

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БАШКИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи
УДК 621.313: 621.926

НУГУМАНОВ РАУШАН РИМОВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРИВОДА
ЖЕРНОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ ПРИМЕНЕНИЕМ
ПЛОСКОГО ЛИНЕЙНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

05.20.02 – Электротехнологии и электрооборудование
в сельском хозяйстве

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор Р.С. Аипов

Уфа – 2016

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 СПОСОБЫ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ЗЕРНА И ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЭТОГО ПРОЦЕССА	11
1.1 Классификация измельчающих машин	11
1.2 Анализ конструкций жерновых мельниц	15
1.3 Линейные асинхронные двигатели с вторичным элементом, выполненным в виде диска	23
1.4 Варианты технических решений жерновых мельниц с линейным электроприводом	26
1.5 Варианты компоновки жерновой мельницы с линейным электроприводом для практической реализации	28
1.5.1 Конструкция жерновой мельницы с горизонтальной осью вращения	28
1.5.2 Конструкция жерновой мельницы с вертикальной осью вращения	34
1.6 Выводы по первой главе	36
2 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЖЕРНОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ С ЛИНЕЙНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ	38
2.1 Кинематическая схема жерновой мельницы с линейным электроприводом	38
2.2 Расчет силы, развиваемой линейным асинхронным двигателем	39
2.3 Расчет силы продольного краевого эффекта в линейном асинхронном двигателе	43
2.4 Определение силы вязкого (внутреннего) трения	46
2.5 Определение силы сухого (внешнего) трения	47
2.6 Математическая модель привода без учета электромагнитной	

силы, определяемой продольным краевым эффектом в линейном асинхронном двигателе	48
2.7 Математическая модель жерновой мельницы с учетом продольного краевого эффекта в линейном асинхронном двигателе	49
2.8 Характеристика разгона и частоты вращения подвижного жернова мельницы	56
2.9 Выводы по второй главе	59
3 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИВОДА ЖЕРНОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ С УЧЕТОМ ОБРАБАТЫВАЕМОГО МАТЕРИАЛА И ПАРАМЕТРОВ ДВИГАТЕЛЯ	61
3.1 Общие сведения	61
3.2 Анализ влияния сил сопротивления на частоту вращения жернова мельницы	61
3.3 Исследование характеристик распределения огибающих полей магнитной индукции по длине двигателя	63
3.4 Скорость распространения полей краевого эффекта	67
3.5 Механические характеристики привода в зависимости от приближения, или отдаления индукторов линейного асинхронного двигателя от оси мельницы	70
3.6 Влияние продольного краевого эффекта на силу, развиваемую двигателем в зависимости от числа пар полюсов	72
3.7 Производительность жерновой мельницы с линейным электроприводом	74
3.8 Выводы по третьей главе	76
4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЖЕРНОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ С ЛИНЕЙНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ	77
4.1 Программа и методика экспериментальных исследований	77
4.2 Методика проведения экспериментальных исследований	77
4.3 Описание экспериментальной жерновой мельницы с линейным	

электроприводом	78
4.4 Методика измерений и снятие экспериментальных зависимостей частоты вращения вторичного элемента линейного асинхронного двигателя	81
4.5 Математическая обработка результатов экспериментов	84
4.6 Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований	91
4.7 Выводы по четвертой главе	92
5 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВНЕДРЕНИЯ ПРИВОДА ЖЕРНОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ С ЛИНЕЙНЫМ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ	93
5.1 Расчет экономической эффективности жерновой мельницы с приводом на базе линейного асинхронного двигателя	93
5.2 Технология изготовления индуктора линейного асинхронного двигателя	98
5.3 Пропитка индуктора эпоксидным компаундом	101
5.4 Выводы по пятой главе	103
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ	104
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	106
ПРИЛОЖЕНИЯ	119

ВВЕДЕНИЕ

В современном мукомольном производстве актуальным является сохранение в муке всех минеральных веществ и витаминов. Минеральные вещества сохраняются в муке, помолотой из цельных зерен. В муке обойной и второго сорта содержатся витамины В1, В2, РР и Е, в муке высшего и первого сортов их нет.

В измельчающих машинах, таких как, жерновые поставы (мельницы) зерно подвергается многократному воздействию рабочих поверхностей (жерновов), благодаря чему мука содержит большой процент всех важнейших составляющих зерна.

Для жерновых мельниц характерна низкая частота вращения жерновов (окружная линейная скорость до 10 м/с), а также своя рациональная частота, которая требуется для помола определенного рода зерна. Известно, что при помоле ржи производительность жерновых мельниц может уменьшаться на 15 – 20%, по отношению к помолу пшеницы при одной и той же частоте вращения. Используемые в приводе жерновых мельниц электрические двигатели вращения не позволяют получить требуемую низкую частоту вращения без использования дополнительных передаточных устройств (редукторов, ременных, клиноременных передач и т.п.). Попытки плавного регулирования частоты вращения мельницы применением преобразователей частоты питания, значительно ухудшают эксплуатационные, энергетические и массогабаритные характеристики электропривода. Современный привод жерновой мельницы должен обеспечивать не только получение низкой частоты вращения рабочего органа, но и возможность плавного регулирования его частоты и момента вращения без снижения производительности мельницы.

С этой точки зрения перспективным является применение в приводе жерновой мельницы плоского линейного асинхронного двигателя (ЛАД), обеспечивающего получение регулируемой частоты и момента вращения

жерновов без усложнения конструкции самой мельницы, что представляет собой актуальную научно-техническую задачу.

Тематика работы отвечает «Стратегии развития пищевой и перерабатывающей промышленности РФ до 2020 года» и соответствует разделу государственной программы «Развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2013-2020 годы»: шифр 01.05 «Техническая и технологическая модернизация, инновационное развитие».

Степень разработанности темы исследования. Применением в технологических машинах различного назначения ЛАД занимались и занимаются известные ученые: И. Болдеа, О.Н. Веселовский, А.И. Винокуров, А.И. Вольдек, В.Н. Денисов, А.П. Епифанов, А.Ю. Коняев, Е.Р. Лейтуейт, В.И. Луковников, Ф.А. Мамедов, С.А. Насар, Б.И. Петленко, А.В. Сапсалева, Ф.Н. Сарапулов, Д.В. Свечарник, В.Е. Скобелев, М.М. Соколов и др. Несмотря на значительное количество научных изысканий, посвященных обоснованию внедрения предлагаемых двигателей в различные отрасли технологических машин, задача создания конструктивно более упрощенного, экономически выгодного безредукторного регулируемого электропривода для жерновых мельниц остается не решенной.

Диссертационное исследование направлено на:

- уменьшение конструктивных элементов электропривода;
- внедрение наиболее упрощенного способа регулирования как частоты, так и момента вращения;
- снижение текущих затрат на оборудование.

Цель работы - разработать безредукторный регулируемый электропривод для жерновой мельницы на основе плоского линейного асинхронного двигателя.

Задачи исследования:

- провести анализ возможных конструктивных исполнений приводов жерновых мельниц с ЛАД, выбрать наиболее рациональный для дальнейшей реализации;

- обосновать конструктивно-технологическую схему привода жерновой мельницы и с учетом особенностей ЛАД, измельчаемого материала и режима работы мельницы, разработать математическую модель;

- исследовать процесс регулирования частоты вращения при помоле зерна в жерновой мельнице с плоским ЛАД, выявить основные силы сопротивления, возникающие при работе, уточнить технологические и конструктивные преимущества привода;

- для проверки адекватности математической модели разработать экспериментальный образец жерновой мельницы с линейным электроприводом (ЖМ с ЛЭП), провести экспериментальные исследования, оценить эффективность применения плоского ЛАД в приводе жерновых мельниц;

- определить технико-экономическую эффективность внедрения привода жерновой мельницы с ЛАД в виде промышленного образца.

Объект исследования – технологический процесс регулирования частоты и момента вращения для жерновых мельниц с плоским ЛАД в приводе.

Предмет исследования – закономерности влияния параметров перерабатываемого зерна (масса, трение, род зерна) на процесс регулирования.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

- разработаны алгоритм и методика расчета электромагнитных сил, действующих на вторичный элемент двигателя с учетом специфики физических процессов в индукторе с малым числом полюсов на основе известных аналитических и численных методов расчета плоского ЛАД;

- создана математическая модель жерновой мельницы на основе привода с плоским ЛАД для расчета его производительности с учетом совместного действия электромагнитных и механических сил;

- выявлены закономерности влияния на производительность ЖМ параметров ЛАД и механической части установки.

Новизна технического решения защищена двумя патентами РФ (№ 2482920, 2546860).

Теоретическая значимость работы:

- раскрыты особенности физических процессов в ЖМ с ЛЭП;
- разработаны методика и программа расчета электромагнитных сил с учетом специфики плоского ЛАД;

- разработана методика расчета частоты вращения жерновов ЖМ с ЛЭП, предполагающая решение дифференциального уравнения движения жерновов в квадратурах (при числе пар полюсов индуктора двигателя больше четырех) и численными методами (при числе пар полюсов индуктора двигателя меньше четырех).

Практическая значимость работы:

- создана экспериментальная установка с возможностью многоканальной выдачи и математической обработки на ЭВМ в современных программных продуктах результатов исследований;

- проведенные исследования сил вязкого и сухого трения аналитическими методами, позволяют дать рекомендации по проектированию привода с ЛАД, которые могут быть использованы при инженерных расчетах для различных технологических линий в АПК;

- результаты исследований регулирования частоты вращения вторичного элемента ЛАД внедрены в учебный процесс кафедры «Электрические машины и электрооборудование» ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ по дисциплине «Электропривод» для студентов бакалавров по направлению подготовки «Агроинженерия», профиль «Электрооборудование и электротехнологии»;

- результаты диссертационной работы приняты к внедрению на предприятиях: ОАО «Уфимский хлебозавод №7» и ООО «ИЛИШ – АГРО» Илишевского района, Республики Башкортостан и соответствуют научно –

исследовательской работе ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ с МИП «ЭШАР» на тему: «Повышение эффективности работы жерновой мельницы применением в приводе линейного асинхронного электродвигателя», заключенной по договору № 48 от 13 марта 2015 года, гос. регистрация №01201176549.

Методология и методы исследований. Для исследования поставленных в диссертационной работе задач использованы теория дифференциальных уравнений, теория математического моделирования, метод объектно-визуального моделирования в среде Matlab, метод математической статистики.

Положения, выносимые на защиту:

- алгоритм и методика расчета электромагнитных сил, действующих на вторичный элемент в магнитном поле линейного индуктора с учетом специфики физических процессов в ЛАД с малым числом полюсов (меньше или равно четырем);

- математическая модель жерновой мельницы на основе привода с плоским ЛАД для расчета его производительности с учетом совместного действия электромагнитных и механических сил;

- рекомендации по выбору параметров ЛАД (число пар полюсов, критическое скольжение) и механической части мельницы (зазор между жерновами, диаметр жерновов);

- результаты экспериментальных исследований установки ЖМ с ЛЭП и апробации технологии изменения числа пар полюсов ЛАД.

Степень достоверности и апробация результатов подтверждены экспериментальными исследованиями с доверительной вероятностью 0,95.

Результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на научных конференциях, конкурсах и выставках: LI Международная научно – техническая конференция «Достижения науки - агропромышленному производству» (Челябинск, 2012); Международная научная конференция студентов и молодых ученых (на иностранных языках) «Молодежь и наука»

(Уфа, 2012); Отборочной тур среди университетов в конкурсе «УМНИК» (Уфа, 2012); Всероссийский конкурс на лучшую научную работу среди студентов, аспирантов и молодых ученых вузов Министерства сельского хозяйства РФ по номинации «Агроинженерия» (Уфа, 2013); Весенний тур конкурса «УМНИК» (Уфа, 2013); VI Всероссийская научно - практическая конференция молодых ученых «Наука молодых – инновационному развитию АПК» (Уфа, 2013); Международная научно – практическая конференция в рамках XXIV Международной специализированной выставки «Агрокомплекс – 2014» (Уфа, 2014); LIV Международная научно – техническая конференция «Достижения науки - агропромышленному производству» (Челябинск, 2015); XXV Международная специализированная выставка «Агрокомплекс – 2015» (Уфа, 2015); Серебряная медаль на 17 - й Российской агропромышленной выставке «Золотая осень» (Москва, 2015 г., МВЦ); XI Всероссийская научно - практическая конференция молодых ученых «Наука молодых – инновационному развитию АПК» (Уфа, 2016).

По результатам исследований получены 2 патента РФ на изобретение, опубликовано 10 статей, в том числе 3 статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов по работе, списка использованной литературы, включающей в себя 132 наименования, и 5 приложений. Основное содержание работы изложено на 118 страницах текста, содержит 56 рисунков, 11 таблиц.

1 СПОСОБЫ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ЗЕРНА И ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЭТОГО ПРОЦЕССА

1.1 Классификация измельчающих машин

Измельчающие машины применяют на мукомольных заводах для размола зерна и продуктов его переработки, на комбикормовых заводах для дробления зерновых, минеральных и других компонентов комбикормов.

На мукомольных и комбикормовых заводах измельчающие машины – основное и наиболее энергоемкое технологическое оборудование.

Рабочие органы всех измельчающих машин совершают вращательное движение с окружными линейными скоростями от 4 до 100 м/с и более.

На рисунке 1.1 приведена классификация измельчающих машин в зависимости от их назначения и принципов воздействия рабочих органов на разрушаемый материал [23,40,107,118].

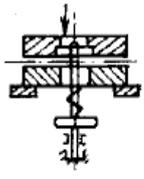
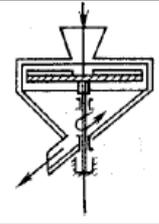
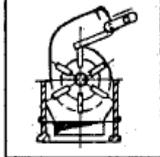
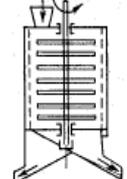
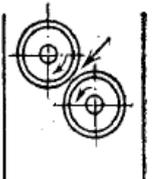
Вальцовый станок	Жерновой постав	Дисковый измельчитель	Молотковая дробилка	Бичевая машина	Плющильный станок
					
Вид воздействия рабочих органов машины на измельчаемый продукт					
Сжатие и сдвиг	Сжатие и сдвиг	Удар	Удар и истирание	Истирание и удар	Сжатие

Рисунок 1.1 Классификация измельчающих машин

Однако прежде всего, из приведенных выше измельчающих машин плющильные станки используются для получения хлопьев и их смеси из различных видов круп, а дисковые измельчители (деташеры) и бичевые

машины используются для измельчения промежуточных продуктов (дунстов) непосредственно после измельчения зерна в вальцовых станке.

Для получения муки, готовой для применения используются три измельчительные машины: молотковая дробилка, вальцовый станок и жерновой постав (мельница)[10,22,47,64,68].

Молотковые дробилки обладают рядом достоинств, которые обусловили возможность широкого применения их во всех отраслях народного хозяйства: простота устройства, высокая надежность в работе, компактность установки, динамичность рабочих режимов, высокие скорости рабочих органов и непосредственное соединение вала машины с электродвигателем [20,76,86].

Наряду с этим молотковым дробилкам свойственны существенные недостатки: высокая энергоемкость, неравномерность гранулометрического состава получаемого продукта с повышенным содержанием переизмельченных частиц, интенсивный износ рабочих органов[24,76,86].

В молотковых дробилках, например, в ДМ-5м (рисунок 1.2) даже очень небольшое смещение центра тяжести ротора от оси вращения вызывает неуравновешенную центробежную силу инерции значительной величины[107].

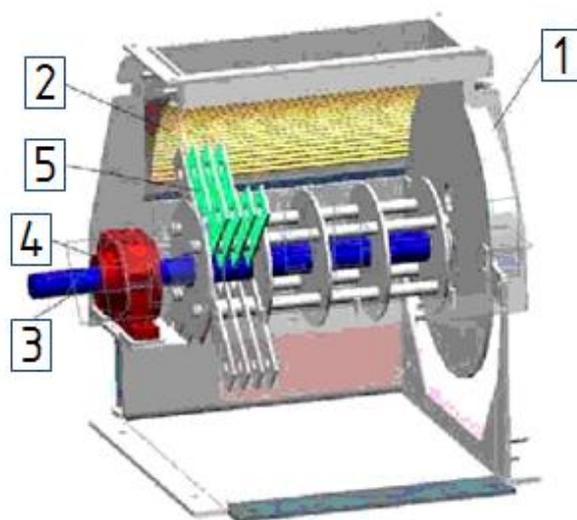


Рисунок 1.2 Молотковая дробилка ДМ-5м: 1 - корпус; 2 - дека; 3 - ротор; 4 - подшипниковая опора; 5 - молотки.

Центробежная сила инерции молотковой дробилки может быть равной силе тяжести ротора:

$$\frac{m \cdot \pi^2 \cdot n^2}{30^2} \cdot e = m \cdot g, \quad (1.1)$$

где m – масса ротора, кг;

n – частота вращения ротора, об/мин;

e – смещение центра тяжести ротора, мм;

g – ускорение свободного падения, м/с².

Так, например, при $n = 3000$ об/мин неуравновешенная центробежная сила инерции станет равной силе тяжести ротора при смещении его центра тяжести от оси вращения всего на 0,1 мм, что видно из равенства:

$$e = \frac{g \cdot 30^2}{\pi^2 \cdot n^2} = \frac{9810 \cdot 30^2}{3,14^2 \cdot 3000^2} \cong 0,1 \text{ мм} \quad (1.2)$$

Следовательно, при конструировании и изготовлении деталей ротора молотковой дробилки необходимо точно соблюдать геометрическую форму деталей, жесткие допуски на посадочные отверстия дисков, молотков и на диаметры деталей, охватываемые отверстиями. Все молотки должны быть расположены строго симметрично по окружности дисков.

Вальцовые станки [11,15,32,100,110] также имеют серьезные недостатки, к числу которых можно отнести:

1. Потери измельчаемого продукта, вызванные неравномерным распределением перерабатываемого зерна по длине питающего вальца, что приводит к его просыпи.

2. Низкое качество размола из-за большого радиального биения вальца, которое может достигать 59 мкм при норме 15 – 20 мкм. Чем больше радиальное биение вальцов, тем ниже качество размола, меньше износостойкость вальцов.

3. Небольшая длина пути измельчения. Длина пути измельчения зависит от диаметра вальцов и составляет примерно 3 – 20 мм.

4. Высокие энергетические затраты, низкий КПД, т.к. на зерно при проходе его через межвальцовое пространство происходит однократное воздействие. Небольшая длина пути измельчения требует использования нескольких станков для получения конечного продукта (муки).

5. Сложность привода вальцового станка. У вальцовых мельниц есть две особенности, которые определяют разработку привода. Первая связана с изменением диаметра вальцов после ремонта (диаметр вальцов, например, для станка А1-БЗН изменяется от 252 до 235 мм). Вторая особенность связана с трудностью зацепления межвальцовой передачи (например, в виде двух косозубых шестерен в станке А1-ЗБН (рисунок 1.3)). С уменьшением диаметра вальцов оптимальность зацепления нарушается, и тогда приходится для определенных диаметров вальцов применять соответствующие пары шестерен. Применение дополнительных пар шестерен на шпонках приводит к появлению повышенного шума, ускоренному износу и поломке отдельных зубьев.



Рисунок 1.3 Вальцовый станок марки А1-ЗБН

Перечисленных выше конструктивных недостатков лишены жерновые поставы или мельницы (рисунок 1.4).



Рисунок 1.4 Жерновая мельница GM - 70 компании «SHELDEM»

В жерновых мельницах зерна измельчаются в пространстве между двумя вращающимися в противоположные стороны, или вращающимся и неподвижным каменными дисками – жерновами. Зерна под воздействием центробежной силы и силы трения перемещаются от центра жерновов к периферии, описывая при этом путь по некоторой спирали. Так как зазор (расстояние между жерновами) меньше размера зерен, они при движении подвергаются многократному сжатию и сдвигу [52,56,59,107]. В результате чего зерна разрушаются и получается мука, сохраняющая все ценные витамины, ароматические вещества и ферменты[6,10,48,75,125], в отличие от помола на вальцовых станках и молотковых дробилках.

1.2 Анализ конструкций жерновых мельниц

В настоящее время устройства для измельчения зерна с каменными жерновами (жерновые мельницы) выпускаются в малых количествах небольшими предприятиями и фирмами, например, в ГУП «Башводмеливодхоз» Республики Башкортостан; немецкими фирмами:

«Hawos», «Schnitzer», «Komo», «Waldner biotech» и австрийской фирмой «Sheldem».

Ниже рассмотрены: мельница жерновая (Агрегат размольный вертикальный с электрическим приводом и жерновами, диаметром 890 мм – модель АВР6 -890) и жерновая мельница фирмы hawos «Pegasus».

Мельница жерновая (Агрегат размольный вертикальный с электрическим приводом – модель АВР6 -890). На рисунке 1.5 показан вертикальный разрез мельницы [88].

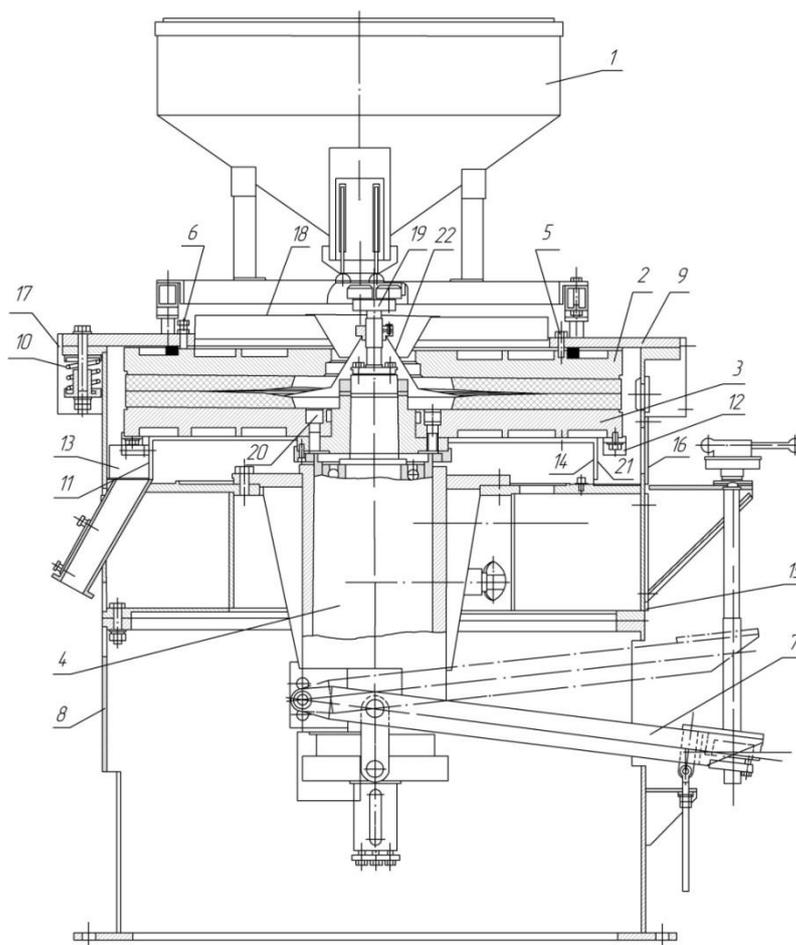


Рисунок 1.5 Вертикальный разрез мельницы: 1- приемный бункер; 2 – верхний жернов; 3 – нижний жернов; 4 – шпиндель; 5,6 – устройства для настройки положения верхнего жернова; 7 – механизм подъема и опускания верхнего жернова; 8 – корпус; 9, 10 - конусы; 11 – вращающийся кожух; 12 – балансировочные грузы; 13 – скребки; 14 – неподвижный кожух; 15 – крышка; 16,17 – пары кронштейнов; 18 – ролики; 19 – колебательное устройство; 20 – крепление нижнего жернова, 21, 22 – кожухи.

Мельница работает следующим образом. Зерно засыпается в приемный бункер 1, на выходе из него имеется дозатор, позволяющий настроить равномерную подачу зерна в жернова независимо от изменения числа оборотов привода.

Верхний жернов 3 неподвижен, а нижний жернов 2 устанавливается на одном конце вала шпинделя 4, другой конец которого соединяется с валом электродвигателя при помощи клиноременной передачи (на рисунке не показан). Для установки параллельности жерновов служит устройство для настройки положения верхнего жернова 5, 6. Для установки рабочего зазора между жерновами, а также для компенсации износа жерновов – нижний жернов 2 кроме вращательного движения имеет поступательное движение вдоль оси шпинделя 4. Для этого в шпинделе имеется пиноль, которой сообщается поступательное движение вдоль оси шпинделя от рычажно – винтового механизма подъема и опускания нижнего жернова 7. Механизм подъема и опускания нижнего жернова является также средством для установки зазора между жерновами. В этом механизме имеется лимб для контроля перемещения нижнего жернова, а также настраиваемый жесткий упор для ограничения перемещения нижнего жернова вверх. При работе мельницы вибрация от колебательного устройства 19 (отдельный привод) передается приемному бункеру 1, предотвращая «слеживание» зерна и обеспечивая его стабильное протекание к жерновам.

На рисунке 1.6 показан электрический двигатель привода жерновой мельницы АВР6 – 890 с клиноременной передачей для изменения частоты вращения нижнего жернова.

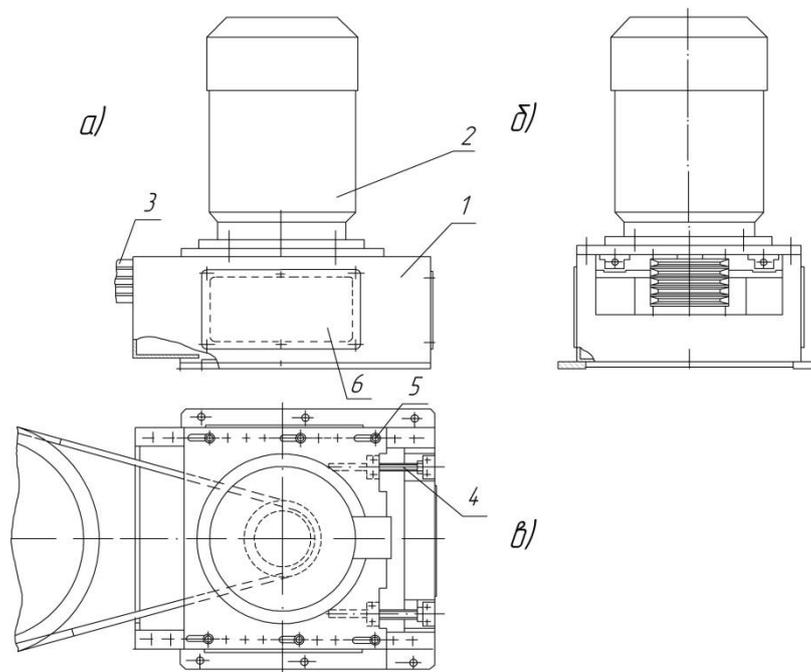


Рисунок 1.6 Электрический привод жерновой мельницы АВР6 – 890:

а) – вид спереди; б) – вид сбоку; в) – вид сверху;

1 – корпус; 2 – асинхронный электродвигатель 5А200М6; 3 – клиноременная передача; 4 – винты; 5 – болты; 6 – защита.

Технические характеристики жерновой мельницы приведены в таблице 1.1

Таблица 1.1 Технические характеристики жерновой мельницы.

Производительность, кг/час	490
Диаметр жерновов, мм	890
Число оборотов верхнего жернова, об/мин	360... 400
Окружная линейная скорость, м/с	16,8
Потребляемая мощность, кВт	22

Мельница фирмы hawos «Pegasus» [125].

Общий вид мельницы показан на рисунке 1.7.

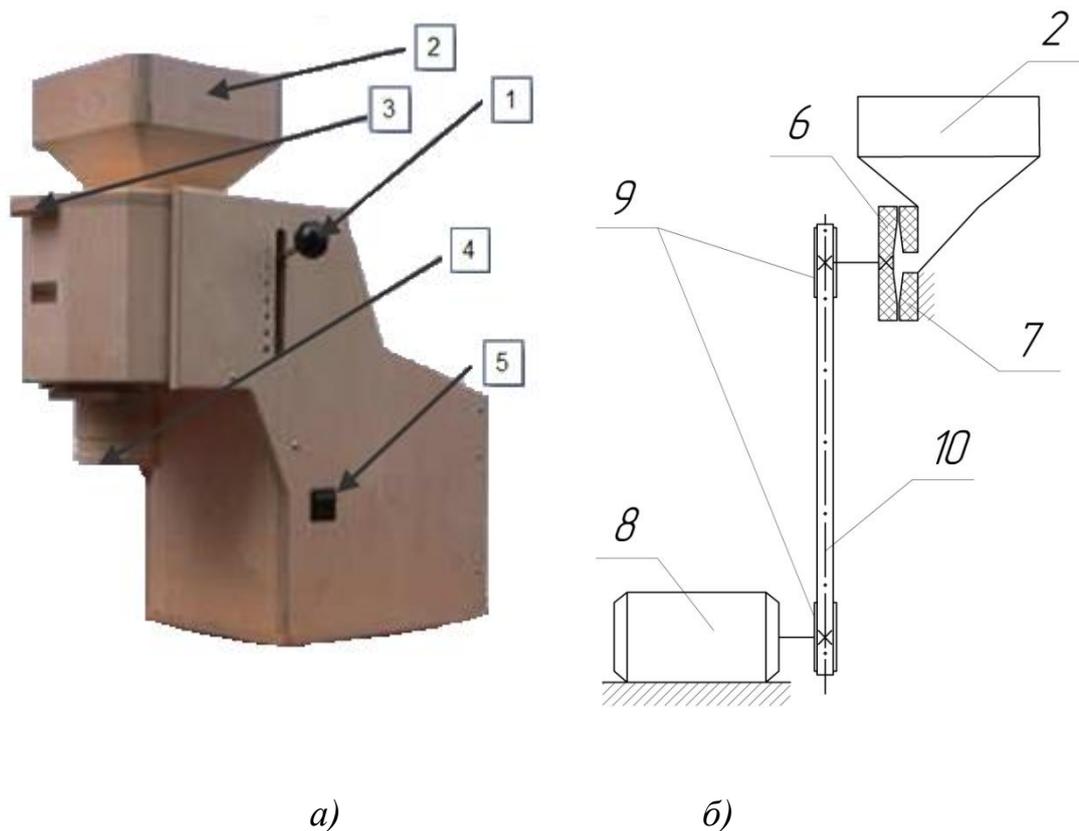


Рисунок 1.7 Мельница для зерна hawos «Pegasus», а – общий вид мельницы:

1 – рычаг настройки помола, 2 – загрузочный бункер; 3 – блокировка бункера для зерна; 4 – отверстие выхода муки; 5 – выключатель питания; б – кинематическая схема: 6 – подвижный жернов; 7 – неподвижный жернов; 8 – электрический двигатель вращения; 9 – шкивы; 10 – ременная передача.

Мельница работает следующим образом. С помощью рычага настройки помола 1 устанавливается степень тонкости помола, посредством изменения зазора между жерновами. Засыпается зерно в загрузочный бункер 2, затем необходимо включить мельницу при помощи выключателя питания 5. После подачи напряжения на обмотки электрического двигателя вращения 8 и через шкивы 9 и ременную передачу 10 вращение передается на подвижный жернов 6.

Отверстие для выхода муки 4 имеет большой размер, чтобы поступающая готовая мука не образовывала заторов. Блокировка 3 служит для снятия загрузочного бункера 2.

Технические данные мельницы для зерна hawos «Pegasus» приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 Технические данные мельницы для зерна hawos «Pegasus»

Производительность, кг/час	10
Диаметр жерновов, мм	125
Окружная линейная скорость, м/с	6,7
Вес, кг	35
Потребляемая мощность, кВт	0,75

В рассмотренных жерновых мельницах в качестве передаточного механизма для передачи механической энергии (движения) от двигателя к исполнительному рабочему органу (жернову) и согласования режимов их работы применяют ременные (клиноременные) передачи.

По сравнению с другими видами передач ременные передачи обладают рядом преимуществ: плавностью и бесшумностью работы, возможностью передачи движения на большие расстояния, предохранением механизмов от резких колебаний нагрузки и при случайных перегрузках, пониженными требованиями к точности изготовления и монтажа, простотой конструкции и эксплуатации, возможностью осуществления бесступенчатого регулирования скорости.

КПД ременных передач составляет $\eta_{рп} = 0,87...0,95$ [53, 109].

Ременным передачам присущи еще и следующие недостатки: повышенные нагрузки на валы и опоры, низкая долговечность ремней, непостоянство передаточного отношения вследствие наличия упругого скольжения ремня по шкиву, большие габаритные размеры, чувствительность нагрузочной способности [12, 53].

Для жерновых мельниц является принципиальным не только возможность получения низкой частоты вращения подвижного жернова, но и остается нерешенным вопрос о необходимости плавного регулирования этой частоты вращения. Как известно, при помоле ржи производительность

жерновых мельниц может уменьшаться на 15 %, при помолу ячменя и овса на 30 % и кукурузы – на 40 % по отношению к помолу пшеницы при одной и той же частоте вращения[59].

Для плавного регулирования частоты вращения асинхронного двигателя можно применить полупроводниковые преобразователи частоты источника питания (частотные преобразователи).

Современные преобразователи частоты источника питания с явно выраженным промежуточным звеном постоянного тока выпускаются с электронными ключами в инверторах, в качестве которых применяются запираемые тиристоры GTO и их усовершенствованные модификации GCT, IGCT, SGCT, и биполярные транзисторы с изолированным затвором IGBT.

Частотные преобразователи на транзисторах IGBT, например, преобразователь ES022[128] по сравнению с тиристорными преобразователями при одинаковой выходной мощности отличается меньшими габаритами, массой, повышенной надежностью в силу модульного исполнения электронных ключей, лучшим теплоотводом с поверхности модуля и меньшим количеством конструктивных элементов.

В преобразователях этого класса используется двойное преобразование электрической энергии: входное синусоидальное напряжение с постоянной амплитудой и частотой выпрямляется в выпрямителе, фильтруется фильтром, сглаживается, а затем вновь преобразуется инвертором в переменное напряжение изменяемой частоты и амплитуды.

Рассматривая тиристор, как полупроводимый прибор: для его включения достаточно подать короткий импульс на управляющий вывод, но для выключения необходимо либо приложить к нему обратное напряжение, либо снизить коммутируемый ток до нуля. Для этого в тиристорном преобразователе частоты требуется сложная и громоздкая система управления. «Резаная» синусоида на выходе преобразователя является источником высших гармоник, которые вызывают дополнительные

потери в электрическом двигателе, перегрев электрической машины, снижение момента, очень сильные помехи в питающей сети [101, 113].

На настоящий момент низковольтные преобразователи на IGBT имеют более высокую цену на единицу выходной мощности, вследствие относительной сложности производства транзисторных модулей, а двойное преобразование энергии приводит к снижению КПД и к ухудшению массогабаритных показателей привода [33, 128].

Кроме того, известно, что при работе устройств для измельчения с жерновами движение рабочего органа представляет собой наложение «быстрых» поворотных колебаний на «медленное» равномерное вращение с некоторой частотой, что повышает эффект помола и способствует удалению муки из рабочей зоны без затруднений (мука не зависает) [13,17,18,19,36,66,88,89].

Это говорит о том, что современный привод жерновой мельницы должен обеспечивать не только получение низкой частоты вращения рабочего органа с возможностью ее плавного регулирования, но и должен обеспечить вращение жернова с одновременной вибрацией. Для создания вибрационного движения в рассмотренных выше мельницах возможно применение дополнительных вибрационных преобразователей движения.

В итоге, КПД привода η_{Π} будет найден из произведений КПД асинхронного двигателя $\eta_{\text{АД}} = 0,7...0,9$; КПД ременной передачи $\eta_{\text{РП}} = 0,9$; КПД преобразователя $\eta_{\text{ПЧ}} = 0,95$ и КПД вибрационного преобразователя движения $\eta_{\text{ВПД}} = 0,65$. Исходя из этого, общий КПД привода будет равен:

$$\eta_{\Pi} = \eta_{\text{АД}} \cdot \eta_{\text{РП}} \cdot \eta_{\text{ПЧ}} \cdot \eta_{\text{ВПД}} = 0,8 \cdot 0,9 \cdot 0,95 \cdot 0,65 = 0,44. \quad (1.3)$$

Как видно, из выражения (1.3) КПД привода складывается из КПД ряда устройств, которым, кроме перечисленных достоинств, присущи еще и существенные недостатки.

1.3 Линейные асинхронные двигатели с вторичным элементом, выполненным в виде диска

Найти выход из создавшейся ситуации можно, заменив электрический двигатель вращения плоским линейным асинхронным двигателем (ЛАД).

Плоский ЛАД имеет две конструктивные разновидности: двухсторонний (рисунок 1.8, а) и односторонний (рисунок 1.8, б) [3,4,7,14,26,31,54,62,80,102,103,105,108,117]. В двухстороннем ЛАД вторичный элемент (2) (у двигателей вращения – ротор) перемещается в зазоре между двумя противоположно расположенными индукторами (1) (у двигателей вращения – статор) (рисунок 1.8, а).

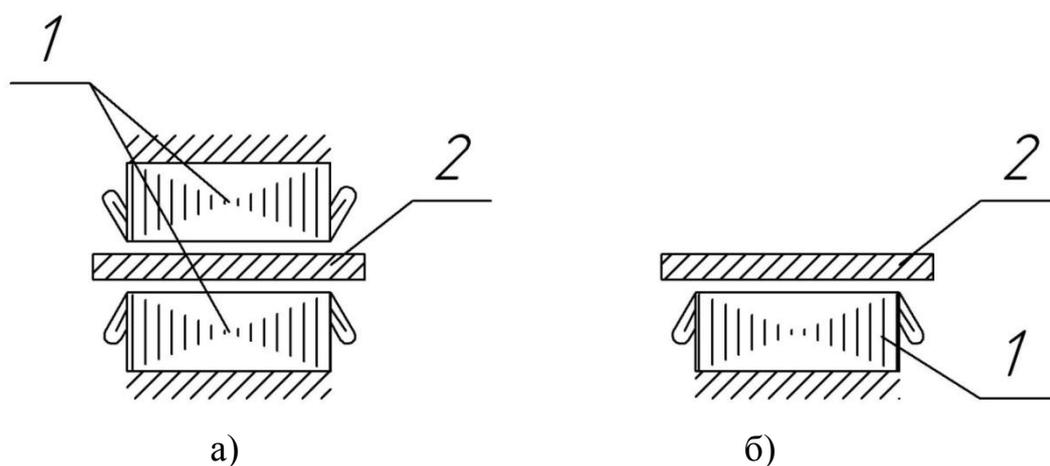


Рисунок 1.8 Конструктивные разновидности ЛАД:

а – двухсторонний; б – односторонний;

1 – индуктор; 2 – вторичный элемент.

Эти двигатели используются в основном для поступательного движения. Однако, если, вторичный элемент ЛАД изготовлен из медного или алюминиевого диска, и закреплен на оси, то диск будет совершать вращательное движение вокруг своей оси (рисунок 1.9) [26,103,117].

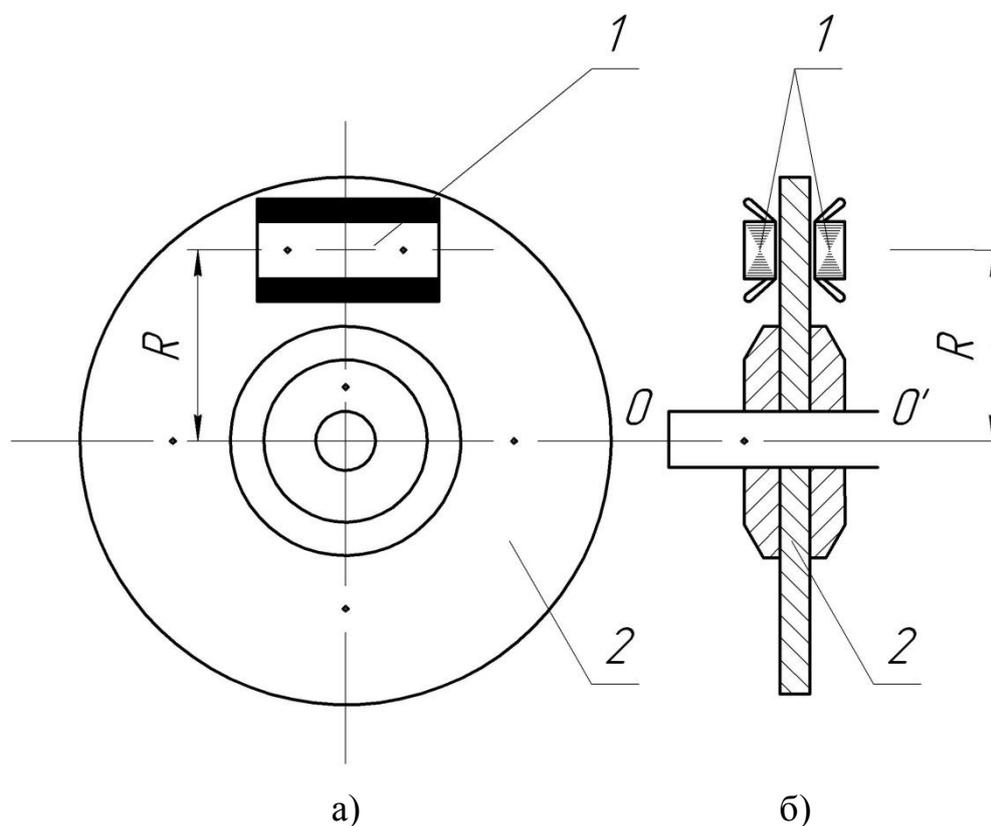


Рисунок 1.9 Двухсторонний ЛАД с вторичным элементом, выполненным в виде медного или алюминиевого диска: а – вид сверху; б – вид сбоку; 1 – индукторы ЛАД, 2 – вторичный элемент (диск); R – расстояние между осью ЛАД и диском.

В настоящее время большинство ЛАД находят применение при низких скоростях (скорость перемещения вторичного элемента относительно первичного или наоборот меньше 10 м/с) [4,69,70], что удовлетворяет окружной скорости жерновых мельниц [20,24].

Преимуществами ЛАД с вторичным элементом, выполненным в виде медного или алюминиевого диска перед двигателями вращения является возможность без усложнения конструкции плавного регулирования частоты вращения диска, изменением (R) расположения индукторов ЛАД (1) относительно оси диска OO' (рисунок 1.9). С приближением индукторов к оси диска OO' , частота вращения диска (2) увеличивается, и наоборот, отдаляя индукторы от оси диска, частота его вращения уменьшается [8,90]. Обмотки индукторов ЛАД можно включать друг с другом последовательно или

параллельно. При параллельном соединении обмоток индукторов происходит увеличение момента, развиваемого ЛАД в два раза. При последовательном соединении обмоток индукторов происходит увеличение числа пар полюсов ЛАД в два раза, следовательно, уменьшение частоты вращения диска в два раза, так как длина индуктора ($L_{ст}$) определяется по радиусу алюминиевого диска (R), исходя из его максимально возможной частоты вращения (n_{max}) по выражению [90,117]:

$$L_{ст} = 2p \cdot \frac{\pi R n_{max}}{60f}, \quad (1.4)$$

где p – число пар полюсов индуктора;

f – частота источника питания трехфазной системы напряжений, Гц.

Тем самым появляется возможность дополнительного регулирования частоты вращения и момента развиваемого ЛАД.

Для получения наименьшей частоты вращения диска с небольшим уменьшением силы ЛАД при двухстороннем исполнении есть возможность включения только одного из индукторов ЛАД к источнику питания, второй при этом будет обеспечивать замыкание магнитных силовых линий работающего индуктора.

Наличие у всех ЛАД разомкнутого магнитопровода конечной длины приводит к появлению продольных краевых эффектов (ПКЭ) [25,26,29,30,80,87,108,122,124,132]. ПКЭ проявляются на концах магнитопровода ЛАД в виде возникновения помимо бегущего магнитного поля стоячих волн этого поля. Вследствие ПКЭ сила, развиваемая двигателем обусловлена волной ПКЭ, которая содержит составляющую с удвоенной частотой колебаний, среднее значение которой равно нулю [108,124]. Проявление ПКЭ при работе ЛАД тем выше, чем меньше p , ПКЭ необходимо учитывать при $p \leq 4$ [26].

В устройствах для измельчения с жерновами наличие быстрых поворотных движений, кроме основного равномерного вращения предотвращает залипание муки в рабочей зоне (мука не зависает) [13,88,89].

1.4 Варианты технических решений жерновой мельницы с линейным электроприводом

Возможные варианты технических решений применения плоского ЛАД в приводе жерновой мельницы показаны на рисунке 1.10.

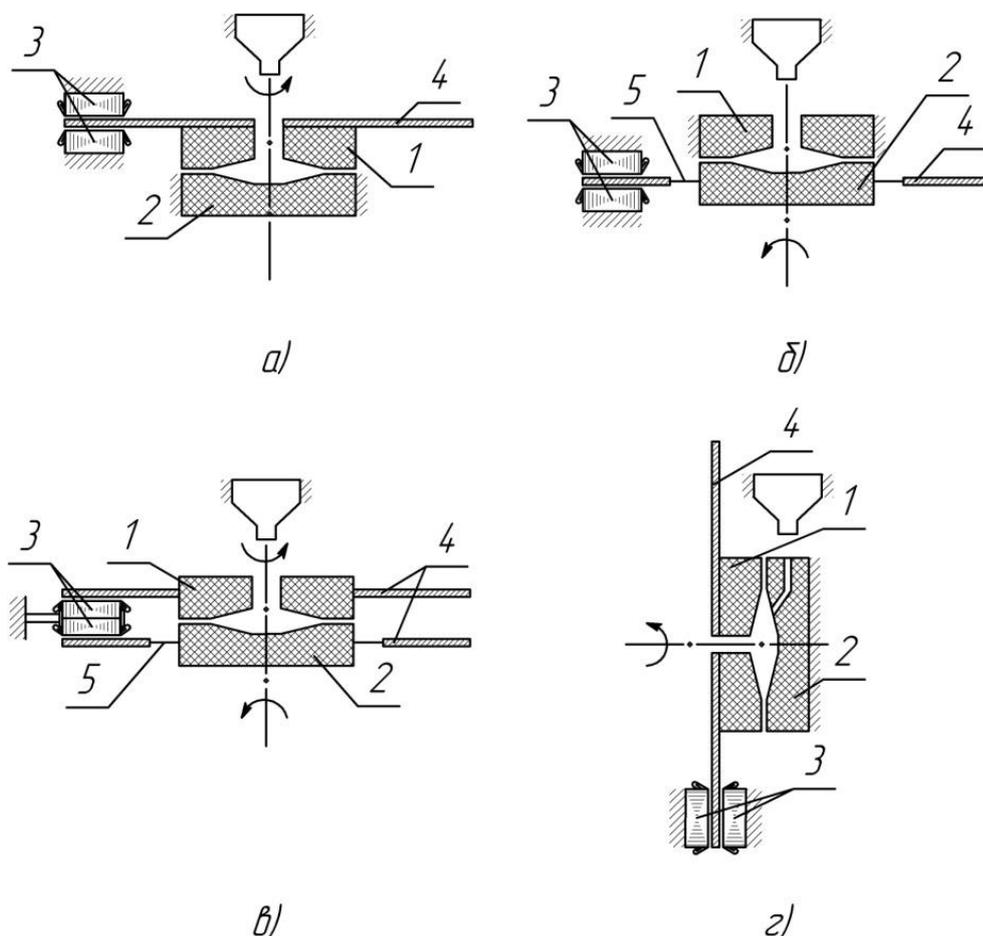


Рисунок 1.10 Варианты технических решений ЖМ с ЛЭП: а, б, в – мельницы с вертикальной осью вращения жерновов; г – мельница с горизонтальной осью вращения жерновов;

1 - верхний жернов, 2 – нижний жернов, 3 – индукторы плоского ЛАД, 4 – вторичный элемент ЛАД, 5 – отверстия для выхода муки

Применение ЛАД в приводе жерновой мельницы позволяет не только приводит в движение один из рабочих органов технологической машины (рисунок 1.10, а, б, г), но и оба рабочих органа в разном направлении (рисунок 1.10, в).

Жерновые мельницы по конструктивному исполнению с применением ЛАД в приводе можно разделить на 4 вида:

1) с вертикальной осью вращения, вращающимся верхним жерновом (рисунок 1.10, а);

3) с вертикальной осью вращения, вращающимся нижним жерновом (рисунок 1.10, б);

3) с вертикальной осью вращения, вращающимися верхним и нижним жерновами (рисунок 1.10, в);

4) с горизонтальной осью вращения (рисунок 1.10, г).

Мельницы с вертикальной осью вращения, вращающимся верхним жерновом (рисунок 1.10, а) получили в свое время широкое распространение, так как здесь имеет место малое давление на основание мельницы. Зерно раздавливается весом камня, так что на основание мельницы приходится разность сил.

Основное достоинство конструкции применения ЛАД в приводе жерновых мельниц с вертикальной осью вращения, с вращающимся нижним жерновом (рисунок 1.10, б) будет состоять в том, что зерно сыпется на нижний вращающийся жернов и под действием центробежных сил выходит наружу, что будет давать более высокую производительность, чем у конструкции мельниц с вертикальной осью вращения, вращающимся верхним жерновом (рисунок 1.10, а). Основным их недостатком будет являться большая вертикальная нагрузка на основание мельницы, состоящая из суммы сил тяжести камня и давления, необходимого для измельчения зерна. Затруднения также могут возникнуть при регулировке и контроле параллельности камней. Всякий перекокс ввиду очень близкого расположения жерновов при размоле зерна в муку становится весьма «чувствительным».

Полагаясь на результаты проведенных опытов для жерновых мельниц с горизонтальной осью вращения и электрическим двигателем вращения в приводе [56], можно предположить, что применением ЛАД в приводе мельниц с вертикальной осью вращения, с вращающимися верхним и нижним

жерновыми (рисунок 1.10, в) возможно повысить производительность данной мельницы на 33,5 % больше варианта конструкции мельницы с вращающимся только верхним жерновом на 20,2 % больше варианта конструкции мельницы с вращающимся только нижним жерновом [59].

Конструкция жерновой мельницы с горизонтальной осью вращения и с ЛАД в приводе (рисунок 1.10, г) требует большей частоты вращения, чем мельница с вертикальной осью вращения из-за отсутствия центробежных сил в следствие чего, может применяться с жерновом небольшого диаметра [125].

Коэффициент полезного действия (КПД) ЛАД, исходя, из опыта проектирования находится в пределах $\eta = 0,5 \dots 0,6$ [14,49,116, 120,126,127], что меньше чем у аналогичных электрических двигателей вращения (0,7...0,9) [50, 60, 111,112]. Однако, если рассматривать КПД привода с электрическими двигателями вращения, дополнительным оборудованием для передачи, регулирования и преобразования частоты вращения ($\eta = 0,44$), то применением ЛАД в приводе жерновых мельниц можно не только повысить КПД привода в целом, но и устранить все негативные факторы дополнительного оборудования, указанные выше.

1.5 Варианты компоновки жерновой мельницы с линейным электроприводом для практической реализации

1.5.1 Конструкция жерновой мельницы с горизонтальной осью вращения

На основе вариантов технических решений, представленных на рисунке 1.10, была разработана конструкция привода жерновой мельнице с горизонтальной осью вращения [2,84], на которую получен патент [90].

Мельница содержит корпус 1 с загрузочными и разгрузочными окнами /на рис. 1.11, 1.12 не показаны/. Внутри корпуса 1 на оси 2 на

подшипниковой опоре 3 установлен средний вращающийся жернов 4, на плоских поверхностях которого имеются канавки 5 различной конфигурации. Жернов 4 связан с приводом вращения. Привод вращения выполнен в виде плоского двухстороннего линейного асинхронного двигателя (ЛАД), имеющего индукторы 6 и 7. Индукторы 6 и 7 установлены с двух сторон вторичного элемента 8 ЛАД. Вторичный элемент 8 ЛАД, выполнен в виде диска, из электропроводного материала, например, алюминия и жестко закреплен на среднем жернове 4. Индукторы 6 и 7 установлены неподвижно на раме 9, которая закреплена жестко на винте 10, а сам винт 10 вставлен в отверстие на корпусе 1 и законтрогаен гайками 11 и 12. Для исключения проворачивания относительно корпуса 1, рама 9 имеет выступы, подвижно вставленные в корпус 1. Такое решение (как вариант) обеспечивает возможность перемещения индукторов 6 и 7 ЛАД относительно алюминиевого диска по его радиусу. При необходимости перемещения индукторов 6 и 7 гайки 11 и 12 откручиваются в ту или иную сторону в зависимости от направления необходимого перемещения индукторов. На резьбовых участках оси 2 расположены два боковых неподвижных жернова 13, 14, причем таким образом, что неподвижный жернов 13 установлен на участке с правой резьбой, а неподвижный жернов 14 на участке с левой резьбой. Боковые неподвижные жернова 13, 14, имеющие канавки 15 различной конфигурации на плоских поверхностях, зафиксированы гибкими элементами 16, 17, в которых заложены упругий элемент 18. Гибкие элементы 16, 17 охватывают неподвижные жернова 16, 17, барабаны 19, 20 и соединяют их с фиксирующими устройствами 21, 22, например, с червячными редукторами. Каналы 23, 24 для подачи материала в рабочую зону выполнены в боковых неподвижных жерновах 13, 14 в виде сообщающихся каналов 25, 26 и 27, 28, направленными в противоположные стороны, и снабжены затворами 29 и 30.

На рисунке 1.11 показан общий вид (вид сверху) конструкции применения ЛАД в жерновой мельнице с горизонтальной осью вращения для измельчения зерна.

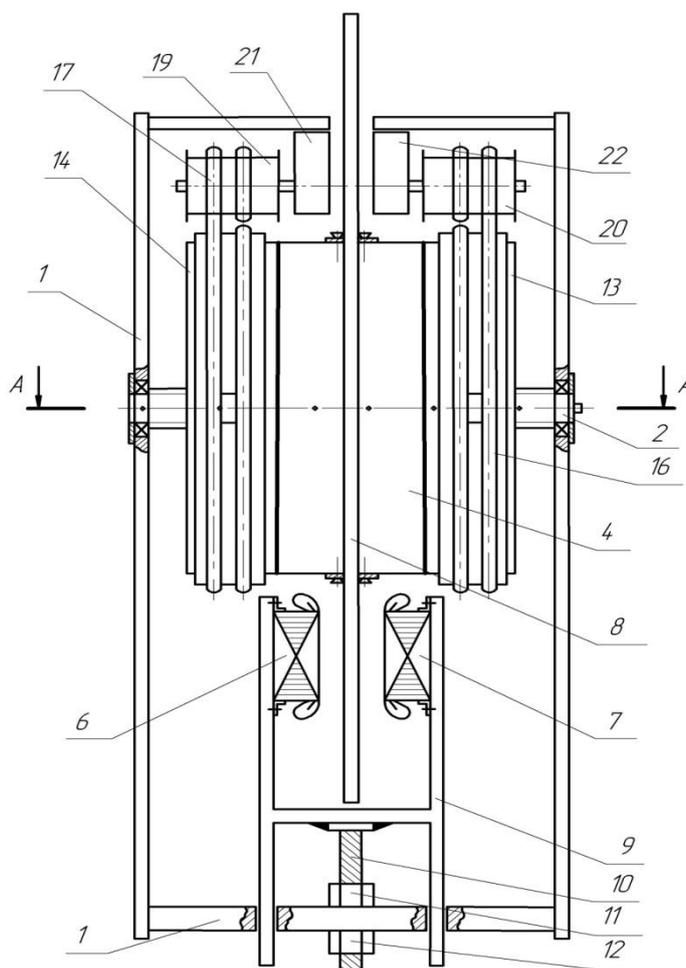


Рисунок 1.11 Общий вид конструкции применения ЛАД в жерновой мельнице с горизонтальной осью вращения для измельчения зерна: 1 – корпус; 2 – ось; 4 – средний жернов; 6,7 – индукторы плоского двухстороннего линейного асинхронного двигателя (ЛАД); 8 – вторичный элемент ЛАД (алюминиевый диск); 9 – рама; 10 – винт; 11,12 – гайки; 13,14 – неподвижные жернова; 16,17 – гибкие элементы; 19,20 – барабаны; 21,22 – фиксирующие элементы.

На рисунке 1.12 показан разрез А – А конструкции по рис.1.11.

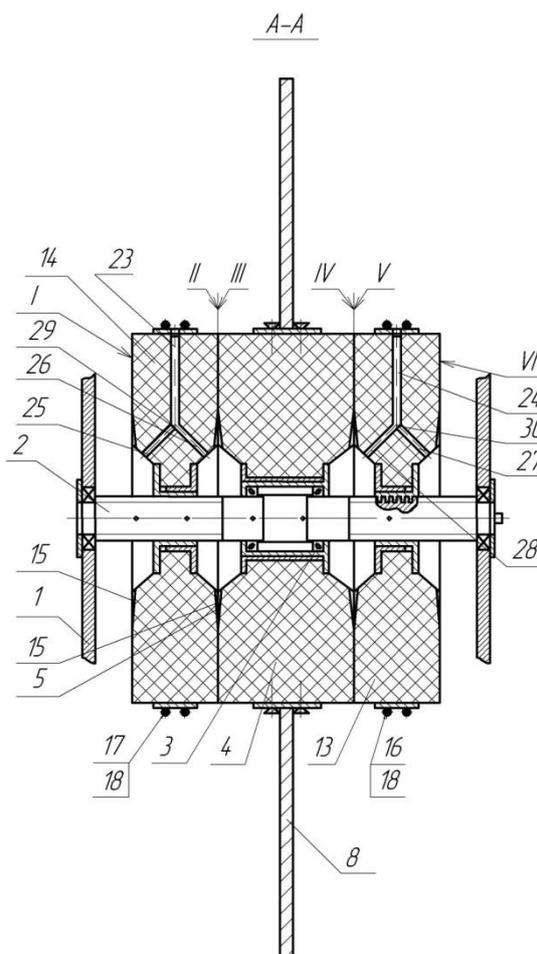


Рисунок 1.12 Разрез А – А конструкции применения ЛАД в жерновой мельнице с горизонтальной осью вращения для измельчения зерна: I, II, III, IV, V - поверхности жерновов с различной толщиной зазора; 2 – ось; 3 - подшипниковая опора; 4 – средний жернов; 5 – канавки среднего жернова; 8 – вторичный элемент ЛАД (алюминиевый диск); 13,14 – неподвижные жернова; 15 – канавки неподвижных жерновов, 16,17 – гибкие элементы; 18 – упругий элемент; 23,24 – каналы для подачи зерна в рабочую зону; 25,26,27,28 – сообщающиеся каналы; 29,30 – затворы.

Мельница для измельчения зерна работает следующим образом. При подаче блоком управления /на рис. 1.11 не показан/ трехфазной системы напряжений на обмотки индукторов 6 и 7 ЛАД, индукторы создают бегущие магнитные поля. Направление этих полей должно быть одинаковым. Под действием бегущих магнитных полей во вторичном элементе 8 появляются

электродвижущие силы и как следствие токи. При взаимодействии токов алюминиевого диска 8 с бегущими магнитными полями создается электромагнитная сила, приложенная к диску и направленная в сторону бегущего поля. Под действием этой силы диск 8 начинает вращаться относительно индукторов 6 и 7, передавая вращение среднему жернову 4. Материал, подлежащий измельчению, подается через загрузочные окна и каналы 23, 24 и 26, 28 в рабочую зону, образованную соприкасающимися поверхностями II, III и/или IV, V среднего вращающегося жернова 4 и боковых неподвижных жерновов 13, 14. При вращении жернова 4 зерно, попав в рабочую зону превращается в муку, которая сходит с периферии плоских поверхностей жерновов 4, 13, 14 и поступает к разгрузочным окнам /на рис. 1.8, 1.9 не показаны/. В период помолы зерна при превышении расчетного крутящего момента от вращающегося среднего жернова 4, т.е. при попадании в рабочую зону любого твердого постороннего предмета, автоматически отворачиваются боковые неподвижные жернова 13, 14 по резьбе, увеличивая тем самым зазор между мелющими поверхностями. Это достигается тем, что момент вращения среднего жернова 4 направлено навстречу направлению захода резьбы для правого и левого боковых жерновов 13, 14. В результате чего создается между ними противоположно отталкивающие силы, которые обеспечивают автоматическое отворачивание боковых неподвижных жерновов 13, 14 посредством гибких элементов 16, 17. При изменении противоположно отталкивающие сил в сторону уменьшения критического значения происходит автоматическое закручивание боковых жерновов 13, 14 к жернову 4 за счет гибких элементов 16, 17, в которых находится упругий элемент 18, выполняющий роль демпфера. Это возможно благодаря тому, что гибкие элементы 16, 17 связаны с фиксирующими устройствами 21, 22, например, червячными редукторами, которые предназначены для фиксации первоначального натяжения гибких элементов 16, 17, т.е. рассчитаны на определенное усилие /в зависимости от мелющегося материала/. Фиксирующие устройства

позволяют отслеживать усилия по нагрузке за счет гибких элементов 15, 16 с упругим элементом 18 и резьбового исполнения оси 2. Кроме того, за счет установки неподвижных жерновов 13, 14 на резьбовых участках оси 2, можно быстро изменить расположение поверхностей с различной зернистостью и регулировать помол зерна, так как тонкость помола зависит от толщины зазора между поверхностями жерновов 4, 13, 14 /II и III, I и III, IV и V, VI и IV/. При установке неподвижных жерновов 13, 14 для работы меняют положение затворов 29, 30, тем самым регулируя направление потока к той или другой плоской поверхности.

Для перестановки неподвижных жерновов 13, 14 или одного из них необходимо ослабить гибкие элементы 16, 17, при помощи фиксирующих устройств 21, 22, затем снять их. После этого отвернуть по резьбе боковой неподвижный жернов 13 или 14, или оба и затем снять их. Сборка производится в обратной последовательности. Плоские поверхности жерновов 4, 13, 14 изготовлены с различной зернистостью, например, поверхности II, III - крупнозернистые, IV, V мелкозернистые, и I средней зернистости и т.д. Это позволяет молоть любое зерно /пшеницу, рожь, ячмень, овес, гречиху и т.п./ различного сорта.

Плавное регулирование частоты вращения в мельнице возможно посредством изменения расположения индукторов 6 и 7 ЛАД относительно оси среднего жернова 4. Приближая индукторы 6 и 7 к оси жернова 4, частота его вращения увеличивается, и наоборот, отдаляя индукторы 6 и 7 от оси жернова 4, частота его вращения уменьшается.

Блок управления должен иметь возможность включения обмоток индукторов 6 и 7 к источнику питания параллельно или последовательно друг с другом, включение обмоток только одного или другого индуктора. При включении только одного из индукторов ЛАД к источнику питания, второй обеспечивает замыкание магнитных силовых линий работающего индуктора. Развиваемый момент ЛАД и частота вращения его вторичного элемента (среднего жернова) определяются техническими параметрами

индуктора (длина, число пар полюсов). При параллельном соединении обмоток индукторов 6 и 7 происходит увеличение момента, развиваемого ЛАД в два раза. При последовательном соединении обмоток индукторов 6 и 7 происходит увеличение числа пар полюсов ЛАД в два раза, следовательно, уменьшение частоты вращения диска в два раза. Тем самым появляется возможность дополнительного регулирования момента и частоты вращения развиваемого ЛАД.

При работе ЛАД имеют место краевые эффекты, которые выражаются в виде наложения высокочастотных колебаний электромагнитной силы на основную. Краевые эффекты значительны при $p \leq 4$ [25,26,30,121].

В связи с тем, что число пар полюсов индукторов равно 2 (при последовательном соединении – 4) вращающийся средний жернов будет совершать вращение с быстрыми одновременными поворотными движениями, что способствует удалению муки из рабочей зоны без затруднений (мука не зависает).

1.5.2 Конструкция жерновой мельницы с вертикальной осью вращения

На базе варианта технического решения (рисунок 1.10, в) была разработана конструкция привода жерновой мельницы с вертикальной осью вращения, защищенная патентом [91], имеет горизонтально расположенные и подвижные друг относительно друга на оси жернова и диски (вторичные элементы ЛАД), каждый из которых взаимодействует со своим индуктором и жерновом, причем индукторы ЛАД установлены между дисками, а обмотки одного индуктора являются продолжением обмоток другого. Применение такого ЛАД приводит к упрощению конструкции устройства и увеличению производительности, как было упомянуто выше.

Кинематическая схема жерновой мельницы с вертикальной осью вращения жерновов на базе ЛАД, показана на рисунке 1.10.

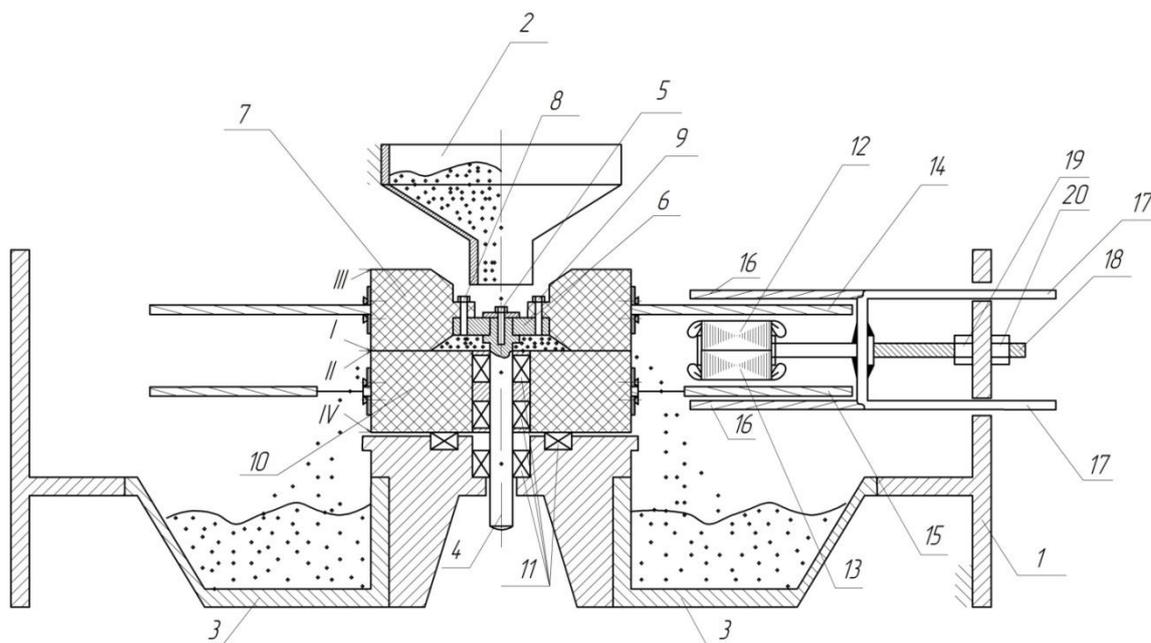


Рисунок 1.13 Конструкция жерновой мельницы с вертикальной осью вращения, вращающимися верхним и нижним жерновами: 1 – корпус, 2 – загрузочный бункер, 3 – приемные емкости, 4 – ось, 5 – осевой болт, 6 – крестовина, 7 – верхний жернов, 8,9 – болты, 10 – нижний жернов, 11 – подшипниковая опора, 12,13 – индукторы ЛАД, 14,15 – вторичные элементы ЛАД, выполненные в виде дисков, 16 – ферромагнитные элементы, 17 – рама, 18 – винт, 19,20 - гайки, I,II,III,IV – мелющие поверхности жерновов.

Мельница работает следующим образом [9]. При подаче блоком управления трехфазной системы напряжений на обмотку индукторов 12 и 13 ЛАД, индукторы создают бегущие магнитные поля. Так как обмотки одного индуктора являются продолжением другого бегущие магнитные поля будут противоположно направленными. Под действием бегущих магнитных полей, которые замыкаются в ферромагнитных элементах 16, в дисках 14 и 15 появляются электродвижущие силы и как следствие токи. При взаимодействии токов дисков 14 и 15 с бегущими магнитными полями создаются электромагнитные силы, приложенные к дискам и направленные в сторону бегущих полей. Под действием этих сил диски 14 и 15 начинают вращаться относительно индукторов 12 и 13 в противоположные стороны, передавая вращение жерновам 7 и 10. Материал, подлежащий измельчению,

поступает через загрузочный бункер 2 и отверстия в крестовине 6 в рабочую зону, образованную мелющими поверхностями I, II и/или III, IV жерновов. При вращении жерновов в противоположные стороны зерно, попав в их рабочую зону превращается в муку, которая сходит с периферии мелющих поверхностей жерновов и поступает через отверстия диска 15 к приемным емкостям 3. Одновременно с этим при попадании в рабочую зону жерновов постороннего предмета, верхний жернов 7 на оси 4 приподнимается, увеличивая тем самым зазор между мелющими поверхностями и без повреждения жерновов посторонний предмет центробежными силами выбрасывается наружу.

1.6 Выводы по первой главе

1. Произведен обзор существующих измельчающих машин, в результате которого были выявлены их достоинства и недостатки. Сделан вывод о целесообразности применения жерновых мельниц в производстве муки, богатой минеральными веществами и витаминами.

2. Установлено, что для жерновых мельниц в зависимости от перерабатываемого рода зерна, необходимы низкая частота вращения жерновов (окружная линейная скорость до 10 м/с) и плавное ее регулирование. Используемые в приводе жерновых мельниц электрические двигатели вращения не позволяют получить требуемую низкую частоту вращения без использования дополнительных передаточных устройств (редукторов, ременных, клиноременных передач и т.п.). Попытки плавного регулирования частоты вращения мельницы применением преобразователей частоты ухудшают эксплуатационные, энергетические и массогабаритные характеристики электропривода. В целом, общий КПД такого привода не превышает 0,44.

3. Выявлено, что использование в приводе жерновой мельницы плоского линейного асинхронного двигателя позволяет не только плавно регулировать

частоту и момент вращения жерновов, но и из-за присутствия в ЛАД краевых эффектов предотвратить залипание муки в рабочей зоне жерновов (патенты РФ на изобретение № 2482920, 2546860). Сформулированы цель и задачи работы.

2 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЖЕРНОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ С ЛИНЕЙНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

2.1 Кинематическая схема жерновой мельницы с линейным электроприводом

В варианте мельницы с вертикальной осью вращения, вращающимся верхним жерновом (рисунок 1.10, а), зерно раздавливается весом камня и на основание приходится малое давление, конструкция привода становится более надежной. Данный вариант компоновки ЖМ с ЛЭП взят за основу при последующих расчетах. На рисунке 2.1, б приведена расчетная схема, полученная по 3-D модели (рисунок 2.1, а).

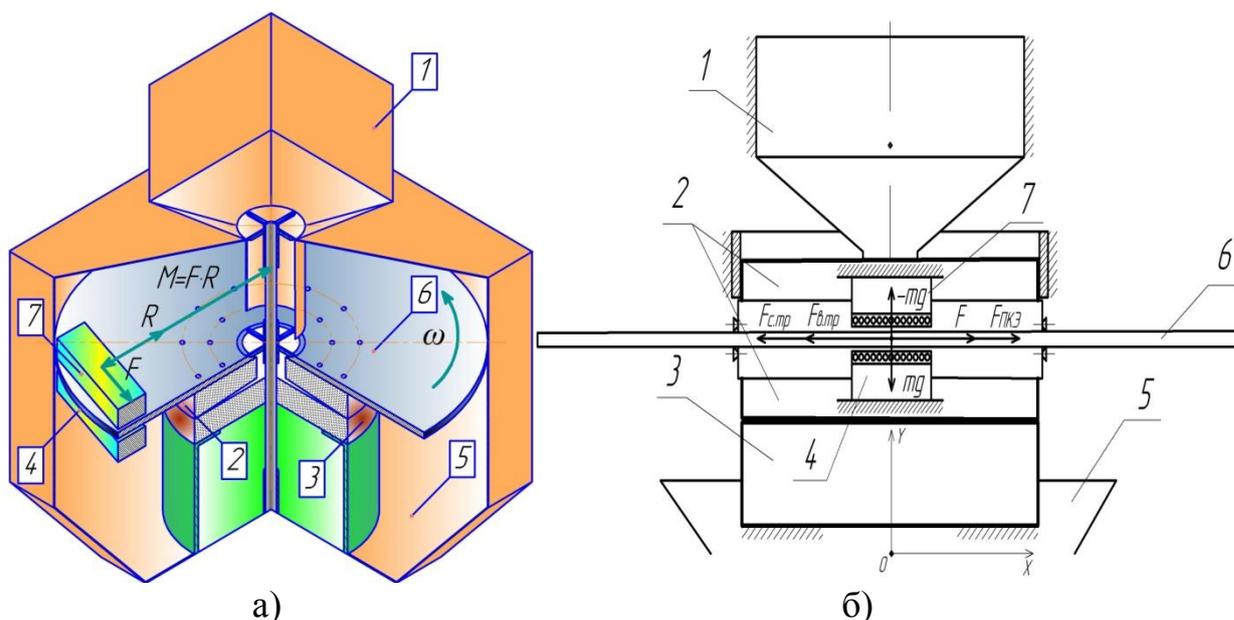


Рисунок 2.1 Схема ЖМ с ЛЭП: а) – 3-D модель; б) – расчетная схема: 1 - загрузочный бункер; 2 – верхний подвижный жернов; 3 – нижний неподвижный жернов; 4,7– индукторы ЛАД; 5 - разгрузочный бункер; 6 – вторичный элемент ЛАД; M – момент вращения, $H \cdot м$; ω – угловая частота вращения, $рад/с$; F – сила, развиваемая ЛАД, без учета продольного краевого эффекта, H ; $F_{пкэ}$ – сила продольного краевого эффекта в ЛАД; $F_{в.тр}$ – сила вязкого (внутреннего) трения, H ; $F_{с.тр}$ – сила сухого (внешнего) трения, H .

При подаче блоком управления трехфазного напряжения питания на обмотки индукторов 4 и 7 ЛАД, возникает электромагнитная сила, приложенная к вторичному элементу (диск) 6, диск перемещается относительно индукторов, передавая вращение верхнему подвижному жернову 2. Электромагнитной силе F_{Σ} (суммарная сила, состоящая из F и $F_{ПКЭ}$) противодействуют силы сопротивления [50, 58, 98, 102]: сила вязкого (внутреннего) трения $F_{в.тр}$, возникающая в рабочей зоне мельницы в результате трения между зернами и сила $F_{с.тр}$, которая возникает при трении зерна об верхний подвижный жернов 2 и нижний неподвижный жернов 3.

Уравнение, описывающее движение рабочего органа (жернова) может быть представлено в виде [1,5, 81,83]:

$$J \frac{d\omega}{dt} = F \cdot R + F_{ПКЭ} \cdot R - F_{в.тр} \cdot R \cdot k_{np} - F_{с.тр} \cdot R \cdot k_{np}, \quad (2.1)$$

где J – момент инерции вторичного элемента ЛАД, $кг \cdot м^2 / с^2$;

F – сила, развиваемая ЛАД, без учета продольного краевого эффекта, H ;

$F_{ПКЭ}$ – сила продольного краевого эффекта в ЛАД, H ;

$F_{в.тр}$ – сила вязкого (внутреннего) трения, H ;

$F_{с.тр}$ – сила сухого (внешнего) трения, H ;

R – расположение индукторов ЛАД от оси жернова, $м$;

k_{np} – приведенный коэффициент.

2.2 Расчет силы, развиваемой линейным асинхронным двигателем

Для исследования ЛАД применяются различные модели, отличающиеся разным уровнем допущений и сложности вычислений. Можно выделить следующие типы моделей [103]:

-на основе теории поля: метод конечных разностей и метод конечных элементов [51, 80]. Они позволяют более корректно учесть конструктивные особенности ЛАД: различие магнитных свойств среды активной зоны и зон

шунтирования, неравномерность воздушного зазора, дискретность распределения намагничивающей силы первичной обмотки. Общим недостатком многомерных моделей, базирующихся на теории поля, является их сложность и громоздкость, требующая использования ЭВМ с большими памятью и быстродействием.

-на основе теории цепей: схемы замещения; Е-Н-четырёхполюсники; цепи с распределенными параметрами; детализированные магнитные схемы замещения [29]. Вышеназванные методы, как правило, распространяются на статические и динамические режимы работы ЛАД, однако не позволяют учесть влияние нормальных сил на характеристики ЛАД.

Привод в жерновой мельнице работает в установившемся режиме, поэтому расчет силы, развиваемой ЛАД можно произвести на основе его электрической схемы замещения (рисунок 2.2) [7,42,65,72,92,93, 103,106,120].

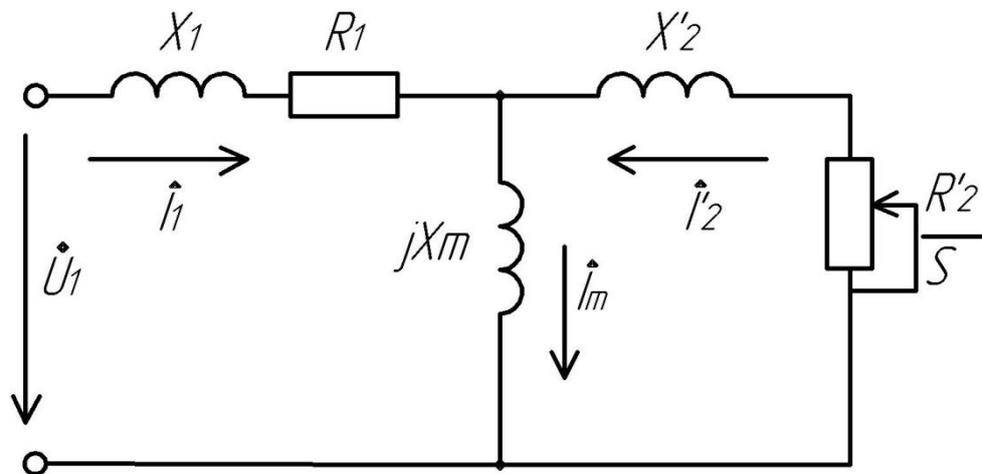


Рисунок 2.2 Схема замещения ЛАД: R_1 и X_1 - активное и реактивное сопротивление фазы индуктора; R'_2 и X'_2 - приведенные активное и реактивное сопротивления вторичного элемента; X_m - сопротивление взаимоиндукции между индуктором и вторичным элементом; s - скольжение; \dot{U}_1 - фазное напряжение; \dot{i}_1 - ток индуктора; \dot{i}'_2 - приведенный ток вторичного элемента; \dot{i}_m - ток намагничивания.

Особенностью ЛАД в приводе ЖМ является то, что длина индуктора значительно меньше длины окружности сплошного проводящего вторичного элемента (ВЭ). Это влечет за собой необходимость внести некоторые коррективы в схему замещения, связанные, прежде всего с параметрами ВЭ. Можно принять, что его движение прямолинейно относительно индуктора (бегущее магнитное поле), а не дугообразно (по радиусу диска) и $X'_2 \rightarrow 0$ [34, 61, 103, 104].

Значения указанных параметров рассчитываются по следующим выражениям [29]:

$$R_1 = \frac{l \cdot w_1}{\gamma_{cu} \cdot S_{np}}, \quad (2.2)$$

где $l = 2 \cdot 2b + 2 \cdot 2 \cdot 2\tau$ – длина провода в обмотке фазы, м; $2b$ – ширина индуктора, м; τ – полюсное деление индуктора, м; w_1 – количество витков в фазе; γ_{cu} – магнитная проводимость меди, См/м; S_{np} – сечение проводника, м².

Реактивное сопротивление фазы индуктора определяется через коэффициенты λ_n и λ_k [29]:

$$X_1 = 4\pi\mu_0 f_1 \frac{w_1^2}{pq} l (\lambda_n + \lambda_k) k_n, \quad (2.3)$$

где μ_0 – магнитная постоянная; f_1 – частота питающей сети, Гц; p – число пар полюсов индуктора; q – число пазов на полюс и фазу; $k_n = 1,15$ – коэффициент, учитывающий дифференциальное рассеяние и рассеяние по коронкам;

Коэффициенты магнитной проводимости пазового рассеивания λ_n и коэффициент магнитной проводимости лобового рассеивания λ_k находятся по известным выражениям [29]:

$$\lambda_n = \frac{h_n}{3b_n} + \frac{h_k}{b_n}, \quad (2.4)$$

где h_n – высота паза индуктора, м;

h_k – высота клина крепления обмотки, м;

b_n – ширина паза индуктора, м.

$$\lambda_n = 0,34 \frac{q}{2b} (l_n - 0,64\tau), \quad (2.5)$$

где l_n – длина вылета лобовых частей обмоток, м.

Сопротивление взаимоиндукции между индуктором и вторичным элементом находится из выражения:

$$X_m = \frac{4 \cdot m_1 \cdot f_1}{\pi} \cdot \frac{\mu_0 \cdot \tau \cdot 2b}{\delta'} \cdot \frac{w_1^2 \cdot k_{об}^2}{p}, \quad (2.6)$$

где m_1 – число фаз индуктора; δ' – эквивалентный зазор, м; $k_{об}$ – обмоточный коэффициент индуктора.

Таким образом, приведенное активное сопротивление вторичного элемента:

$$R_2' = r_{2д} \cdot k_{прив}, \quad (2.7)$$

где сопротивление диска:

$$r_{2д} = \frac{2 \cdot b}{\tau \cdot \delta \cdot \gamma_{al}}, \quad (2.8)$$

где δ – воздушный зазор, м;

γ_{al} – электрическая проводимость алюминия, См.

Коэффициент приведения к фазе индуктора:

$$k_{прив} = \frac{2m_1 \cdot w_1^2 \cdot k_{об}^2}{p}, \quad (2.9)$$

Мельница работает в установившемся режиме, поэтому для определения силы, развиваемой ЛАД может быть использовано уравнение Клосса, составленное по схеме замещения двигателя [4,7]:

$$F = \frac{F_k (2 + g) s_k (v_1 - \dot{x}) v_1}{s_k^2 v_1^2 + (v_1 - \dot{x})^2 + s_k (v_1 - \dot{x}) g v_1}, \quad (2.10)$$

где $F_k = \frac{3 \cdot I_1^2 \cdot \varepsilon_0 \cdot R_2'}{2 \cdot \tau \cdot f_1}$ – критическая сила ЛАД, Н;

ε_0 – добротность двигателя;

s_k – критическое скольжение ЛАД;

v_1 – синхронная скорость ЛАД, м/с;

\dot{x} – производная пути перемещения подвижного жернова по времени;

$g = \frac{2R_1}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2' + X_1 X_2' / X_m)^2}}$ – параметр двигателя, определяемый из схемы замещения ЛАД;

Силу, развиваемую ЛАД по (2.10) при значениях $s_k \approx 0,2 - 0,4$ можно упростить и представить в виде [4,5]:

$$F = F_k (B_0 + B_1 \dot{x} + B_2 \dot{x}^2) \quad (2.11)$$

где B_0, B_1, B_2 – постоянные коэффициенты

$$B_0 = \frac{0,5s_k(2+g)}{(0,25+s_k^2+0,5gs_k)^2} + \frac{0,5s_k(2+g)(s_k^2-0,25)}{(0,25+s_k^2+0,5gs_k)^2} + \frac{s_k(2+g)(0,5+0,5gs_k)^2}{(0,25+s_k^2+0,5gs_k)^3} - \frac{s_k(2+g)(0,5+0,5gs_k) + 0,25s_k(2+g)}{(0,25+s_k^2+0,5gs_k)^2};$$

$$B_1 = -2 \left[\frac{0,5s_k(2+g)(s_k^2-0,25)}{(0,25+s_k^2+0,5gs_k)^2} + 2 \frac{s_k(2+g)(0,5+0,5gs_k)^2}{(0,25+s_k^2+0,5gs_k)^3} \right] / v_1;$$

$$B_2 = 4 \left[\frac{s_k(2+g)(0,5+0,5gs_k)^2}{(0,25+s_k^2+0,5gs_k)^3} - \frac{s_k(2+g)(0,5+0,5gs_k) + 0,25s_k(2+g)}{(0,25+s_k^2+0,5gs_k)^2} \right] / v_1^2.$$

2.3 Расчет силы продольного краевого эффекта в линейном асинхронном двигателе

Главная особенность ЛАД по сравнению с обычными асинхронными двигателями заключается в том, что сердечник с обмоткой имеет конечную длину $2r\tau$, и поэтому возникает так называемый продольный краевой эффект (ПКЭ).

ПКЭ связан со сложной структурой электромагнитных полей ЛАД, вследствие чего он трудно поддается аналитическому исследованию. Это обусловило многообразие методов теоретического исследования ЛАД и привело к появлению разных по характеру работ в этой области [25,26,30,51,67,80,85,87,103,104,108,122,124].

С. Ямамура [124] предлагает одно-, двух- и трехмерные модели ЛАД и приводит сравнительный анализ их применения. Показано, что в ряде

случаев расхождение результатов, полученных с помощью двух- и трехмерных моделей, невелико, поэтому для анализа характеристик ЛАД можно ограничиться использованием двухмерной, а иногда и одномерной модели.

Большую роль в изучении ЛАД сыграла одномерная модель А.И. Вольдека [29,30,85].

Одномерная модель ЛАД основывается на ряде упрощающих предположений, самым существенным из которых является допущение о том, что шихтованные ферромагнитные сердечники индуктора с магнитной проницаемостью $\mu = \infty$ и электрической проницаемостью $\gamma = 0$ простираются от активной зоны, несущей первичную обмотку в обе стороны до бесконечности.

В итоге этих допущений расчетная модель двигателя принимает вид, изображенный на рисунке 2.3.

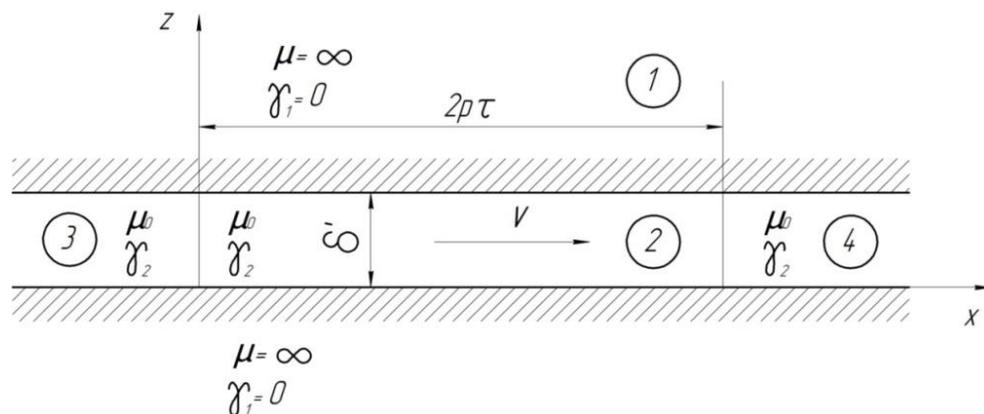


Рисунок 2.3 Расчетная модель линейного асинхронного двигателя: 1 – активная зона сердечника индуктора; 2 – активная зона немагнитного зазора; 3 и 4 – неактивные входная и выходная зоны зазора.

Схема замещения, которая учитывает наличие ПКЭ в ЛАД по одномерной модели при этом примет вид, изображенный на рисунке 2.4 [30], отличающийся от обычной T – образной схемы замещения нормального асинхронного двигателя только наличием сопротивления $\underline{Z}_{кЭ}$.

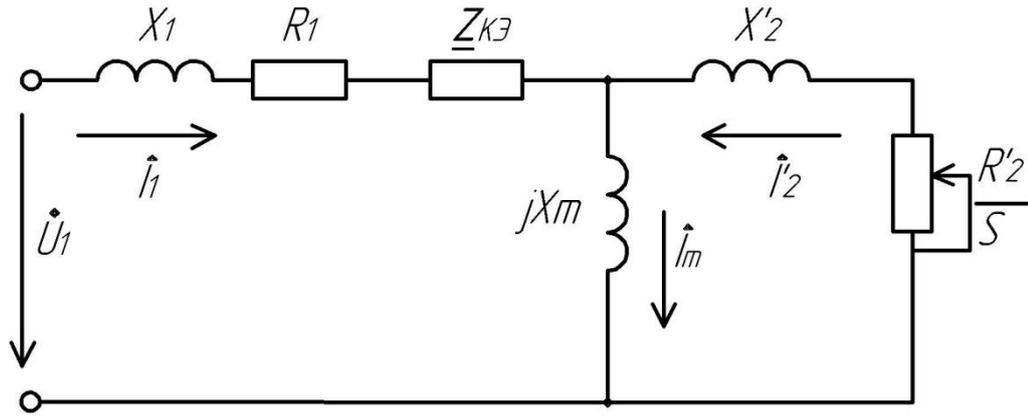


Рисунок 2.4 Электрическая схема замещения ЛАД с учетом ПКЭ: $\underline{Z}_{кэ}$ – сопротивление, характеризующее ПКЭ.

При учете конечной ширины индуктора ЛАД приведенные активное (R'_2) и реактивное (X'_2) сопротивления вторичного элемента определяются следующими выражениями[30]:

$$R'_2 = X_m \left[\frac{\varepsilon}{1+\varepsilon^2} (1 + k_r) \right] \quad (2.12)$$

$$X'_2 = X_m \left[\frac{1}{1+\varepsilon^2} (1 + \varepsilon k_x) \right] \quad (2.13)$$

где

$$k_r = \frac{1}{G} [(\varepsilon n - m)sh\beta - (\varepsilon m + n)sin\gamma + (\varepsilon^2 - m^2 + n^2)(ch\beta - cos\gamma)];$$

$$k_x = \frac{1}{G} [(\varepsilon m + n)sh\beta + (\varepsilon n - m)sin\gamma + \varepsilon(m^2 - n^2 + 1)(ch\beta - cos\gamma)];$$

$$G = \alpha \alpha (m^2 + n^2) [sh\beta + cos\gamma + (m^2 + n^2)(ch\beta - cos\gamma) + (msh\beta - nsin\gamma)2];$$

$$\varepsilon = s\varepsilon_0; m = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \varepsilon^2}}; n = \frac{\varepsilon}{2m}; \beta = 2bam; \gamma = 2ban; \alpha = \frac{\pi}{\tau}$$

Сопротивление $\underline{Z}_{кэ}$, определяется по следующему выражению:

$$\underline{Z}_{кэ} = \frac{-(R'_2 + jX'_2)}{2p\pi} \left[\frac{\lambda - \eta - j}{2\lambda(\lambda + \eta + j)} (1 - e^{-(\lambda + \eta)2p\pi}) + \frac{\lambda + \eta + j}{2\lambda(\lambda - \eta - j)} (1 - e^{-(\lambda - \eta)2p\pi}) \right], \quad (2.14)$$

где $\lambda = \sqrt{\eta^2 + j\varepsilon_0}$ – комплексное слагаемое [16]; $\eta = \frac{\varepsilon_0}{2} (1 - s)$ – вещественное число; p – число пар полюсов ЛАД.

Амплитудное значение $F_{ПКЭ}$, обусловленное отраженной волной бегущего магнитного поля, с удвоенной частотой колебаний [124], имеет вид:

$$F_{ПКЭ} = \frac{3R_{кЭ}I_1^2}{2\tau f_1} \quad (2.15)$$

Электромагнитная сила (F_{Σ}) определяемая двумя составляющими: силой, развиваемой ЛАД(F), найденной по выражению (2.10) и силой, обусловленной ПКЭ ($F_{ПКЭ}$) по выражению (2.15) равна:

$$F_{\Sigma} = \frac{F_K(2+g)s_K(v_1 - \dot{x})v_1}{s_K^2 v_1^2 + (v_1 - \dot{x})^2 + s_K(v_1 - \dot{x})g v_1} + \frac{3R_{кЭ} I_1^2}{2\tau f_1} \quad (2.16)$$

2.4 Определение силы вязкого (внутреннего) трения

Вязкость – это показатель внутреннего трения зерна внутри рабочей зоны, которое противодействует любому динамическому изменению в движении зерна.

Теория вязкости пищевых сред основывается на теории вязкости жидкости [63, 74] которая в отличие от теории вязкости газов не достаточно подробно изучена и разработана [21, 35, 114, 131].

Сила вязкого (внутреннего) трения $F_{в.тр}$ определяется радиусом жерновов, и зависит от того, насколько быстро меняется скорость движения потока зерна в рабочей зоне мельницы, которое может быть приближенно моделировано течением вязкой несжимаемой жидкости [63,74,115] при переходе от слоя к слою.

$$F_{в.тр} = \beta \cdot \dot{x}, \quad (2.17)$$

где $\beta = \frac{h_0 \cdot \rho + 4\sigma \cdot f}{4 \cdot \gamma} \cdot g_3 \cdot R_{ж}$ – коэффициент вязкого трения, $H \cdot c / m$;

h_0 – предельное значение высоты вертикально стоящего столба сыпучего материала, определяемое экспериментально [71], м;

ρ – плотность зерна, кг/м³;

σ – напряжение сжатия, определяемое по [41], кг/м²;

f_{θ} – коэффициент внутреннего трения зерна;

$\dot{\gamma}$ – скорость сдвига [74], с⁻¹;

g_3 – ускорение свободного падения зерна, м/с²;

$R_{\text{ж}}$ – радиус жерновов, м;

При определении коэффициента вязкого трения (β), коэффициент внутреннего трения зерен (f_{θ}) находится в пределах от 0,32 ÷ 0,45 (для яровой пшеницы – 0,35).

Рассчитанные средние значения коэффициента вязкого трения для различных видов зерновых культур, представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 Средние значения коэффициента вязкого трения для различных видов зерновых культур

Вид зерновой культуры	Коэффициент вязкого трения (β)
Озимая пшеница	40,1 Н·с/м
Яровая пшеница	49,5 Н·с/м
Тритикале	65,6 Н·с/м
Озимая рожь	93,2 Н·с/м

2.5 Определение силы сухого (внешнего) трения

В машинах для измельчения с жерновами существенную роль играет сила трения, так как в качестве рабочих поверхностей применяются мелкозернистые естественные и искусственные (наждачные, фарфор и т.п.) камни с большим коэффициентом трения [56,59,107,126].

Сила сухого трения в рабочем пространстве описывается следующим выражением:

$$F_{c.mp} = f_c \cdot N, \quad (2.18)$$

где $f_c = \operatorname{tg} \varphi$ – коэффициент трения продукта и камня;

φ – угол трения;

$N = m \cdot g_z$ - сила нормального давления, H ;

Угол трения для измельчения и получения муки находится в пределах от $34 \div 37^\circ$ ($\approx 0,59 \div 0,65 \text{ рад}$) [56,107]. Следовательно, коэффициент трения продукта и камня находится в пределах от $0,67 \div 0,75$ в зависимости от применяемого камня и перемалываемого зерна.

Значения силы сухого трения, рассчитанные по формуле (2.18) представлены в таблице 2.2

Таблица 2.2 Рассчитанные значения силы сухого трения

Коэффициент трения продукта и камня (f_c)	Сила нормального давления (N), H	Сила сухого трения ($F_{c.mp}$), H
0,67	27,81	18,63
0,71	27,81	19,75
0,75	27,81	20,86

2.6 Математическая модель без учета электромагнитной силы, определяемой продольным краевым эффектом в ЛАД

После подстановки (2.11) в (2.1) дифференциальное уравнение движения жернова имеет вид:

$$J \frac{d\omega}{dt} = F_k \cdot (B_0 + B_1 \cdot \dot{x} + B_2 \cdot \dot{x}^2) \cdot R - (\beta \cdot \dot{x}) \cdot R \cdot k_{np} - F_{c.mp} \cdot R \cdot k_{np} \quad (2.19)$$

Уравнение (2.19) представляет собой дифференциальное уравнение Рикатти [4,5], которое решается относительно окружной скорости жернова в квадратурах. Решение для окружной скорости имеет вид:

$$\dot{x}(t) = Y \left(\frac{2}{k_0 e^{t/T} - 1} + 1 \right) - \frac{d}{2f}, \quad (2.20)$$

где $k_0 = \frac{2Y}{d/2f - Y} + 1$; $Y = \sqrt{\frac{(\beta - F_k B_1)^2}{4(F_k B_2)^2} - \frac{F_k B_0 - F_{c.mp}}{F_k B_2}}$; $\frac{d}{2f} = \frac{\beta - F_k B_1}{2F_k B_2}$ -

безразмерные параметры, характеризующие работу ЛАД в приводе ЖМ;

$$T = \frac{m}{2F_k B_2 Y} - \text{постоянная времени разгона, с.}$$

Выражение для определения установившейся частоты вращения жернова n [об/мин] примет следующий вид:

$$n = 60 \cdot \left[Y - \frac{d}{2f} \right] / 2\pi R, \quad (2.21)$$

2.7 Математическая модель жерновой мельницы с учетом продольного краевого эффекта в ЛАД

Дифференциальное уравнение (2.1) с учетом (2.16) может быть решено методами численного интегрирования. Решение данного уравнения и построение характеристик привода возможно получить на компьютере в объектно-ориентированной среде визуального моделирования Matlab (Simulink). Программный пакет типа Simulink является довольно простым, наглядным и имеет большое количество выполняемых функций. При моделировании Simulink позволяет создавать собственные функциональные блоки и при нехватке рабочего пространства убирать сделанную модель в отдельную подсистему, упорядочивая этим удобство восприятия. О всех достоинствах визуального моделирования в Matlab можно узнать из специальной литературы [37,39,43,44,45,46,73,94,95,96,97,127], отметим лишь некоторые из них:

- модель может иметь иерархическую структуру, то есть состоять из моделей более низкого уровня;

- прозрачность реализуемой модели – все составляющие модель блоки соединены между собой линиями связи с указанием направления или специальными блоками «входа», «выхода», в результате чего модель представляет собой структурную схему, из которой легко понять сущность процессов, происходящих в системе;

- состав библиотеки Simulink может быть пополнен новыми модулями, что позволяет пользователю не отвлекаться каждый раз на операции синтеза исходных элементов («строительных блоков») и т.д.

В модели, блоки «Goto» и «From» означают «вход» и «выход» одного и того же сигнала, что позволяет избежать загромождения рабочего окна и соответственно модели линиями связи. Параметры и числовые значения блоков задаются в их настроечных окнах, которые открываются после двойного щелчка по ним. После ввода всех данных производится запуск моделирования с указанием начального и конечного времени, шага и других настроечных параметров в окне «Параметры моделирования».

Результаты моделирования представляются графическим (при необходимости цифровым) способом посредством раскрывающегося окна блоков «Scope» и «XYGraph». Вид математической модели жерновой мельницы с ЛЭП показан на рисунке 2.9 (настроечное окно на рисунке 2.8) и может отображать следующие результаты моделирования: скорость движения и ускорение жернова мельницы от времени с учетом сил вязкого (внутреннего), сухого (внешнего) трения и силы ПКЭ в ЛАД.

Интерфейс Simulink не поддерживает русские названия переменных, поэтому в модели переменные обозначены через похожие английские буквы.

При моделировании привода жерновой мельницы с ЛАД за не меняющиеся в течение времени приняты следующие параметры: масса жернова и зерна m_h ; критическая сила ЛАД F_k (F_k); коэффициент вязкого (внутреннего) трения β (B) и сила сухого (внешнего) трения $F_{c.mp}$ (F_{ctr}).

В Matlab (Simulink) критическая сила ЛАД, коэффициент вязкого (внутреннего) трения и сила сухого (внешнего) трения примут вид, изображенный на рисунках 2.5, 2.6 и 2.7.

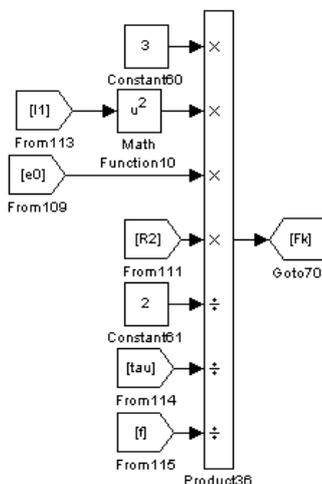


Рисунок 2.5 Критическая сила ЛАД в среде Matlab (Simulink)

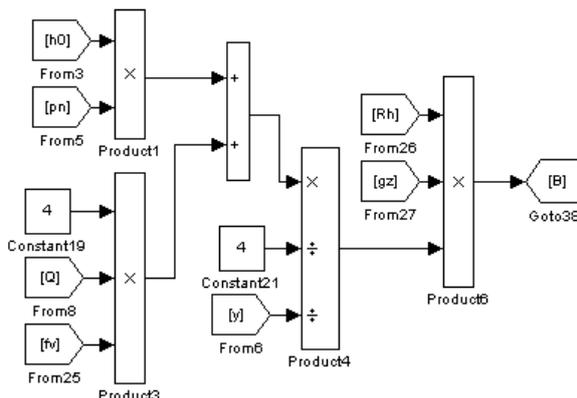


Рисунок 2.6 Коэффициент вязкого (внутреннего) трения в среде Matlab (Simulink)

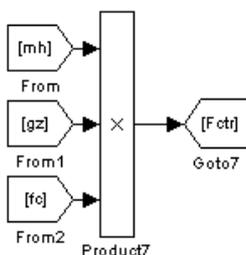


Рисунок 2.7 Сила сухого (внешнего) трения в среде Matlab (Simulink)

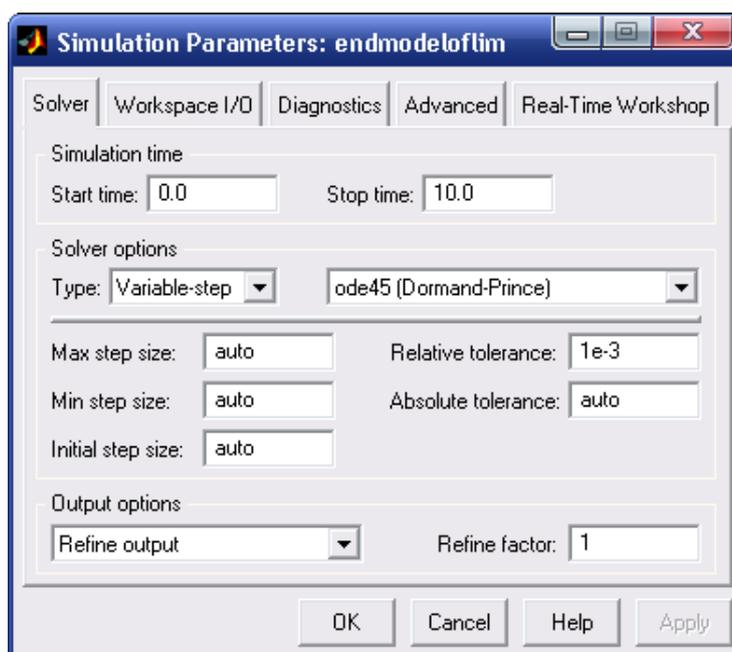


Рисунок 2.8 Настроечное окно пункта меню «Параметры моделирования»

Дополнение дифференциального уравнения (2.19) формулами А. И. Вольдека (2.14), (2.15) и (2.16) позволяет получить при моделировании все необходимые характеристики ЛАД с учетом краевых эффектов.

Результаты моделирования представляются посредством раскрывающегося окна блока «XYGraph». Вид математической модели ЖМ с ЛЭП на рисунке 2.9 отображает силу, развиваемую ЛАД с учетом продольного краевого эффекта. На рисунках 2.10, 2.11, 2.12 приведены механические характеристики низкоскоростного ЛАД и ЖМ; зависимость ПКЭ от скольжения со следующими параметрами схемы замещения, рассчитанными по техническим паспортным данным двигателя, предоставленным заводом-изготовителем – ООО «Электромеханический завод», г. Ставрополь: $R_1=0.87(Ом)$, $R_2=0.64(Ом)$, $X_1=0.35(Ом)$, $X_2=1.5(Ом)$, $X_m=1.92(Ом)$, $U=220В$, $\omega=314рад/с$, $p=2$; $\tau=0,042м$, $v_1=4.2м/с$.

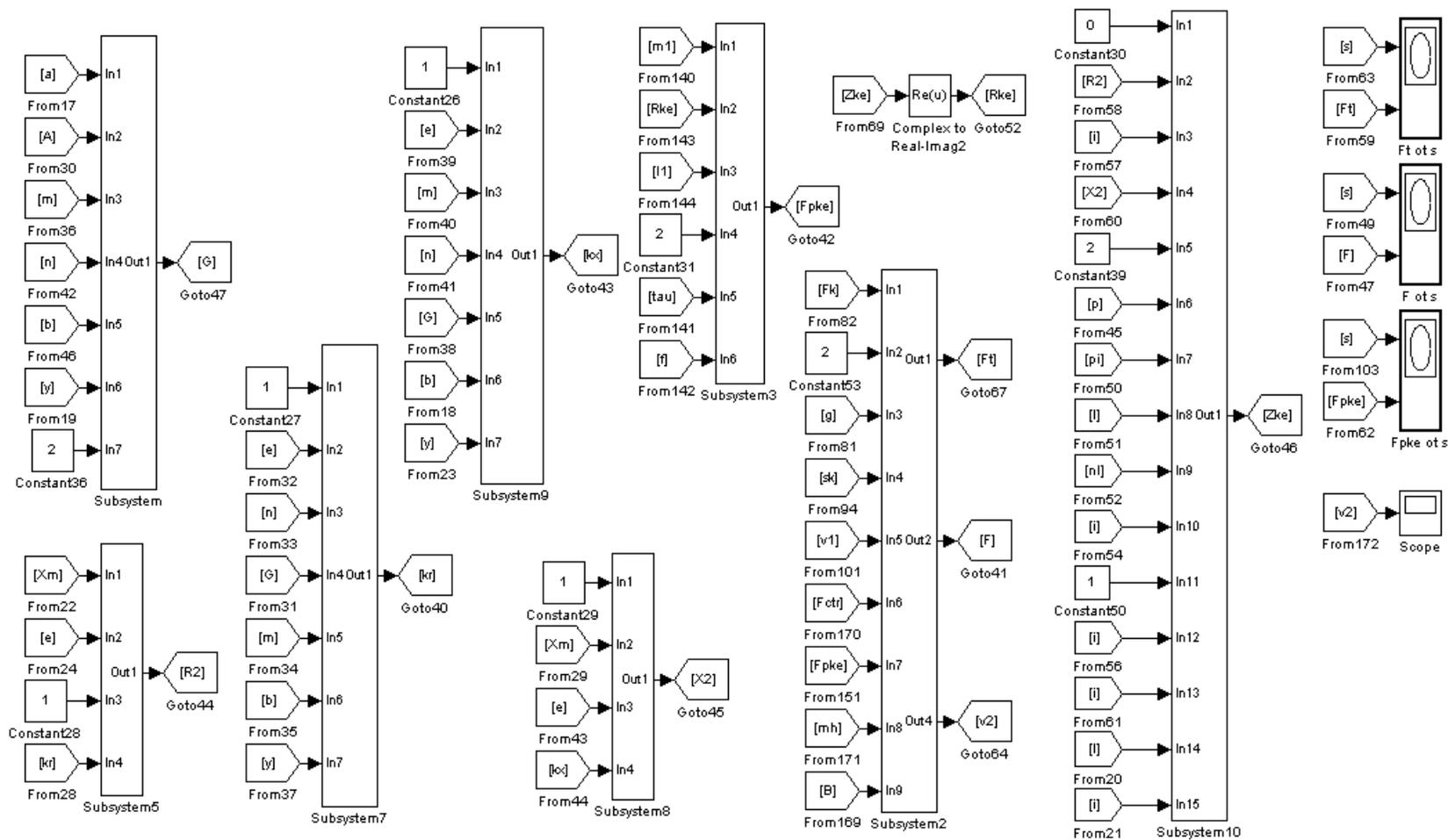
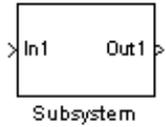
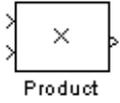


Рисунок 2.9 Вид математической модели жерновой мельницы с ЛЭП в среде объектно-визуального моделирования Matlab (Simulink)

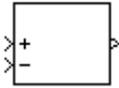
Блоки на рисунках 2.5, 2.6, 2.7 и 2.9 имеют следующие назначения:



- подсистема, включающая в себя множество блоков;



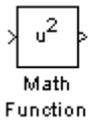
- блок произведения (деления) сигналов;



- сумматор сигналов (знаки означают полярность сигнала);



- источник постоянного воздействия, константа;



- блок, осуществляющий изменение сигнала по формуле U^2 , где U – входной сигнал;



- блок вычисления действительной части комплексного числа.

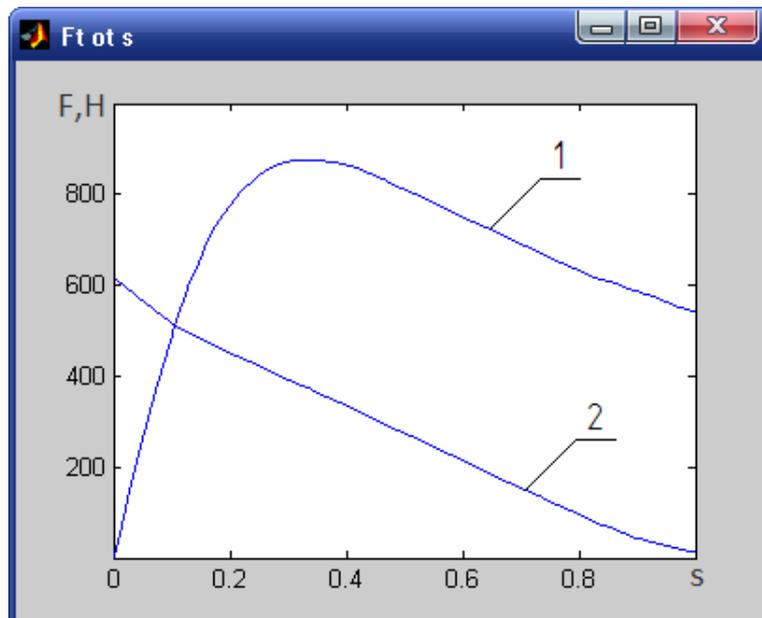


Рисунок 2.10 Механическая характеристика ЛАД (1) и ЖМ (2) без учета ПКЭ

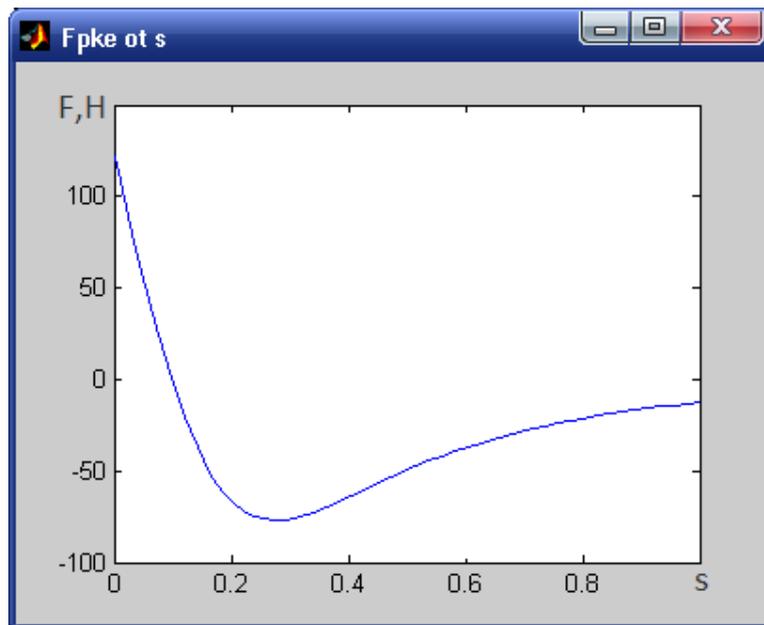


Рисунок 2.11 Зависимость силы ПКЭ ЛАД от скольжения

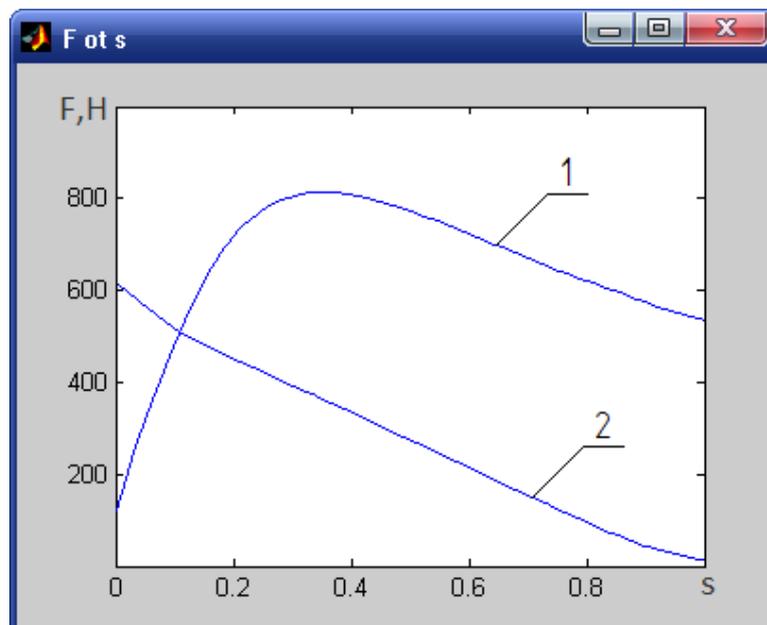


Рисунок 2.12 Механическая характеристика ЛАД с учетом ПКЭ (1) и ЖМ (2)

Из рисунка 2.11 и 2.12 следует, что низкоскоростной двухсторонний ЛАД при неизменном напряжении питания также создает силу, когда скорость равна или выше синхронной. Это дает дополнительный эффект, проявляющийся в виде волн, которые будут оказывать измельчающее воздействие на зерно и высвобождать рабочую зону жерновов от накопившейся муки, тем самым устранять ее залипание при работе ЖМ.

2.8 Характеристика разгона и частоты вращения подвижного жернова мельницы

Характеристика разгона подвижного жернова мельницы, полученная решением системы уравнений (2.1) и (2.10) методами численного интегрирования, без учета выражения 2.15 и реализованная в среде Matlab(Simulink) изображена на рисунке 2.13.

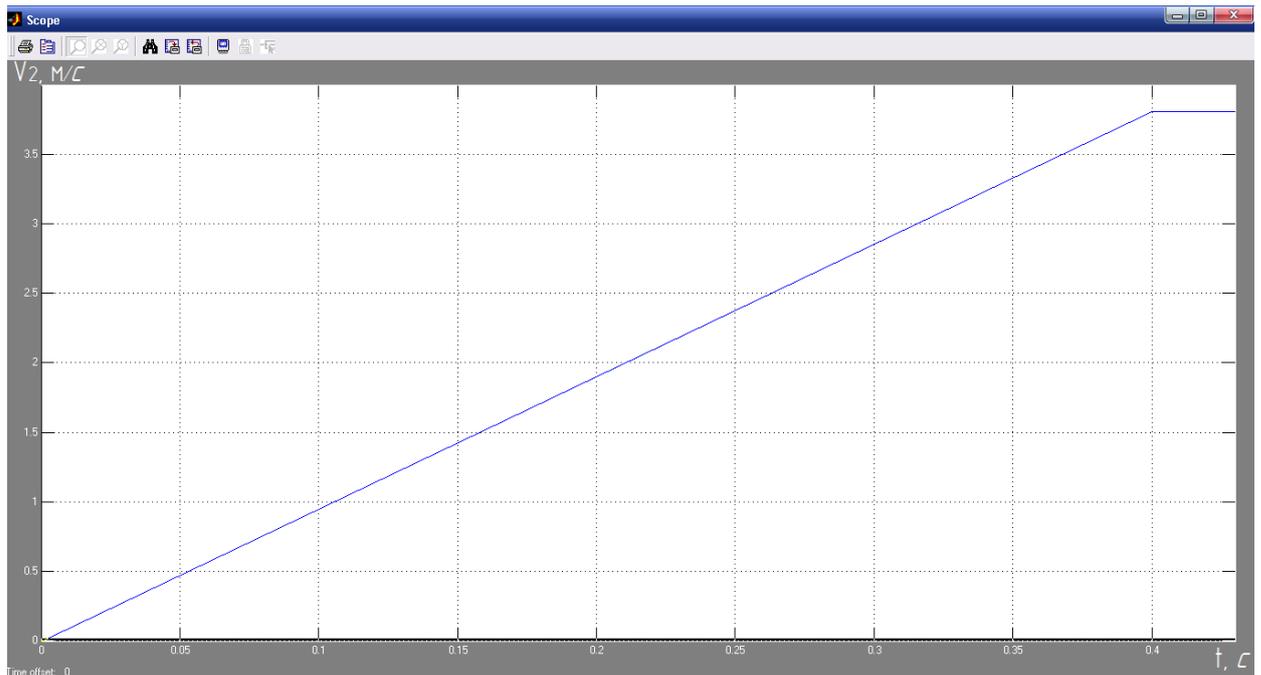


Рисунок 2.13 Характеристика разгона подвижного жернова мельницы в среде Matlab(Simulink) при следующих параметрах: критическая сила ЛАД $F_k = 876,8 \text{ Н}$; масса жернова вместе с зерном в рабочей зоне $m = 2,8 \text{ кг}$; критическое скольжение $s_k = 0,32$; синхронная скорость $v_l = 4,2 \text{ м/с}$; коэффициент вязкого (внутреннего) трения $\beta = 49,5 \text{ Н}\cdot\text{с/м}$ (яровая пшеница); сила сухого (внешнего) трения $F_{c.mp} = 19,75 \text{ Н}$.

По графику видно, что установившееся время разгона составляет $t_{уст} = 0,4 \text{ с}$, а жернов при этом вращается с окружной скоростью, равной $v_2 = 3,79 \text{ м/с}$.

Результаты разгона жернова мельницы, найденные путем решения дифференциального уравнения Рикатти (2.19), из которого найдено

выражение для окружной скорости жернова (2.20) показаны на рисунке 2.14.

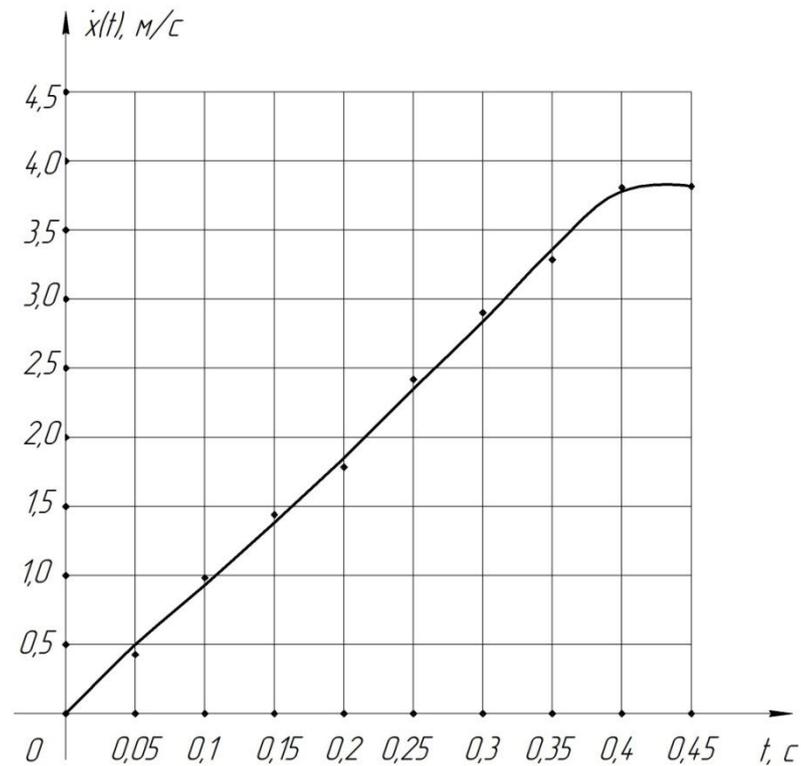


Рисунок 2.14 Характеристика разгона подвижного жернова мельницы при следующих параметрах: критическая сила ЛАД $F_k = 876,8 \text{ Н}$; масса жернова вместе с зерном в рабочей зоне $m = 2,8 \text{ кг}$; критическое скольжение $s_k = 0,32$; синхронная скорость $v_l = 4,2 \text{ м/с}$; коэффициенты $B_0 = 0,21$, $B_1 = 0,5$, $B_2 = -0,13$; коэффициент вязкого (внутреннего) трения $\beta = 49,5 \text{ Н}\cdot\text{с/м}$; сила сухого (внешнего) трения $F_{с.тр} = 19,75 \text{ Н}$.

Из графика видно, что установившаяся окружная скорость жернова в этом случае составляет $3,85 \text{ м/с}$, что на $1,6 \%$ превышает значения установившейся окружной скорости, полученной в среде Matlab(Simulink).

С точки зрения присутствия в двигателе ПКЭ имеет наибольший интерес их влияние на разгон жернова мельницы. Для этого в среде Matlab (Simulink) решается система уравнений (2.1) и (2.10) с подстановкой формул А. И. Вольдека (2.14), (2.15) и (2.16), результаты представлены на рисунке 2.15.

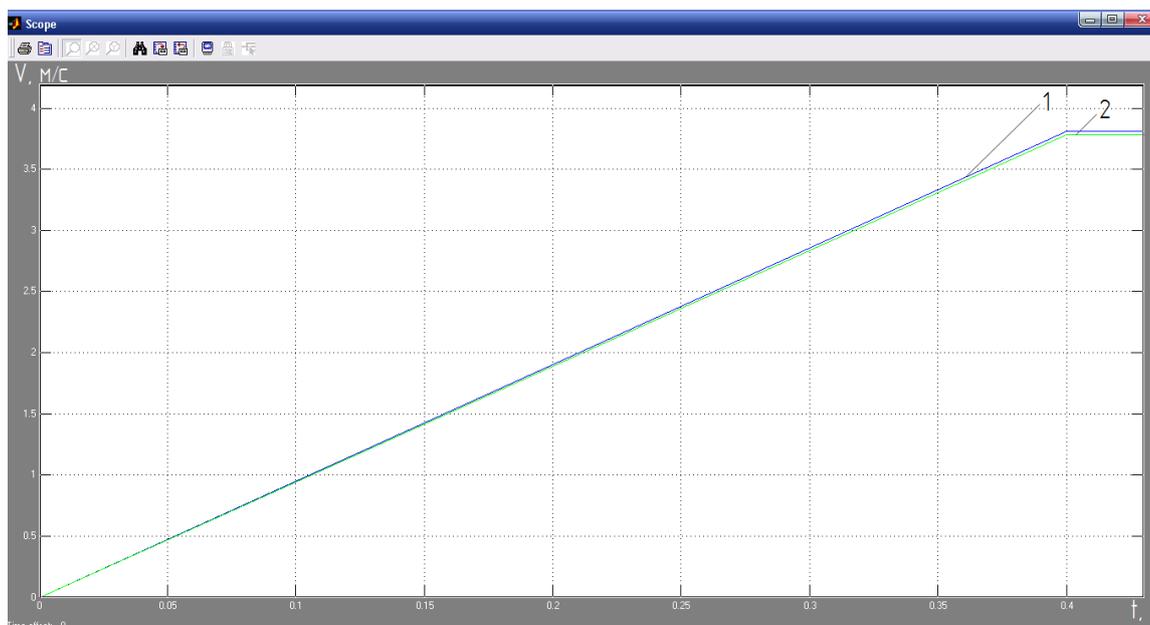


Рисунок 2.15 Характеристика разгона подвижного жернова мельницы:
1 – без учета ПКЭ; 2 – с учетом ПКЭ

Как видно из рисунка 2.15, скорость вторичного элемента ЛАД, а соответственно и окружная скорость подвижного жернова без учета ПКЭ $v_2 = 3,79$ м/с, с учетом ПКЭ $v_2 = 3,74$ м/с. То есть, выявлено, что при проявлении ПКЭ в ЛАД сила уменьшается на 4,9 – 7,6 % (рисунок 2.12), при этом установившаяся скорость вторичного элемента уменьшается на 1,3 %. Из этого следует, что при инженерных расчетах окружную скорость подвижного жернова, можно найти по выражению (2.20).

Индукторы ЛАД, применяющиеся в приводе мельницы имеют возможность перемещения относительно оси вторичного элемента (оси жернова), поэтому возникает необходимость перерасчета окружной скорости на частоту вращения (рисунок 2.16) по формуле 2.21.

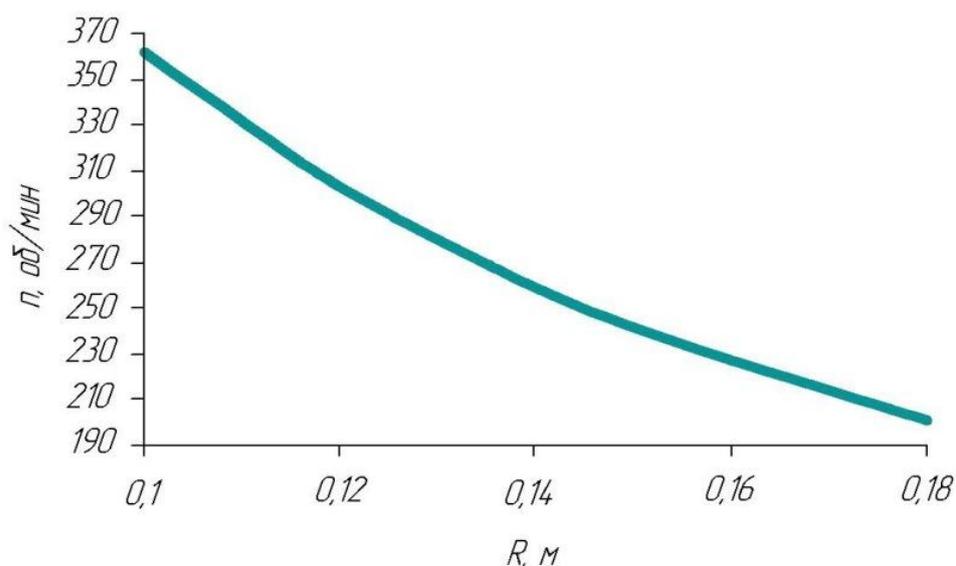


Рисунок 2.16 Перерасчет окружной скорости жернова (v_2 , м/с) на частоту вращения (n , об/мин)

Исходя из рисунка 2.16 можно сделать вывод о том, что частоту жернова можно регулировать в широких пределах, от $362,1 \text{ об/мин}$ при приближении индукторов ЛАД к оси жернова на расстояние $0,1 \text{ м}$, до $201,2 \text{ об/мин}$ при отдалении индукторов ЛАД от оси жернова на $0,08 \text{ м}$ (максимально возможное расстояние при ширине индуктора – $0,17 \text{ м}$) при диаметре вторичного элемента ЛАД, равном $0,7 \text{ м}$.

2.9 Выводы по второй главе

1. Составлена с возможностью решения аналитическими методами математическая модель привода ЖМ на базе плоского ЛАД без учета ПКЭ, позволяющая учесть силу вязкого (внутреннего) и сухого (внешнего) трения.
2. Для оценки влияния ПКЭ в приводе с ЛАД разработана математическая модель ЖМ, которая решена в среде объектно-визуального моделирования Matlab (приложение Simulink).
3. Установлено, что ПКЭ уменьшает силу, развиваемую ЛАД на $4,9 - 7,6 \%$.

4. Выявлено, что окружная скорость жернова, полученная решением уравнения движения привода с учетом и без учета ПКЭ, имеет расхождение, которое не превышает 1,6 %.

3 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИВОДА ЖЕРНОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ С УЧЕТОМ ОБРАБАТЫВАЕМОГО МАТЕРИАЛА И ПАРАМЕТРОВ ДВИГАТЕЛЯ

3.1 Общие сведения

Теоретическое исследование привода жерновой мельницы с ЛАД для измельчения и помола зерна проводится с целью определения взаимного влияния конструктивных и технологических параметров привода.

Исследования проводились со следующими параметрами схемы замещения ЛАД, рассчитанными по известной методике [25,30,31]: $R_1=0.87(Ом)$, $R'_2=0.64(Ом)$, $X_1=0.35(Ом)$, $X'_2=1.5(Ом)$, $X_m=1.92(Ом)$, $U=220В$, $\omega=314рад/с$, $p=2$; $\tau=0,042м$, $V_1=4.2м/с$, $s_k = 0,32$. Остальные параметры: длина и ширина ЛАД – 0,168 м; диаметр вторичного элемента – 0,7 м; диаметр жерновов – 0,2 м; масса подвижного жернова мельницы– 2,8 кг; коэффициент вязкого трения (зерно яровой пшеницы в рабочем зазоре) – 49,5 Н·с/м; сила сухого трения (коэффициент трения продукта и камня $f_C = 0,71$) – 19,75 Н.

3.2 Анализ влияния сил сопротивления на частоту вращения жернова мельницы

Сравнительная оценка сортов различных зерновых культур и влияние их коэффициента вязкого трения, найденного в разделе 2.4, на частоту вращения жернова (параметры Y , $d/2f$; выражение (2.21)) представлена на рисунке 3.1.

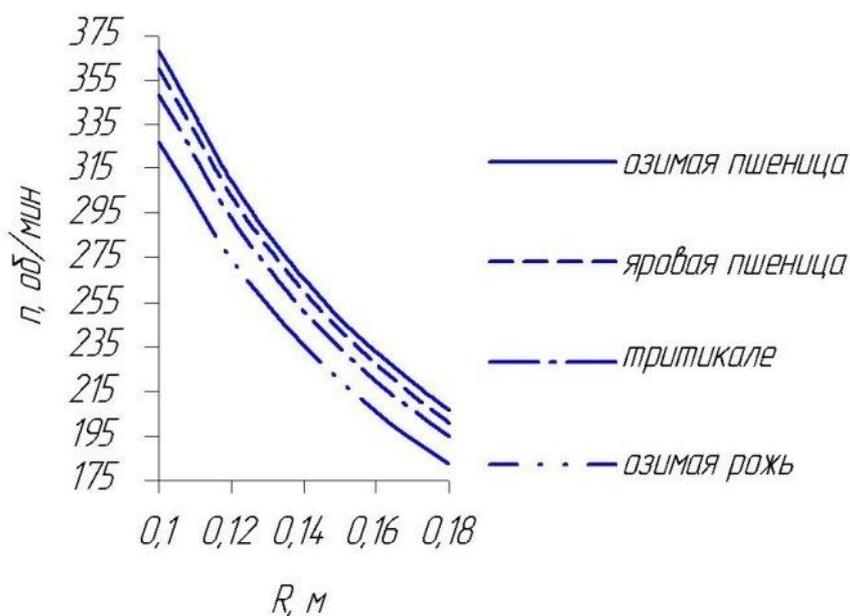


Рисунок 3.1 Влияние на частоту вращения жернова при перемещении индукторов: коэффициента вязкого трения

Как видно, наибольшим коэффициентом вязкого трения обладает озимая рожь, среднее значение для которой составляет от $93,0 \div 93,4$ Н·с/м, а наименьшим – озимая пшеница от $39,8 \div 40,4$ Н·с/м. При этом разница между частотой вращения жернова при помоле этих зерен составляет 10,9 – 11,2%.

Сила сухого трения напрямую зависит от следующих параметров – коэффициента трения продукта и камня (f_c) и массы подвижного жернова ($m_{жс}$) и зерна в рабочем пространстве (m_z), взаимодействующей с поверхностями жерновов. Масса зерна в рабочем пространстве экспериментальной установки равна $0,035$ кг, а коэффициент трения меняется от $0,67$ до $0,75$. Соответственно, сила сухого трения меняется в диапазоне от $18,63$ Н до $20,86$ Н. На рисунке 3.2 показано влияние силы сухого трения, найденной в разделе 2.5 по формуле (2.18), на частоту вращения жернова (параметр Y ; выражение (2.21)) при его неизменной массе.

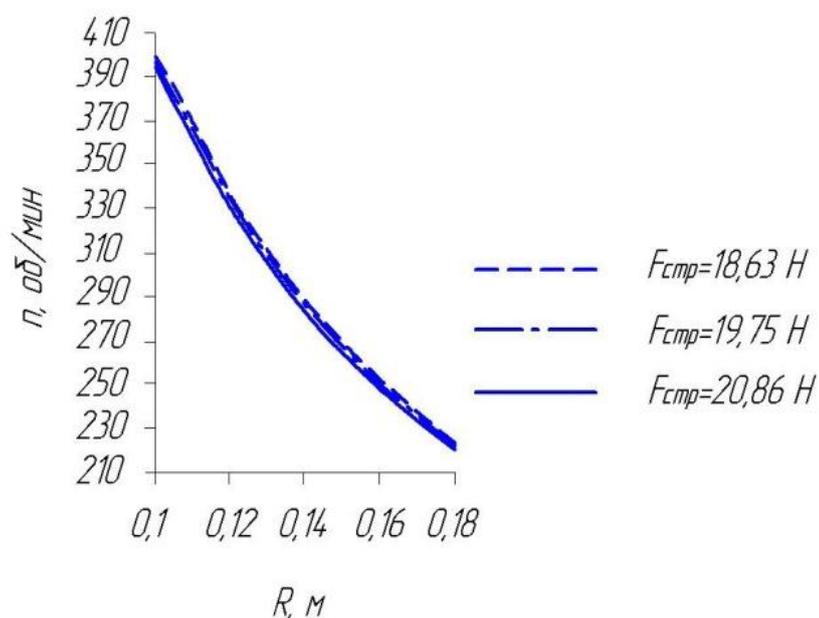


Рисунок 3.2 Влияние на частоту вращения жернова при перемещении индукторов силы сухого трения

Из рисунка видно, что происходит наложение графиков друг на друга. Максимальная частота вращения жернова находится от 397,93 об/мин ($F_{с.тр} = 18,63$ Н) до 397,01 об/мин ($F_{с.тр} = 20,86$ Н) при $R = 0,1$ м, минимальная от 221,02 об/мин ($F_{с.тр} = 18,63$ Н) до 220,59 об/мин ($F_{с.тр} = 20,86$ Н), то есть практически не меняется. В связи с этим, без большой погрешности можно принять, что в жерновых мельницах с малыми диаметрами (массой) жерновов, и соответственно с малой массой зерна в рабочем пространстве силу сухого трения можно принять: $F_{с.тр} = 0$ Н.

3.3 Исследование характеристик распределения огибающих полей магнитной индукции по длине двигателя

Магнитное поле по длине ЛАД из-за влияния ПКЭ неоднородно в отличие от обычных асинхронных двигателей вращения, поэтому представляет собой интерес для исследования.

Первичное поле двигателя возбуждается основной гармоникой первичной линейной токовой нагрузки с амплитудой [29,31]

$$A_{1m} = \frac{2\sqrt{2} \cdot m \cdot w_1 \cdot k_{об}}{2p\tau} I_1, \quad (3.1)$$

где m – число фаз первичной обмотки;

w_1 – число последовательно соединенных витков первичной обмотки в активной зоне индуктора;

$k_{об}$ – обмоточный коэффициент первичной обмотки;

p – число пар полюсов первичной обмотки.

Амплитуда плотности первичного тока, отнесенная к величине зазора:

$$J_{1m} = \frac{A_{1m}}{\delta'} I_1, \quad (3.2)$$

где δ' – немагнитный зазор, м.

Уравнения для комплексной амплитуды результирующего векторного потенциала первичных и вторичных токов при этом имеют вид [29]:

$$\begin{cases} \dot{A}_2 = \dot{A}_m e^{-j\alpha x} + C_{21} e^{(\lambda + \eta)\alpha x} + C_{22} e^{-(\lambda - \eta)\alpha x} \\ \dot{A}_3 = C_3 e^{(\lambda + \eta)\alpha x} \\ \dot{A}_4 = C_4 e^{-(\lambda - \eta)\alpha x} \end{cases} \quad (3.3)$$

Выше обозначено:

$\dot{A}_m = \frac{\mu_0^J I_{1m}}{\alpha^2 (1 + j\varepsilon)}$ – комплексная амплитуда векторного потенциала бегущего

поля; C_{21} , C_{22} , C_3 , C_4 – постоянные интегрирования, которые определяются из граничных условий по концам зоны 2 (рисунок 2.4):

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{21} = -\dot{A}_m \frac{\lambda - \eta - j}{2\lambda} e^{-(\lambda + \eta)2p\pi} \\ C_{22} = -\dot{A}_m \frac{\lambda + \eta + j}{2\lambda} \\ C_3 = \dot{A}_m \frac{\lambda - \eta - j}{2\lambda} (1 - e^{-(\lambda + \eta)2p\pi}) \\ C_4 = \dot{A}_m \frac{\lambda + \eta + j}{2\lambda} (e^{(\lambda - \eta)2p\pi} - 1) \end{array} \right. \quad (3.4)$$

Первое слагаемое в выражении для \dot{A}_2 определяет бегущее поле двигателя, созданное совместным действием первичных и бегущими составляющими вторичных токов, а второе и третье слагаемые в \dot{A}_2 , а также в \dot{A}_3 и \dot{A}_4 определяют обусловленные конечной длиной индуктора поля ПКЭ – прямобегущие при множителе $e^{-(\lambda - \eta)\alpha x}$ и обратnobегущие при множителе $e^{(\lambda + \eta)\alpha x}$.

Используя (3.3), можно найти распределение по длине двигателя комплексных амплитуд магнитной индукции:

$$\dot{B}_{2m} = j\alpha \dot{A}_m e^{-j\alpha x} - (\lambda + \eta)\alpha C_{21} e^{(\lambda + \eta)\alpha x} + (\lambda - \eta)\alpha C_{22} e^{-(\lambda - \eta)\alpha x}; \quad (3.5)$$

$$\dot{B}_{3m} = -(\lambda + \eta)\alpha C_3 e^{(\lambda + \eta)\alpha x}; \quad (3.6)$$

$$\dot{B}_{4m} = (\lambda - \eta)\alpha C_4 e^{-(\lambda - \eta)\alpha x}; \quad (3.7)$$

Суммарные плотности первичного и вторичного тока в зазоре определяются из выражения:

$$J = -\frac{1}{\mu_0} \frac{d\dot{B}}{dx}. \quad (3.8)$$

На рисунке 3.3 представлена модель в среде объектно-визуального моделирования Matlab (приложение Simulink), позволяющая исследовать характер изменения магнитной индукции.

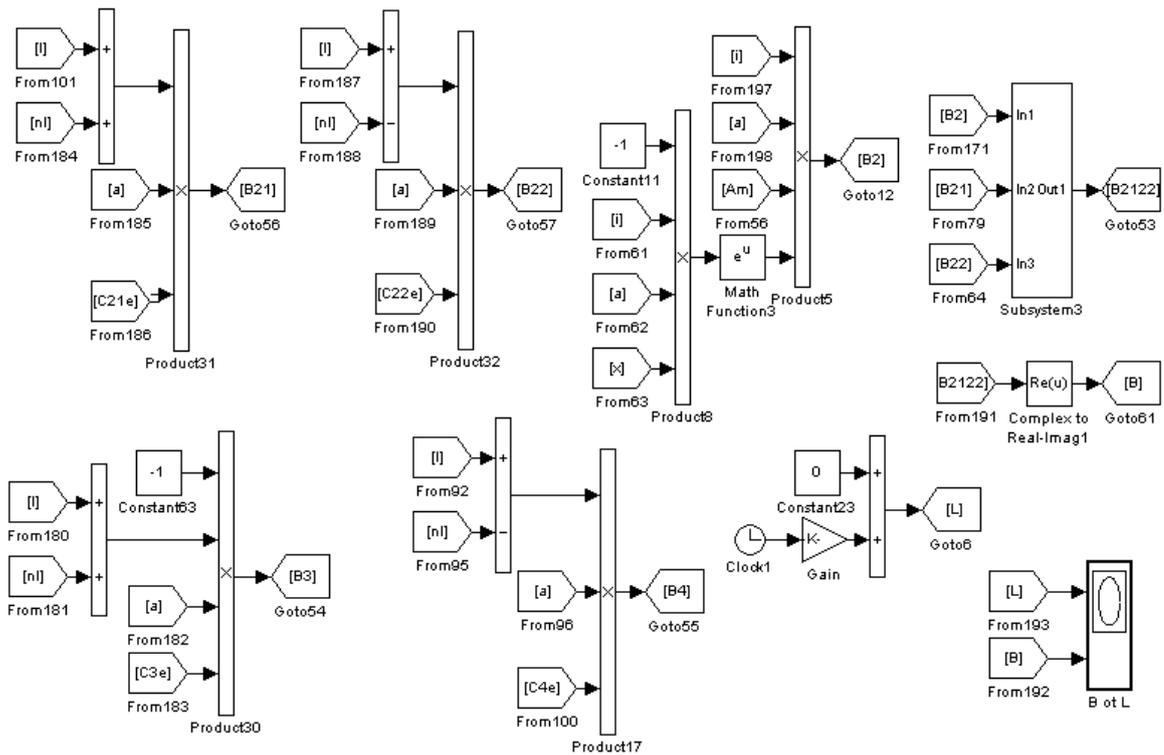


Рисунок 3.3 Модель для исследования характера изменения магнитной индукции

Ниже приведены некоторые решения данной модели.

Для двухстороннего плоского ЛАД с длиной индуктора– 0,168 м, при разных значениях первичного тока распространение огибающих кривых полей магнитной индукции изображено на рисунках 3.4, 3.5 и 3.6

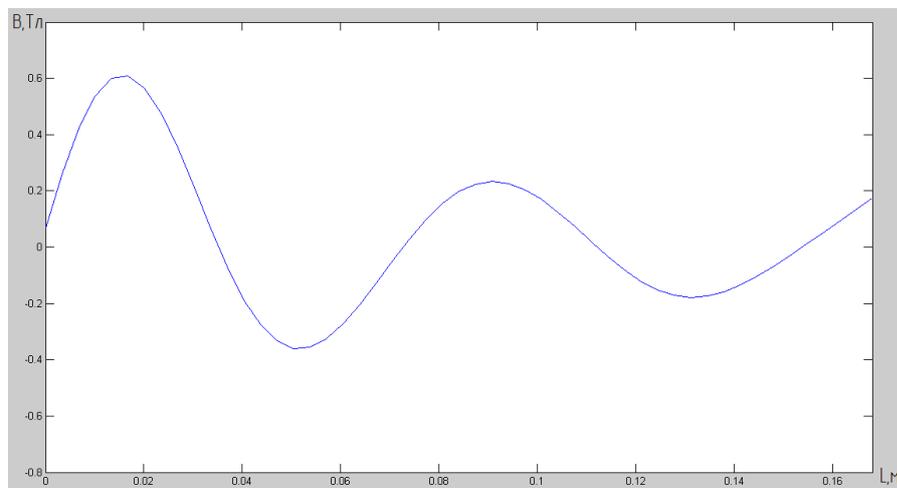


Рисунок 3.4 Распространение огибающих кривых полей магнитной индукции по длине двигателя при $I_1=15$ А

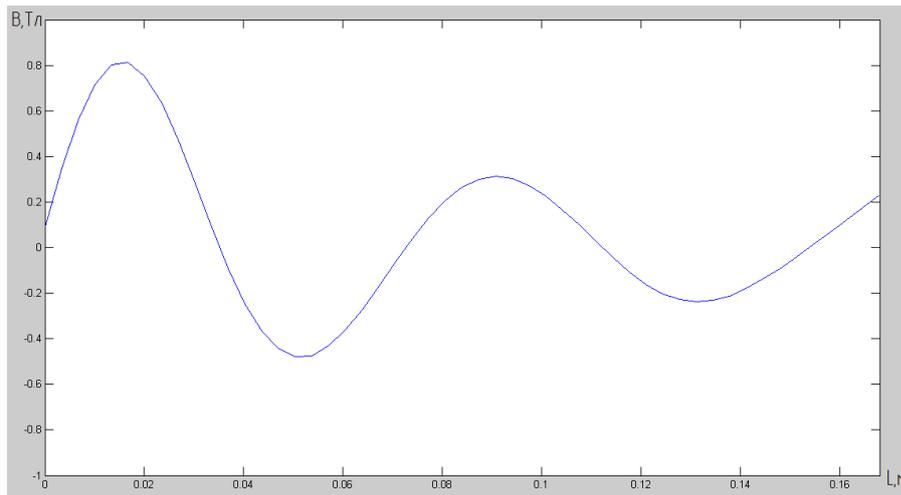


Рисунок 3.5 Распространение огибающих кривых полей магнитной индукции по длине двигателя при $I_1=20$ А

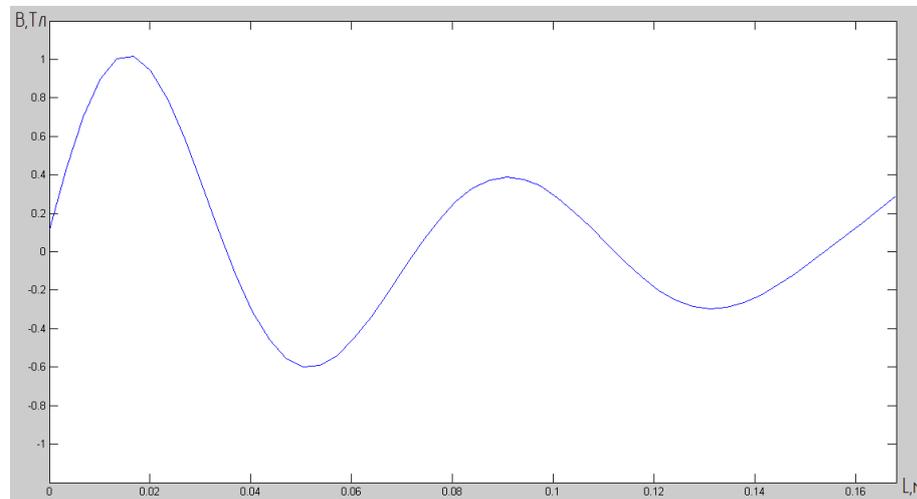


Рисунок 3.6 Распространение огибающих кривых полей магнитной индукции по длине двигателя при $I_1=25$ А

3.4 Скорость распространения полей краевого эффекта

Рассмотрим третье слагаемое выражения (3.5). Оно содержит в показателе степени некоторое комплексное слагаемое λ , у которого можно выделить вещественную и мнимую части [26]:

$$\lambda = \sqrt{\eta^2 + j\varepsilon_0} = N + jM. \quad (3.9)$$

Отбрасывая знаки «минус» перед корнями, как лишаящие искомые величины физического смысла, получим

$$N = \sqrt{\frac{1}{2} \left[\sqrt{\eta^4 + \varepsilon_0^2} + \eta^2 \right]}; \quad (3.10)$$

$$M = \sqrt{\frac{1}{2} \left[\sqrt{\eta^4 + \varepsilon_0^2} - \eta^2 \right]}. \quad (3.11)$$

Тогда корни характеристического уравнения (2.11) можно представить следующим образом:

$$p_1 = \alpha(\eta + N + jM);$$

$$p_2 = \alpha(\eta + N - jM);$$

Вещественная часть последних выражений определяет затухание волновых процессов, а мнимая – фазовую скорость. Величины, обратные вещественной части корней характеристического уравнения, могут рассматриваться, как глубины проникновения электромагнитной волны, т.е. как расстояния в направлении распространения волны, при которых амплитуда волн уменьшается в $e=2,718$ раза.

Третье слагаемое выражения (3.11) характеризует бегущую в активной зоне в положительном направлении оси x волну магнитной индукции, затухающую по закону $e^{-\alpha(N-\eta)x}$. Эта волна как было сказано ранее – прямобегущая волна поля краевого эффекта.

Глубина ее проникновения

$$L_{\text{пр}} = -\frac{1}{[\alpha(\eta-N)]} = 1/[\alpha(N-\eta)] \quad (3.12)$$

Второе слагаемое выражения (3.11) представляет собой обратnobегущую волну поля краевого эффекта, движущуюся от входного края обмотанной зоны против положительного направления оси x . Ее глубина проникновения меньше, чем у прямобегущей волны, и определяется выражением

$$L_{\text{об}} = -1/[\alpha(\eta + N)] \quad (3.13)$$

Выражение (3.13) характеризует обратное затухающее поле краевого эффекта в зоне 3 (рисунок 3.3), а выражение (3.12) – прямое затухающее поле краевого эффекта в зоне 4.

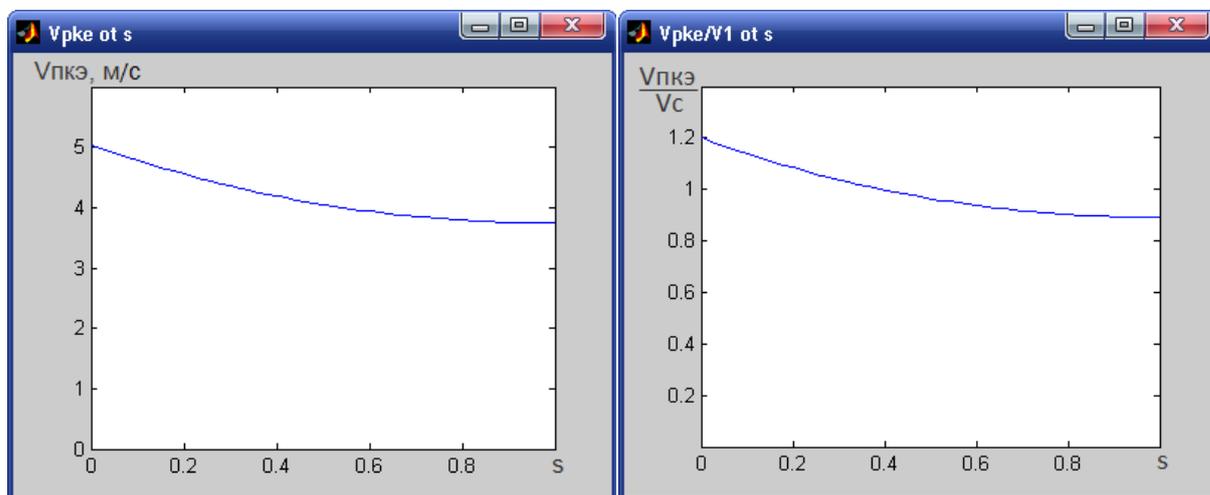
Среди волн полей, вызванных продольным краевым эффектом, наибольший интерес представляет прямобегающая волна в активной зоне индуктора[26].

Главное незатухающее поле движется в прямом направлении с синхронной скоростью $v_l = 2\tau f_1$, а все поля краевых эффектов перемещаются с фазовой скоростью

$$v_{кэ} = \frac{\omega_1}{\alpha M} = \frac{2\pi f_1 \tau}{\pi M} = \frac{2f_1 \tau}{M} = \frac{v_l}{M}. \quad (3.14)$$

Анализ выражения (3.14) показывает, что величина M при прочих равных условиях возрастает с увеличением скольжения и принимает наибольшее значение в момент пуска, когда $s = 1$. В тоже время в зависимости от добротности машины ε_0 величина M может приобретать различные значения, в том числе меньше или больше единицы. А это значит, что согласно (3.14) поля краевых эффектов, «разбегающиеся» от границ активной зоны индуктора в положительном и отрицательном направлениях оси x , могут двигаться медленнее или быстрее главного поля.

На рисунке 3.7 показаны графики зависимости скорости ПКЭ.



а)

б)

Рисунок 3.7 Графики зависимости скорости ПКЭ от скольжения:

- а) скорость распространения полей краевого эффекта; б) относительная скорость движения волн полей краевого эффекта

3.5 Механические характеристики привода в зависимости от приближения, или отдаления индукторов линейного асинхронного двигателя от оси мельницы

При расчетах уравнения динамики электропривода за основу принимались, такие параметры, как сила, критическая сила, влияние силы ПКЭ и сил сопротивления. Однако, при приближении, или отдалении индукторов ЛАД от оси мельницы появляется возможность регулирования не только частоты, но и момента вращения жерновов. Поэтому имеет смысл построения механических характеристик привода с использованием моментов двигателя.

На рисунках 3.8, 3.9, 3.10, 3.11, 3.12 изображены механические характеристики в зависимости от перемещения индукторов ЛАД к оси жерновой мельницы – R , м.

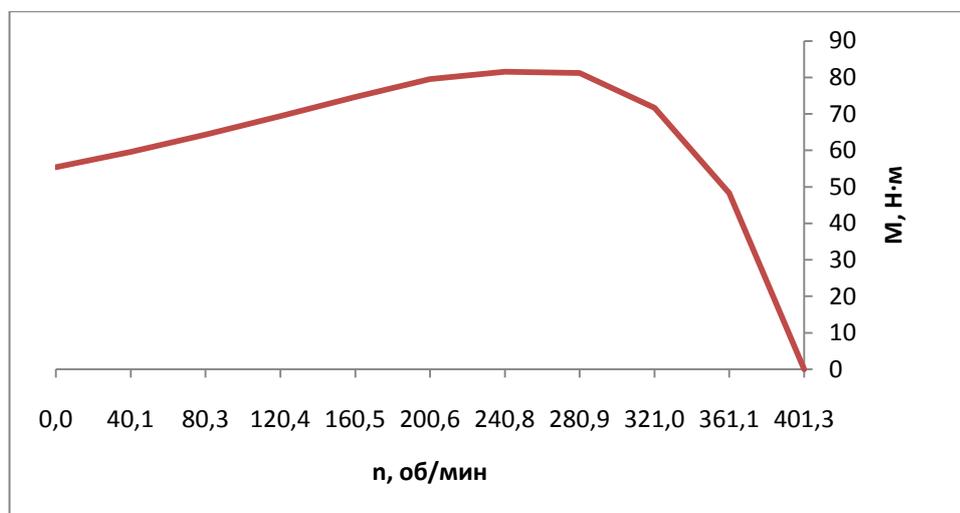


Рисунок 3.8 Механическая характеристика двигателя при расположении индукторов ЛАД на расстоянии 0,1 м от оси мельницы

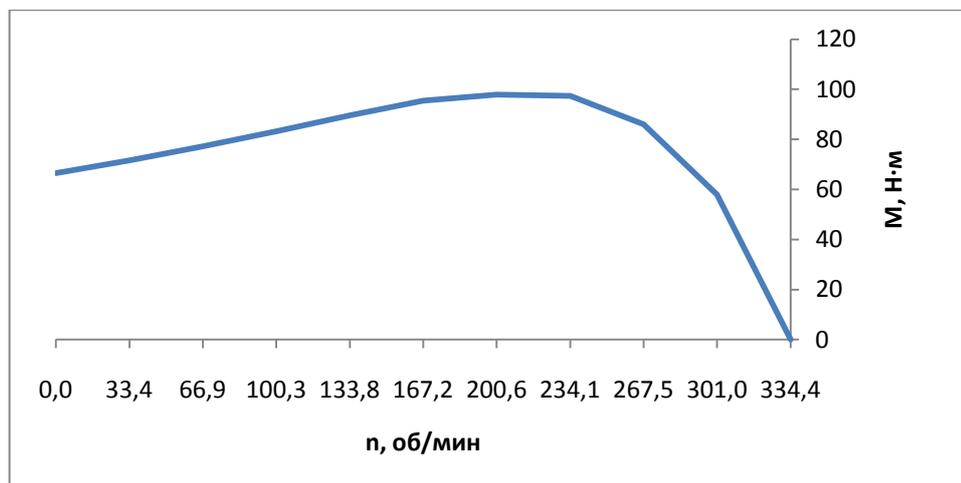


Рисунок 3.9 Механическая характеристика двигателя при расположении индукторов ЛАД на расстоянии 0,12 м от оси мельницы

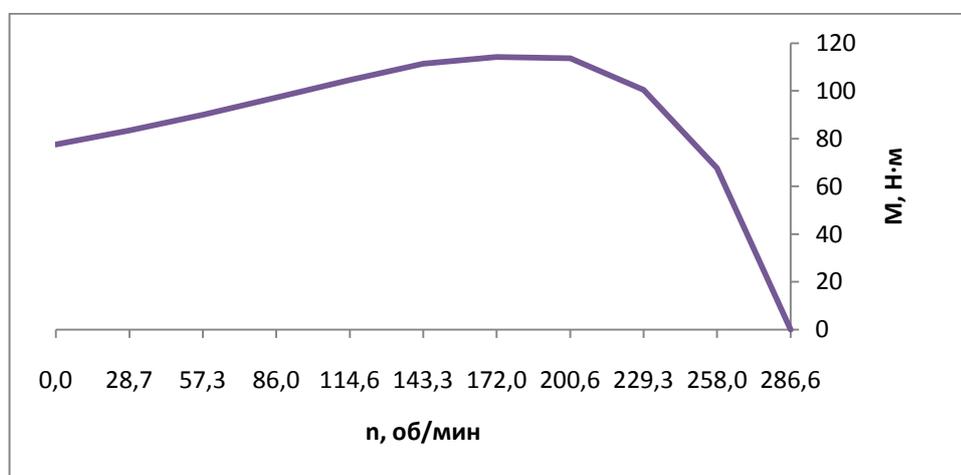


Рисунок 3.10 Механическая характеристика двигателя при расположении индукторов ЛАД на расстоянии 0,14 м от оси мельницы

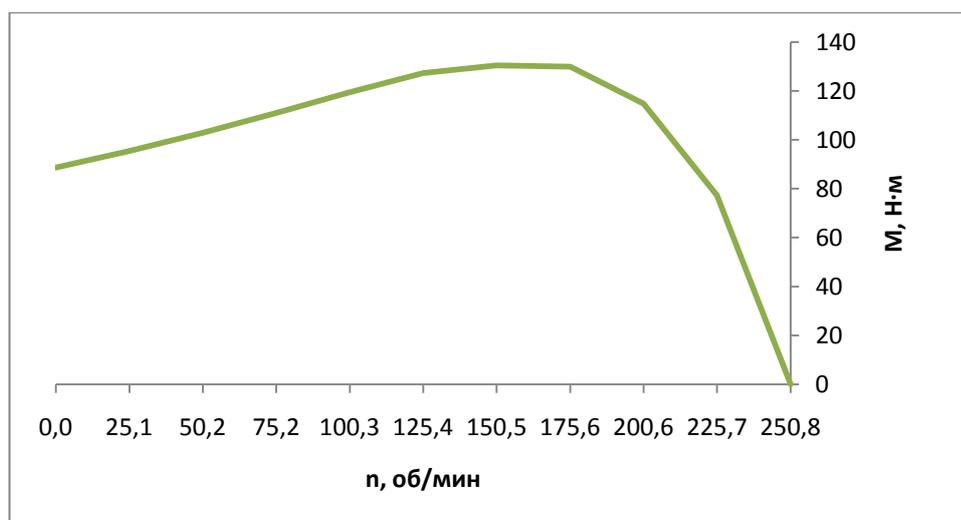


Рисунок 3.11 Механическая характеристика двигателя при расположении индукторов ЛАД на расстоянии 0,16 м от оси мельницы

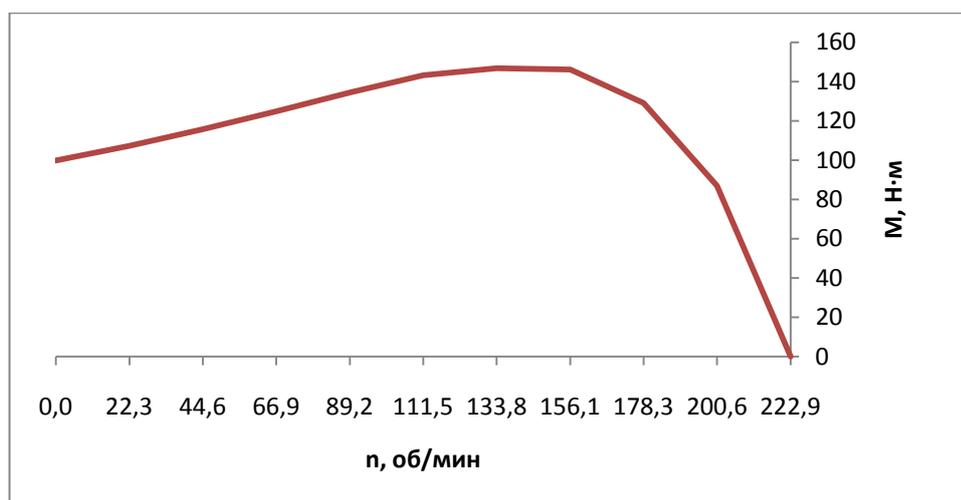


Рисунок 3.12 Механическая характеристика двигателя при расположении индукторов ЛАД на расстоянии 0,18 м от оси мельницы

Как видно из графиков, применение двухстороннего плоского ЛАД позволяет регулировать не только частоту вращения жерновой мельницы, но и момент на вторичном элементе двигателя, причем при расположении индукторов на расстоянии 0,1 м (максимальное приближение) от оси мельницы возможно получить момент вращения 81,53 Н·м и 0,18 м (максимальное отдаление) от оси мельницы – 146,75 Н·м.

3.6 Влияние продольного краевого эффекта на силу, развиваемую двигателем в зависимости от числа пар полюсов

Существует много факторов, оказывающих влияние на характеристики и свойства ЛАД, например такие, как число пар полюсов, величина воздушного зазора, частота питающей сети, активное сопротивление вторичного элемента, полные сопротивления, полюсное деление и др. Большинство из них влияют также на краевой эффект.

Лейтвейтом было предложено [129,130] увеличение числа пар полюсов, в качестве меры, направленной на ослабление влияния ПКЭ,

однако до последнего времени не было достоверного обоснования этого предложения.

Полученные с помощью одномерной математической модели А.И. Вольдека решения уравнений позволяют определить, насколько происходит снижение силы, развиваемой ЛАД в зависимости от числа пар полюсов (рисунок 3.13).

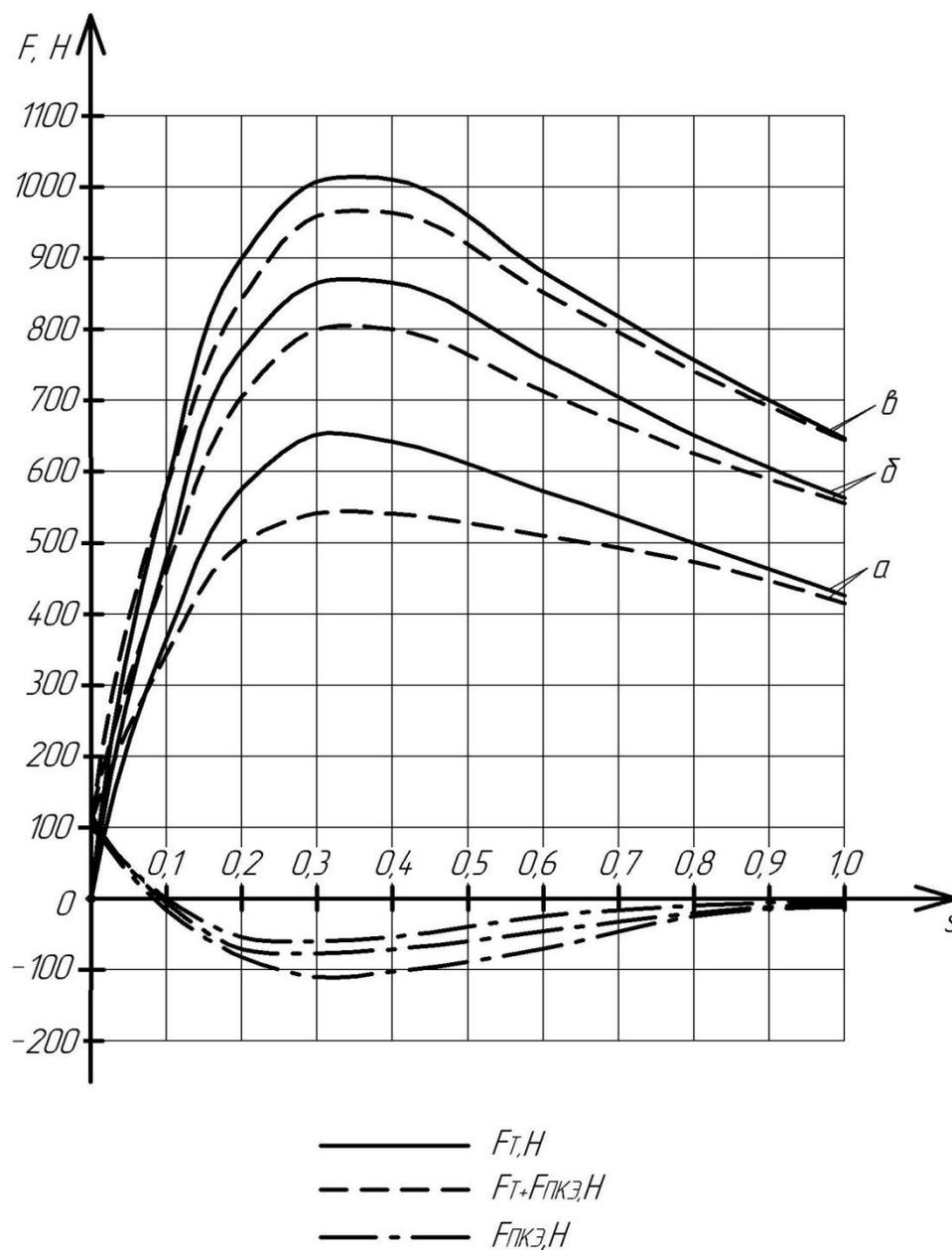


Рисунок 3.13 Влияние ПКЭ на тяговое усилие двигателя в зависимости от числа пар полюсов: а – $p = 1$, $X_m = 1,5 \text{ Ом}$; б – $p = 2$, $X_m = 1,92 \text{ Ом}$; в - $p = 3$, $X_m = 2,19 \text{ Ом}$

Из рисунка 3.13 видно, что с увеличением числа пар полюсов сужается область скольжений, где в наибольшей степени проявляется действие ПКЭ.

3.7 Производительность жерновой мельницы с линейным электроприводом

Производительность жерновой мельницы (в кг/ч) определяется по формуле [24]

$$Q = 60 \cdot k_1 k_2 \psi \rho D_d^2 \delta_{жс} n_{жс} \quad (3.15)$$

где k_1 — коэффициент производительности (обычно $k_1 = 0,7$);

k_2 — коэффициент частоты вращения ($k_2 = 0,01$);

ψ — коэффициент заполнения зоны измельчения зерном между жерновами ($\psi = 0,7 \div 0,8$);

ρ — плотность измельчаемого зерна, кг/м³;

D_d — наружный диаметр жернова, м;

$\delta_{жс}$ — зазор между жерновами, м;

$n_{жс}$ — частота вращения подвижного жернова, об/мин.

Производительность жерновой мельницы с ЛЭП в зависимости от помола разного рода зерна показана на рисунке 3.14.

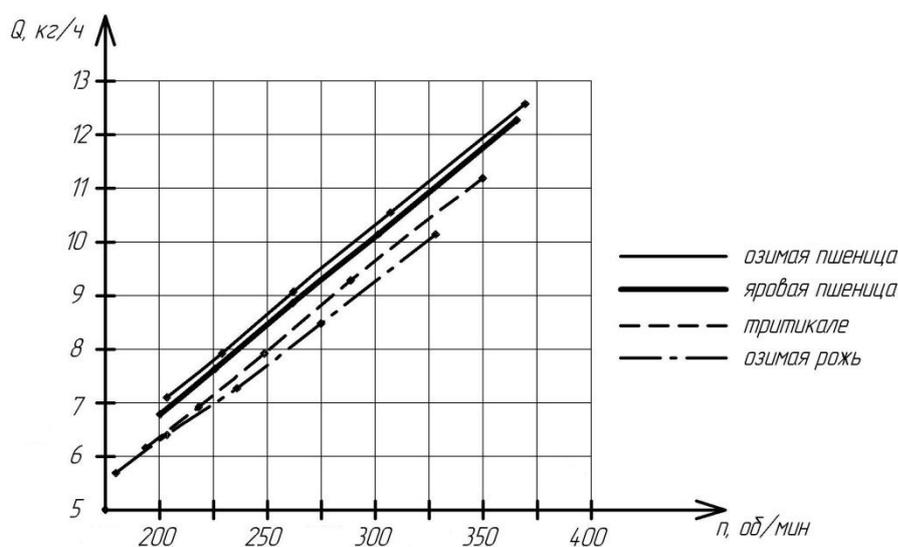


Рисунок 3.14 Производительность жерновой мельницы с ЛЭП в зависимости от помола разного рода зерна

Результаты влияния коэффициента заполнения ψ и зазора между жерновами ($\delta_{ж}$) на производительность мельницы показаны на рисунках 3.15 и 3.16.

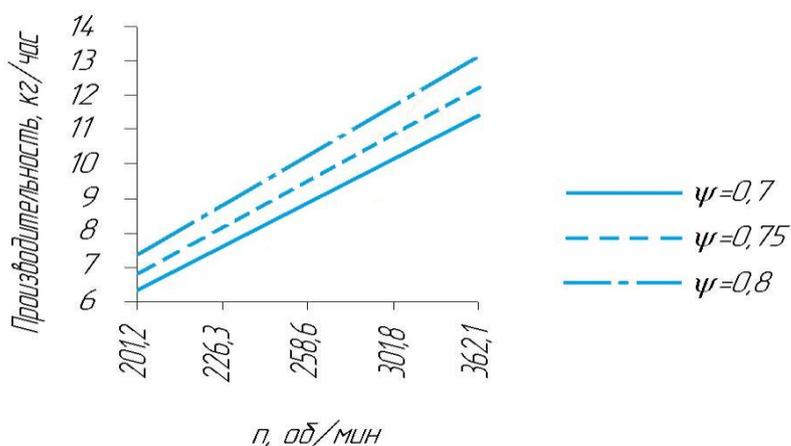


Рисунок 3.15 Влияние коэффициента заполнения ψ на производительность мельницы

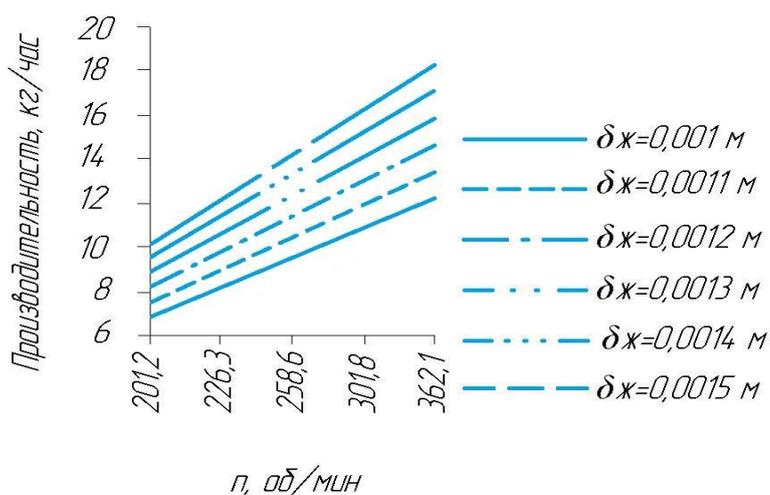


Рисунок 3.16 Влияние зазора между жерновами ($\delta_{ж}$) на производительность мельницы

Максимальное увеличение производительности жерновой мельницы с ЛЭП наблюдается при изменении зазора между жерновами от 0,001...0,0015 м (1...1,5 мм). Однако, с увеличением зазора увеличивается количество крупных частиц (составляющих зерна) в муке, поэтому целесообразным является увеличение зазора в пределах от 0,001...0,0012 м (1...1,2 мм).

3.8 Выводы по третьей главе

1. Установлено, что при работе жерновой мельницы с ЛЭП наибольшее влияние на процесс измельчения оказывает вязкое трение, определяемое в зависимости от рода зерна. Наибольшую силу сопротивления оказывает озимая рожь, коэффициент вязкого трения которой лежит в пределах от $93,0 \div 93,4$ Н·с/м, а наименьшее сопротивление озимая пшеница - $39,8 \div 40,4$ Н·с/м. При этом разница между частотой вращения жернова при помолу этих зерен составляет 10,9 – 11,2%.

2. Выявлено, что при малых диаметрах жерновов, а значит и малой вместимости рабочей зоны, сила сухого (внешнего) трения не оказывает столь большого влияния на работу ЖМ с ЛЭП, и при диаметрах жерновов $\leq 0,2$ м, ею можно пренебречь.

3. Получены зависимости изменения производительности от частоты вращения жернова при измельчении разного рода зерна; от коэффициента заполнения зоны измельчения ψ от 0,7 до 0,8; зазора между жерновами от 0,001 до 0,0015 м; изменения силы ЛАД от уменьшения, или увеличения числа пар полюсов ($p = 1 - 3$); скорости распространения полей краевого эффекта от скольжения; распространения огибающих кривых полей магнитной индукции по длине двигателя, при разных значениях силы тока; найдены механические характеристики привода при перемещении индукторов плоского ЛАД.

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЖЕРНОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ С ЛИНЕЙНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

4.1 Программа и методика экспериментальных исследований

Для подтверждения адекватности разработанной математической модели привода и проверки полученных теоретических положений, а также доказательства адекватности математической модели ЖМ с ЛАД необходимо провести экспериментальные исследования в следующем порядке:

- 1) Разработать методику проведения экспериментальных исследований;
- 2) Разработать экспериментальную модель ЖМ с ЛАД;
- 3) В соответствии с разработанной методикой эксперимента укомплектовать исследуемую установку контрольно-измерительными приборами;
- 4) Провести экспериментальные исследования, с последующей обработкой полученных результатов эксперимента;
- 5) Сравнить результаты теоретических и экспериментальных исследований, сделать выводы.

4.2 Методика проведения экспериментальных исследований

Экспериментальная установка ЖМ с ЛАД должна иметь возможность: -регулирования частоты вращения подвижного жернова изменяя расстояние между осью вращения мельницы и индукторами ЛАД (приближая индукторы ЛАД к оси мельницы частота вращения жернова увеличивается, и наоборот, отдаляя индукторы от оси, частота вращения жернова уменьшается);

-увеличения диапазона регулирования частоты и момента вращения, изменением числа пар полюсов ЛАД (параллельным соединением обмоток индукторов происходит увеличение момента, развиваемого ЛАД, а последовательным соединением обмоток индукторов происходит увеличение числа пар полюсов ЛАД в два раза, следовательно, уменьшение частоты вращения верхнего жернова);

-энергосбережения (подключение только одного из индукторов ЛАД к источнику питания, второй при этом обеспечивает замыкание магнитных силовых линий работающего индуктора);

-изменения зазора между жерновами (для помола разного рода зерна);

-установки вторичного элемента ЛАД на нижнем жернове (при этом зерно сыпется на нижний вращающийся жернов и под действием центробежных сил выходит в виде муки наружу, что будет давать более высокую производительность);

-предотвращения залипания муки в рабочей зоне жерновов (вследствие разомкнутого магнитопровода сила, развиваемая ЛАД обусловлена волной ПКЭ). Для наибольшего проявления ПКЭ индуктор плоского ЛАД должен иметь малое число полюсов: при параллельном соединении обмоток $2p = 2 \div 4 (p = 1 \div 2)$, при последовательном $2p = 4 \div 8 (p = 2 \div 4)$.

4.3 Описание экспериментальной жерновой мельницы с линейным электроприводом

В первой главе работы были приведены варианты технических решений жерновой мельницы с ЛЭП. Для создания экспериментальной установки с точки зрения удобства физической реализации и проведения экспериментов была выбрана конструкция жерновой мельницы с двухсторонним плоским ЛАД в приводе и горизонтально расположенным подвижным жерновом [82,91] (рисунок 4.1).

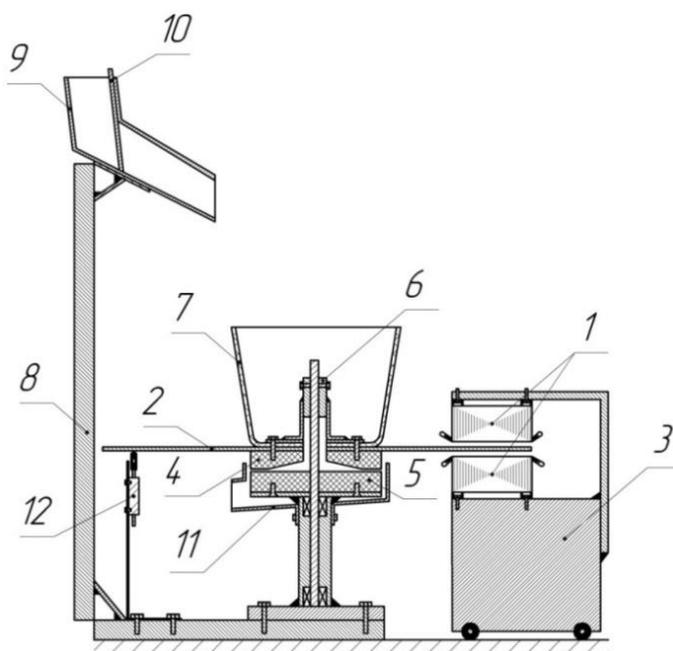


Рисунок 4.1 Структурная схема экспериментальной установки: 1 – индукторы ЛАД, 2 – вторичный элемент ЛАД, 3 – тележка, 4 – верхний подвижный жернов, 5 – нижний неподвижный жернов, 6 – втулка, 7 – бункер, для зерна, 8 – металлическая рама, 9 – лоток, 10 – заслонка, 11 – разгрузочный лоток, 12 – потенциометрический датчик Bourne 3046 L – 1 –

102

Экспериментальная жерновая мельница с ЛЭП представлена на рисунке 4.2 и детально на рисунках 4.3 и 4.4.



Рисунок 4.2 Общий вид экспериментальной жерновой мельницы с ЛЭП



Рисунок 4.3 Жернова, разгрузочный лоток и датчик



Рисунок 4.4 Двухсторонний плоский линейный асинхронный двигатель (1), закрепленный на тележке (3)

Технические характеристики двухстороннего плоского линейного асинхронного двигателя:

– размеры индукторов плоского ЛАД (длина×ширина×высота) – $0,168 \times 0,168 \times 0,06$ м;

– полюсное деление (τ) – $0,042$ м;

– число пар полюсов (p) – 2;

– число зубцов (z) – 12;

- напряжение питания (U_n/U_ϕ) – 380/220 В;
- частота питающей сети (f_1) – 50 Гц;
- сила, развиваемая ЛАД (F) – 800...900 Н;
- синхронная скорость (v_1) – 4,2 м/с.

4.4 Методика измерений и снятие экспериментальных зависимостей частоты вращения вторичного элемента линейного асинхронного двигателя

Основным параметром, характеризующим работу жерновой мельницы с ЛЭП, принята частота вращения вторичного элемента ЛАД, или подвижного жернова.

Замеры частоты вращения вторичного элемента ЛАД (диска) проводились с помощью цифрового фототахометра DT-2234A (рисунок 4.5).



Рисунок 4.5 Цифровой фототахометр DT-2234A

Цифровой фототахометр DT-2234A позволяет осуществлять точное измерение частоты вращения без соприкосновения с объектом измерения. Данные снимались следующим образом, на алюминиевый диск наносилась отражательная метка, в виде полосы синей краски (рисунок 4.6), затем при помолу к вращающемуся диску на рабочее расстояние подносился прибор.



Рисунок 4.6 Отражательная метка, в виде полосы синей краски.

Нажав кнопку измерений «TEST» и совместив видимый луч света с меткой на диске, загорался индикатор монитора тахометра, когда метка совпадала со световым лучом (около 1-2 сек.). Так как, необходимо было проверить на сколько изменяется частота вращения жернова мельницы, то замеры были сняты при постепенном перемещении индукторов ЛАД к оси. Данные, полученные непосредственно перед выключением кнопки измерений, записывались и автоматически сохранялись в самом тахометре. Сохраненные данные показываются на дисплее поочередно, если нажать кнопку памяти. Символ «UP» представляет максимальное значение, символ «dn» - минимальное значение, «LA» – последнее значение.

Технические характеристики цифрового фототахометра DT-2234A:

- диапазон измерений – $2,5 \div 99999$ об/мин;
- скорость проведения измерений – 1 с;
- разрешающая способность – $0,1 \dots 1$ об/мин;
- расстояние до тестируемого объекта – $50 \div 250$ мм;
- потребляемый ток – 80 мА;
- рабочая температура – $0 \dots 50$ °С;
- размер – $190 \times 72 \times 37$ мм;
- масса – 300 г;

– погрешность измерений – $0,05 \dots 1 \%$.

Для выявления наиболее точного значения частоты вращения вторичного элемента ЛАД [116], которое в последующем путем сравнения показаний двух приборов могло быть приравнено, или принято в качестве действительного значения применялся дополнительный контактный цифровой тахометр JM-DT-2235B с двумя детекторами (рисунок 4.7).



Рисунок 4.7 Цифровой тахометр JM-DT-2235B

Технические характеристики цифрового тахометра JM-DT-2235B представлены ниже:

- диапазон измерений – $2,5 \div 19999$ об/мин;
- время выборки – $0,8$ с;
- разрешающая способность:
 - ≤ 1000 об/мин – $0,1$ об/мин;
 - ≥ 1000 об/мин – 1 об/мин;
- потребляемый ток – 35 мА;
- размер прибора – $208 \times 72 \times 37$ мм;
- масса – 280 г;
- погрешность измерений – $0,05 \dots 1 \%$.

Значения измеренной частоты вращения вторичного элемента ЛАД с яровой пшеницей Омская – 36 в рабочей зоне жерновов показаны на рисунке 4.8.

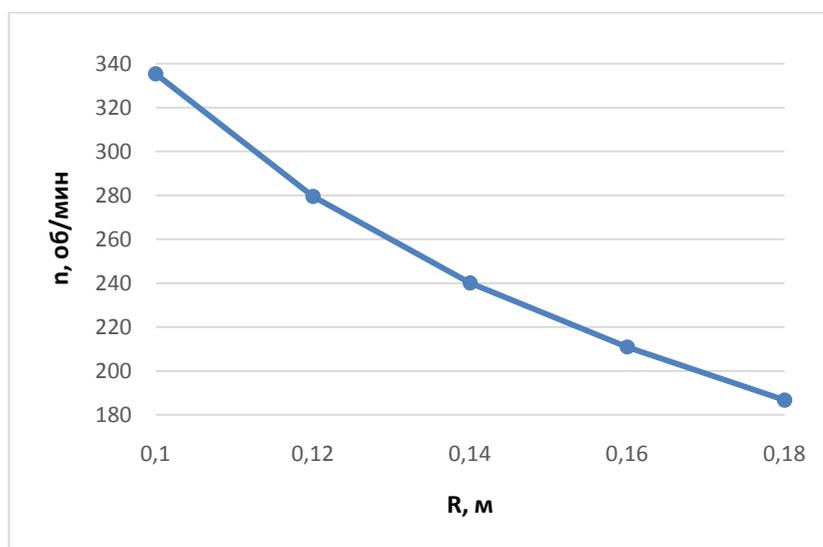


Рисунок 4.8 Значения измеренной частоты вращения ВЭ ЛАД с яровой пшеницей Омская – 36 в рабочей зоне жерновов

4.5 Математическая обработка результатов экспериментов

Для определения вероятностной погрешности физических измерений, проведенных в п. 4.4 проводится математическая обработка результатов измерений частоты вращения вторичного элемента ЛАД при перемещении индукторов от оси мельницы согласно ГОСТ 8.207-76 [99].

Таблица 4.1 Выборочные значения измеренной частоты вращения вторичного элемента ЛАД

№ измерения	X ₁ , об/мин	X ₂ , об/мин	X ₃ , об/мин	X ₄ , об/мин	X ₅ , об/мин
1	186,7	210,9	240,1	279,5	335,4
2	187,0	210,7	239,8	279,3	335,6
3	186,8	211,1	240,2	279,7	335,1
4	186,9	210,6	239,9	279,1	335,5
5	187,3	210,8	240,4	279,4	335,3
6	187,1	211,2	240,6	280,8	335,6
7	187,7	211,5	240,3	280,2	335,9
8	188,0	211,9	240,9	280,4	335,7
9	187,6	211,6	240,5	280,1	336,0
10	187,8	211,7	240,7	280,3	335,8

Среднее арифметическое результатов наблюдений (\bar{x}) в каждом ряду ($\bar{X}_1, \bar{X}_2, \bar{X}_3, \bar{X}_4$) определяем по формуле

$$\bar{X}_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i. \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned} \bar{X}_1 &= \frac{186,7 + 187,0 + 186,8 + 186,9 + 187,3 + 187,1 + 187,7 + 188,0 + 187,6 + 187,8}{10} \end{aligned}$$

$$= 187,3 \text{ об/мин.}$$

$$\bar{X}_2 = 211,2 \text{ об/мин.}$$

$$\bar{X}_3 = 240,3 \text{ об/мин.}$$

$$\bar{X}_4 = 279,8 \text{ об/мин.}$$

$$\bar{X}_5 = 335,6 \text{ об/мин.}$$

Среднеквадратические отклонения результата наблюдения в каждом ряду определяются по формуле

$$\sigma = \sqrt{D(x)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}. \quad (4.2)$$

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{(186,7 - 187,3)^2 + (187,0 - 187,3)^2 + (186,8 - 187,3)^2 + (186,9 - 187,3)^2 + (187,3 - 187,3)^2 + (187,1 - 187,3)^2 + (187,7 - 187,3)^2 + (188,0 - 187,3)^2 + (187,6 - 187,3)^2 + (187,8 - 187,3)^2}{10 - 1}}$$

$$= 0,48 \text{ об/мин.}$$

$$\sigma_2 = 0,5 \text{ об/мин.}$$

$$\sigma_3 = 0,35 \text{ об/мин.}$$

$$\sigma_4 = 0,45 \text{ об/мин.}$$

$$\sigma_5 = 0,3 \text{ об/мин.}$$

Необходимо проверить результаты наблюдений на наличие промахов по составному критерию.

$$X_{1min} = 186,7 \text{ об/мин}; X_{1max} = 188,0 \text{ об/мин.}$$

$$X_{2min} = 210,6 \text{ об/мин}; X_{2max} = 211,9 \text{ об/мин.}$$

$$X_{3min} = 239,8 \text{ об/мин}; X_{3max} = 240,9 \text{ об/мин.}$$

$$X_{4min} = 279,1 \text{ об/мин}; X_{4max} = 280,4 \text{ об/мин.}$$

$$X_{5min} = 335,1 \text{ об/мин}; X_{5max} = 336,0 \text{ об/мин.}$$

Расчет коэффициентов V_{\min} и V_{\max} проводим по формулам

$$V_{\min} = \frac{\bar{x} - x_{\min}}{\sigma}, V_{\max} = \frac{x_{\max} - \bar{x}}{\sigma},$$

где x_{\min} – минимальное значение замеренной частоты вращения в ряду, об/мин;

x_{\max} – максимальное значение замеренной частоты вращения в ряду, об/мин

$$V_{\min 1} = \frac{187,3 - 186,7}{0,48} = 1,25.$$

$$V_{\max 1} = \frac{188,0 - 187,3}{0,48} = 1,46.$$

$$V_{\min 2} = 1,2, V_{\max 2} = 1,4.$$

$$V_{\min 3} = 1,43, V_{\max 3} = 1,71.$$

$$V_{\min 4} = 1,56, V_{\max 4} = 1,33.$$

$$V_{\min 5} = 1,67, V_{\max 5} = 1,33.$$

При доверительной вероятности $P_{\text{дов}}=0,95$ уровень значимости

$$\alpha = 1 - P_{\text{дов}} = 1 - 0,95 = 0,05.$$

Значение критического коэффициента при числе измерений $n=10$ $\beta=2,11$ [55, 78].

Для того чтобы определить, не являются ли промахами максимальное и минимальное значения измеренной величины, их сравнивают с критическим коэффициентом.

$$V_{\min} < \beta, V_{\max} < \beta.$$

Значения коэффициентов V_{\min} и V_{\max} по всем пяти рядам меньше критического коэффициента $\beta=2,11$, следовательно, ни одно из минимальных и максимальных результатов наблюдений нельзя отнести к промахам.

Оценка среднеквадратического отклонения результатов измерений вычисляется по формуле

$$\sigma_x = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}. \quad (4.3)$$

$$\sigma_{x_1} = \frac{0,48}{\sqrt{10}} = 0,15 \text{ об/мин.}$$

$\sigma_{X_2} = 0,16$ об/мин, $\sigma_{X_3} = 0,11$ об/мин, $\sigma_{X_4} = 0,14$ об/мин, $\sigma_{X_5} = 0,09$ об/мин.

Доверительный интервал случайной составляющей погрешности результата измерения обычно расположен симметрично относительно величины \bar{X} . Значение доверительной границы $\dot{\Delta}$ вычисляется согласно ГОСТ 8.207 – 76 по формуле

$$\dot{\Delta} = t_\gamma \cdot \sigma_x, \quad (4.4)$$

где t_γ - коэффициента распределения Стьюдента. При доверительной вероятности $P_{довер} = 0,95$ и числе степеней свободы $n-1=9$ принимается $t_\gamma = 2,27$ [55].

$$\dot{\Delta}_1 = 2,27 \cdot 0,15 = 0,34.$$

$$\dot{\Delta}_2 = 0,36, \dot{\Delta}_3 = 0,25, \dot{\Delta}_4 = 0,32, \dot{\Delta}_5 = 0,2.$$

В результате статистической обработки конечной выборки $\bar{X}_1 \dots \bar{X}_5$ могут быть найдены случайные величины X_H и X_B (нижние и верхние доверительные границы), образующие доверительный интервал [78]

$$X_H = \bar{X} - \dot{\Delta}; X_B = \bar{X} + \dot{\Delta}; \quad (4.5)$$

$$X_{H1} = 187,3 - 0,3 = 187,0 \text{ об/мин}; X_{B1} = 187,3 + 0,3 = 187,6 \text{ об/мин}.$$

$$X_{H2} = 210,8 \text{ об/мин}; X_{B2} = 211,6 \text{ об/мин}.$$

$$X_{H3} = 240,1 \text{ об/мин}; X_{B3} = 240,6 \text{ об/мин}.$$

$$X_{H4} = 279,5 \text{ об/мин}; X_{B4} = 280,1 \text{ об/мин}.$$

$$X_{H5} = 335,4 \text{ об/мин}; X_{B5} = 335,8 \text{ об/мин}.$$

Границы неисключенной систематической погрешности результата измерений вычисляются по формуле

$$\Delta_{\text{сист}} = \bar{x} - x_H, \quad (4.6)$$

где \bar{x} - среднее значение замеренной частоты вращения ВЭ ЛАД, об/мин;

x_H - номинальное значение частоты вращения ВЭ ЛАД, полученное при сравнении значений частоты вращения с тахометром JM-DT-2235B, об/мин.

$$\Delta_{X1\text{сист}} = 187,3 - 187,1 = 0,2 \text{ об/мин}, \Delta_{X2\text{сист}} = 211,2 - 210,9 = 0,3 \text{ об/мин},$$

$$\Delta_{X3\text{сист}} = 240,3 - 240,0 = 0,3 \text{ об/мин}, \Delta_{X4\text{сист}} = 279,8 - 279,6 = 0,2 \text{ об/мин},$$

$$\Delta_{X5\text{сист}} = 335,6 - 335,5 = 0,1 \text{ об/мин},$$

Неисключенные систематические погрешности (НСП) рассматриваются как реализации случайной величины, имеющей равномерное распределение.

Каждая из НСП имеет свою границу $\Delta_{\text{сист}}$. Если значения существенно отличаются друг от друга (например, на два порядка или более), то меньшие из них следует отбросить, а оставшиеся просуммировать с учетом вероятностного коэффициента K по формуле

$$\Delta_c = K \sqrt{\frac{1}{3} \sum_{i=1}^m \Delta_{\text{сист}i}^2}, \quad (4.7)$$

где $\Delta_{\text{сист}i}$ – граница i -й систематической погрешности, найденная нестатистическими методами;

m – число составляющих НСП;

K – коэффициент, определяемый принятой доверительной вероятностью и числом составляющих НСП (при $P=0,95$ $K=1,1$ при любом значении m).

Так как соотношение $\frac{\Delta_{\text{сист}}}{\sigma_x} < 8$ по всем пяти рядам измерений, суммарная погрешность вычисляется, как

$$\Delta_{\Sigma} = K_{\Sigma} \cdot S_{\Sigma}, \quad (4.8)$$

где K_{Σ} – коэффициент распределения композиции случайной и неисключенной систематической погрешности результата косвенных измерений при заданной доверительной вероятности $P_{\text{дов}}=0,95$;

S_{Σ} – оценка суммарного среднего квадратического отклонения композиции указанных законов распределения.

Формулу можно использовать в соответствии с ГОСТ 8.207 – 76 при условии, что неисключенные систематические погрешности аргументов измерений распределены по равномерному закону, а случайные погрешности по нормальному закону.

Коэффициент K_{Σ} вычисляют по эмпирической формуле

$$K_{\Sigma} = \frac{\Delta + \Delta_c}{\sigma_x + \sqrt{\frac{1}{3} \sum_{i=1}^m \Delta_{\text{сист}i}^2}}. \quad (4.9)$$

Оценку суммарного среднего квадратического отклонения результата измерения вычисляют по формуле

$$S_{\Sigma} = \sqrt{\frac{1}{3} \sum_{i=1}^m \Delta_{\text{сист}i}^2 + \sigma_x^2}. \quad (4.10)$$

$$\Delta_c = \Delta_{\text{сист}} \cdot K.$$

$$\dot{\Delta} = \sigma_x \cdot t_p.$$

$$\delta x = \pm \frac{\Delta_{\Sigma}}{\bar{x}}$$

Значение коэффициента распределения Стьюдента при доверительной вероятности $P_{\text{дов}}=0,95$ и числе степеней свободы $n-1=9$ принимается $t=2,27$ [55].

$$S_{\Sigma 1} = \sqrt{\left(\frac{1}{3} \cdot 0,2^2 + 0,15^2\right)} = 0,19.$$

$$\Delta_{c1} = 0,2 \cdot 1,1 = 0,22.$$

$$\dot{\Delta}_1 = 0,15 \cdot 2,27 = 0,34.$$

$$K_{\Sigma} = \frac{0,2 + 0,22}{0,15 + \sqrt{\frac{1}{3} \cdot 0,2^2}} = 1,58.$$

$$\Delta_{\Sigma 1} = 0,19 \cdot 1,58 = 0,3 \text{ об/мин.}$$

$$X_1 = (187,3 \pm 0,3) \text{ об/мин, } P_{\text{дов}} = 0,95.$$

$$\delta x_1 = \pm \frac{\Delta_{\Sigma}}{\bar{x}} = \pm \frac{0,3}{187,3} = \pm 0,16\%$$

$$S_{\Sigma 2} = \sqrt{\left(\frac{1}{3} \cdot 0,3^2 + 0,16^2\right)} = 0,24.$$

$$\Delta_{c2} = 0,3 \cdot 1,1 = 0,33.$$

$$\dot{\Delta}_2 = 0,16 \cdot 2,27 = 0,36.$$

$$K_{\Sigma 2} = \frac{0,3 + 0,33}{0,16 + \sqrt{\frac{1}{3} \cdot 0,3^2}} = 1,89.$$

$$\Delta_{\Sigma 2} = 0,24 \cdot 1,89 = 0,45 \text{ об/мин.}$$

$$X_2 = (211,2 \pm 0,45) \text{ об/мин, } P_{\text{дов}} = 0,95.$$

$$\delta x_2 = \pm 0,21\%$$

$$S_{\Sigma 3} = \sqrt{\left(\frac{1}{3} \cdot 0,3^2 + 0,11^2\right)} = 0,21.$$

$$\Delta_{c3} = 0,3 \cdot 1,1 = 0,33.$$

$$\dot{\Delta}_3 = 0,11 \cdot 2,27 = 0,25.$$

$$K_{\Sigma 3} = \frac{0,3 + 0,33}{0,11 + \sqrt{\frac{1}{3} \cdot 0,3^2}} = 2,22.$$

$$\Delta_{\Sigma 3} = -0,21 \cdot 2,22 = 0,47 \text{ об/мин.}$$

$$X_3 = (240,3 \pm 0,47) \text{ об/мин, } P_{\text{дов}} = 0,95.$$

$$\delta x_3 = \pm 0,19\%$$

$$S_{\Sigma 4} = \sqrt{\left(\frac{1}{3} \cdot 0,2^2 + 0,14^2\right)} = 0,18.$$

$$\Delta_{c4} = 0,2 \cdot 1,1 = 0,22.$$

$$\dot{\Delta}_4 = 0,14 \cdot 2,27 = 0,32.$$

$$K_{\Sigma 4} = \frac{0,2 + 0,22}{0,14 + \sqrt{\frac{1}{3} \cdot 0,2^2}} = 1,64.$$

$$\Delta_{\Sigma 4} = -0,18 \cdot 1,64 = 0,3 \text{ об/мин.}$$

$$X_4 = (279,8 \pm 0,3) \text{ об/мин, } P_{\text{дов}} = 0,95.$$

$$\delta x_4 = \pm 0,11\%$$

$$S_{\Sigma 5} = \sqrt{\left(\frac{1}{3} \cdot 0,1^2 + 0,09^2\right)} = 0,11.$$

$$\Delta_{c5} = 0,1 \cdot 1,1 = 0,11.$$

$$\dot{\Delta}_5 = 0,09 \cdot 2,27 = 0,2.$$

$$K_{\Sigma 5} = \frac{0,1 + 0,11}{0,09 + \sqrt{\frac{1}{3} \cdot 0,1^2}} = 1,42.$$

$$\Delta_{\Sigma 5} = 0,11 \cdot 1,42 = 0,16 \text{ об/мин.}$$

$$X_5 = (335,6 \pm 0,16) \text{ об/мин, } P_{\text{дов}} = 0,95.$$

$$\delta x_5 = \pm 0,05\%$$

Анализ результатов измерений частоты вращений ВЭ ЛАД показывает, что относительная погрешность измерений не превышает $\pm 0,21\%$.

4.6 Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований

Результаты сравнения теоретических и экспериментальных данных изменения частоты вращения подвижного жернова мельницы в зависимости от перемещения индукторов ЛАД изображено на рисунке 4.9.

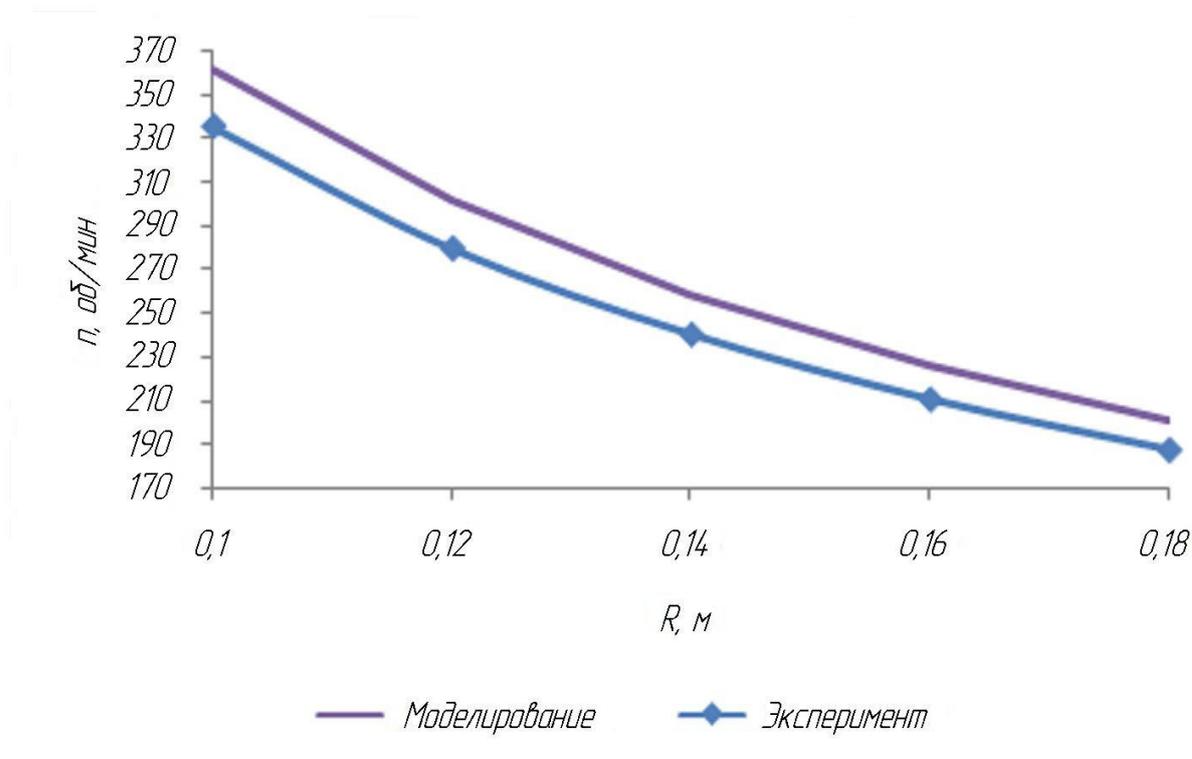


Рисунок 4.9 Сравнительная оценка теоретических и экспериментальных данных изменения частоты вращения подвижного жернова мельницы в зависимости от перемещения индукторов ЛАД

Анализ результатов измерений частоты вращения ВЭ ЛАД (число пар полюсов равно двум) при помоле яровой пшеницы Омская – 36 показал, что расхождение результатов измерений, полученных теоретическим и экспериментальным путем не превышает 7,32 %.

4.7 Выводы по четвертой главе

1. Разработана методика экспериментальных исследований, на основе которой создана экспериментальная ЖМ с ЛЭП, которая обладает широкими возможностями: регулированием частоты вращения подвижного жернова изменяя расстояние между осью вращения мельницы и индукторами ЛАД; увеличенным диапазоном регулирования частоты вращения и момента, изменением числа пар полюсов ЛАД; энергосбережением, при подключении только одного из индукторов ЛАД к источнику питания; изменением зазора между жерновами, для помола разного рода зерна; установки вторичного элемента ЛАД на нижнем жернове для получения еще большей производительности; предотвращения залипания муки в рабочей зоне жерновов, так как сила, развиваемая ЛАД обусловлена волной ПКЭ.

2. Установлено, что применением двухстороннего плоского ЛАД ($U_n / U_\phi = 380/220\text{В}$, $f_1 = 50 \text{ Гц}$, $p = 2; z = 12$; $\tau = 0,042\text{м}$, $v_1 = 4.2\text{м/с}$) в приводе жерновой мельницы при помоле яровой пшеницы Омская – 36 возможно плавно регулировать частоту вращения подвижного жернова от 187,3...335,6 об/мин.

3. Сравнение теоретических и экспериментальных зависимостей частоты вращения с относительной погрешностью измерений $\pm 0,21\%$ показало, что их максимальное расхождение не превышает 7,32 %, что позволяет считать снятые экспериментальные зависимости с достаточной точностью соответствующими данным теоретических исследований, а разработанную математическую модель адекватно отражающей физические процессы и использовать ее в практических расчетах.

5 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВНЕДРЕНИЯ ПРИВОДА ЖЕРНОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ С ЛИНЕЙНЫМ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

5.1 Расчет экономической эффективности жерновой мельницы с приводом на базе линейного асинхронного двигателя

Разработка привода жерновой мельницы с линейным асинхронным двигателем позволяет добиться экономии текущих затрат на оборудование и электроэнергии при подключении только одного из индукторов плоского линейного асинхронного двигателя. Расчет проводится путем сравнительного анализа проектируемого (таблица 5.1) и базового варианта (таблица 5.2), за который принята жерновая мельница АВР6-890 (Агрегат размольный вертикальный с жерновами диаметра – 890 мм) с асинхронным двигателем 5А200М6, преобразователем частоты источника питания IBD223U43В, шкивами, клиновыми ремнями и вибрационным преобразователем движения). Проведение сравнительного анализа осуществляется статистическим методом срока окупаемости инвестиций без учета дисконтирования [27, 28, 57, 77, 79, 86, 121].

Таблица 5.1 Определение стоимости проектируемого варианта

Оборудование	Количество, штук	Стоимость единицы, руб.	Общая стоимость, проектируемого варианта, руб.
Плоский линейный асинхронный двигатель	2	35152	70304
Вторичный элемент ЛАД	1	5940	5940
Система управления ЛАД	1	10794	10794
Мельница жерновая АВР6-890 без электропривода	1	66218	66218
Мельница жерновая АВР6-890 с электроприводом	1	-	153256
Итого			153256

Таблица 5.2 Определение стоимости базового варианта

Оборудование	Количество, штук	Стоимость единицы, руб.	Общая стоимость, проектируемого варианта, руб.
Асинхронный двигатель 5А200М6	1	49673	49673
Преобразователь частоты источника питания IBD223U43B	1	68900	68900
Шкивы	2	2592	5184
Клиновые ремни	5	478	2390
Вибрационный преобразователь движения	1	18615	18615
Мельница жерновая АВР6-890 без электропривода	1	66218	66218
Мельница жерновая АВР6-890 с электроприводом	1	-	210980
Итого			210980

Данные для расчета экономической эффективности внедрения привода жерновой мельницы с плоским линейным асинхронным двигателем приведены в таблице 5.3

Таблица 5.3 Исходные данные для расчета экономической эффективности

Показатель	Символ	Базовый вариант	Проектируемый вариант
Выход продукции, т/ч	$A_{1,2}$	0,49	0,49
Мощность установки, кВт	$P_{1,2}$	22	22
Стоимость электроэнергии, $\frac{руб}{кВт\cdotч}$	$\beta_{э}$		3,05
Коэффициент, учитывающий расход на транспорт	K_m		0,14
Коэффициент, учитывающий расходы на монтаж	K_M		0,19
Коэффициент запаса	$K_з$		0,8
Уральский коэффициент	$K_{урал}$		1,15
Коэффициент сложности	$K_{слож}$		1,6
Нормативный коэффициент эффективности	E		0,15
Тарифная ставка, руб	$T_{став}$		33,19
Время работы установки за год, час	Φ	528	528
Стоимость установки	$K_{уст}$	210980	153256

Капитальные вложения проектируемого варианта рассчитываются по формуле:

$$K_{np} = C_{об} + C_{тp} + C_{м} + P_p, \quad (5.1)$$

где: K - капитальные вложения, руб;

$C_{об}$ - стоимость оборудования, руб;

$C_{тp}$ - транспортные расходы, руб;

$C_{м}$ - расходы на монтажные работы, руб;

P_p - прочие расходы руб.

Стоимость оборудования:

$$C_{об} = 70304 + 5940 + 10794 + 66218 = 153256 \text{ руб.}$$

Затраты на транспортировку:

$$C_{тp} = \frac{153256 \cdot 14}{100} = 21455,84 \text{ руб.}$$

Стоимость монтажных работ:

$$C_{м} = \frac{153256 \cdot 19}{100} = 29118,64 \text{ руб.}$$

Прочие расходы составляют 1,5% от стоимости оборудования:

$$P_p = \frac{153256 \cdot 1,5}{100} = 2298,84 \text{ руб.}$$

Капитальные вложения проектируемого варианта:

$$K_{np} = 153256 + 21455,84 + 29118,64 + 2298,84 = 206129,32 \text{ руб.}$$

$$K_{б} = 210980 + 29537,2 + 40086,2 + 3164,7 = 283768,1 \text{ руб.}$$

Расход электрической энергии:

$$Q_{э} = P \cdot t \cdot K_з \quad (5.2)$$

где $Q_{э}$ – расход электрической энергии, кВт·ч/год;

P – установленная мощность, кВт;

t - время работы установки в год;

$K_з$ - коэффициент запаса.

Результаты расчета приведены в таблице 5.4.

Таблица 5.4 Определение затрат на электроэнергию

Вариант	Установленная мощность, кВт	Расход электроэнергии, кВт·ч/год
Базовый	22	34672
Проектируемый	22	34672

Определим эксплуатационные затраты:

$$\text{ЭЗ} = \text{ЗП} + A + \text{ТО} + \text{ТР} + \text{Э} \quad (5.3)$$

где ЗП - заработная плата обслуживающего персонала, руб;

A - издержки на амортизацию, руб;

ТО и ТР - издержки на техническое обслуживание и текущий ремонт, руб;

Э - затраты на электрическую энергию, руб.

Расчет заработной платы:

$$\text{ЗП} = n \cdot T_{\text{став}} \cdot K_{\text{слож}} \cdot K_{\text{урал}} \cdot \Phi \quad (5.4)$$

где n - количество рабочих, человек;

$T_{\text{став}}$ - тарифная ставка, руб;

$K_{\text{слож}}$ - коэффициент сложности;

$K_{\text{урал}}$ - уральский коэффициент;

Φ - число часов работы в год.

Расчет базового варианта:

$$\text{ЗП}_б = 3 \cdot 33,19 \cdot 1,6 \cdot 1,15 \cdot 528 = 96734,25 \text{ руб.}$$

Так как число рабочих для проектируемого варианта не отличается от базового, $\text{ЗП}_б = \text{ЗП}_п = 96734,25$ руб.

Издержки на амортизацию принимаем равные 14% от капитальных вложений. Издержки на ТО и ТР принимаем равные 18% от капитальных вложений.

Расчет базового варианта:

$$A = \frac{283768,1 \cdot 14}{100} = 39727,53 \text{ руб.}$$

$$TO \text{ и } TP = \frac{283768,1 \cdot 18}{100} = 51078,26 \text{ руб.}$$

Расчет проектируемого варианта:

$$A = \frac{206129,32 \cdot 14}{100} = 28858,1 \text{ руб.}$$

$$TO \text{ и } TP = \frac{206129,32 \cdot 18}{100} = 37103,28 \text{ руб.}$$

Определим затраты на электроэнергию:

$$\mathcal{E} = Q \cdot \beta_{\mathcal{E}}, \quad (5.5)$$

где $\beta_{\mathcal{E}}$ - тариф на электроэнергию, руб.

$$\mathcal{E}_B = 34672 \cdot 3,05 = 105749,6 \text{ руб.}$$

$$\mathcal{E}_{PP} = 34672 \cdot 3,05 = 105749,6 \text{ руб.}$$

Таким образом, эксплуатационные затраты при базовом и проектируемом варианте будут равны:

$$\mathcal{E}_{\mathcal{E}} = 96734,25 + 39727,53 + 51078,26 + 105749,6 = 293289,64 \text{ руб.}$$

$$\mathcal{E}_{np} = 96734,25 + 28858,1 + 37103,28 + 105749,6 = 268445,23 \text{ руб.}$$

Рассчитаем приведенные затраты:

$$PP = \mathcal{E} + E \times K \quad (5.6)$$

где PP - приведенные затраты, руб;

E - нормативный коэффициент эффективности;

K - капитальные вложения, руб.

$$PP_{\mathcal{E}} = 293289,64 + 0,15 \cdot 283768,1 = 335854,85 \text{ руб.}$$

$$PP_{np} = 268445,23 + 0,15 \cdot 206129,32 = 299364,62 \text{ руб.}$$

Рассчитаем годовой экономический эффект:

$$\Gamma_{\mathcal{E}} = PP_{\mathcal{E}} - PP_{np} \quad (5.7)$$

$$\Gamma_{\mathcal{E}} = 335854,85 - 299364,62 = 36490,23 \text{ руб.}$$

Приведем расчет сроков окупаемости капитальных вложений:

$$T = \frac{K_{np}}{\Gamma_{\mathcal{E}}} \quad (5.8)$$

$$T = \frac{206129,32}{36490,23} = 5,6 \text{ года}$$

Рассчитаем фактический коэффициент эффективности капитальных вложений:

$$E_{\phi} = \frac{1}{T} \quad (5.9)$$

$$E_{\phi} = \frac{1}{5,6} = 0,2$$

Технико-экономические показатели сводим в таблицу 5.5

Таблица 5.5 Технико-экономические показатели

Показатель	Вариант	
	базовый	проектируемый
Капитальные вложения, руб.	283768,1	206129,32
Эксплуатационные затраты, руб.	293289,64	268445,23
Приведенные затраты, руб.	335854,85	299364,62
Годовой экономический эффект, руб.		36490,23
Сроки окупаемости капитальных вложений, год		5,6
Фактический коэффициент эффективности капитальных вложений		0,2

5.2 Технология изготовления индуктора ЛАД

По чертежу определяется требуемое количество листов на каждый индуктор. Предварительно стандартные листы железа раскраиваются по требуемому размеру, затем производится вырубка заготовок. Эти заготовки стягиваются технологическими обжимными плитами в пакеты толщиной 20-40 мм каждый. В каждом пакете на станке просверливаются отверстия под стяжные шпильки индуктора. Затем пакеты разбираются, обжимаются на прессе и закрепляются уголками и шпильками в единый пакет. Следующей операцией является шлифовка поверхности магнитопровода на

станке для обеспечения строго параллельного расположения с вторичной цепью, затем в магнитопроводе профрезуются прямоугольные пазы для обмоток, после чего пакет вновь разбирается, и каждая пластина очищается от заусенец и отшлифовывается.

Наиболее распространенным способом изоляции листов магнитопровода является двухстороннее покрытие масляно-канифольными лаками № 202 и 302. Но при изоляции листов таким способом достигается довольно низкий коэффициент заполнения пакета магнитопровода железом, что, в свою очередь, ведет к низким энергетическим характеристикам ЛАД. Поэтому применяется метод фосфатирования листов, что позволяет получить при высоком коэффициенте заполнения пакета сталью надежную изоляцию листов магнитопровода индуктора. Преимущества этой технологии заключаются в следующем:

- 1) значительное повышение производительности труда и экономия лака;
- 2) коэффициент заполнения пакетов сталью увеличивается до 98 %;
- 3) снижение потерь в стали за счет дополнительного отжига фосфотирования и хорошая изоляция листов.

После изоляции листов магнитопровода проводятся следующие технологические операции по сборке индуктора ЛАД:

- 1) шпильки, соединяющие листы железа в индукторе, изолируются лакотканью;
- 2) пакет стали обжимается на прессе и окончательно закрепляется шпильками;
- 3) изготавливаются шаблоны для намотки секций и наматываются обмотки;
- 4) секции пропитываются лаком, затем укладываются в пазы. Для пазовой изоляции используется фторопластовая пленка минимальной толщины или лакоткань [4];
- 5) катушки объединяются в катушечные группы по электрической схеме при желательном использовании контактной сварки;

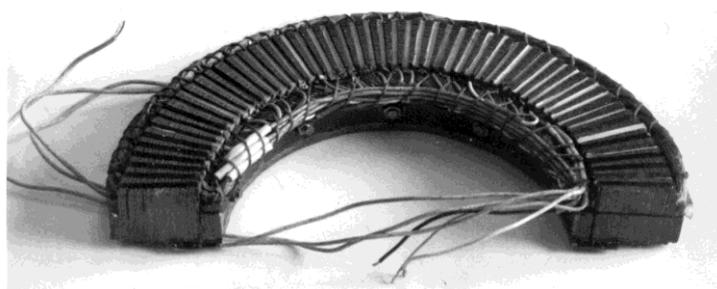
б) намотанные индукторы помещаются в ультразвуковую установку УЗУ-0,25 с лаком МЛ-92 ГОСТ 6240-70 на 10 минут, затем сушатся в вакуумной компаундной печи при температуре 120° в течение 4 часов.

Операция № 6 проводится три раза для улучшения изоляционных свойств электродвигателей.

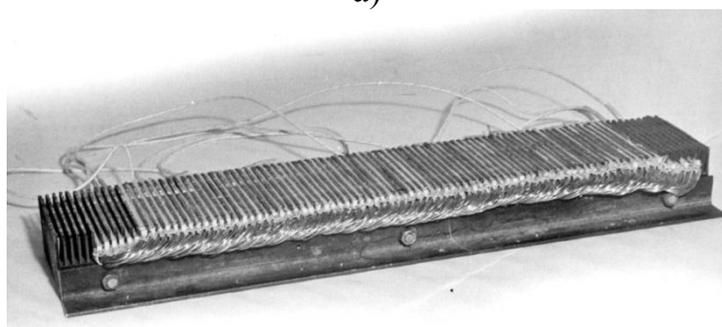
Обмотки контролируются и испытываются на всех стадиях производства: после изготовления катушек, после укладки обмоток в пазы, после сборки ЛАД.

Сопротивление изоляции обмоток ЛАД по отношению к корпусу и сопротивление изоляции между отдельными фазами обмоток должно быть не менее 0,5 МОм, согласно ГОСТ 183-66.

На рисунке 5.1 даны фотографии индукторов ЛАД, изготовленные по приведенной технологии.



а)



б)

Рисунок 5.1 Индукторы ЛАД, изготовленные на учебно -
производственном предприятии вуза: а) –дугостаторный индуктор; б) –
плоский индуктор

Дугостаторный индуктор является наиболее рациональным вариантом применения в приводе жерновой мельницы, так как этот индуктор повторяет очертания вторичного элемента ЛАД (диска), из – за чего появляется возможность уменьшения потерь мощности, КПД, $\cos\phi$ и создания наибольшего сцепления между индуктором(ми) и алюминиевым диском. Однако этот вариант индуктора является наиболее сложным в изготовлении, по отношению к плоскому индуктору ЛАД. Поэтому в данной диссертационной работе рассматривается применение в приводе мельницы лишь плоского индуктора ЛАД в двухстороннем исполнении, для создания большей силы, развиваемой двигателем.

5.3 Пропитка индуктора эпоксидным компаундом

Для заливки применяют компаунд ЭЗК-6.

Состав компаунда ЭЗК-6 (НО.014.000 или НО.054.003):

- компаунд К-115 – 100 в.ч.;
- пылевидный кварцевый песок – 50 ÷ 100 в.ч.;
- полиэтиленополиамин – 10 ÷ 12 в.ч.

Свойства компаунда ЭЗК – 6 приведены в таблице 5.6

Таблица 5.6 Свойства компаунда ЭЗК – 6

Удельная вязкость кгсм/см ²	К-1 лин. расширения	Удельный вес	Линейная усадка	Теплопроводимость	Жизнеспособность = 20°С мин	Вязкость по ворон НИЙКЛ = 20°С
5,5	30	1,22	1÷1,5	0,3	60	3

Приготовление ЭЗК-6:

1. Отвесить компоненты;
2. Смешать за исключением полиэтиленополиамины;
3. Вакуумировать при $t = 70\div 75^{\circ}\text{C}$, р. 5-10 мм рт. ст.;
4. Отвакуумированную смесь охладить до нормальной температуры и ввести

полиэтиленополиамин при тщательном помешивании.

Заливку индуктора компаундом ЭЗК-6 проводят в следующем технологичном порядке:

I. Подготовка заливочной формы:

1. Очистить или промыть внутреннюю поверхность формы ацетоном, бензином или уайт-спиртом;
2. Покрыть рабочую поверхность формы смазкой на основе полиизобутилена;
3. Высушить смазку на основе полиизобутилена;

$t = 18-20^{\circ}\text{C}$ T-30 мин

$t = 60-70^{\circ}\text{C}$ T-10 мин

Форма используется один раз.

На основе СКТ $t = 200-250^{\circ}\text{C}$ T-5 часов

Форма используется три раза.

II. Подготовка индуктора к заливке и заливка индуктора:

1. Подготовить компаунд;
2. Высушить индуктор $t = 70^{\circ}\text{C}$. Выдержка 2 часа;
3. Довести температуру индуктора до температуры компаунда, т.е. 20°C ;
4. Вынуть индуктор из термостата и залить компаундом;

III. Полимеризация:

1. Поместить залитый индуктор в нагретый специальный сушильный шкаф и провести полимеризацию:

- $t = 20^{\circ}\text{C}$ – 24 часа;

- $t = 60^{\circ}\text{C}$ – 3 часа.

Полимеризацию при $t = 20^{\circ}\text{C}$ применяют для неответственных ЛАД. В случае полимеризации при 60°C залитый индуктор предварительно выдерживают на воздухе в течение 1 часа.

2. Охладить форму с индикатором до $40-50^{\circ}\text{C}$.

IV. Разобрать форму, вынуть индуктор, произвести внешний осмотр, проверить на соответствие ТУ.

V. После механической обработки поверхности индуктора от эпоксидной смолы необходимо эту поверхность покрыть лаком Э4100.

На рисунке 5.2 приведена фотография индуктора ЛАД после заливки эпоксидной смолой.

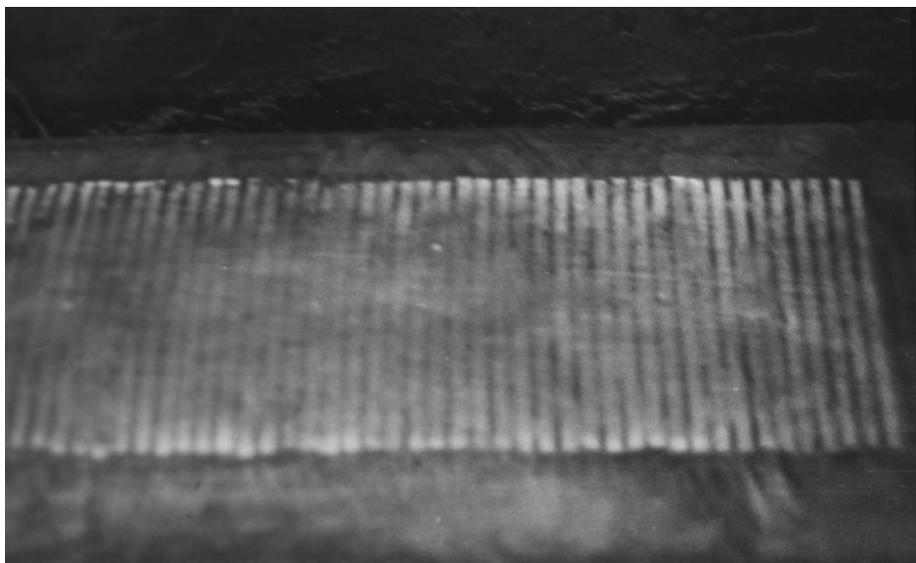


Рисунок 5.2 Индуктор ЛАД после заливки эпоксидной смолой

5.4 Выводы по пятой главе

1. Техничко-экономические расчеты показали, что внедрение электропривода жерновой мельницы с линейным асинхронным двигателем на предприятиях мукомольного производства позволяет достичь годового экономического эффекта в размере 36490,23руб при производительности 258,7 т. Срок окупаемости проекта составляет 5,6 года, а годовой экономический эффект достигнут за счет экономии текущих затрат на оборудование.

2. Рассмотрена технология изготовления индуктора ЛАД, отличительными особенностями которой, по отношению к двигателям вращения являются простота конструкции, отсутствие сложных узлов и деталей, поэтому производство рассматриваемых двигателей может освоить любой металлообрабатывающий завод со стандартным оборудованием.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Произведен анализ измельчающих машин, выявлены их достоинства и недостатки. Сделан вывод о целесообразности применения жерновых мельниц в производстве муки, богатой минеральными веществами и витаминами. Разработаны варианты компоновки жерновой мельницы с плоским ЛАД, упрощающие конструкцию электропривода. Новизна технических решений защищена патентами РФ на изобретение № 2482920, 2546860.

2. Обоснована конструктивно-технологическая схема электропривода и разработана его математическая модель. С учетом особенностей измельчаемого материала и условий работы мельницы (сила вязкого и сухого трения) модель решается аналитическими методами. При учете конструктивных особенностей ЛАД (сила ПКЭ) математическая модель имеет решение в среде объектно-визуального моделирования Matlab (приложение Simulink).

3. Выявлено, что наибольшую силу сопротивления на процесс измельчения оказывает сила вязкого трения. Наибольшим коэффициентом вязкого трения обладает озимая рожь ($93,0 \div 93,4$ Н·с/м), а наименьшим - озимая пшеница ($39,8 \div 40,4$ Н·с/м). Разница между частотой вращения жернова при помоле этих зерен составляет 10,9 – 11,2%. Сила сухого трения при малом диаметре жерновов (0,2 м) находится от 18,63 Н до 20,86 Н и не оказывает большого влияния на частоту вращения.

4. Разработана методика проведения экспериментальных исследований электропривода жерновой мельницы с использованием современных программных продуктов и технических средств; создан экспериментальный образец. При помоле яровой пшеницы Омская – 36 возможно плавно регулировать частоту вращения подвижного жернова от 187,3...335,6 об/мин. Сравнение теоретических и экспериментальных зависимостей частоты вращения показало, что их максимальное расхождение не превышает 7,32 %.

5. Экономический эффект от внедрения привода жерновой мельницы с плоским линейным асинхронным двигателем достигается за счет экономии текущих затрат на оборудование и составляет 36490,23 руб/год при производительности 258,7 т; срок окупаемости капитальных вложений 5,6 лет.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аипов Р.С. Исследование работы жерновой мельницы с линейным асинхронным двигателем / Р.С. Аипов, Р.Р. Нугуманов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2014. - №5. – С.28 – 30.
2. Аипов Р.С. Каменная мельница с линейным асинхронным двигателем в приводе/ Р.С. Аипов, Р.Р. Нугуманов // Достижения науки - агропромышленному производству. Материалы LI международной научно-технической конференции. Часть 2. – Челябинск: ФГБОУ ВПО Челябинская ГАА, 2012. – С.7 – 10.
3. Аипов Р.С. Линейный электропривод колебательного движения: учебное пособие/ Р.С. Аипов. – Уфимск. гос. авиац. техн. ун–т. – Уфа, 1994. – 77с.
4. Аипов Р.С. Линейные электрические машины и приводы на их основе: учебное пособие / Р.С. Аипов – Уфа: БГАУ, 2003. – 201 с.
5. Аипов Р.С. Математическая модель жерновой мельницы с двухсторонним линейным асинхронным двигателем в приводе/ Р.С. Аипов, Р.Р. Нугуманов//Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2013. - №4. – С.27 – 31.
6. Аипов Р. С. Мельница для производства "живой" муки/ Р. С. Аипов, Р.Р. Нугуманов // Сельский механизатор. - 2012. - № 8. - С. 27.
7. Аипов Р.С. Основы построения и теории линейных асинхронных приводов с упругими накопителями энергии: учебное пособие / Р.С. Аипов. – Уфа: БГАУ, 2006.- 330 с.
8. Аипов Р.С. Регулирование скорости жерновой мельницы с двухсторонним линейным асинхронным двигателем в приводе / / Р.С. Аипов, Р.Р. Нугуманов // Российский научный электронный журнал Башкирского ГАУ [Электронный ресурс]. – Уфа: Башкирский ГАУ, 2014. - №3. С.1 – 14. - Режимдоступа: <http://journal.bsau.ru/directions/05-00-00->

9. Аипов Р.С. Устройство для измельчения зерна с безредукторным асинхронным двигателем в приводе/ Р.С. Аипов, Р.Р. Нугуманов // Наука молодых – инновационному развитию АПК. Материалы VI всероссийской научно-практической конференции молодых ученых. – Уфа: ФГБОУ ВПО Башкирский ГАУ, 2013. – С. 197 – 202.
10. Айзикович Л.Е. Технология производства пшеничной и ржаной муки: учебник / Л.Е. Айзикович, Б.Н. Хорцев. – М.: Заготиздат, 1954. – 513 с.
11. Антипов С.Т. Машины и аппараты пищевых производств: учебное пособие /С.Т. Антипов, И.Т. Кретов. – М.: Высш. шк., 2001. – 703 с.
12. Артоболевский, И.И. Теория механизмов и машин: учебное пособие/ И.И. Артоболевский. – М.: Наука, 1988. – 640 с.
13. Авторское свидетельство №1310021 СССР МКИ В02С7/10. Дисковая мельница / В.И. Юкин (СССР) – №3929694/29 – 33; заявлен 17.07.1985; опубликован 15.05.1987, Бюл.№ 18. – 6 с.
14. Барыкин К.К. Электрические машины с разомкнутым магнитопроводом: учебное пособие / К.К. Барыкин. – Уфимск. ордена Ленина авиац. институт им. Серго Орджоникидзе. – Уфа, 1985. – 85 с.
15. Байкин С.В. Технологическое оборудование для переработки продукции растениеводства: учебное пособие / С.В. Байкин [и др.]– М.: Колос, 2007. – 445 с.
16. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: учебное пособие / Л.А. Бессонов– М.: Высшая школа, 1996. – 638 с.
17. Бидерман В.Л. Теория механических колебаний: учебное пособие /В.Л. Бидерман– М.: Высшая школа, 1980. – 408 с.
18. Блехман И.И. Вибрационное перемещение: учебник / И.И.Блехман, Г.Ю.Джанелидзе – М.: Наука, 1964. – 412 с.
19. Блехман И.И. Что может вибрация?: О «вибрационной механике» и вибрационной технике: учебник/ И.И. Блехман. – М.: Наука, 1988. – 208 с.
20. Борщев В.Я. Оборудование для измельчения материалов: дробилки и

мельницы: учебное пособие / В.Я. Борщев. – Тамбов: изд. – во Тамбовского государственного технического университета, 2004. – 75 с.

21. Бретшнайдер С. Свойства газов и жидкостей: инженерные методы расчета: учебное пособие / С. Бретшнайдер – М., Л.: Химия, 1966. – 536 с.

22. Бутковский В.А. Технологическое оборудование мукомольного производства: учебное пособие /В.А. Бутковский, Г.Е. Птушкина – М.: ГП «Журнал Хлебопродукты», - 1999. – 208 с.

23. Бутковский В.А. Технологии зерноперерабатывающих производств: учебное пособие / В.А. Бутковский, А.И. Мерко, Е.М. Мельников - М.: Агропромиздат, 1999. – 241 с.

24. Вельтищев В.Н. Основы расчета и конструирования машин и аппаратов пищевых производств. Часть 2. «Машины для выполнения процессов измельчения, прессования и перемешивания»: учебно-практическое пособие / В.Н. Вельтищев, Ю.А. Калошин - М., МГУТУ, 2005.

25. Веселовский О.Н. Некоторые вопросы теории и применения линейных двигателей / Электродвигатели с разомкнутым магнитопроводом: Межвуз. сб. науч. тр. // Под ред. О.Н. Веселовского; Новосиб. электро–техн. ин–т. – Новосибирск, 1989. – С. 3 – 7.

26. Веселовский О.Н. Линейные асинхронные двигатели: учебное пособие / О.Н. Веселовский, А.Ю. Коняев, Ф.Н. Сарапулов. – М.: Энергоатомиздат, 1991, – 256с.

27. Водяников В.Т. Организационно–экономические основы сельской электроэнергетики: учебное пособие / В.Т. Водяников. – М.: Экмос, 2002. – 312с.

28. Водяников В.Т. Экономическая оценка энергетики АПК: учебное пособие / В.Т. Водяников. – М.: Экмос, 2002. – 304 с.

29. Вольдек А.И. Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом: учебник / А.И. Вольдек. – Л.: Энергия, 1970. – 272с.

30. Вольдек А.И. Основы теории и методики расчета характеристик

линейных асинхронных машин/ А.И. Вольдек, Е.В. Толвинская. – Электричество. – 1975. - №9. – С.29 – 36.

31. Вольдек А.И. Электрические машины: учебник / А.И. Вольдек. –М.: Энергия, 1974. – 840 с.

32. Глебов Л.А. Технологическое оборудование предприятий отрасли (зерноперерабатывающие предприятия): учебник /Л.А. Глебов и др.– М.: Дели принт, 2006. – 816 с.

33. Глазенко Т.А. Полупроводниковые преобразователи частоты в электроприводах: учебник / Т.А. Глазенко, Р.Б. Гончаренко. – Л.: Энергия, 1969. – 184 с.

34. Глушаков С.В. Математическое моделирование: Учебный курс / С.В.Глушаков, И.А.Жакин, Т.С.Хачиров. – М.: ООО "Издательство АСТ", 2001. – 524с.

35. Голубев И.Ф. Вязкость газов и газовых смесей: справочное руководство/ И.Ф. Голубев – М.: Физматгиз, 1959. – 375 с.

36. Гортинский В.В. О техническом уровне и перспективах развития вибрационных машин для зерноперерабатывающей и пищевой промышленности// Машиноведение, 1985. – №1. – С. 3 – 7.

37. Гультияев А.Б. Визуальное моделирование в среде MATLAB: учебный курс / А.Б. Гультияев–СПб: Питер, 2000. – 432с.

38. Гячев Л.В. Движение сыпучих материалов в трубах и бункерах:учебник / Л.В. Гячев. – М.: Машиностроение, 1968. – 184 с.

39. Данилов А.И. Компьютерный практикум по курсу "Теория управления". Simulink – моделирование в среде Matlab: учебное пособие / А.И. Данилов– М: МГУИЭ, 2002. – 128с.

40. Демский А.Б. Оборудование для производства муки и крупы:справочник / А.Б Демский [и др.]– СПб, Издательство «Профессия», 2000. – 624 с.

41. Дженике Э.В. Складирование и выпуск сыпучих материалов: учебник / Э.В. Дженике. – М.: Мир, 1968. – 164 с.

42. Дьяков В.И. Расчет и анализ статических механических характеристик линейных асинхронных двигателей / В.И. Дьяков, А.Н. Фролов // Электричество. – 1978. - №12. – С. 67 – 70.
43. Дьяконов В.В. Matlab 6: учебный курс / В.В. Дьяконов. – СПб.: Питер, 2001. – 592 с.
44. Дьяконов В.В. Simulink 4. Специальный справочник: справочник / В.В. Дьяконов – СПб.: Питер, 2002. – 528с.
45. Дьяконов В.В., Математические пакеты расширения MATLAB: справочник / В.В. Дьяконов, В.И. Круглов. – СПб.: Питер, 2001. – 480с.
46. Дьяконов В.В. MATLAB. Анализ, идентификация и моделирование систем. Специальный справочник: справочник / В.В. Дьяконов, В.И. Круглов. – СПб.: Питер, 2001. – 448с.
47. Егоров Г.А. Технология и оборудование мукомольной, крупяной и комбикормовой промышленности. / А.Г. Егоров, Я.Ф. Мартыненко, Т.П. Петренко – М.: Издательский комплекс МГАПП, 1996. – 210 с.
48. Егоров Г.А. Технологические свойства зерна: учебник / Г.А. Егоров – М.: Агропромиздат, 1985.-334 с.
49. Епифанов А.П. Основные вопросы проектирования тяговых линейных асинхронных двигателей. Ч.1., Ч.2, Ч.3.// Электротехника. 1992 - №1, №6, №10.
50. Епифанов А.П. Электропривод: учебник / А.П. Епифанов, Л.М. Малайчук, А.Г. Гущинский. – СПб.: Лань, 2012. – 400 с.
51. Епифанов А.П., Соловьев Г.И. Трехмерная теория линейного асинхронного двигателя с различными типами обмоток: епонир. Рукопись. Реф. 10И234. РЖ. «ЭЭ». 1976. №10.
52. Жислин Я.М. Выработка муки и крупы в сельскохозяйственном мукомолье: учебник / Я.М. Жислин, А.К. Терещенко. – М.: Колос, 1969. – 232 с.
53. Иванов, М.Н. Детали машин: учеб. для студентов высш. техн.учеб. заведений/М.Н. Иванов. – 5-е изд., перераб. – М. : Высш. шк., 1991. – 383 с.

54. Ижеля Г.И. Линейные асинхронные двигатели: учебное пособие / Г.И.Ижеля, С.А.Ребров, А.Г.Шаповаленко. –Киев: Техника, 1975. – 136 с.
55. Иванова В.А. Основы стандартизации, метрологии, сертификации: учебник / В.А. Иванова, О.П. Яблонский. –М.: Феникс, 2004. – 448 с.
56. Ильченко В.И. Мельничные, крупяные и элеваторные машины (Теория и конструкции) / В.И. Ильченко. – М.: Заготиздат,1938. – 483 с.
57. Клевцов А.В. Средства оптимизации потребления электроэнергии: учебное пособие /А.В. Клевцов.– М.: Солон–пресс, 2004. – 240 с.
58. Ключев В.И. Теория электропривода: учебник / В.И.Ключев – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 560с.
59. Козьмин П.А.Мукомольно-крупяное производство: практическое и теоретическое руководство для техников и инженеров по мукомольно-крупяному производству и постройке мельниц / П. А. Козьмин. - третье издание. - М.: Государственное техническое издательство, 1925. - 447 с.
60. Кононенко Е.В. Электрические машины: учебник / Е.В.Кононенко, Г.А.Сипайлов, К.А.Хорьков.– М.: Высшая школа, 1975. –279 с.
61. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин: учебник / И.П. Копылов – М.: Высш. шк., 2001. – 327с.
62. Копылов И.П. Электрические машины: учебник / И.П. Копылов– М.: Высшая школа, 2000. – 607 с.
63. Косой В.Д. Инженерная реология биотехнологических сред: учебник / В.Д. Косой, Я.И. Виноградов, А.Д. Малышев. – СПб.: ГИОРД, 2005. – 648 с.
64. Кулак В.Г. Технология производства муки: учебное пособие/ В.Г. Кулак, Б.М. Максимчук. – М.: Агропромиздат, 1991. – 224 с.
65. Лаугис Ю.А. Расчет механических характеристик линейных асинхронных двигателей / Ю.А. Лаугис, Х.А. Тийсмус, Р.А., Тээметс // Труды Таллинского политехнического института. – 1978. - № 456. – С.75 – 85.
66. Левитский Н.И. Колебания в механизмах: учебное пособие / Н.И Левитский. – М.: Наука, 1988.- 336 с.

67. Лиелпегер Я.Я. Физико–технические основы линейных индукционных МГД машин: учебное пособие / Я.Я. Лиелпегер – Рига, 1970. – 256 с.
68. Личко Н.М. Технология переработки продукции растениеводства: учебник / Н.М. Личко – М.: Колос, 2000. – 552 с.
69. Луковников В.И. Электромашинный безредукторный колебательный электропривод / В.И. Луковников. – Электротехническая промышленность. Электропривод, 1980. –№8.–С. 14–18.
70. Луковников В.И. Электропривод колебательного движения: учебное пособие / В.И. Луковников. – М.: Энергоатомиздат, 1984, – 152с.
71. Макаров Ю.И. Аппараты для смешения сыпучих материалов: учебник / Ю.И. Макаров. – М.: Машиностроение, 1973, – 216 с.
72. Маринин Ю.С. Методы расчета специальных электрических машин: учебное пособие / Ю.С. Маринин. – М.: МЭИ, 1993. – 72 с.
73. Мартынов Н.Н. Введение в Matlab 6: учебное пособие / Н.Н. Мартынов – М.: Кудиц–Образ, 2002. – 352 с.
74. Мачихин Ю.А. Инженерная реология пищевых материалов: учебник / Ю.А. Мачихин, С.А. Мачихин.– М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. - 212 с.
75. Мельник Б.Е. Технология приемки, хранения и переработки зерна: учебник/ Б.Е. Мельник, В.Б. Лебедев, Г.А. Винников. – М.: Агропромиздат, 1990. – 367 с.
76. Мельников С.В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм: учебное пособие / С.В. Мельников. – Л.: Колос, Ленингр. отделен., 1978. – 560 с.
77. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов и их отбору для финансирования: методическое пособие – М.: Экономика, 1994. – 42 с.
78. Метрологическая обработка результатов технических измерений: справочник / Рего К.Г. – Киев:Техника,1987. – 126 с.
79. Минаков И.А. Экономика АПК / И.А Минаков. – М.: КолосС, 2004. –

328 с.

80. Насар С.А. Линейные тяговые электрические машины: учебное пособие /С.А. Насар, И. Болдеа. – М.: Транспорт, 1981. – 176с.

81. Нугуманов Р.Р. Влияние вязкого и сухого трения на работу жерновой мельницы с безредукторным электроприводом/ Р.Р. Нугуманов // Материалы международной научно – практической конференции в рамках XXIV международной специализированной выставки «Агрокомплекс - 2014» Часть 2. – Уфа: ФГБОУ ВПО Башкирский ГАУ, 2014. – С. 230 – 235.

82. Нугуманов, Р.Р. Плоский линейный асинхронный двигатель в приводе жерновой мельницы/ Р.Р. Нугуманов, Г.Ф. Бикмухаметова// Наука молодых – инновационному развитию АПК. Материалы IX всероссийской научно-практической конференции молодых ученых. – Уфа: ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ, 2016. – С. 89 – 92.

83. Нугуманов Р.Р. Повышение эффективности жерновой мельницы применением линейного электропривода/ Р.Р. Нугуманов // Достижения науки - агропромышленному производству. Материалы LIV международной научно-технической конференции. Часть III. – Челябинск: ФГБОУ ВПО Челябинская ГАА, 2015. – С.284 – 289.

84. Нугуманов Р.Р. The device for grinding grain with linear induction motor in drive/Р.Р. Нугуманов //Молодежь и наука. Материалы международной научной конференции студентов и молодых ученых (на иностранных языках). – Уфа: ФГБОУ ВПО Башкирский ГАУ, 2012. – С. 228 – 230.

85. Огарков Е.М. Квazитрехмерная теория линейных асинхронных двигателей: учебное пособие / Е.М. Огарков. – Перм. гос. техн. ун-т. — Пермь, 2003. – 240 с.

86. Основы расчета и конструирования машин и автоматов пищевых производств: справочник / под ред. Соколова А.Я. – М.: «Машиностроение», 1969. – 637 с.

87. Партс И. Теоретическое и экспериментальное исследование индукционных машин с разомкнутым магнитопроводом: учебное пособие /

И.Партс. – Таллинский педагогический институт им. Э.Вильде. – Таллин: изд. – во «Варгус», 1972. – 246 с.

88. Патент № 23795 Российская Федерация, МПК 7 В02С7/14. Мельница жерновая / Бизяркин В.Я., Бянкин Н.П., Галин З.А., Губайдуллин А.У.; заявитель и патентообладатель: Общество с ограниченной ответственностью "Научно-техническая фирма "НИИТ-Проект" (RU) - №2001134431/20; заявлен 18.12.2001; опубликован 20.07.2002.

89. Патент № 2073568 Российская Федерация, МПК 6 В02С7/18. Мельница для зерна / Палагин В.В.; заявитель и патентообладатель: В.В. Палагин (RU) - №94014510/13; заявлен 19.04.1994; опубликован 20.04.1996, Бюл. № 11. – 8 с.

90. Патент № 2482920 Российская Федерация, МПК В02С7/16. Устройство для измельчения твердых материалов / Аипов Р.С., Нугуманов Р.Р.; заявитель и патентообладатель: Р.С. Аипов (RU), Р.Р. Нугуманов (RU) - №2012106826/13; заявлен 24.02.2012; опубликован 27.05.2013, Бюл. № 15. – 7 с.

91. Патент № 2546860 Российская Федерация, МПК В02С7/08, В02С7/16. Устройство для измельчения / Аипов Р.С., Нугуманов Р.Р., Линенко А.В.; заявитель и патентообладатель: Р.С. Аипов (RU), Р.Р. Нугуманов (RU), А.В. Линенко (RU) - №2013153279/13; заявлен 29.11.2013; опубликован 10.04.2015, Бюл. № 10. – 7 с.

92. Петленко Б.И., Круковский Л.Е. Исследование механических характеристик линейного асинхронного двигателя // Сб. науч. тр. МАДИ. – М., Вып. 146. – С. 70–87.

93. Петленко Б.И. Определение механической характеристики линейного асинхронного двигателя по режиму пуска без нагрузки / Б.И. Петленко, Л.Г. Чанов // Электричество, 1984. – №9. – С. 61 – 63.

94. Потемкин В.Г. Введение в MATLAB: учебное пособие / В.Г. Потемкин. – М.: ДИАЛОГ – МИФИ, 2000. – 247с.

95. Потемкин В.Г. Инструментальные средства MATLAB 5.x: учебное пособие / В.Г. Потемкин. – М.: ДИАЛОГ – МИФИ, 2000. – 336с.

96. Потемкин В.Г. Система инженерных и научных расчетов MATLAB 5.x: учебное пособие / В.Г. Потемкин. – М.: ДИАЛОГ – МИФИ, 1999. Т1. – 336с.
97. Потемкин В.Г. Система инженерных и научных расчетов MATLAB 5.x: учебное пособие / В.Г. Потемкин. – М.: ДИАЛОГ – МИФИ, 1999. Т2. – 304с.
98. Применение математических методов и ЭВМ. Планирование и обработка результатов эксперимента: Учебное пособие/ А.Н. Останин и др.; Под общей редакцией Останина А.Н. – Мн.: Выш. шк., 1989. – 218с.
99. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений: ГОСТ 8.207 – 76. – Введ. 15.03.1976. – М.: Госстандарт России, 1977. – 7 с.
100. Птушкина Г.Е. Высокопроизводительное оборудование мукомольных заводов: учебное пособие / Г.Е. Птушкина, Л.И. Товбин. – М.: Агропромиздат, 1987. – 288 с.
101. Рогинская Л.Э. Тиристорные преобразователи частоты: учебное пособие / Л.Э. Рогинская, А.К. Белкин, Т.П. Костюкова, А.А. Гидляк. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 263 с.
102. Ряшенцев Н.П. Электропривод с линейными электромагнитными двигателями: учебное пособие / Н.П. Ряшенцев – Новосибирск: Наука, 1981. – 149с.
103. Сарапулов Ф.Н. Математические модели линейных индукционных машин на основе схем замещения: учебное пособие / Ф.Н.Сарапулов, С.Ф.Сарапулов, П.Н. Шымчак– Екатеринбург: Изд-во УГТУ–УПИ, 2001. – 236с.
104. Сарапулов Ф.Н.. Передаточные функции и структурные схемы линейных асинхронных двигателей: учебное пособие / Ф.Н. Сарапулов, И.В. Черных. Екатеринбург: УПИ, 1992. – 100с.
105. Свечарник Д.В. Линейный электропривод: учебное пособие / Д.В. Свечарник – М.: Энергия, 1979. – 152с.

106. Соболев С.В., Юрченко М.В. Выбор рациональной схемы вторичной обмотки ЛАД / С.В.Соболев, М.В.Юрченко // Взрывозащищенные ЛАД: Сборник научных трудов: Донецк: ВНИИВЭ, 1984 С 19–24.
107. Соколов А.Я. Технологическое оборудование предприятий по хранению и переработке зерна: учебное пособие / А.Я. Соколов. – М.:Колос,1967. – 448 с.
108. Соколов М.М. Электропривод с линейными асинхронными двигателями: учебник/ М.М.Соколов, Л.К.Сорокин— М.: Энергия, 1974. – 136с.
109. Справочник инженера–электрика с/х производства: справочник / В.М. Баутин и др. – М.: Информагротех, 1999. – 212 с.
110. Справочник мукомола, крупящика, комбикормщика: справочник / Бардышев [и др]. – М.: Колос, 1973. – 335 с.
111. Справочник по электрическим машинам: справочник /Копылов И.П. [и др]; Под общей редакцией И.П. Копылова.Т. 1. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 413 с.
112. Справочник по электротехнике и электрооборудованию: справочник / Алиев И.И. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2004. – 478 с.
113. Справочник по преобразовательной технике: справочник / Чиженко И.М. – К.: Техника, 1978. – 447 с.
114. Справочное пособие по расчету фазового состояния и свойств газоконденсатных смесей: справочник / А.И. Брусиловский, Г.Р. Гуревич – М.: Недра, 1984. – 264 с.
115. Таранин С.А. Исследование процессов шелушения ячменя с целью создания малогабаритного шелушителя горизонтально типа: Автореф. канд. техн. наук. – М.: МГУПП, 2005. – 24 с.
116. Токарев В.П. Преобразователи физических величин: учебное пособие /В.П. Токарев. – Уфа: УГАТУ, 2014. – 256 с.
117. Фридкин П.А. Безредукторный дугостаторный электропривод: учебник/ П.А. Фридкин. – Л.: Энергия,1970. – 140 с.

118. Чеботарев О.Н. Технология муки, крупы и комбикормов: учебное пособие / О.Н.Чеботарев, А.Ю.Шаззо, Я.Ф.Мартыненко. – М.: ИКЦ «МарТ», 2004. – 688 с.
119. Чесонис В.И. Характеристики ЛАД при заданном напряжении / В.И.Чесонис // Электротехника. – 1980. – №10. – С. 47 – 52.
120. Чесонис В.И. Применение математических методов для расчета характеристик ЛАД / В.И.Чесонис, И.П.Бекеркис // Электротехника. – 1981. – №8. – С.33 – 36.
121. Швандар, В.А. Экономика предприятия: учебник / В.А. Швандар, Л.Я. Аврашков. – М.: ЮНИТИ – ДАНА, 2002. – 240с.
122. Штурман Г.И. Индукционные машины с разомкнутым магнитопроводом / Г.И. Штурман // Электричество - 1946. - №10 - С. 43-50.
123. Электропривод на базе двигателей с разомкнутым магнитопроводом для машин агропромышленного комплекса: отчет о НИР / ЧИМЭСХ; рук. А.А. Пястолов. – Челябинск, 1987. – 49 с.
124. Ямамура С. Теория линейных асинхронных двигателей: учебное пособие / С. Ямамура. – Л.: Энергоатомиздат, 1983.– 180с.
125. Мельницы для бизнеса [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.hawos.de/index.php/ru/produkte-ru/gewerbemuehlen-ru – 04.12.2012
126. Сила трения знакомая, но таинственная. А.А.Первозванский [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.abitura.com/collection/trenie.html> – 11.10.2013
127. Поддержка пользователей Matlab в РФ.[Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://www.matlab.exponenta.ru> – 12.11.2013
128. Преобразователи частоты на IGBT транзисторах. [Электронный ресурс] - Режим доступа: http://www.m.softstarter.ru/invertors/articles/preobrazovatel_igbt – 14.12.2013
129. Laithwaite E.R. Linear electric motors. London, Mills and Boon, 1971.
130. Laithwaite E.R. Induction Machines for Special Purposes, New York: Chemical Publishing Co. Ltd, 1986, 377pp.

131. Reid R.C., Prausnitz J.M., and Poling B.E. The properties of liquids and gases, 4rd ed., McGraw – Hill, New York, 1987.
132. Sudan R.N. Interaction of a conducting fluid stream with a travelling wave of magnetic field of finite extension. – Journal of Applied Physics, 1963, vol.34, № 3, p.641 – 650.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2482920

**УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ТВЕРДЫХ
МАТЕРИАЛОВ**

Патентообладатель(ли): *Аинов Рустам Сагитович (RU),
Нугуманов Раушан Римович (RU)*

Автор(ы): *Аинов Рустам Сагитович (RU), Нугуманов Раушан
Римович (RU)*

Заявка № 2012106826

Приоритет изобретения 24 февраля 2012 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре
изобретений Российской Федерации 27 мая 2013 г.

Срок действия патента истекает 24 февраля 2032 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2546860

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

Патентообладатель(ли): **Аипов Рустам Сагитович (RU),
Нугуманов Раушан Римович (RU), Линенко Андрей
Владимирович (RU)**

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2013153279

Приоритет изобретения **29 ноября 2013 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре
изобретений Российской Федерации **04 марта 2015 г.**

Срок действия патента истекает **29 ноября 2033 г.**

*Врио руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Л.Л. Кирий



Приложение В

РӘСӘЙ ФЕДЕРАЦИЯҒЫНЫҢ АУЫЛ
ХУЖАЛЫҒЫ МИНИСТРЛЫҒЫ

Юғары профессиональ белем биреү буйынса
Федераль бюджет дәүләт мәғариф учреждениеһы

**БАШКОРТ
ДӘҮЛӘТ АГРАР
УНИВЕРСИТЕТЫ**

450001, Рәсәй, Башкортостан Республикаһы,
Өфө, Октябрҙең 50 йышылығы урамы, 34

Тел. (347) 228-91-77

Факс (347) 228-08-98



МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования

**БАШКИРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

450001, Россия, Республика Башкортостан,
г. Уфа, ул. 50-летия Октября, 34

Web-сайт: www.bsau.ru

E-mail: bsau@ufanet.ru

№ 1611 от 10.09.2014

На № _____ от _____

Справка

о внедрении результатов диссертационной работы «Совершенствование привода жерновой мельницы применением линейного асинхронного двигателя» в учебный процесс

На кафедре электрических машин и электрооборудования Башкирского ГАУ на лабораторных занятиях по дисциплине БЗ.В4 «Электропривод» для студентов энергетического факультета проводится лабораторная работа «Исследование привода жерновой мельницы с линейным асинхронным двигателем». Данная работа разработана и поставлена аспирантом кафедры ЭМЭ Нугумановым Р.Р. по результатам его диссертационной работы.

Первый проректор



М.Н. Фархшатов

Исп. Нугуманов Р.Р.

т. 8(347)228-36-55

Приложение Г

УТВЕРЖДАЮ
Главный инженер ООО «ИЛИШ-АГРО»
Шайдуллин А.Н.

«17» декабря 2014 г.


УТВЕРЖДАЮ
И.о. проректора по научной и инновационной
деятельности ФГБОУ ВПО
Башкирский ГАУ Чудов И.В.

«23» декабря 2014 г.


Акт

принятия к внедрению результатов научно-исследовательской работы
Мы, нижеподписавшиеся, представитель предприятия *гл инженер*
ООО «ИЛИШ-АГРО» Шайдуллин А.Н., *гл. энергетик* Набиев А.С. с одной стороны и
представители ФГБОУ ВПО Башкирский ГАУ: *д.т.н. Аипов Р.С., декан энергетического*
факультета к.т.н. Линенко А.В. с другой стороны составили настоящий акт о принятии к
внедрению результатов законченной научно-исследовательской работы.

Результатом научно-исследовательской работы является *разработка проектной*
документации и изготовление жерновой мельницы с линейным асинхронным двигателем в
приводе. Внедряемая научно-исследовательская работа содержит сведения о патенте РФ
на изобретение №2482920.

Кем и когда разработка рекомендована к внедрению: *устройство разработано на*
кафедре «Электрические машины и электрооборудование» ФГБОУ ВПО Башкирский ГАУ
и рекомендовано к внедрению в предприятие ООО «ИЛИШ-АГРО» Илишевского района
Р.Б..

Элементы новизны: *возможность энергетически эффективного плавного*
регулирования частоты вращения жернова мельницы без усложнения конструкции
(использования ременных, клиноременных передач, преобразователей частоты,
редукторов и т.д.), разработанная система электропривода жерновой мельницы с
линейным асинхронным двигателем позволяет снизить энергоемкость производства и
повысить производительность мельницы.

Технический уровень соответствует лучшим отечественным разработкам.

Внедрение результатов научно – исследовательской работы

1. Демонстрация на конкурсах, публикации в печати и т.п. *Жерновая мельница с*
линейным асинхронным двигателем в приводе является победителем II-го тура конкурса
«У.М.Н.И.К. – Башкортостан, 2013, весенний тур», 5-ое место в итоговом III-ем туре
по номинации «Новые приборы и аппаратные комплексы»; участник II-го тура
Всероссийского конкурса на лучшую научную работу среди студентов, аспирантов и
молодых ученых вузов Министерства сельского хозяйства РФ по номинации
«Агроинженерия» (Уфа, 2013).

Описание предлагаемого устройства опубликовано в следующих изданиях:

1. *Аипов Р.С., Нугуманов Р.Р. Каменная мельница с линейным асинхронным*
двигателем в приводе/ Материалы LI международной научно-технической конференции
«Достижения науки - агропромышленному производству». Часть 2. – Челябинск: ФГБОУ
ВПО Челябинская ГАА, 2012. – С.7 – 10.

2. *Нугуманов Р.Р. The device for grinding grain with linear induction motor in drive/*
Материалы международной научной конференции студентов и молодых ученых (на
иностранном языке) «Молодежь и наука». – Уфа: ФГБОУ ВПО Башкирский ГАУ, 2012.
– С. 228 – 230.

3. *Аипов Р.С., Нугуманов Р.Р. Мельница для производства «живой» муки //*
Сельский механизатор, 2012. - №8 – С. 27.

Продолжение Приложения Г

4. Патент 2482920 Российская Федерация, МПК В02С7/16 Устройство для измельчения твердых материалов / Аипов Р.С., Нугуманов Р.Р.: заявитель и патентообладатель: Аипов Р.С. (RU), Нугуманов Р.Р. (RU). - №2012106826; заявл. 24.02.2012; опубл. 27.05.2013, Бюл. №15. – 7 с.

5. Аипов Р.С., Нугуманов Р.Р. Устройство для измельчения зерна с безредукторным асинхронным двигателем в приводе/ Материалы VI всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «Наука молодых – инновационному развитию АПК». – Уфа: ФГБОУ ВПО Башкирский ГАУ, 2013. – С. 197 – 202.

6. Аипов Р.С., Нугуманов Р.Р. Математическая модель жерновой мельницы с двухсторонним линейным асинхронным двигателем в приводе // Электротехнические и информационные комплексы и системы, 2013. - №4 – С.27 -31.

7. Нугуманов Р.Р. Влияние вязкого и сухого трения на работу жерновой мельницы с безредукторным электроприводом/ Материалы международной научно – практической конференции в рамках XXIV международной специализированной выставки «Агрокомплекс - 2014» Часть 2. – Уфа: ФГБОУ ВПО Башкирский ГАУ, 2014. – С. 230 – 235.

8. Аипов Р.С., Нугуманов Р.Р. Регулирование скорости жерновой мельницы с двухсторонним линейным асинхронным двигателем в приводе// Российский научный электронный журнал Башкирского ГАУ [Электронный ресурс]. – Уфа: БашГАУ, 2014. - №3. С. 1 – 14. - Режим доступа: http://journal.bsau.ru/directions/05-00-00-technical-sciences/index.php?ELEMENT_ID=369.

2. В результате внедрения рассматриваемой научно-исследовательской работы в предприятие ООО «ИЛИШ-АГРО» Илишевского района РБ ожидается получение годового экономического эффекта в размере 36490,23 руб. на одну жерновую мельницу, производительностью 0,49 т/час.

Экономический эффект от внедрения результатов научно-исследовательской работы: возможность энергетически эффективного плавного регулирования частоты вращения жернова мельницы без усложнения конструкции (использования ременных, клиноременных передач, преобразователей частоты, редукторов и т.д.), разработанная система электропривода жерновой мельницы с линейным асинхронным двигателем позволяет снизить энергоемкость производства и регулировать производительность мельницы включением, или отключением одного из индукторов двигателя.

3. Предложения о дальнейшем внедрении работы и другие замечания. Предлагаемая мельница может быть использована на мукомольных заводах и зерноперерабатывающих предприятиях РФ.

Представители предприятия:

Главный инженер ООО «ИЛИШ-АГРО»
Шайдуллин А.Н.

Главный энергетик ООО «ИЛИШ-АГРО»
Набиев А.С.

Представители Башкирского ГАУ:

Декан энергетического факультета
к.т.н. Линенко А.В.
Зав. кафедрой ЭМЭ
д.т.н. Аипов Р.С.

Приложение Д

УТВЕРЖДАЮ
Директор ОАО «Уфимский хлебозавод №7»
Лутфуллин А.Г.
«12» декабря 2015 г.



УТВЕРЖДАЮ
И.о. проректора по научной и
инновационной деятельности ФГБОУ
ВПО Башкирский ГАУ Чудов И.В.
«16» декабря 2015 г.



Акт

принятия к внедрению результатов научно-исследовательской работы

Мы, нижеподписавшиеся, представители предприятия директор ОАО «Уфимский хлебозавод №7» Лутфуллин А.Г., гл. инженер Давлеткулов М.А. с одной стороны и представители ФГБОУ ВПО Башкирский ГАУ: д.т.н. Аипов Р.С. и инженер Нугуманов Р.Р. с другой стороны составили настоящий акт о принятии к внедрению результатов законченной научно-исследовательской работы.

Результатом научно-исследовательской работы является разработка проектной документации и изготовление жерновой мельницы с линейным асинхронным двигателем в приводе. Внедряемая научно-исследовательская работа содержит сведения о патенте РФ на изобретение №2482920.

Кем и когда разработка рекомендована к внедрению: устройство разработано на кафедре «Электрические машины и электрооборудование» ФГБОУ ВПО Башкирский ГАУ и рекомендовано к внедрению в предприятие ОАО «Уфимский хлебозавод №7» г.Уфы РБ.

Элементы новизны: возможность энергетически эффективного плавного регулирования частоты вращения жернова мельницы без усложнения конструкции (использования ременных, клиноременных передач, преобразователей частоты, редукторов и т.д.), разработанная система электропривода жерновой мельницы с линейным асинхронным двигателем позволяет снизить энергоемкость производства и повысить производительность мельницы.

Технический уровень соответствует лучшим отечественным разработкам.

Внедрение результатов научно – исследовательской работы

1. Демонстрация на конкурсах, публикации в печати и т.п. Жерновая мельница с линейным асинхронным двигателем в приводе является победителем II-го тура конкурса «У.М.Н.И.К. – Башкортостан, 2013, весенний тур», 5-ое место в итоговом III-ем туре по номинации «Новые приборы и аппаратные комплексы»; участник II-го тура Всероссийского конкурса на лучшую научную работу среди студентов, аспирантов и молодых ученых вузов Министерства сельского хозяйства РФ по номинации «Агроинженерия» (Уфа, 2013).

Описание предлагаемого устройства опубликовано в следующих изданиях:

1. Аипов Р.С., Нугуманов Р.Р. Каменная мельница с линейным асинхронным двигателем в приводе/ Материалы LI международной научно-технической конференции «Достижения науки - агропромышленному производству». Часть 2. – Челябинск: ФГБОУ ВПО Челябинская ГАА, 2012. – С.7 – 10.

2. Нугуманов Р.Р. The device for grinding grain with linear induction motor in drive/ Материалы международной научной конференции студентов и молодых ученых (на иностранных языках) «Молодежь и наука». – Уфа: ФГБОУ ВПО Башкирский ГАУ, 2012. – С. 228 – 230.

3. Аипов Р.С., Нугуманов Р.Р. Мельница для производства «живой» муки // Сельский механизатор, 2012. - №8 – С. 27.

Продолжение Приложения Д

4. Патент 2482920 Российская Федерация, МПК В02С7/16 Устройство для измельчения твердых материалов / Аипов Р.С., Нугуманов Р.Р.: заявитель и патентообладатель: Аипов Р.С. (RU), Нугуманов Р.Р. (RU). - №2012106826; заявл. 24.02.2012; опубл. 27.05.2013, Бюл. №15. - 7 с.

5. Аипов Р.С., Нугуманов Р.Р. Устройство для измельчения зерна с безредукторным асинхронным двигателем в приводе/ Материалы VI всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «Наука молодых – инновационному развитию АПК». – Уфа: ФГБОУ ВПО Башкирский ГАУ, 2013. – С. 197 – 202.

6. Аипов Р.С., Нугуманов Р.Р. Математическая модель жерновой мельницы с двухсторонним линейным асинхронным двигателем в приводе // Электротехнические и информационные комплексы и системы, 2013. - №4 – С.27 -31.

7. Нугуманов Р.Р. Влияние вязкого и сухого трения на работу жерновой мельницы с безредукторным электроприводом/ Материалы международной научно – практической конференции в рамках XXIV международной специализированной выставки «Агрокомплекс - 2014» Часть 2. – Уфа: ФГБОУ ВПО Башкирский ГАУ, 2014. – С. 230 – 235.

8. Аипов Р.С., Нугуманов Р.Р. Регулирование скорости жерновой мельницы с двухсторонним линейным асинхронным двигателем в приводе// Российский научный электронный журнал Башкирского ГАУ [Электронный ресурс]. – Уфа: БашГАУ, 2014. - №3. С. 1 – 14. - Режим доступа: http://journal.bsau.ru/directions/05-00-00-technical-sciences/index.php?ELEMENT_ID=369.

9. Аипов Р.С., Нугуманов Р.Р. Исследование работы жерновой мельницы с линейным асинхронным двигателем // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2014. - №5. – С.28 – 30.

2. В результате внедрения рассматриваемой научно-исследовательской работы в предприятие ОАО «Уфимский хлебозавод №7» г.Уфы РБ ожидается получение годового экономического эффекта в размере 36490,23 руб. на одну жерновую мельницу, производительностью 0,49 т/час.

Экономический эффект от внедрения результатов научно-исследовательской работы: возможность энергетически эффективного плавного регулирования частоты вращения жернова мельницы без усложнения конструкции (использования ременных, клиноременных передач, преобразователей частоты, редукторов и т.д.), разработанная система электропривода жерновой мельницы с линейным асинхронным двигателем позволяет снизить энергоемкость производства и регулировать производительность мельницы включением, или отключением одного из индукторов двигателя.

3. Предложения о дальнейшем внедрении работы и другие замечания. Предлагаемая мельница может быть использована на мукомольных заводах и зерноперерабатывающих предприятиях РФ.

Представители предприятия:

Директор ОАО «Уфимский хлебозавод №7»
Лутфуллин А.Г.

Главный инженер ОАО
«Уфимский хлебозавод №7»
Давлеткулов М.А.

Представители Башкирского ГАУ:

Декан энергетического факультета
к.т.н. Линенко А.В.
Зав. кафедрой ЭМЭ
д.т.н. Аипов Р.С.