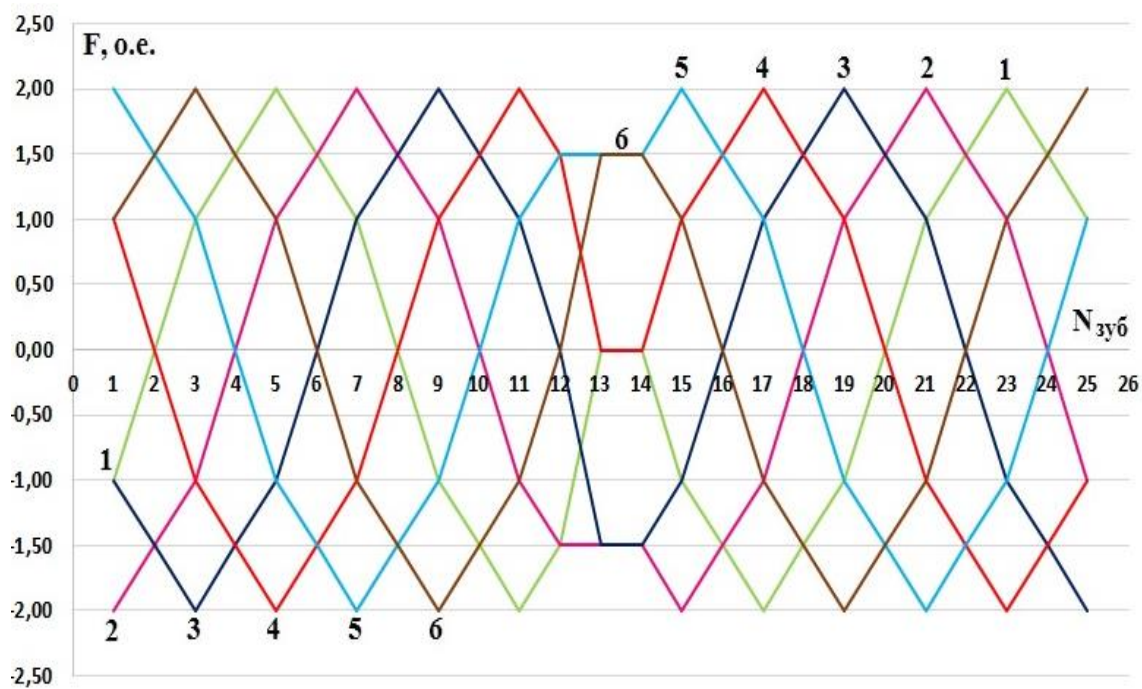
Приведены диаграммы н.с., соответствующие схемам, создающим СБМП, не вошедшие в раздел 2.3.



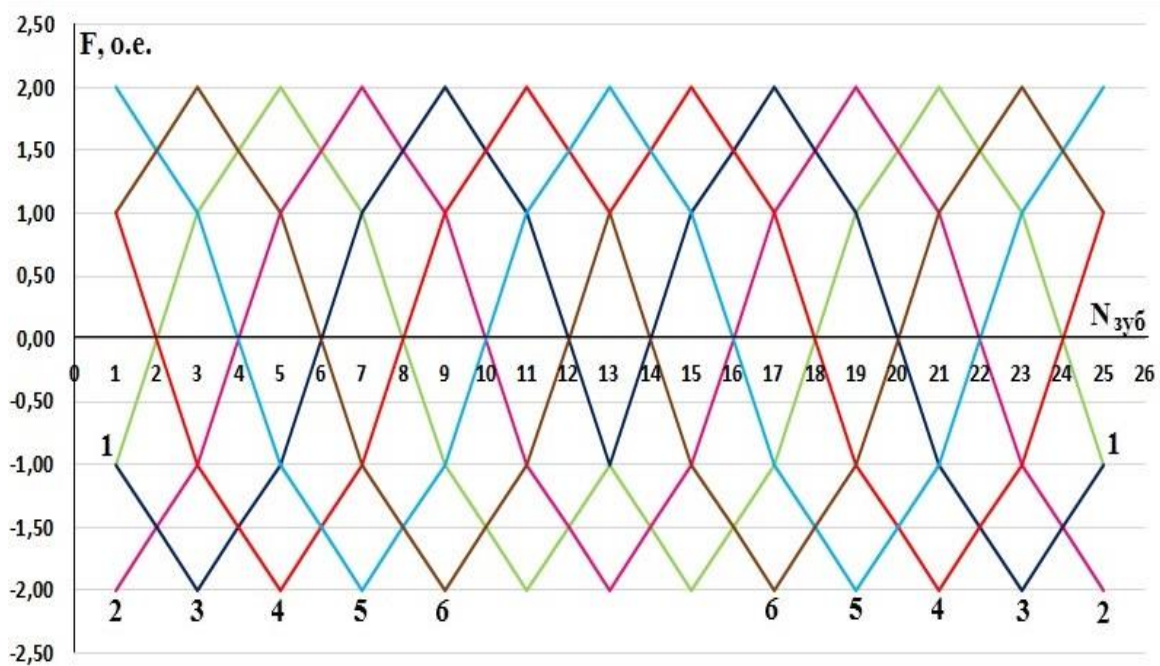
П 2.1. СБМП по варианту 1с



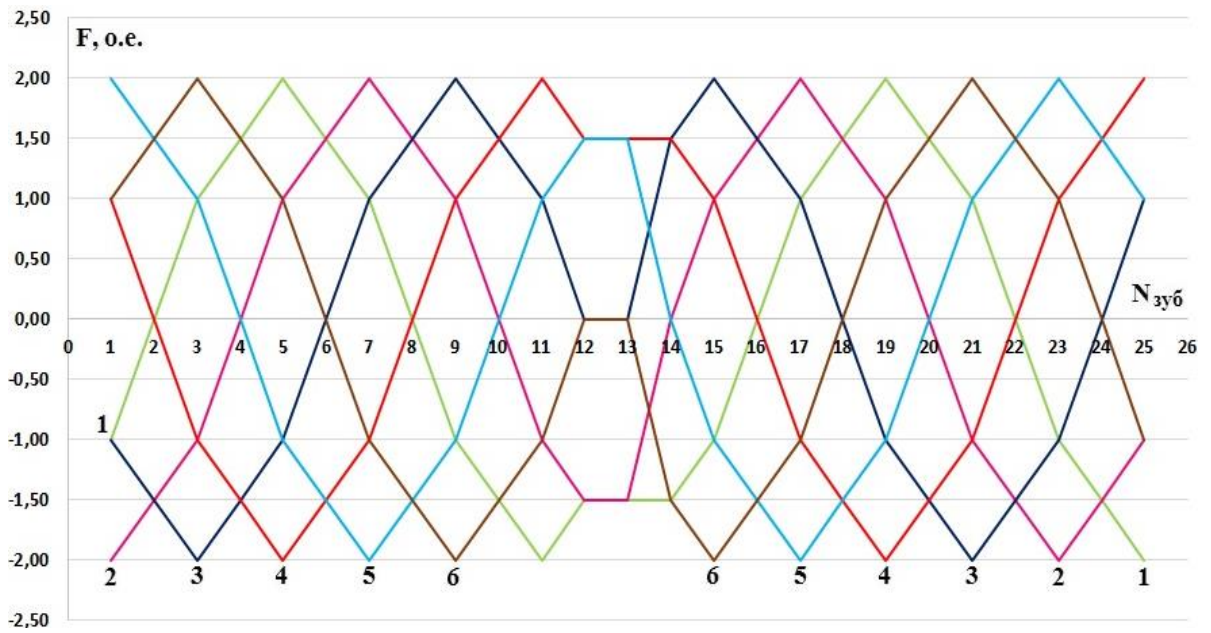
П 2.2. СБМП по варианту 2с



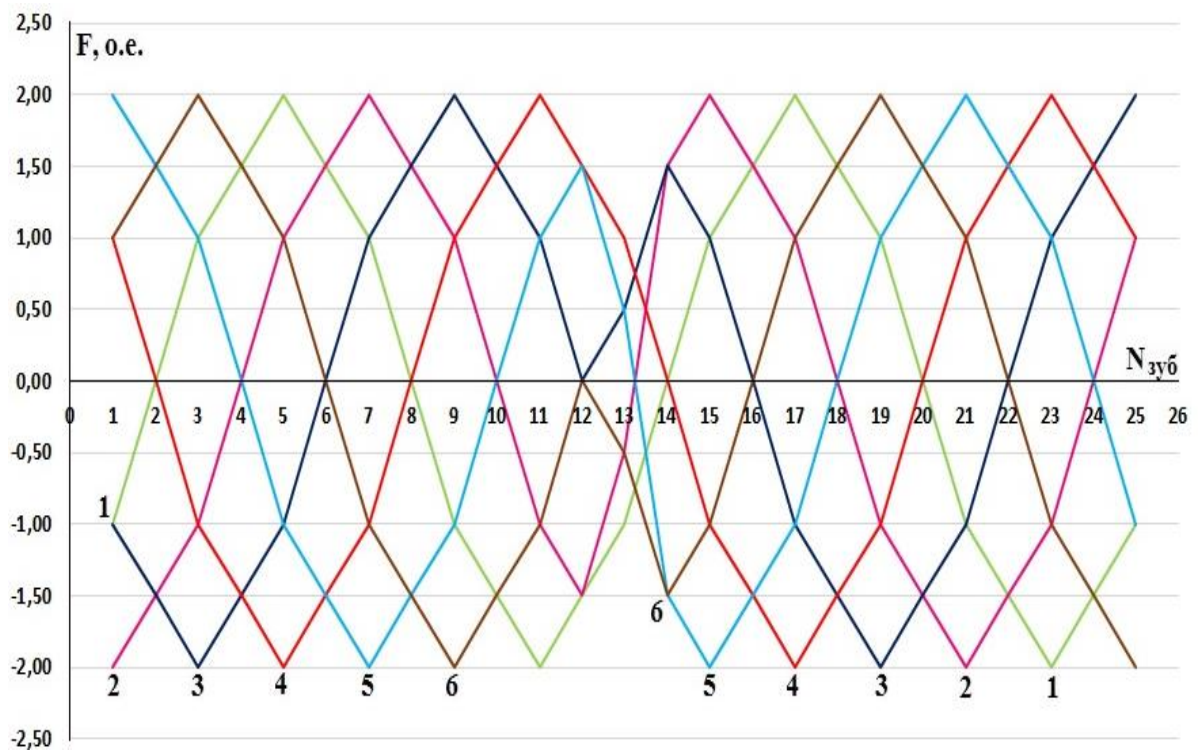
П 2.3. СБМП по варианту 3с



П 2.4. СБМП по варианту 4с



П 2.5. СБМП по варианту 5с

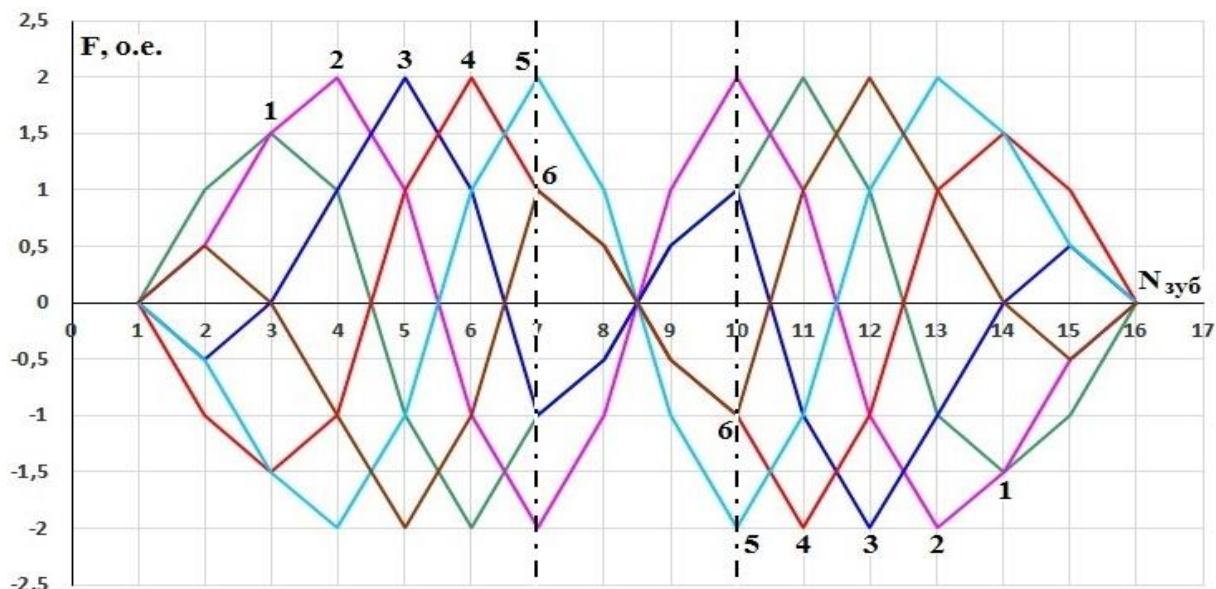


П 2.6. СБМП по варианту 6с

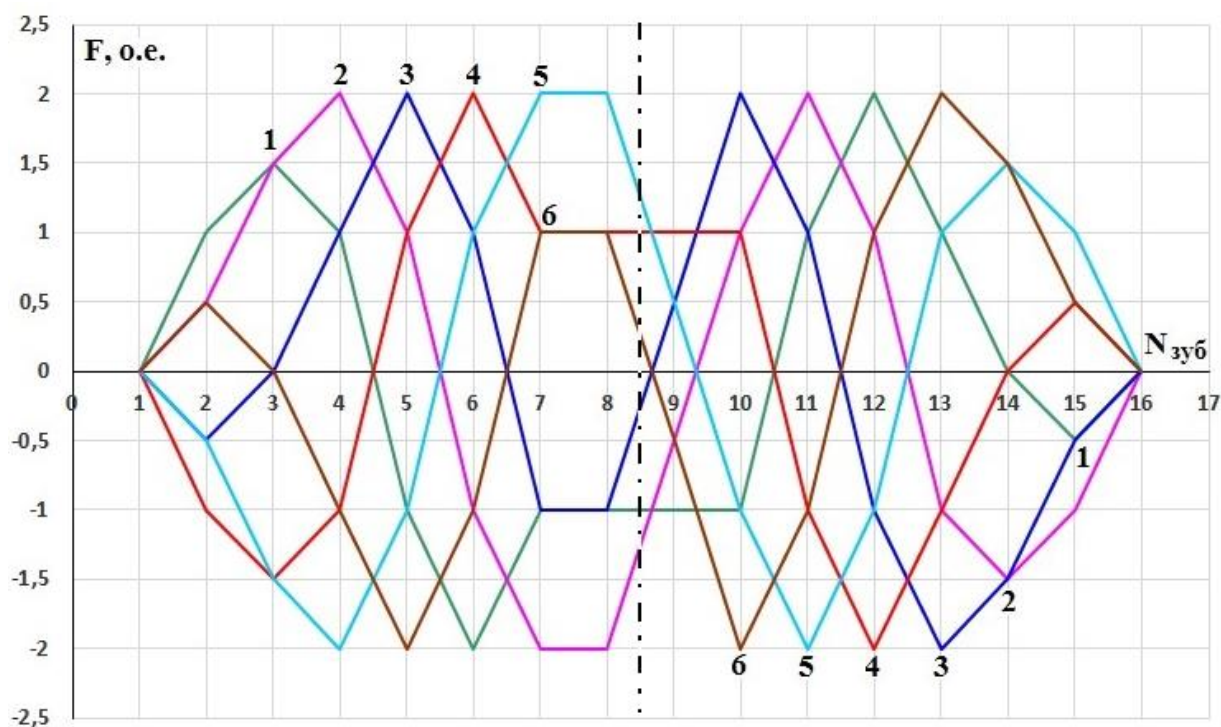
Как отмечалось в разделе 2.3., характер кривых на диаграммах для случаев СБМП аналогичен характеру кривых ЛИМ с РБМП.

П 2.2. Диаграммы н.с. ЛИМ4 с двухслойной обмоткой

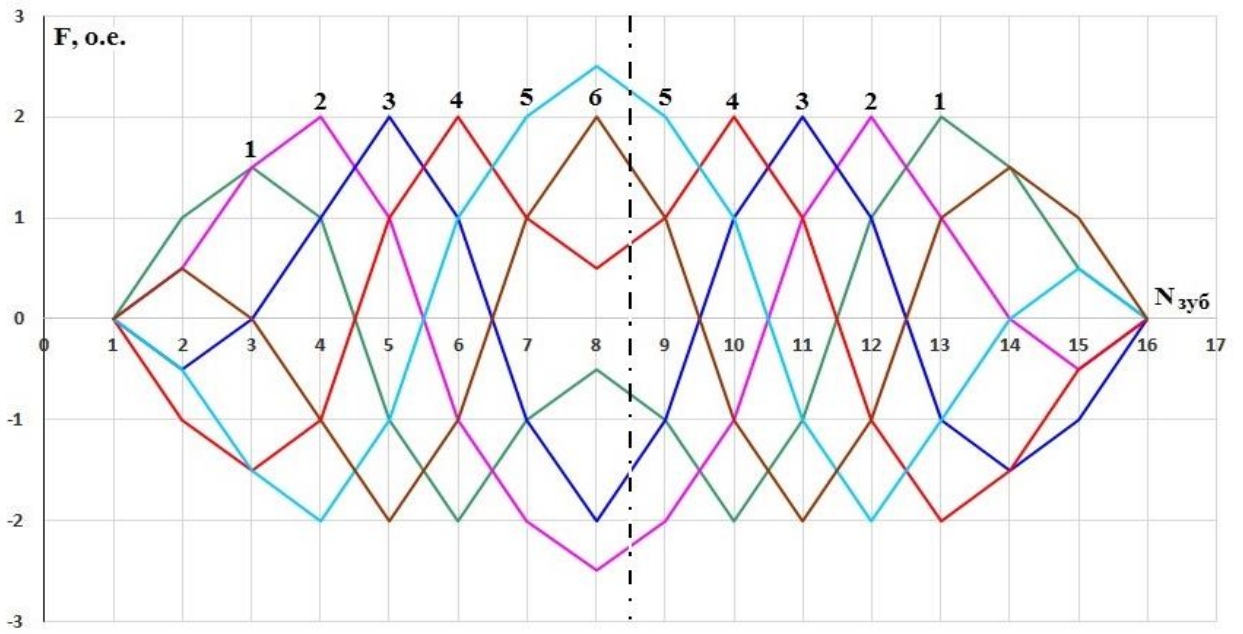
Приведены диаграммы н.с., соответствующие схемам, создающим СБМП, не вошедшие в раздел 2.3.



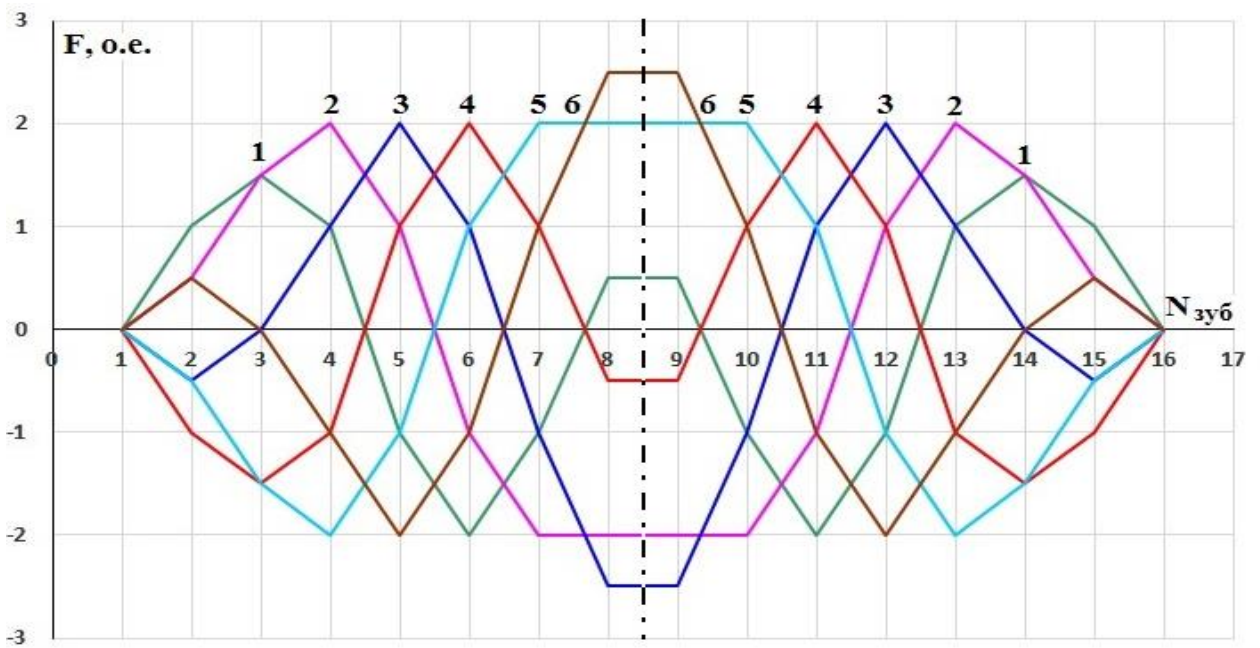
П 2.7. СБМП по варианту 1с



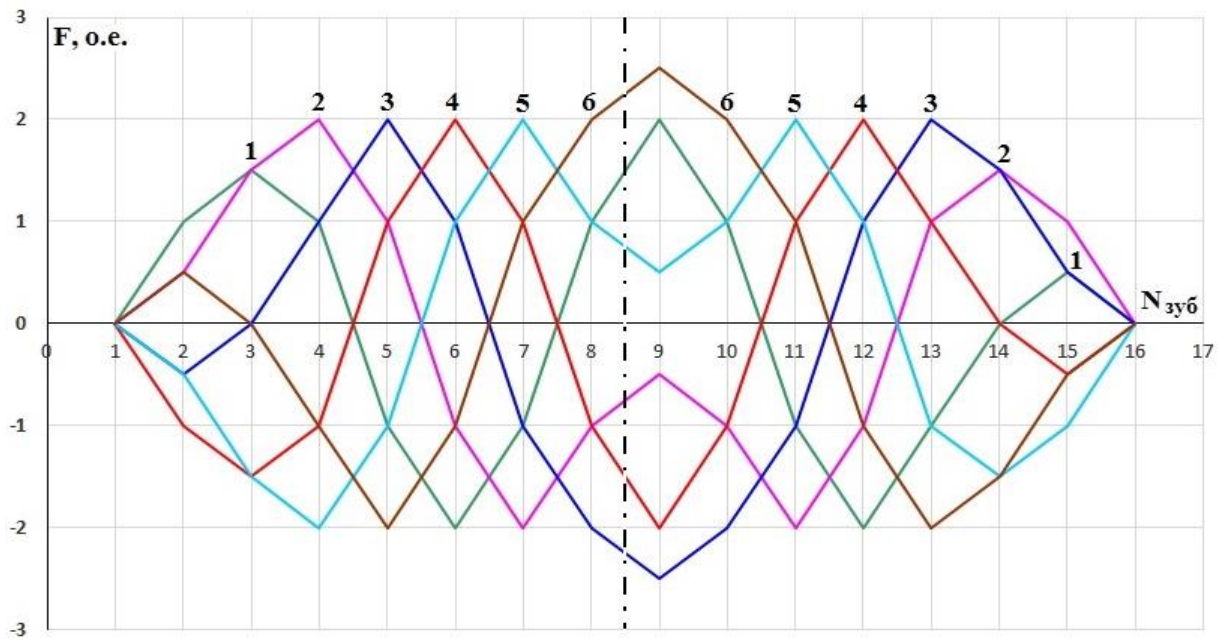
П 2.8. СБМП по варианту 2с



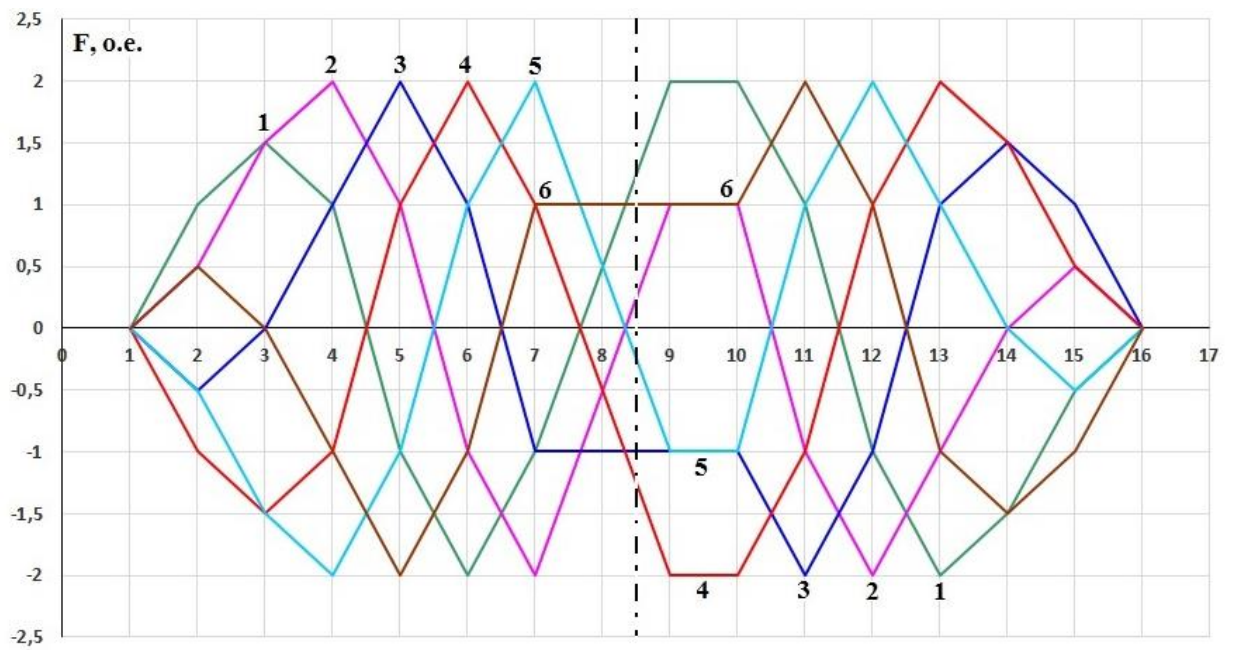
П 2.9. СБМП по варианту 3с



П 2.10. СБМП по варианту 4с



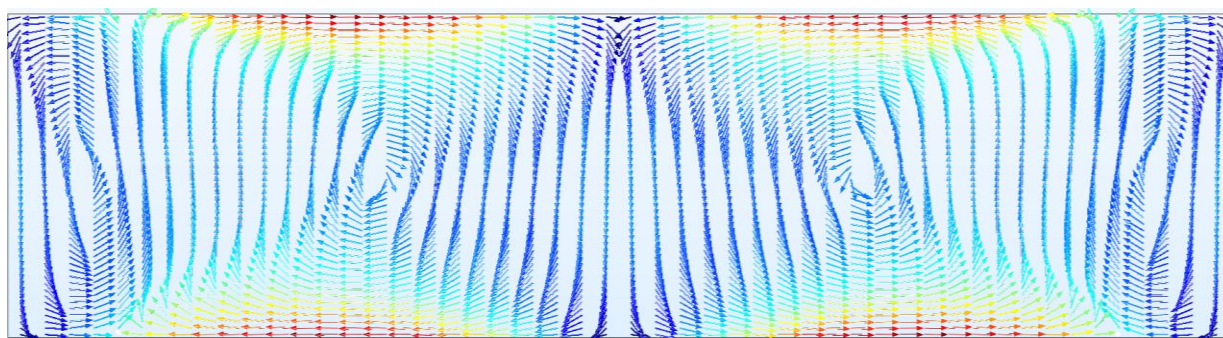
П 2.11. СБМП по варианту 5с



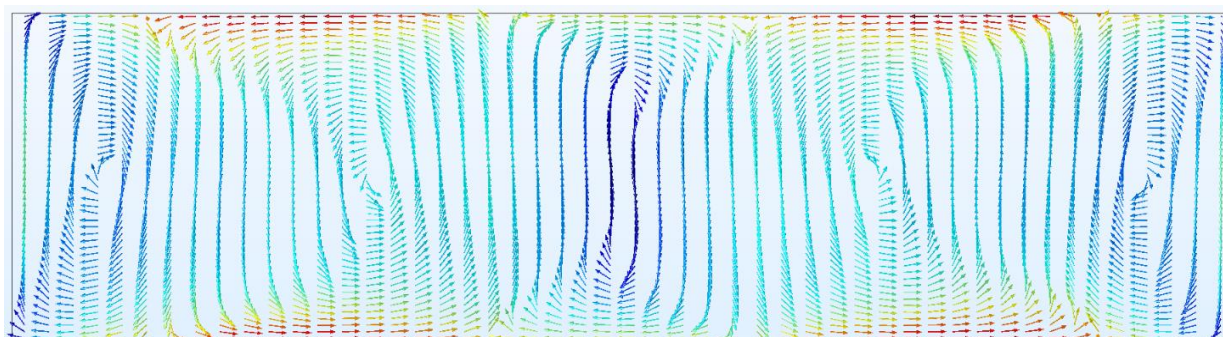
П 2.12. СБМП по варианту 6с

П 2.3. Картины распределения контуров замыкания токов в зависимости от схемы ЛИМ

Приведены результаты расчетных исследований, проведенные для определения влияния схемы обмотки, создающей встречно бегущее магнитное поле, на контуры замыкания токов, индуцированных во ВЭ. Расчетная модель в трехмерной постановке создана в пакете *Comsol Multiphysics* для ЛИМ6. Геометрические параметры ВЭ $105 \times 408 \times 10$ мм, свойства заданы как алюминиевой пластины, $\gamma = 32$ МСм/м. Приведены результаты, соответствующие схемам, создающим РБМП.



П 2.13. РБМП по варианту 1р

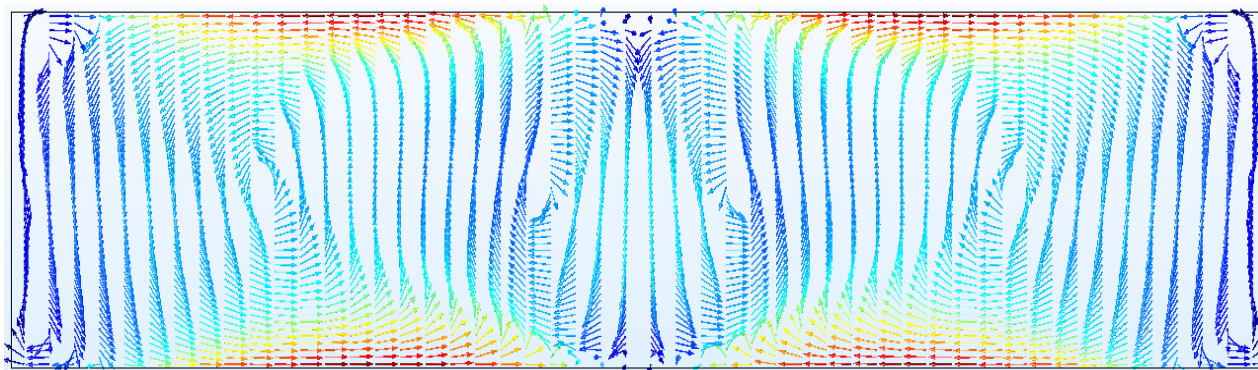


П 2.14. РБМП по варианту 4р

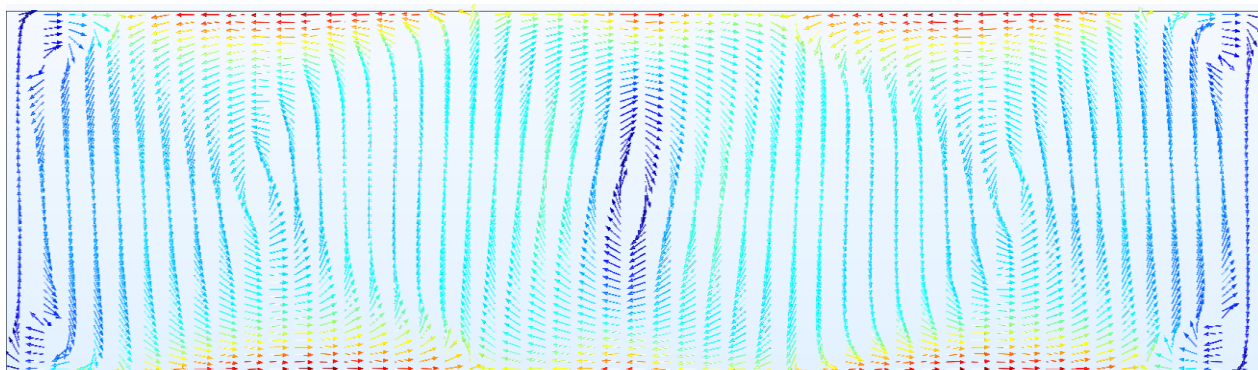


П 2.15. РБМП по варианту 6р

Результаты, соответствующие схемам, создающим СБМП



П 2.16. РБМП по варианту 1с



П 2.17. СБМП по варианту 4с

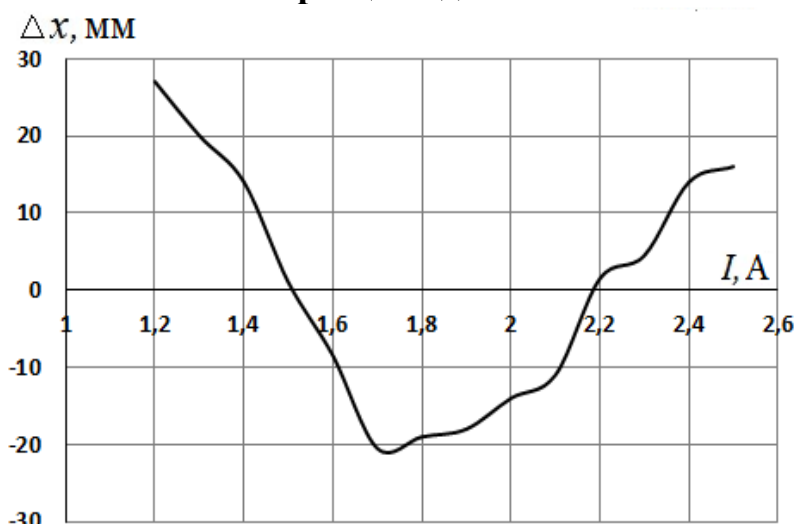
Как отмечалось в разделе 2.3., при схеме соединения 1р и 1с в центральной части индуктора располагаются одноименные фазы катушек, с токами одного направления, что можно наблюдать на рис. П 2.13, П 2.16. При схеме соединения 4р и 4с, на оси индуктора, которая совпадает с осью 13 зубца, располагаются стороны катушек одноименной фазы с токами противоположного направления представленные на рис. П 2.14, П 2.17. (в данном случае А и Х). На рис. П 2.15 представлена картина токов для варианта схемы создающей РБМП по варианту бр, где нетрудно увидеть смещение контуров замыкания токов от оси индуктора. Данное смещение также находит свое отражение как в картине распределения усилий вдоль индуктора, так и в диаграмме н.с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3. ОЦЕНКА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ВЭ

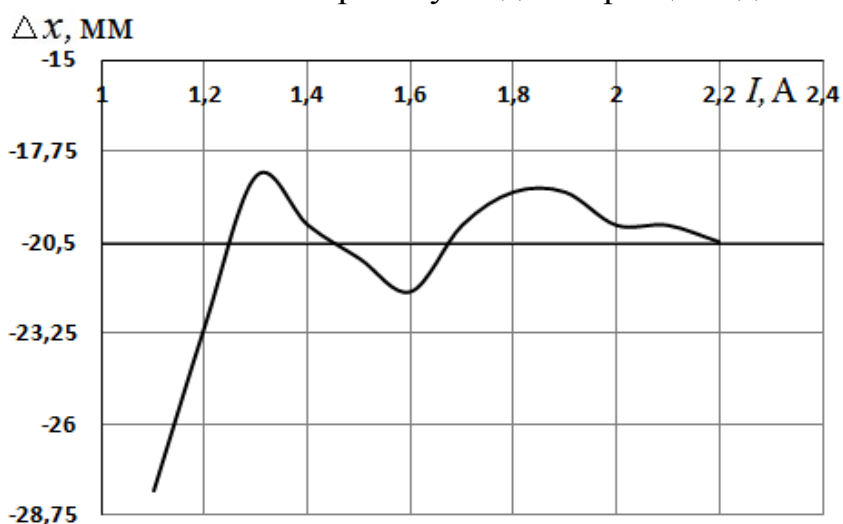
П 3.1. Графики зависимости погрешности позиционирования от тока ЛИМ

Приведены результаты экспериментальных исследований, проведенные для определения влияния схемы обмотки, создающей СБМП, на позиционирование ВЭ. Исследования проведены на ЛИМ6. Параметры образцов приведены в разделе 4.1 в табл. 1.

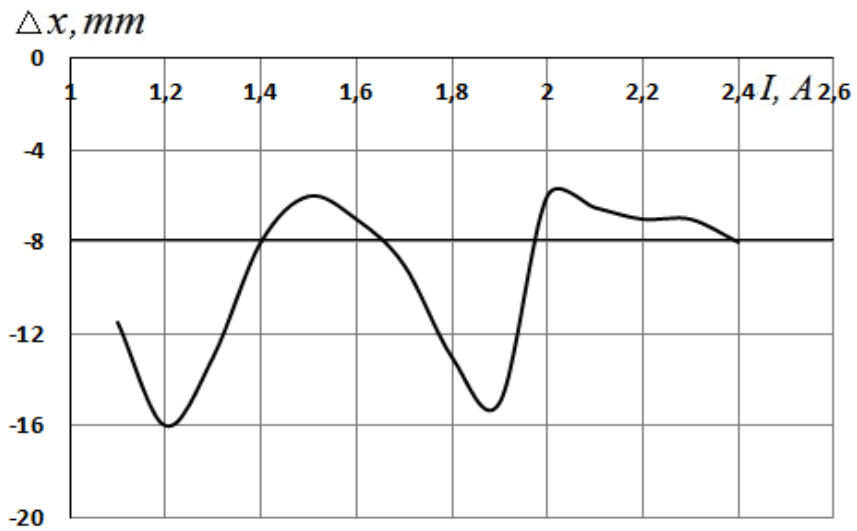
Графики зависимости погрешности позиционирования от тока ЛИМ для образца под №1



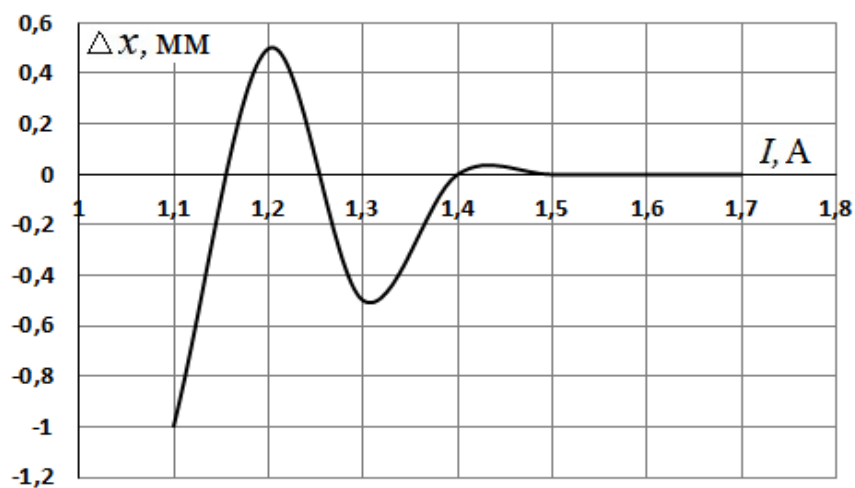
П 3.1. СБМП по варианту 1с для образца под №1



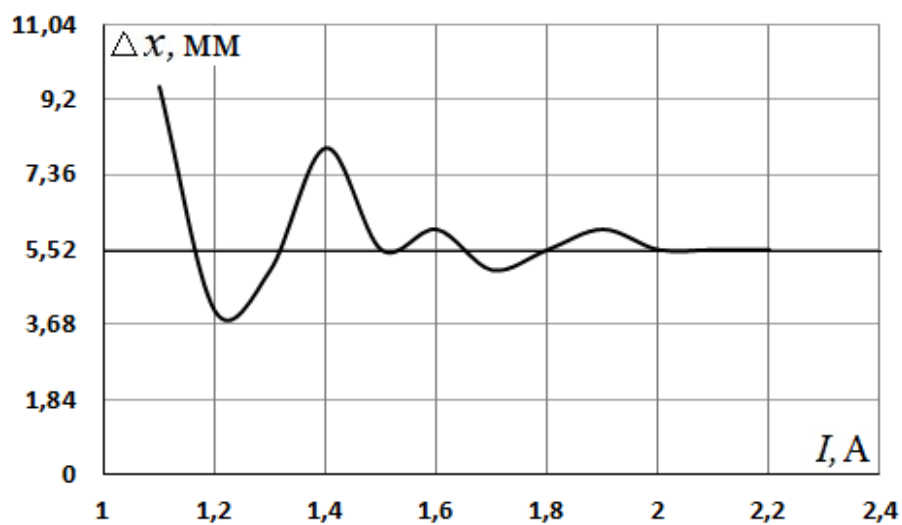
П 3.2. СБМП по варианту 2с для образца под №1



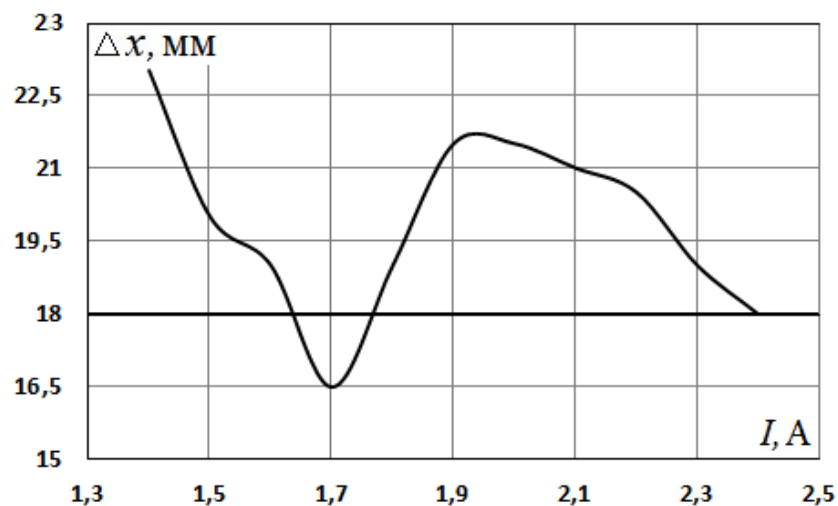
П 3.3. СБМП по варианту 3с для образца под №1



П 3.4. СБМП по варианту 4с для образца под №1

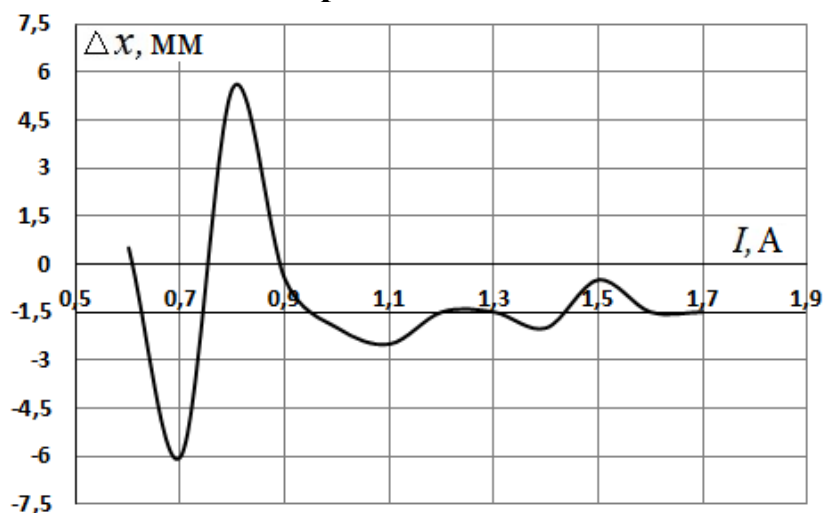


П 3.5. СБМП по варианту 5с для образца под №1

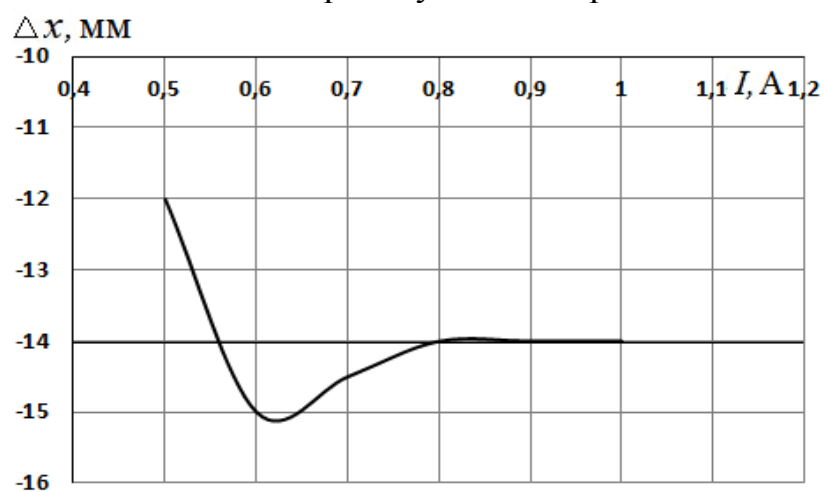


П 3.6. СБМП по варианту 6с для образца под №1

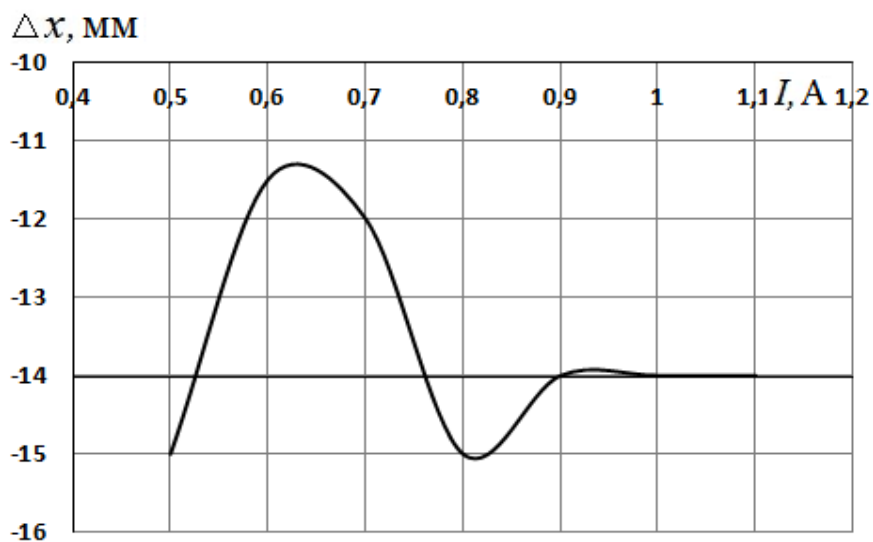
Графики зависимости погрешности позиционирования от тока ЛИМ для образца под №2



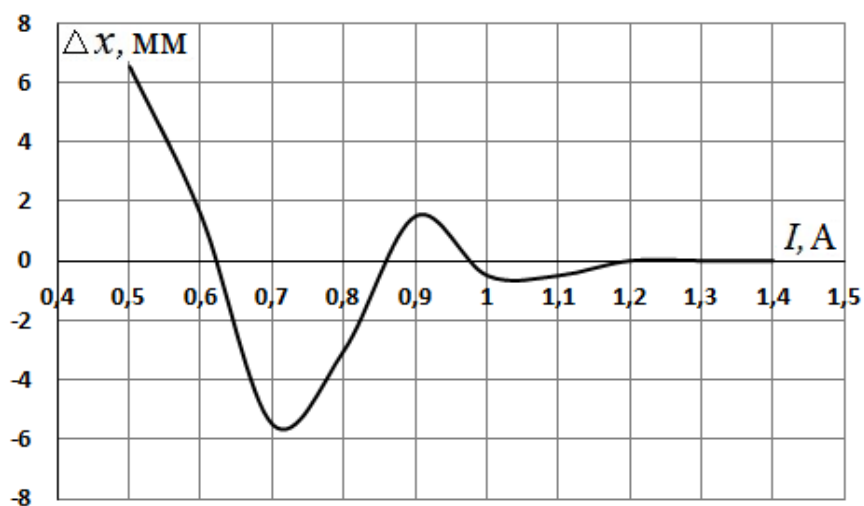
П 3.7. СБМП по варианту 1с для образца под №2



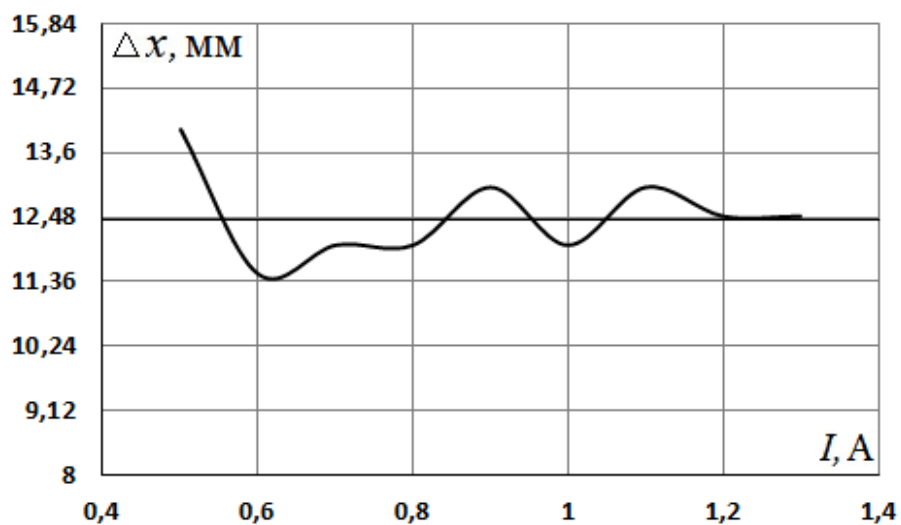
П 3.8. СБМП по варианту 2с для образца под №2



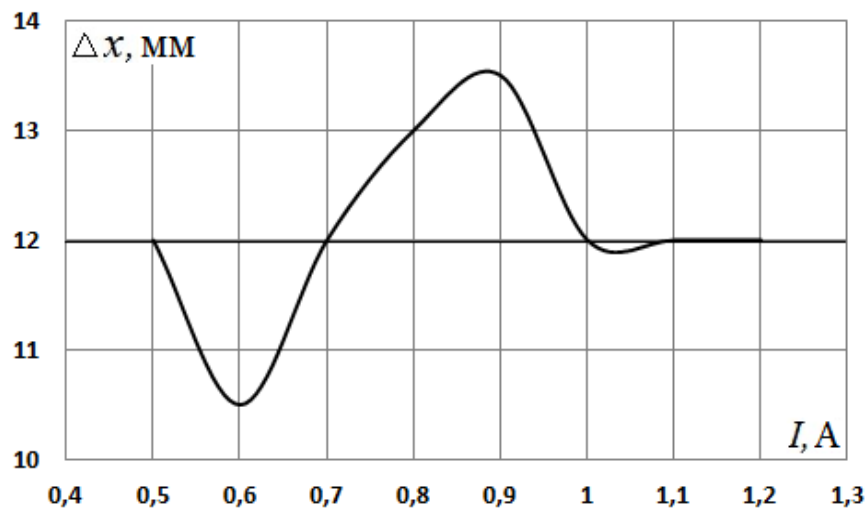
П 3.9. СБМП по варианту 3с для образца под №2



П 3.10. СБМП по варианту 4с для образца под №2

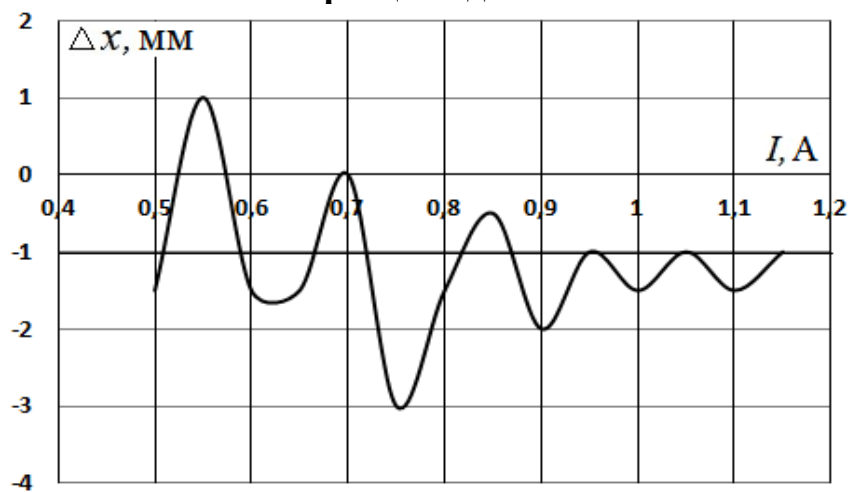


П 3.11. СБМП по варианту 5с для образца под №2

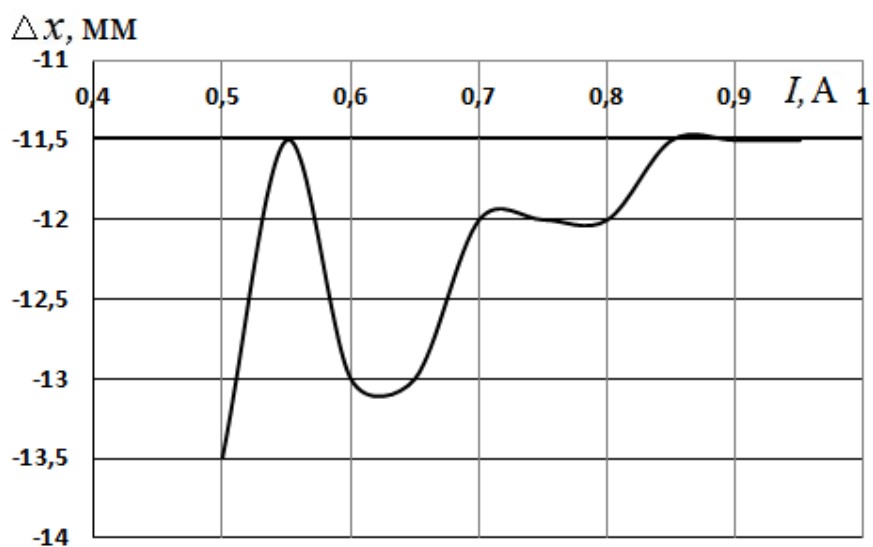


П 3.12. СБМП по варианту 6с для образца под №2

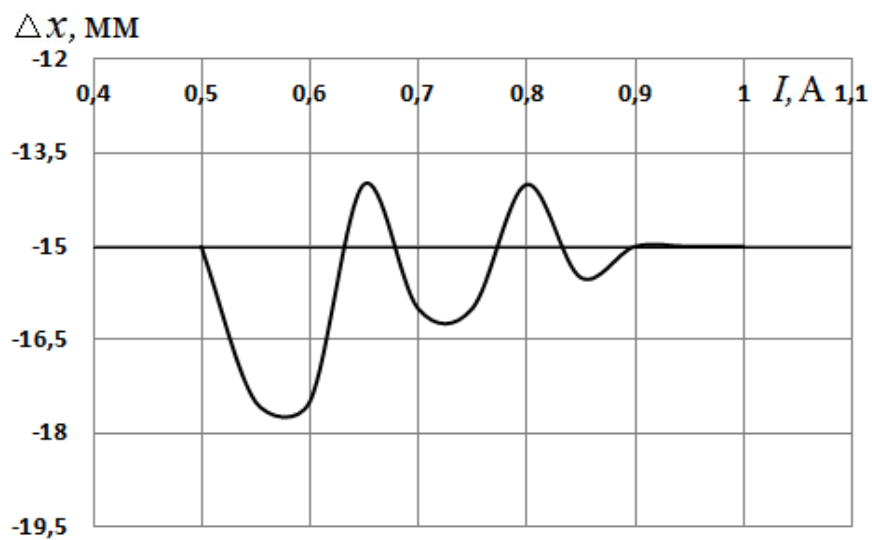
Графики зависимости погрешности позиционирования от тока ЛИМ для образца под №3



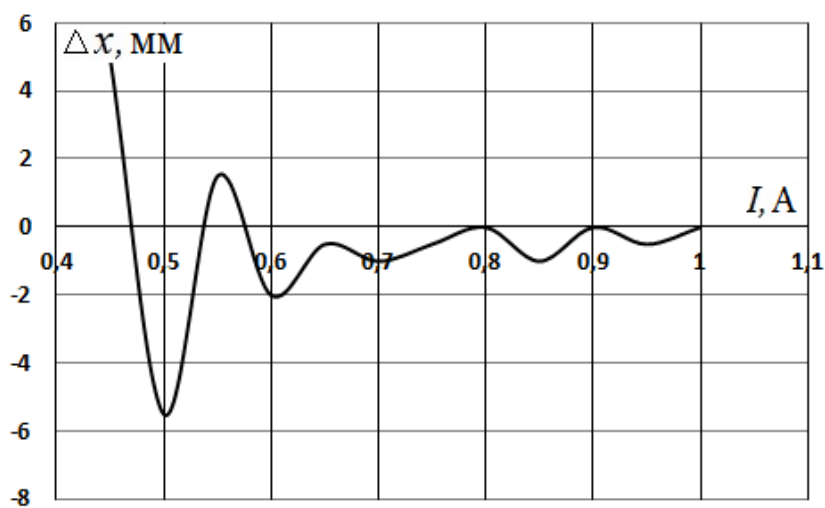
П 3.13. СБМП по варианту 1с для образца под №3



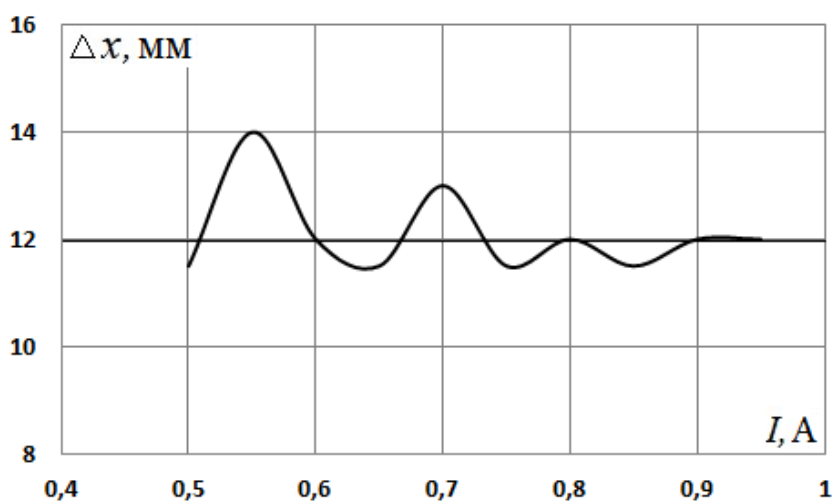
П 3.14. СБМП по варианту 2с для образца под №3



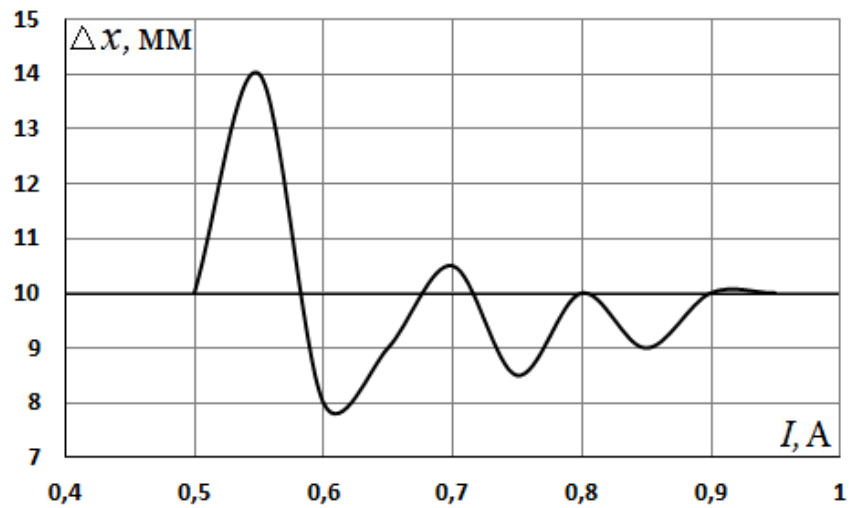
П 3.15. СБМП по варианту 3с для образца под №3



П 3.16. СБМП по варианту 4с для образца под №3

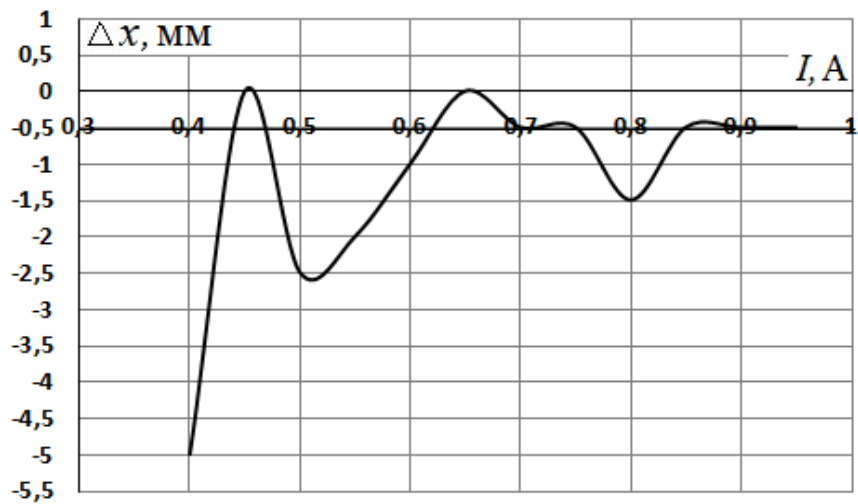


П 3.17. СБМП по варианту 5с для образца под №3

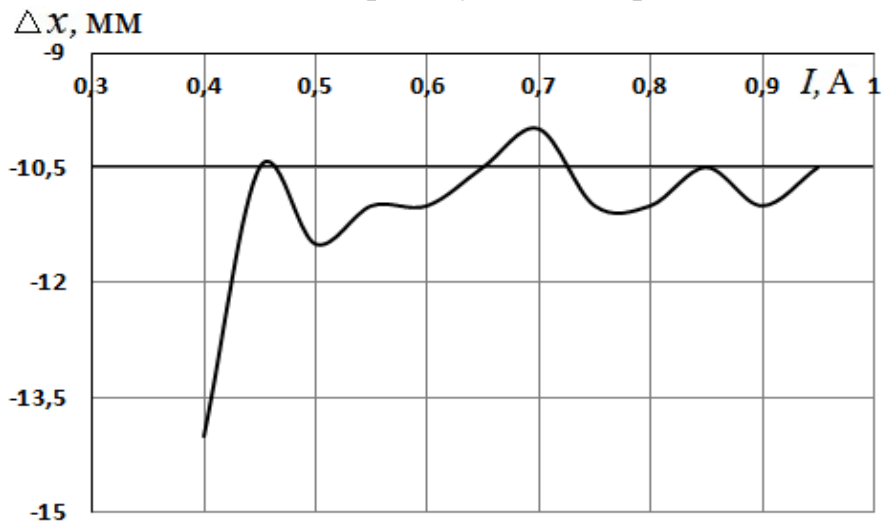


П 3.18. СБМП по варианту 6с для образца под №3

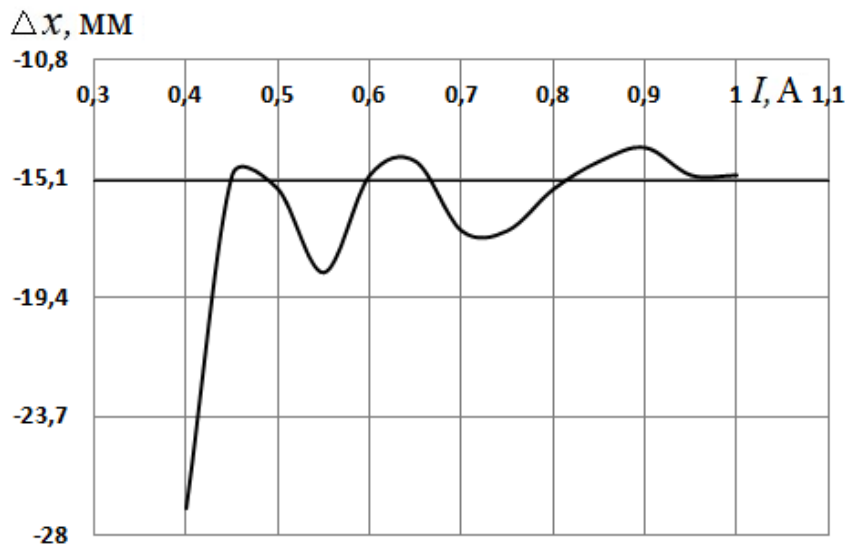
Графики зависимости погрешности позиционирования от тока ЛИМ для образца под №4



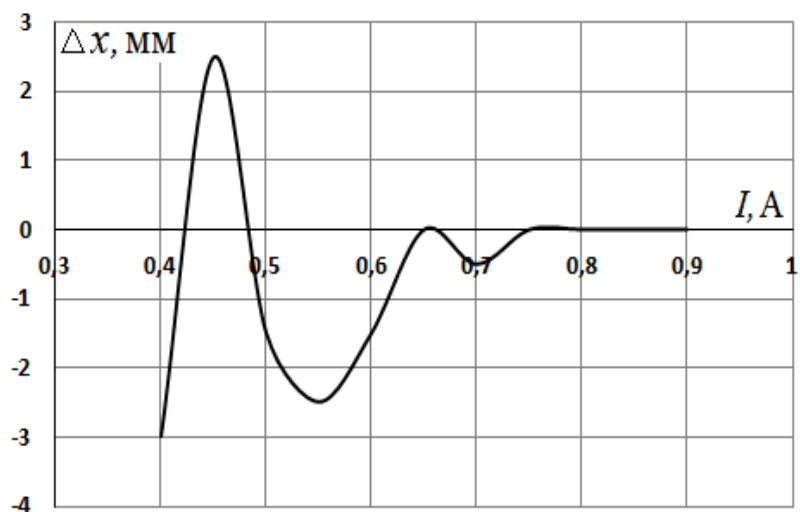
П 3.19. СБМП по варианту 1с для образца под №4



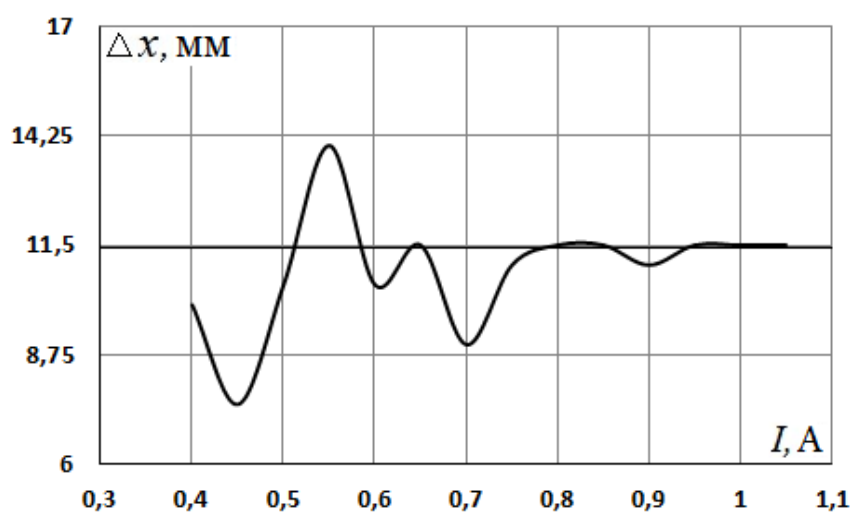
П 3.20. СБМП по варианту 2с для образца под №4



П 3.21. СБМП по варианту 3с для образца под №4



П 3.22. СБМП по варианту 4с для образца под №4



П 3.23. СБМП по варианту 5с для образца под №4

ПРИЛОЖЕНИЕ 4. ДОКУМЕНТЫ О СОТРУДНИЧЕСТВЕ С ПРЕДПРИЯТИЯМИ

Наименование «Исполнителя»
ФГАОУ ВПО УрФУ имени
первого Президента России
Б.Н.Ельцина
Кафедра ЭЭС

ИНН 6660003190
КПП 667001001
р/с 40503810213800000001
к/с 30101810800000000756
в ОАО «СКБ Банк»,
г. Екатеринбург
БИК 046577756

Наименование «Заказчика»
ЗАО «Южно-Уральский
специализированный центр
утилизации»

456300, Челябинская
область, г. Миасс,
Тургоякское шоссе, 4/9.

ИНН 7415020430
КПП 741501001

АКТ № 2

сдачи-приемки выполненных работ по
договору № Н975.210.001/13 от 24.01.2013 г.

Этап 2. Создание и испытания трехфазного линейного индуктора в лаборатории УрФУ. Авторский надзор за изготовлением опытного электродинамического сепаратора. Участие в его пуско-наладочных работах и испытаниях.

Мы, нижеподписавшиеся, представитель «Исполнителя» в лице проректора по науке Кружаева В.В., действующего на основании доверенности № 14-17/254 от 19.09.2013 г., с одной стороны, и представитель «Заказчика» в лице директора Воскобойникова В.В., действующего на основании Устава предприятия, с другой стороны, составили настоящий акт о том, что работа выполнена в полном объеме с надлежащим качеством и в установленные сроки.

Стоимость договора – 150 000 рублей (Сто пятьдесят тысяч рублей), без НДС.

Стоимость этапа № 2 – 75 000 рублей. (Семьдесят пять тысяч рублей), без НДС.

Следует к перечислению – 75 000 рублей (Семьдесят пять тысяч рублей), без НДС.



АХМАТДИНОВА Е.А.
НИЧ

**Общество с ограниченной ответственностью
«Производственное Предприятие
«ПРЕССМЕТ»**

Юр. адрес: 620017, Россия, 620017,
г. Екатеринбург, ул. Фронтовых бригад, 18;
Факт. адрес: 620017, Россия, 620017,
г. Екатеринбург, ул. Фронтовых бригад, 18;
Почт. адрес: Россия, 620057,
г. Екатеринбург ОС № 57, а/я 86;
Тел.: (343) 300-29-50, 300-29-51, 300-29-52,
факс: (343) 300-29-53
E-mail: pp-pressmet@mail.ru
Сайт: www.pressmet-pp.ru

ИНН 6686003148
КПП 668601001
Р/сч. 40702810905000000328
К/сч. 30101810500000000975
Уральский Филиал ПАО «Промсвязьбанк»
г. Екатеринбург;
БИК 046577975
ОГРН 1126686003212
ОКПО 09005170
ОКВЭД 37.10

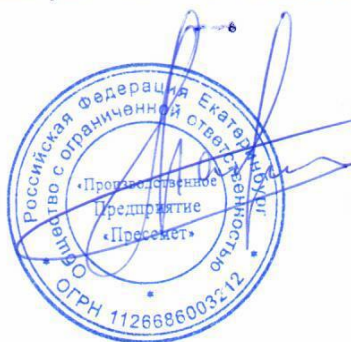
Исх. №185
от «12» июля 2017 год

Директору энергетического института
Уральского федерального университета
Сарапулову С.Ф.

Уважаемый Сергей Федорович!

На кафедре «Электротехника и электротехнологические системы» Вашего института под руководством профессора Коняева А.Ю. разработана установка электродинамической сепарации на основе трехфазных линейных индукторов. ООО «Производственное предприятие «Прессмет» заинтересовано в применении подобных установок для обработки дробленого кабельного лома. Испытания установки в научной лаборатории кафедры ЭЭС УрФУ показали возможность получения с помощью электродинамической сепарации качественного концентрата алюминия. Просим Вас предоставить опытный образец электродинамического сепаратора для его испытаний в промышленных условиях и опытной эксплуатации в ООО «ПП Прессмет».

Генеральный директор



А.Н. Мальцев



Исх. № 08 - 1678 от 24.09.2018 Директору энергетического института
На № _____ от _____ Уральского федерального университета
Сарапулову С.Ф.

Уважаемый Сергей Федорович!

В Вашем институте на кафедре «Электротехника и электротехнологические системы» под руководством профессора Коняева А.Ю. разработана установка электродинамической сепарации на основе трехфазных линейных индукторов, используемая для обработки мелких фракций лома цветных металлов. Наше предприятие заинтересовано в применении подобных установок для обработки дробленого кабельного лома.

В порядке оказания технической помощи просим оценить в научной лаборатории УрФУ возможности установки применительно к обработке дробленого лома медного кабеля с целью очистки получаемого медного гранулята от включений свинца. Проба дробленого кабельного лома для выполнения исследований предоставляется.

Технический директор

С.Г. Соколкин

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 182858

**УСТРОЙСТВО ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА В
БЕГУЩЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ**

Патентообладатель: *Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
"Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина" (RU)*

Авторы: *Абдуллаев Жaxonгир Одашжонович (RU),
Коняев Андрей Юрьевич (RU)*

Заявка № 2018117009

Приоритет полезной модели 07 мая 2018 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных

моделей Российской Федерации 05 сентября 2018 г.

Срок действия исключительного права

на полезную модель истекает 07 мая 2028 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев