

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина»

На правах рукописи



Абдуллаев Жахонгир Одашжонович

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

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Екатеринбург – 2020

Работа выполнена на кафедре «Электротехника и электротехнологические системы» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

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

Официальные оппоненты:

Линенко Андрей Владимирович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет» (г. Уфа), декан энергетического факультета;

Мошкин Владимир Иванович, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Курганский государственный университет», заведующий кафедрой энергетика и технологии металлов;

Фаткуллин Салават Мирдасович, кандидат технических наук, доцент, ООО Научно-производственное предприятие «РЭЛТЭК» (г. Екатеринбург), директор научно-технического центра.

Защита состоится «18» марта 2020 г. в 14:15 ч. на заседании диссертационного совета УрФУ 05.01.02 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=1017>

Автореферат разослан «__» февраля 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Болотин Кирилл Евгеньевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Линейные индукционные машины (ЛИМ) находят применение в целом ряде технологических процессов (МГД-технологии, электродинамическая сепарация, загрузочно-подающие операции при обработке прокатных изделий, индукционный нагрев в бегущем магнитном поле и т.д.). Основные достоинства ЛИМ связаны с бесконтактной передачей усилия вторичным элементам (ВЭ). 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. Основная особенность ЛИМ технологического назначения состоит в том, что размеры и свойства ВЭ (обрабатываемых заготовок и материалов) не являются предметом выбора при разработке машин, а задаются технологической задачей, что сужает возможности формирования механических и рабочих характеристик ЛИМ. В то же время при разработке линейных индукторов таких машин возможно использование технических решений, не применяемых в традиционной электромеханике. Одним из таких решений является использование индукторов с обмотками, создающими встречно бегущие магнитные поля (движущиеся от центра или к центру линейного индуктора). ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями (ВБМП) позволяют улучшить энергетические и функциональные возможности электроприводов и технологических установок. Однако физические процессы в таких машинах изучены недостаточно. Это делает проведение их исследований актуальным.

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.

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 исследований 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 сбегущимися 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 НПК «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. Основные положения и результаты исследования опубликованы в 28 научных работах, включая 7 статей опубликованных в научных изданиях, определенных ВАК, из них 2 статьи – в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus; 2 патента РФ на полезные модели; 18 тезисов докладов на всероссийских и международных конференциях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения. Содержит 132 страниц основного текста (с приложением 157), 98 рисунков и 16 таблиц, список литературы, включающий 101 наименование и приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы, оценивается состояние научных разработок в рассматриваемой области, сформулированы цель и задачи, определены объект и предмет исследования, раскрывается научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, перечисляются положения, выносимые на защиту, приводятся сведения о апробации и достоверности результатов.

В **первой главе** на основе обзора отечественной и зарубежной литературы сделан обзор применений ЛИМ в технологических процессах (МГД-технологии, электродинамическая сепарация, загрузочно-подающие операции при обработке прокатных изделий, индукционный нагрев в бегущем магнитном поле и т.д.). Отмечается, что вторичным элементом (ВЭ) таких ЛИМ служат обрабатываемые заготовки, изделия и материалы, свойства которых заданы технологической задачей, поэтому улучшение показателей рассматриваемых устройств возможно только за счет совершенствования линейных индукторов. Одним из путей является применение в индукторах ЛИМ трехфазных обмоток, создающих встречно бегущие магнитные поля. Принципы формирования встречно бегущих магнитных полей, показаны на рисунке 1.

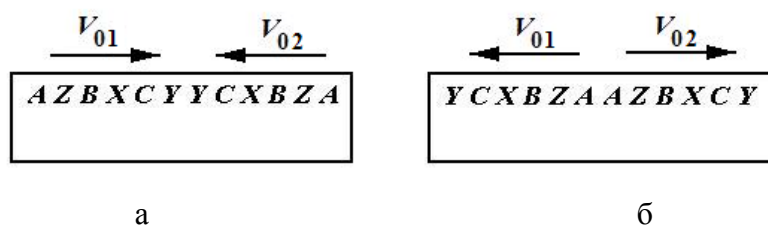


Рисунок 1 –ЛИМ, создающие встречно бегущие магнитные поля: сбегающиеся к центру индуктора (а) и разбегающиеся от него (б)

Рассмотрены примеры применения встречно бегущих магнитных полей в МГД-устройствах и в электродинамических сепараторах, в том числе в разработках УрФУ. Показано также, что применение таких магнитных полей позволяет расширить функциональные возможности ЛИМ, используемых во вспомогательном технологическом оборудовании, а также в устройствах индукционного нагрева в бегущем магнитном поле. В частности, появляются новые воз-

возможности управления параметрами движения обрабатываемых заготовок. В зависимости от схем и режимов питания обмоток ЛИМ, создающих ВБМП, возможно создание возвратно-поступательного движения заготовок, движения их на пониженной скорости, позиционирование заготовок. Вместе с тем, отмечено, что исследованию особенностей электромагнитных процессов в них до настоящего времени не уделялось достаточного внимания.

Показано, что при моделировании ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями наряду с такими явлениями, как продольный и поперечный краевые эффекты, ограниченность размеров массивных вторичных элементов и др. необходимо учитывать искажения в распределении магнитного поля и усилий в центре активной зоны индуктора, зависящие от конструкции и схемы соединения обмоток.

Во **второй главе** обоснован выбор математических моделей ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями с учетом их особенностей, исследованы электромагнитные силы в рассматриваемых ЛИМ, предложен анализ таких машин на основе построения диаграмм намагничивающих сил.

ЛИМ с ВБМП 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. С учетом этого для расчетов рассматриваемых ЛИМ необходимо их моделирование численными методами в трехмерной постановке. В главе представлены результаты тестовых расчетов ЛИМ с двухсторонним индуктором в пакете Comsol Multiphysics с использованием трехмерных моделей. Показано, что такой подход позволяет учесть наибольшее количество факторов, однако являются весьма трудоемкими и требуют больших ресурсов компьютеров. Поэтому рассмотрены возможности применения для расчетов ЛИМ двумерных математических моделей.

Разработанная ранее в УрФУ двумерная аналитическая модель ЛИМ с массивным ВЭ произвольной длины позволяет учитывать перераспределение вторичных токов, обусловленное ограниченностью размеров ВЭ, однако основана на допущении о существовании в активной зоне индуктора только бегущей волны магнитного поля. С другой стороны, использование для расчетов ЛИМ численных методов в двумерной постановке (например, метода конечных элементов в пакете Elcut) обеспечивает определение сложного распределения магнитного поля, но не позволяет корректно рассчитать вторичные токи в массивном ВЭ ограниченных размеров. С учетом сказанного в диссертации предложена методика расчета ЛИМ на основе «квазитрехмерного» подхода, сочетающая достоинства аналитической и численной моделей в двумерной постановке. Алгоритм расчетов по предложенной методике представлен на рис. 2.

В пакете Elcut (версия 5.5 и выше) имеется возможность моделирования массивного ВЭ с помощью цепной электрической схемы замещения, количе-

ство элементов которой соответствует количеству участков (блоков), на которые в направлении движения поля разбивается ВЭ. Сопротивление таких участков схемы замещения можно определять по выражению:

$$R_{\text{э}} = \frac{a}{\gamma \cdot \Delta b \cdot d \cdot k_{\text{ноп}}}, \quad (1)$$

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

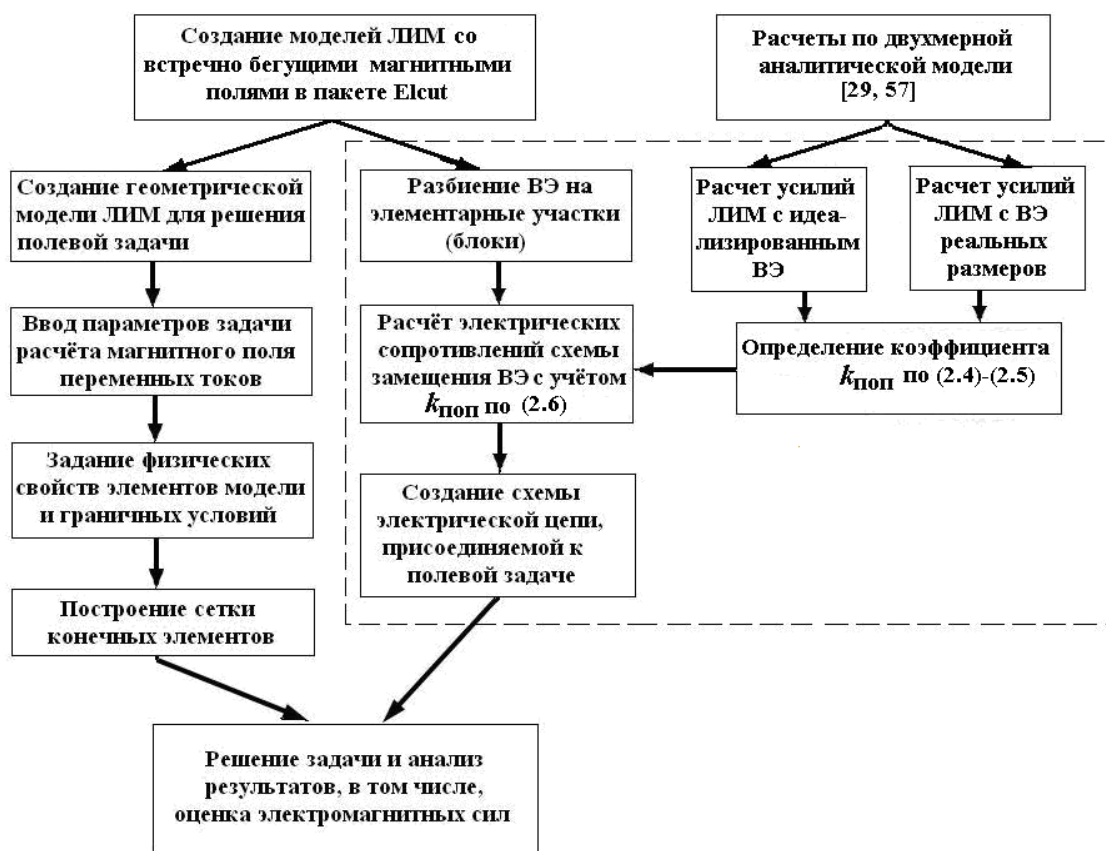


Рисунок 2 – Алгоритм расчета ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями (выделена оригинальная часть методики)

Входящий в (1) коэффициент поперечного эффекта $k_{\text{ноп}}$ предлагается определять из расчетов по аналитической модели путем сопоставления электромагнитных усилий, определенных для идеализированной ЛИМ с ВЭ, бесконечно широким в направлении поперечной оси ($a \gg b$), с учетом последующего приведения усилия к реальной ширине ВЭ, и усилия, рассчитанного при реальных размерах ВЭ:

$$k_{non} = \frac{F_{эм.ид}}{F_{эм}} \quad (2)$$

Выполнены сопоставления результатов расчетов по предлагаемой методике с расчетами в трехмерной постановке. Один из примеров такого сопоставления показан на рис. 3. Расхождение результатов не превышает 10%. Достоверность расчетов по предлагаемой методике подтвердилась также при сопоставлении данных расчетов и экспериментов.

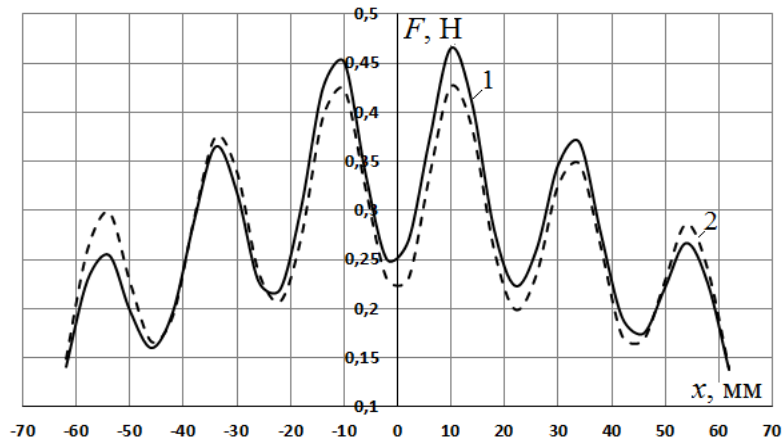


Рисунок 3 – Распределение электромагнитных усилий по длине ЛИМ: 1 – расчет в трехмерной постановке; 2 – расчет по предлагаемой методике

Сопоставления расчетов ЛИМ в двухмерной и трехмерной постановке при разных размерах ВЭ показали, что при малой длине ВЭ ($b < 0,5\tau$; τ – полюсное деление индуктора) преобладает одноконтурное распределение вторичных токов, и значения коэффициента поперечного эффекта $k_{поп}$ могут рассчитываться аналитически по формуле:

$$k_{non} = 1 - \frac{2b}{\pi a} \cdot th \frac{\pi a}{2b} \quad (3)$$

Предложенный подход к моделированию и расчету ЛИМ целесообразен для исследований машин со встречно бегущими магнитными полями, поскольку позволяет существенно уменьшить требуемые для расчетов вычислительные ресурсы. Основной целью исследований ЛИМ с ВБМП являлось выявление закономерностей протекания электромагнитных процессов в них при различных способах формирования встречно бегущих магнитных полей, при разных габаритах и мощности машин. В качестве примера можно привести характеристики одной из исследованных ЛИМ с односторонним индуктором мощностью до 500 ВА. Четырехполюсный индуктор имеет полюсное деление $\tau = 102$ мм и ширину активной зоны $L_{н} = 105$ мм. Однослойная трехфазная обмотка такого индуктора, уложенная в 24 паза, позволяет легко изменять схемы соединений катушек для формирования встречно бегущих магнитных полей. Основные варианты таких обмоток, создающих разбегающиеся магнитные поля (РБМП), показаны в таблице 1.

Таблица 1 – схемы обмоток ЛИМ, создающей разбегающиеся 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
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 показательными оказались 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. 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. В качестве примера на рис. 4 представлены кривые распределения усилий по длине ЛИМ для двух схем обмоток (1р и 4р).

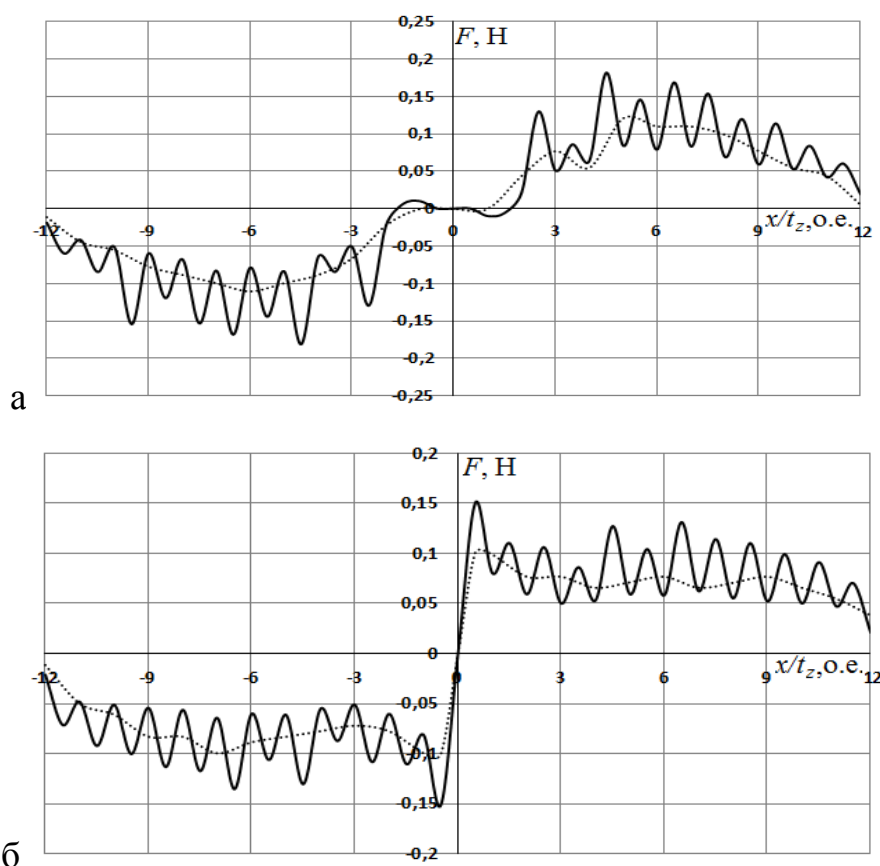


Рисунок 4 – Расчетные (сплошные линии) и экспериментальные (пунктир) для ЛИМ, создающей РБМП по варианту 1р (а) и 4р (б)

На рис. 4 видно, что характер искажения электромагнитных усилий в центральной зоне ЛИМ зависит от схемы обмотки индуктора, от порядка чередования фаз на левой и правой его половинах. В ЛИМ по варианту 1р, соответствующему симметричному расположению катушек отдельных фаз и токов в катушках справа и слева от оси машины (зеркальная симметрия), в центре индуктора наблюдается «мертвая» зона с усилием, близким к нулю, 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 поля. В кривых распределения усилий ЛИМ по варианту 4р «мертвой» зоны нет. При этом волны бегущего магнитного поля начинаются непосредственно от оси машины. Стороны катушек одноименной фазы, расположенные в пазах с 11 по 14 (ХХАА) создают дополнительное пульсирующее поле в центре индуктора, ось которого направлена перпендикулярно к поверхности индуктора. Такой магнитный поток складывается с бегущим магнитным полем, увеличивая его амплитуду в центральной зоне. В процессе дальнейших исследований выяснилось, 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»). Варианты ЛИМ с другими схемами соединения обмоток (2р, 3р, 5р, 6р) характеризуются несимметрией кривых распределения усилий и смещением оси зоны искажений от оси индуктора.

Исследование той же ЛИМ с обмотками, создающими сбегающие магнитные поля, а также ЛИМ других габаритов и мощностей, с другими конструкциями обмоток в целом соответствуют рассмотренному примеру. Это позволяет сделать вывод о наличии благоприятных и неблагоприятных схем обмоток, что необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации ЛИМ.

Для ускорения анализа характера искажений полей и усилий в рассматриваемых ЛИМ предложена методика оценки электромагнитных процессов в рассматриваемых ЛИМ на основе построения диаграмм намагничивающих сил, реализованная в программной среде Excel. Использование возможностей электронных таблиц позволяет автоматизировать построение кривых намагничивающих сил обмоток, существенно снижая трудоемкость анализа. 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. Для примера на рис. 5 и 6 приведены диаграммы н.с. для рассмотренной выше ЛИМ с вариантами схем 1р и 4р.

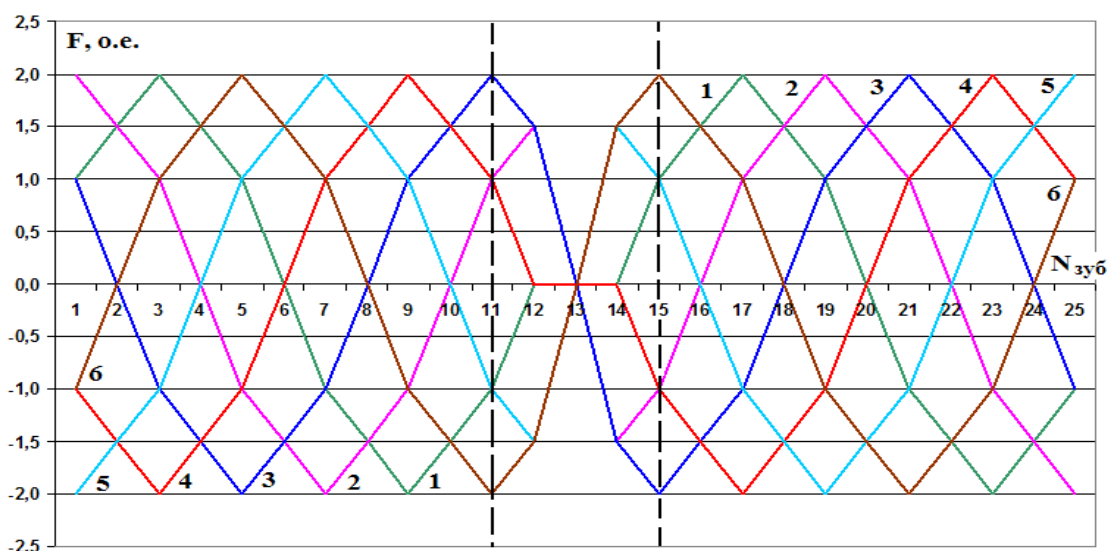


Рисунок 5 – Диаграмма н.с. ЛИМ6 с однослойной обмоткой варианту 1р

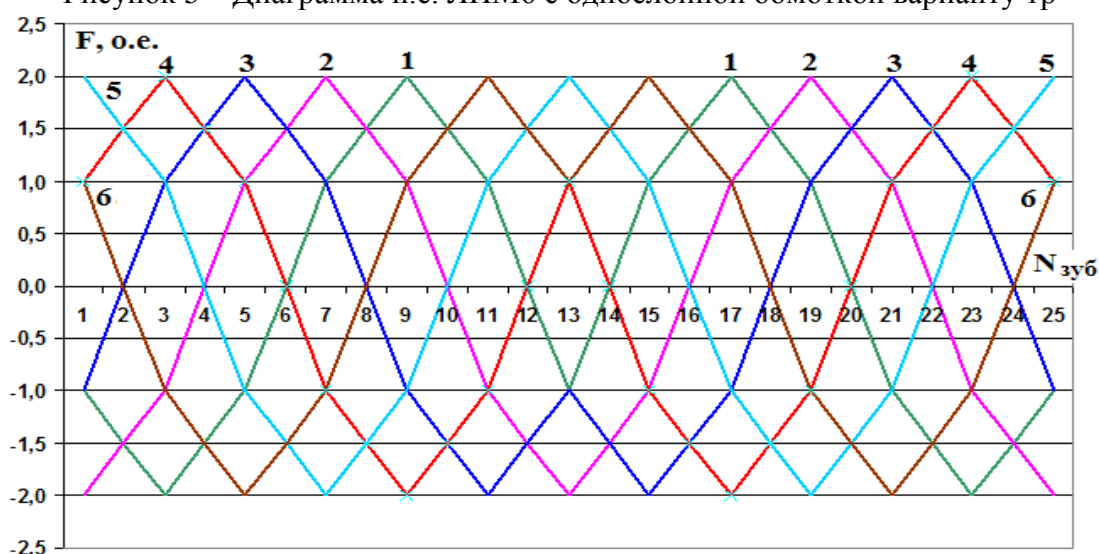


Рисунок 6 – Диаграмма н.с. ЛИМ6 с однослойной обмоткой по варианту 4р

Как видно на рис. 5, в варианте 1р в центре индуктора возникает искажение кривых н.с., и четко видна пульсирующая составляющая н.с. В то же время в варианте 4р искажения поля отсутствуют (рис. 6), а волны н.с. бегущего магнитного поля начинают движение от оси индуктора. Как показано, ранее в указанных вариантах ЛИМ это соответствует наличию или отсутствию «мертвой» зоны в кривых распределения электромагнитных усилий. Предложенная методика оценки процессов в ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями на основе построения диаграмм н.с. была успешно апробирована при анализе ряда экспериментальных ЛИМ и использована для исследования характера процессов в мощной опытно-промышленной ЛИМ, индуктор которой имел двухслойную обмотку, расположенную в 89 пазах.

В третьей главе рассмотрено применение ЛИМ с разбегающимися магнитными полями в электродинамических сепараторах, предназначенных для извлечения цветных металлов из потоков металлосодержащих отходов, а также для индукционной сортировки металлов.

Для извлечения цветных металлов из твердых отходов производства и потребления в мировой практике применяются электродинамические сепараторы на основе линейных индукторов. При этом индукторы устанавливаются под лентой конвейера, перемещающего отходы, как показано на рис. 7

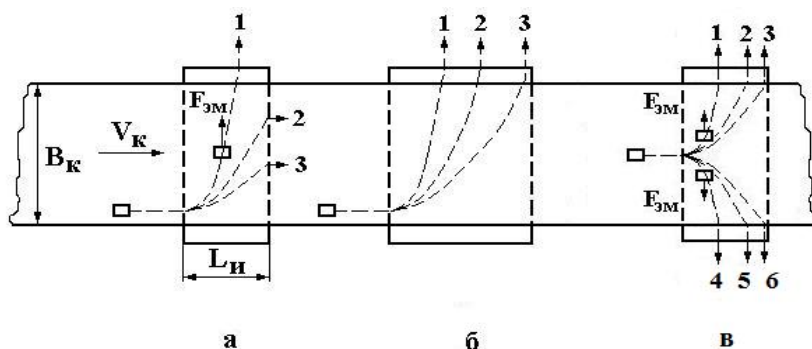


Рисунок 7 – Схемы электродинамических сепараторов с односторонним (а, б) и двухсторонним (в) выходом металлических частиц

Под действием электромагнитных сил металлические включения должны перемещаться в поперечном направлении и выноситься за пределы конвейера (частица 1 на рис. 7, а). Однако электромагнитное усилие существенно зависит от физических свойств частиц (прежде всего, от крупности и удельной электропроводности), и отдельные частицы металла могут не извлекаться из потока (частицы 2 и 3 на рис. 7, а). Добиться сепарации таких частиц можно за счет повышения частоты или интенсивности магнитного поля, либо за счет увеличения ширины линейного индуктора (рис. 7, б). Во всех указанных случаях повышается энергопотребление установок. Увеличение выхода металлов из отходов можно обеспечить при использовании ЛИМ с разбегающимися магнитными полями. В таких сепараторах обеспечивается двухсторонний выход извлекаемых частиц металла (рис. 7, в). При этом снижаются требуемые для сепарации

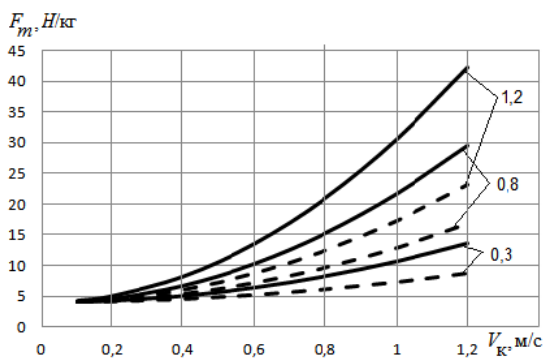


Рисунок 8 – Зависимости требуемых удельных усилий F_m от скорости V_k и ширины B_k конвейера, при коэффициенте трения 0,4

усилия, и при заданном уровне извлечения металлов уменьшается мощность индукторов. Наоборот, при неизменной мощности индукторов можно увеличить выход цветных металлов. Сказанное иллюстрируется результатами расчетов требуемых для сепарации удельных усилий при разных параметрах установок, показанными на рис. 8. Зависимости, соответствующие одностороннему выходу металла, показаны сплошными линиями, двухстороннему – пунктиром.

При применении электродинамических сепараторов для индукционной сортировки цветных металлов и сплавов (например, при сепарации электронного и кабельного лома) главным показателем эффективности процесса является селективность сепарации. Для селективного разделения цветных металлов и сплавов целесообразно использовать электродинамические сепараторы на ос-

нове двухсторонних линейных индукторов с подачей материалов по наклонной плоскости. При этом сепарируемые материалы приходится подавать узким потоком, что ограничивает производительность установок. В ходе исследований сепараторов оценивались изменения технологических показателей сепарации (ε – извлечение целевого металла в концентрат, β – содержание целевого металла в концентрате) при изменении ширины потока (ширины желоба подачи $b_{ж}$). На рис. 9 показаны зависимости технологических показателей опытного сепаратора, предназначенного для извлечения алюминиевых частиц из смеси материалов крупностью до 10 мм, от положения разделителя потока (R – расстояние от линии подачи до разделителя) при разных $b_{ж}$ (цифры на графиках, мм). Нетрудно видеть, что увеличение ширины потока подаваемого материала существенно ухудшает показатели сепарации. Увеличения производительности установки без ухудшения качества сепаратора удалось добиться при использовании в ЛИМ разбегающихся магнитных полей. Как видно на рис. 10, при ширине подачи 20 мм в случае разбегающихся полей удалось достичь показателей, удовлетворяющих требованиям заказчиков.

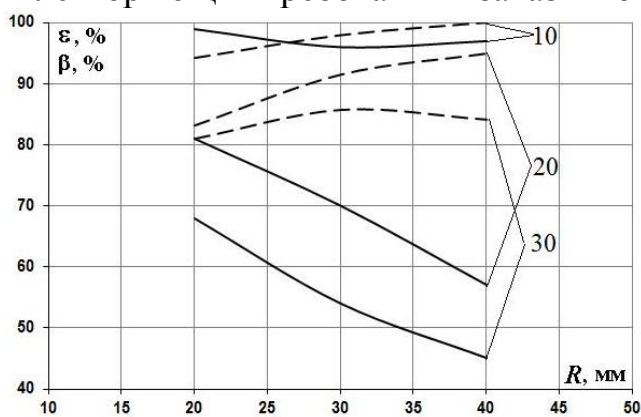


Рисунок 9 – Зависимости технологических показателей сепарации при увеличении ширины подаваемого потока материалов

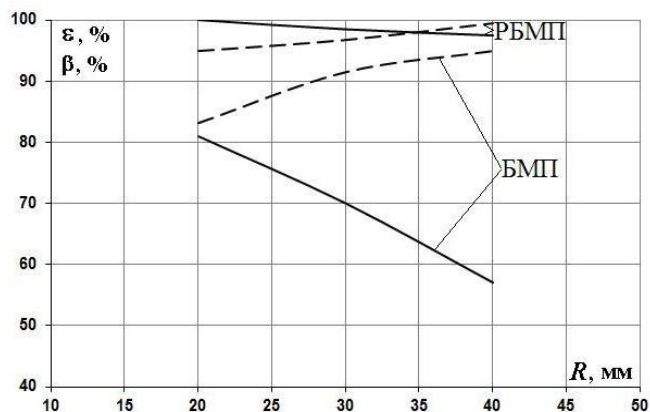


Рисунок 10 – Сравнение показателей сепарации при одностороннем (БМП) и двухстороннем (РБМП) выходе металла

В четвертой главе проанализированы возможности использования ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями для решения задач перемещения, позиционирования и индукционного нагрева мерных металлических заготовок.

При использовании ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями появляются дополнительные возможности управления параметрами движения заготовок и изделий. В зависимости от схем и режимов питания обмоток, создающих встречно бегущие магнитные поля, возможно возвратно-поступательного движения заготовок, движение их на пониженной скорости, позиционирование заготовок. Наиболее востребованным на практике оказывается режим позиционирования. Например, при расчетах ЛИМ, совмещающих функции электродвигателя и индукционного нагревателя, получены зависимости относительного размаха колебаний температуры $\delta\theta$ по длине алюминиевой заготовки от ошибки позиционирования заготовки (отклонение осей заготовки и индуктора Δx). Для расчета сопряженных электромагнитных и тепловых процессов в установке

использовался метод конечных элементов. Результаты расчетов для одной из экспериментальных ЛИМ показаны на рис. 11. Схемы обмоток четырехполюсного линейного индуктора, использованные при оценках режимов индукционного нагрева и позиционирования заготовок представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Варианты схем укладки обмоток линейного индуктора

Пульсирующее поле (ПП)	1	AAAAAAXXXXXXAAAAAAXXXXXX
Бегущее магнитное поле (БМП)	2	AAZZBBXXCCYYAAZZBBXXCCYY
Сбегающиеся магнитные поля (СБМП)	3 (1с)	AAZZBBXXCCYYYYCCXXBBZZAA
	4 (2с)	AAZZBBXXCCYYCCXXBBZZAAYY
	5 (3с)	AAZZBBXXCCYYXXBBZZAAYYCC
	6 (4с)	AAZZBBXXCCYYBDZZAAYYCCXX
	7 (5с)	AAZZBBXXCCYYZZAAYYCCXXBB
	8 (6с)	AAZZBBXXCCYYAAAYYCCXXBBZZ

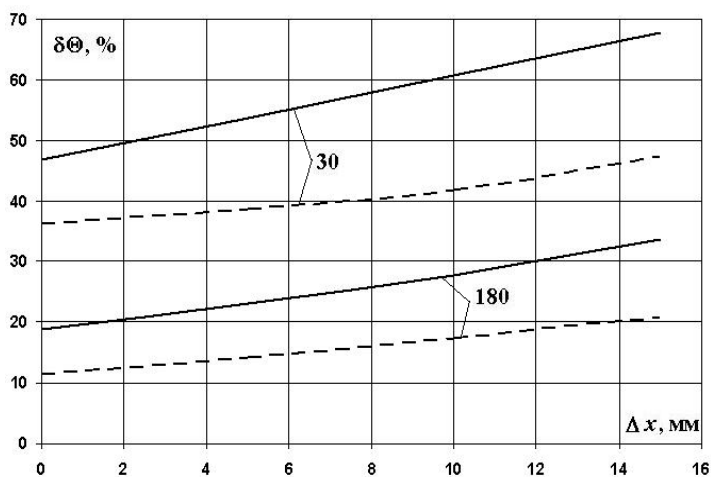


Рисунок 11 – Относительный размах колебаний температуры по длине заготовки при ее несимметричном расположении в индукторе

Зависимости, приведенные на рис. 11, получены для разных значений времени нагрева: 30 и 180 с. (цифры на графиках). Сплошные линии соответствуют режиму нагрева в бегущем магнитном поле одного направления, пунктирные – нагреву с применением сбегающихся магнитных полей. Видно, что неравномерность нагрева возрастает при смещении заготовок от центра индуктора, что подтверждает необходимость их позиционирования.

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.

Оценка эффекта самоцентрирования заготовок при вводе их в рабочую зону рассматриваемых ЛИМ выполнена экспериментально для четырехполюсного индуктора со сбегающимися магнитными полями (СБМП). В качестве заготовок использовались алюминиевые пластины разных размеров: длина в направлении движения магнитного поля $b = 20-134$ мм, поперечный размер $a = 100$ мм, толщина $d = 10$ мм. 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.

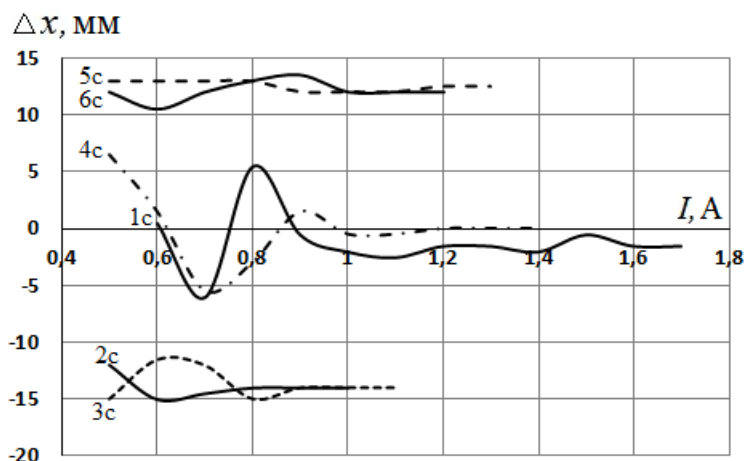


Рисунок 12 – Сравнение результатов позиционирования образца размером $b = 49$ мм при разных схемах обмоток, создающих СБМП

При схеме 1с, характеризующейся наличием «мертвой» зоны в кривой усилия, заготовка останавливается с небольшой ошибкой. В случае схем по вариантам 2с, 3с, 5с, 6с заготовки останавливаются с отклонением $\Delta x = 13-14$ мм. Результаты позиционирования хорошо согласуются с расположением зон искажения в кривых распределения электромагнитных усилий, приведенных в разделе 2.

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 токи индуктора, которые могут обеспечить подачу заготовок и первый этап позиционирования. После входа заготовки в центральную зону индуктора установка (ЛИМ – индукционный нагреватель) включается на полную мощность, соответствующую режиму нагрева. При такой мощности (при больших токах) обеспечиваются необходимая точность позиционирования и высокая скорость нагрева. Режим позиционирования заготовок рекомендуется для создания автоматизированных линий индукционного нагрева непрерывного или периодического действия. Дальнейшие исследования таких ЛИМ показали, что схемы обмоток по вариантам 1с и 4с обеспечивают также уменьшение неравномерности распределения температур в режиме индукционного нагрева.

В пятой главе представлены описание опытных ЛИМ и установок на их основе, результаты их экспериментальных исследований, результаты апробации конкретных технологических задач.

В экспериментальных исследованиях использовано 8 линейных индукторов, отличающихся габаритами, мощностью, конструкциями обмоток. Некоторые из них, созданные при участии автора, показаны на рис. 13

Опыты проводились при различных значениях тока с шагом 0,2 А и повторялись несколько раз для каждого из значений. Сравнение результатов опытов для разных схем обмоток ЛИМ при размере заготовки $b = 49$ мм представлено на рис. 12.

Как видно на рисунке, в случае схемы по варианту 4с достигается позиционирование с ошибкой, близкой к нулю.

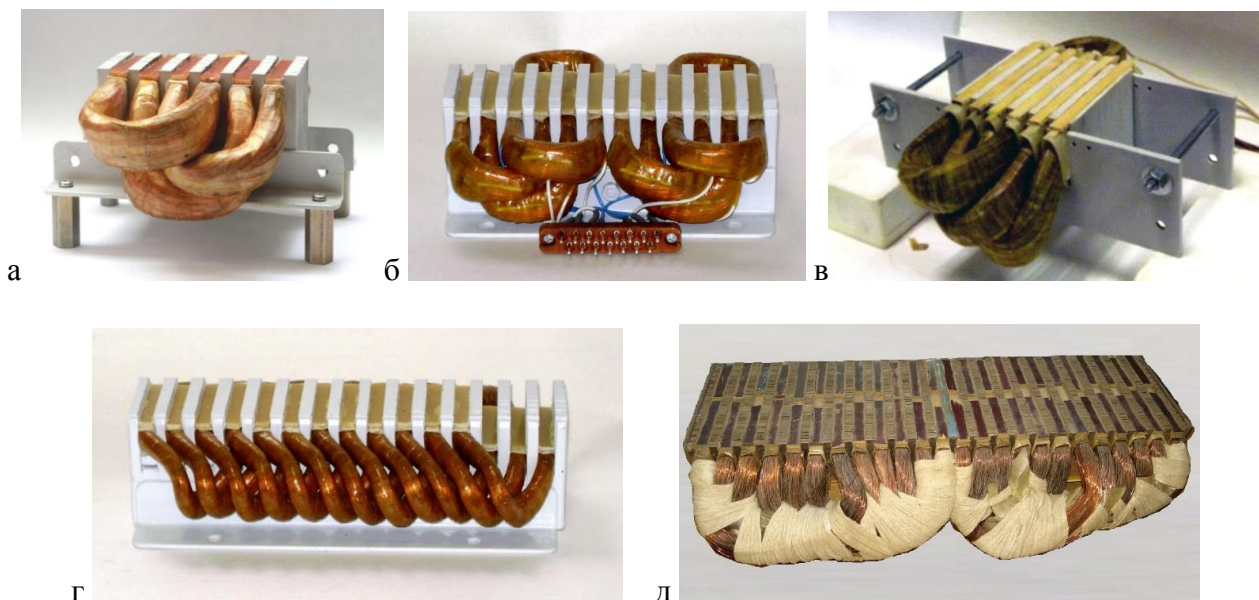


Рисунок 13 – Линейные индукторы экспериментальных установок

Прежде всего, эксперименты проводились с целью проверки достоверности методик расчета ЛИМ и выводов, полученных в ходе расчетов. Результаты таких экспериментов представлены в главах 2-4.

Одной из задач экспериментальных исследований являлась оценка характеристик ЛИМ, работающих на повышенной частоте, которые могут применяться в электродинамических сепараторах для обработки мелких фракций отходов (с крупностью частиц менее 30 мм). Пример зависимости удельного электромагнитного усилия, действующего на алюминиевую пластину размером 25 мм, от частоты, полученной при постоянстве тока для одной из ЛИМ, показан на рис. 14. Можно отметить, что в данном случае на результате существенно сказался рост магнитных потерь с увеличением частоты, обусловивший отклонение опытной кривой 2 от идеализированной (без магнитных потерь) – 1. Оценка воздействия на результаты других факторов (высшие гармоники, генерируемые преобразователем частоты, нагрев ВЭ и обмоток индуктора) показала, что их влиянием можно пренебречь.

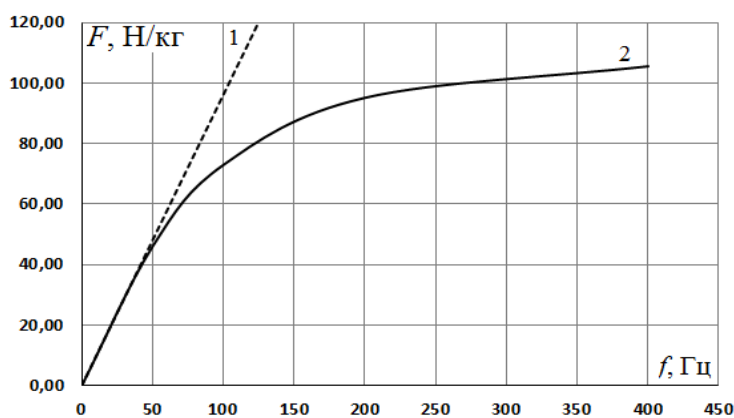


Рисунок 14 – Зависимость удельных усилий от частоты

Следует отметить, что подобные оценки для других исследованных ЛИМ не были столь очевидны. В целом, исследования не дали однозначного ответа о целесообразности применения ЛИМ, работающих на повышенных частотах, в электродинамических сепараторах. Подобные исследования должны быть продолжены.

Отдельный интерес представляет сопоставление кривых распределения магнитного поля и электромагнитного усилия по длине ЛИМ. Для одной из

ЛИМ результаты опытов представлены на рис. 15. В экспериментах использованы две схемы соединения обмоток четырехполюсной ЛИМ: одна создает однонаправленное бегущее магнитное поле, вторая – сбегаящиеся поля согласно схеме соединения 3с, представленной в табл. 2.

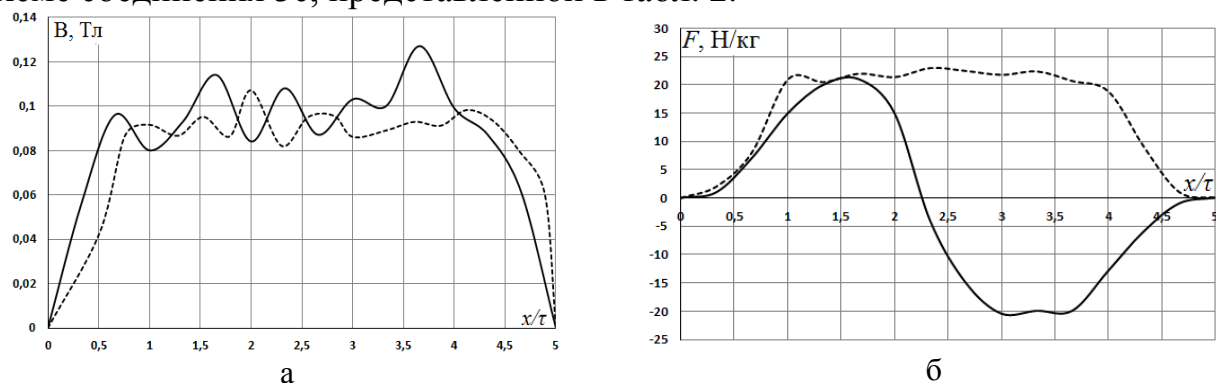


Рисунок 15 – Огибающие кривых индукции (а) и кривые распределения усилий (б) пунктирной – БМП, сплошной – СБМП

Как видно из рис. 14, в случае однонаправленного БМП наблюдается корреляция между характерами распределения магнитного поля и усилий в рабочей зоне ЛИМ. В то же время по виду огибающей кривых магнитной индукции в случае СБМП нельзя судить о распределении электромагнитных усилий. Это является одной из особенностей таких электрических машин.

Важной составляющей экспериментальных исследований являлись апробации реальных технологий на основе ЛИМ, которые выполнялись в интересах заинтересованных предприятий. В частности, испытывались опытные установки электродинамической сепарации для обработки электронного и кабельного лома, для извлечения металлов из различных твердых отходов, установки индукционного нагрева в бегущем магнитном поле, в том числе с использованием режимов перемещения и позиционирования заготовок. Результаты исследований переданы заказчикам.

В **заключении** приведены основные выводы по результатам работы.

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 выявлены 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 сбегающиеся 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.

Основное содержание работы отражено в следующих публикациях:

Статьи в журналах, определенных ВАК для специальности 05.09.01:

1. Абдуллаев, Ж.О. Применение линейных индукторов со встречно бегущими магнитными полями в электродинамических сепараторах / А.Ю. Коняев,

Ж.О. Абдуллаев, М.Е. Зязев, Д.Н. Багин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2019. № 32. С. 22-37; 0,4 п.л. / 0,1 п.л.

2. Abdullaev, Zh. O. Investigation of Double-Purpose Linear Induction Motors / Zh. O. Abdullaev, A.Yu. Konyaev, M.E. Zyazev // 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; 0,18 п.л. / 0,1 п.л. (Scopus)

3. Abdullaev, Zh. O. Linear Induction Machines with the Opposite Direction Travelling Magnetic Fields for Induction Heating / Zh. O. Abdullaev, A.Yu. Konyaev // Proceeding of the 2018 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (January 29 – February 1, 2018 ElConRus). St. Petersburg, Russia, 2018. Pp. 555-557; 0,18 п.л. / 0,1 п.л. (Scopus)

4. Абдуллаев, Ж.О. Исследование двухцелевых линейных индукционных машин / А.Ю. Коняев, Ж.О. Абдуллаев, М.Е. Зязев, И.А. Коняев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2018. № 28. С. 108-121; 0,87 п.л. / 0,1 п.л.

5. Абдуллаев, Ж.О. Исследование установок индукционного нагрева в бегущем магнитном поле / Абдуллаев Ж.О., Коняев А.Ю. // Вопросы электротехнологии. 2018. № 3 (12). С. 28-35; 0,5 п.л. / 0,1 п.л.

6. Абдуллаев, Ж.О. 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; 0,37 п.л. / 0,1 п.л.

7. Абдуллаев, Ж.О. Анализ электромеханических процессов, определяющих эффективность работы электродинамического сепаратора / Ж.О. Абдуллаев, А.Ю. Коняев, С.Л. Назаров, Д.Н. Багин // Промышленная энергетика. 2015. № 7. С. 48-53; 0,37 п.л. / 0,1 п.л.

Патенты:

8. Абдуллаев, Ж.О. Патент, МПК В03С 1/24, Российская Федерация. Устройство для извлечения немагнитных металлов из потока сыпучих материалов / Ж.О. Абдуллаев, А.Ю. Коняев. – № 2019133171; заявл. 18.10.2019;(положительное решение от 03.12.2019).

9. Абдуллаев, Ж.О. Патент 182858, МПК 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.;

Публикации в других научных изданиях:

10. Абдуллаев, Ж.О. Способы повышения эффективности электродинамических сепараторов для обработки твердых металлосодержащих отходов / Ж.О. Абдуллаев, А.Ю. Коняев, М.Е. Зязев, Е.В. Гапоненко // Экология промышленного производства. 2019. № 1. С. 2-6; 0,31 п.л. / 0,1 п.л.

11. Абдуллаев, Ж.О. Технологические преимущества концепции «двух баков» при механизированной переработке твердых коммунальных отходов / Ж.О. Абдуллаев, А.Ю. Коняев, Е.А. Лутошкина // Система управления экологической безопасностью: сб. трудов XIII международной НПК. Екатеринбург: УрФУ, 2019. С. 129-134. [Электронный ресурс]. URL: <http://hdl.handle.net/10995/72329>; 0,37 п.л. / 0,1 п.л.
12. Абдуллаев, Ж.О. Возможности и проблемы промышленной переработки твердых коммунальных отходов / Ж.О. Абдуллаев, А.Ю. Коняев, М.А. Бубнова, Е.С. Кирпичникова // Система управления экологической безопасностью: сб. трудов XII международной НПК. Екатеринбург: УрФУ, 2018. С.126-131; 0,37 п.л. / 0,1 п.л.
13. Абдуллаев, Ж.О. Использование линейных индукторов со встречно бегущими магнитными полями в установках индукционного нагрева / Ж.О. Абдуллаев, А.Ю. Коняев, Е.В. Гапоненко // Материалы XVII международной конференции «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты». М.: Знак, 2018. С. 353-355; 0,18 п.л. / 0,1 п.л.
14. Абдуллаев, Ж.О. Оценка эффективности позиционирования заготовок в линейных индукционных машинах со встречно бегущими магнитными полями / Ж.О. Абдуллаев, А.Ю. Коняев, М.Е. Зязев // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика: сб. трудов Международной НПК. Екатеринбург: УрФУ, 2018. С. 211-215. [Электронный ресурс]. URL: <https://cloud.mail.ru/public/MTbt/nmHprzkUb>; 0,31 п.л. / 0,15 п.л.
15. Абдуллаев, Ж.О. 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; 0,37 п.л. / 0,1 п.л.
16. Abdullaev, Zh. O. Possibilities of induction heating installations based on three-phase linear inductors / Zh.O. Abdullaev, A.Yu. Konyaev // Актуальные проблемы электромеханики и электротехнологий: сборник научных трудов. Екатеринбург: ФГАОУ ВПО УрФУ, 2017. С. 17-20; 0,25 п.л. / 0,2 п.л.
17. Абдуллаев, Ж.О. Сепараторы для извлечения цветных металлов из твердых коммунальных отходов / А.Ю. Коняев, Ж.О. Абдуллаев, И.А. Коняев // Твердые бытовые отходы. 2017. № 3. С. 36-39; 0,25 п.л. / 0,1 п.л.
18. Абдуллаев, Ж.О. Повышение эффективности переработки лома и отходов кабельной продукции / Ж.О. Абдуллаев, И.А. Коняев, Е.Ю. Обвинцева, А.Ю. Коняев // Система управления экологической безопасностью: сб. трудов XI международной НПК. Екатеринбург: УрФУ, 2017. С. 120-125. [Электронный ресурс]. URL: <http://study.urfu.ru/Aid/Publication/13602/1%D0%A1%D0%A3%D0%AD%D0%91-2017.pdf>; 0,37 п.л. / 0,1 п.л.
19. Абдуллаев, Ж.О. Экспериментальное исследование электродинамических сепараторов для сортировки мелких фракций лома цветных металлов / Ж.О. Абдуллаев, А.Ю. Коняев // Эффективное и качественное снабжение и исполь-

зование электроэнергии: сб. докладов 6-й международной НПК. Екатеринбург: Изд-во УМЦ УПИ, 2017. С. 152-155; 0,25 п.л. / 0,1 п.л.

20. Абдуллаев, Ж.О. Опыт применения электродинамической сепарации в технологиях переработки твердых металлосодержащих отходов / Ж.О. Абдуллаев, А.Ю. Коняев, С.Л. Назаров, Д.Н. Багин, И.А. Коняев // Труды конгресса с международным участием «Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований. Екатеринбург: УрО РАН, 2017. С. 368-372; 0,31 п.л. / 0,1 п.л.

21. Абдуллаев, Ж.О. Повышение эффективности электродинамических сепараторов для извлечения цветных металлов из твердых бытовых отходов / Ж.О. Абдуллаев, А.Ю. Коняев, М.А. Бубнова // Эффективное и качественное снабжение и использование электроэнергии: сб. докладов 5-й международной НПК. Екатеринбург: Изд-во УМЦ УПИ, 2016. С. 99-102; 0,25 п.л. / 0,1 п.л.

22. Абдуллаев, Ж.О. Перспективы применения линейных индукционных машин со встречно бегущими магнитными полями / Ж.О. Абдуллаев, А.Ю. Коняев, С.Л. Назаров, Д.Н. Багин // Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике: материалы II международной НПК. Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2016. С. 194-199; 0,37 п.л. / 0,3 п.л.

23. Абдуллаев, Ж.О. Применение линейных индукционных машин со встречно бегущими магнитными полями / Ж.О. Абдуллаев, А.Ю. Коняев // Федоровские чтения: материалы XLVI Международной НПК. М.: Изд-во МЭИ, 2016. С. 136-138; 0,18 п.л. / 0,15 п.л.

24. Абдуллаев, Ж.О. 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; 0,5 п.л. / 0,1 п.л.

25. Абдуллаев, Ж.О. 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 НПК. Екатеринбург: УрФУ, 2015. С. 118-123. [Электронный ресурс]. URL: <http://study.urfu.ru/view/aidview.aspx?AidId=13253>; 0,37 п.л. / 0,1 п.л.

26. Абдуллаев, Ж.О. Особенности расчета линейных индукционных машин для сепарации измельченных отходов / Ж.О. Абдуллаев, А.Ю. Коняев, С.Л. Назаров, Д.Н. Багин // Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике: материалы I международной НПК. Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2015. С. 196-202; 0,43 п.л. / 0,1 п.л.

27. Абдуллаев, Ж.О. Исследование электродинамического сепаратора с линейным индуктором при повышенных частотах питания / Ж.О. Абдуллаев, А.Ю. Коняев, С.Л. Назаров // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: Сборник материалов Всероссийской НПК. Екатеринбург, 2014. С. 269-271; 0,18 п.л. / 0,1 п.л.

28. Абдуллаев, Ж.О. Экспериментальная оценка простых методов расчета электромагнитного ядра электродинамических сепараторов с бегущим магнитным полем / Ж.О. Абдуллаев, А.О. Батенев, С.Л. Назаров // Актуальные про-

блемы энергосберегающих электротехнологий: сб. науч. трудов. Екатеринбург:
УрФУ, 2014. С. 207-210; 0,25 п.л. / 0,1 п.л.