

На правах рукописи

**Нугуманов Раушан Римович**

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

Специальность 05.20.02 – Электротехнологии и электрооборудование  
в сельском хозяйстве

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Саратов – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Башкирский государственный аграрный университет».

**Научный руководитель –** **Аипов Рустам Сагитович,**  
доктор технических наук, профессор

**Официальные оппоненты:** **Сапсалева Анатолий Васильевич,**  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Электроника и  
электротехника» ФГБОУ ВО  
«Новосибирский государственный  
технический университет»

**Баженов Владимир Аркадьевич,**  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Автоматизированный  
электропривод» ФГБОУ ВО «Ижевская  
государственная сельскохозяйственная  
академия»

**Ведущая организация** ФГБОУ ВО «Южно-Уральский  
государственный аграрный университет»

Защита диссертации состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г. в \_\_.<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 220.061.03 на базе ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова» по адресу: 410056, г. Саратов, ул. Советская, 60, ауд. 325.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова» и на сайте [www.sgau.ru](http://www.sgau.ru).

Отзывы на автореферат направлять по адресу: 410012, г. Саратов, Театральная пл. 1, ученому секретарю диссертационного совета Д 220.061.03.  
e-mail: [chekmarev.v@yandex.ru](mailto:chekmarev.v@yandex.ru).

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Чекмарев Василий Васильевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** 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 условия 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.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, кратко изложены основные положения, выносимые на защиту, дана общая характеристика работы.

**В первой главе** «Способы измельчения зерна и пути совершенствования этого процесса» произведен обзор существующих способов и конструкций машин для измельчения зерна. Выявлены их достоинства и недостатки. Известно, что молотковые дробилки и вальцовые станки, применяющиеся для помола имеют серьезные конструктивные недостатки, а их использование для получения муки обойной и второго сорта, которая сохраняет все важнейшие составляющие зерна, требует дополнительных материальных затрат, является нецелесообразным и энергозатратным.

Конструкции жерновых поставов (мельниц) с возможностью многократного воздействия рабочих поверхностей на зерно позволяют получить муку, содержащую большой процент частично дробленых оболочек и зародыша зерна, которые по размеру будут соответствовать частицам муки и не смогут быть выделены из смеси при последующем просеивании, в отличие от других измельчающих машин, где этого достичь невозможно. Применяемый привод жерновых мельниц с электрическими двигателями вращения не позволяет производить регулирование частоты вращения жерновов без остановки самой технологической машины. Плавного регулирования в широком диапазоне частоты вращения рабочих органов мельницы возможно достичь применением преобразователей частоты источника питания, что снижает КПД привода, ухудшает эксплуатационные характеристики и увеличивает массу и габариты агрегатов. Перспективным является применение в приводе жерновых мельниц простых в изготовлении и надежных в эксплуатации линейных асинхронных двигателей (ЛАД). 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.

Преимуществами такой конструкции ЛАД перед двигателями вращения является возможность без усложнения конструкции плавного и широкого диапазона регулирования частоты и момента вращения диска, изменением расположения индукторов ЛАД относительно оси диска. С приближением индукторов к оси диска, частота вращения диска увеличивается, и наоборот, отдаляя индукторы от оси диска, частота его вращения уменьшается. Кроме того у конструкции с двухсторонним двигателем появляется дополнительная возможность регулирования. 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 определяется по радиусу алюминиевого диска.

Анализ известных работ дает возможность предложить следующие варианты технических решений ЖМ с ЛЭП (рисунок 1).

Применение плоского ЛАД в приводе жерновой мельницы позволяет реализовать регулирование частоты и момента вращения двух жерновов, вращающихся в противоположные стороны (рисунок 1, в).

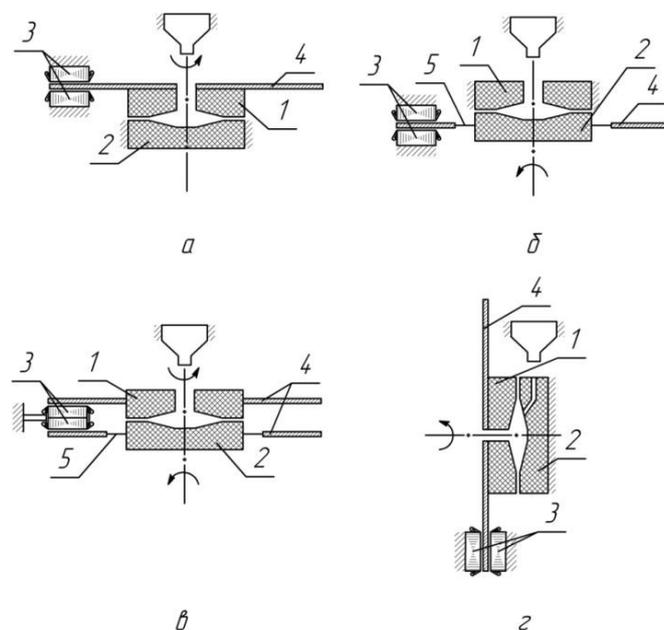


Рисунок 1 - Варианты технических решений ЖМ с ЛЭП: *а, б, в* мельницы с вертикальной осью вращения жерновов; *г* мельница с горизонтальной осью вращения жерновов 1 - верхний жернов, 2 – нижний жернов, 3 – индукторы плоского ЛАД, 4 – вторичный элемент ЛАД, 5 – зона выхода муки

В работе предложены варианты компоновки для практической реализации ЖМ с ЛЭП: с одним вращающимся жерновом (патент РФ на изобретение № 2482920) (рисунок 2, *а*), с двумя вращающимися в противоположные стороны верхним и нижним жерновами (патент РФ на изобретение № 2546860) (рисунок 2, *б*).

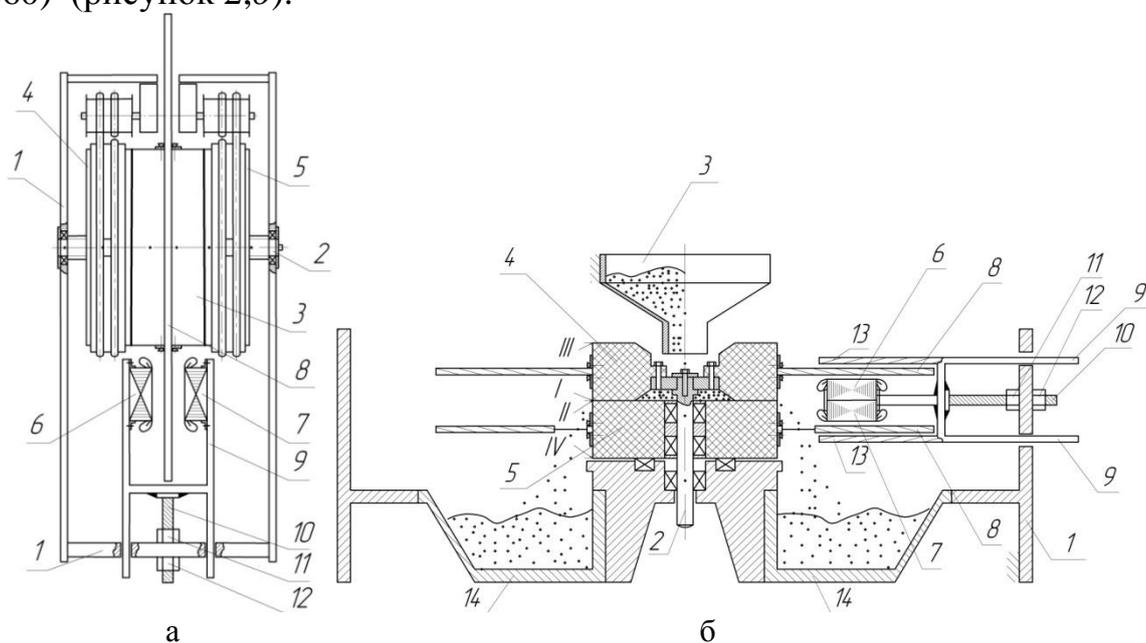


Рисунок 2 - Варианты компоновки ЖМ с ЛЭП (схематично): *а* – с одним вращающимся жерновом: 1 – корпус; 2 – ось; 3 – вращающийся жернов; 4,5 – неподвижные жернова; 6,7 – индукторы плоского двухстороннего ЛАД; 8 – вторичный элемент ЛАД (алюминиевый диск); 9 – рама; 10 – регулировочный винт; 11,12 – фиксирующие гайки; *б* - с двумя вращающимися в противоположные стороны верхним и нижним жерновами: 3 – загрузочный бункер; 4,5 – верхний и нижний жернова; 13 – ферромагнитные элементы ЛАД; 14 – приемные емкости; I,II,III,IV – мелющие поверхности жерновов.

Сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе «Математическая модель жерновой мельницы с линейным электроприводом» разработана математическая модель жерновой мельницы с линейным электроприводом. На рисунке 3 представлена обобщенная схема ЖМ с ЛЭП.

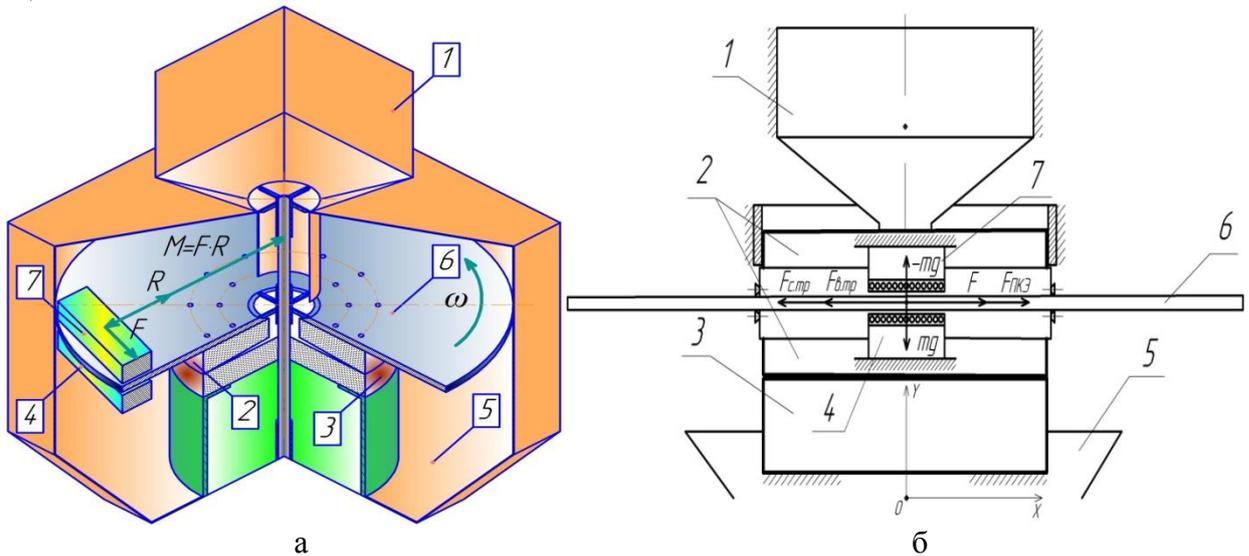


Рисунок 3 - ЖМ с ЛЭП: а – 3D модель; б – расчетная схема; 1 - загрузочный бункер; 2 – верхний подвижный жернов; 3 – нижний неподвижный жернов; 4, 7 – индукторы ЛАД; 5 - разгрузочный бункер; 6 – вторичный элемент ЛАД;  $M$  – момент вращения, Н·м;  $\omega$  – угловая частота вращения, рад/с;  $F$  – сила, развиваемая ЛАД, Н;  $F_{ПКЭ}$  – сила продольного краевого эффекта ЛАД;  $F_{в.тр}$  – сила вязкого трения, Н;  $F_{с.тр}$  – сила сухого трения, Н.

Уравнение, описывающее движение рабочего органа (жернова) может быть представлено в виде:

$$J \frac{d\omega}{dt} = F \cdot R + F_{ПКЭ} \cdot R - F_{в.тр} \cdot R \cdot k_{нр} - F_{с.тр} \cdot R \cdot k_{нр}, \quad (1)$$

где  $J$  – момент инерции вторичного элемента ЛАД,  $кг \cdot м^2 / с^2$ ;  $F_{в.тр} = \beta \cdot \dot{x}$  – сила вязкого (внутреннего) трения, Н;  $\beta$  – коэффициент вязкого (внутреннего) трения,  $Н \cdot с / м$ ;  $\dot{x}(t)$  – производная пути перемещения подвижного жернова по времени;  $F_{с.тр}$  – сила сухого (внешнего) трения, Н;  $R$  – расположение индукторов ЛАД от оси жернова, м;  $k_{нр}$  – приведенный коэффициент.

Мельница работает в установившемся режиме, длина ЛАД значительно меньше длины окружности вторичного элемента, поэтому для определения силы, развиваемой ЛАД, может быть использовано полное уравнение Клосса, составленное по Т – образной схеме замещения асинхронного двигателя:

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

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;  $I_1$  – сила тока в индукторе,

$A$ ;  $\varepsilon_0$  – добротность двигателя;  $R_2'$  – приведенное активное сопротивление

вторичного элемента,  $O_m$ ;  $\tau$  – полюсное деление ЛАД,  $m$ ;  $f_1$  – частота питающей сети,  $Гц$ ;  $s_k = 1/\varepsilon_0$  – критическое скольжение ЛАД;  $v_1$  – синхронная скорость ЛАД,  $м/с$ ;  $g = \frac{2R_1}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2' + X_1 X_2' / X_m)^2}}$  – параметр двигателя, определяемый по схеме замещения ЛАД;  $R_1$  и  $X_1$  – активное и реактивное сопротивления фазы индуктора;  $X_2'$  – приведенное реактивное сопротивление вторичного элемента;  $X_m$  – сопротивление взаимоиндукции между индуктором и вторичным элементом.

Особенность ЛАД по сравнению с обычными асинхронными двигателями вращения заключается в том, что при его работе возникает продольный краевой эффект (ПКЭ).

Схема замещения ЛАД, которая учитывает наличие ПКЭ в ЛАД по одномерной модели А.И. Вольдека, отличается от обычной  $T$  – образной схемы замещения асинхронного двигателя вращения наличием сопротивления  $\underline{Z}_{кэ}$  в первичной обмотке.

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

$$\underline{Z}_{кэ} = \frac{-(R_2' + jX_2')}{2p\pi} \left[ \frac{\lambda - \eta - j}{2\lambda(\lambda + \eta + j)} (1 - e^{-(\lambda + \eta)2p\pi}) + \frac{\lambda + \eta + j}{2\lambda(\lambda - \eta - j)} (1 - e^{-(\lambda - \eta)2p\pi}) \right] \quad (3)$$

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

Амплитудное значение  $F_{ПКЭ}$ , обусловленное отраженной волной бегущего магнитного поля имеет вид

$$F_{ПКЭ} = \frac{3R_{кэ}I_1^2}{2\mathcal{F}_1} \quad (4)$$

где  $R_{кэ}$  – активная составляющая сопротивления  $\underline{Z}_{кэ}$ ,  $O_m$ .

Сила вязкого (внутреннего) трения  $F_{в.тр}$  определяется движением потока зерна в рабочей зоне жерновов, которое может быть моделировано, согласно, инженерной реологии течением жидкости при переходе от слоя к слою

$$F_{в.тр} = \beta \cdot \dot{x}, \quad (5)$$

где  $\beta = \frac{h_0 \cdot \rho + 4\sigma \cdot f_6}{4 \cdot \dot{\gamma}} \cdot g_3 \cdot R_{жс}$  – коэффициент вязкого трения,  $H \cdot c / м$ ;  $h_0$  –

предельное значение высоты вертикально стоящего столба сыпучего материала, определяемое экспериментально,  $м$ ;  $\rho$  – плотность зерна,  $кг/м^3$ ;  $\sigma$  – на-

пряжение сжатия,  $кг/м^2$ ;  $f_6$  – коэффициент внутреннего трения зерна;  $\dot{\gamma}$  – скорость сдвига,  $c^{-1}$ ;  $g_3$  – ускорение свободного падения зерна,  $м/с^2$ ;  $R_{жс}$  – радиус

жерновов,  $м$ ;

Сила сухого (внешнего) трения определяется законом Ш. Кулона и описывается следующим выражением

$$F_{c.mp} = f_c \cdot N, \quad (6)$$

где  $f_c = tg\varphi$  – коэффициент трения зерна и камня;  $\varphi$  – угол трения;  $N = m \cdot g_z$  – сила нормального давления,  $H$ ;  $m = m_{жс} + m_z$  – масса подвижного жернова и зерна, находящегося в рабочей зоне, кг.

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

$$F = F_k (B_0 + B_1 \dot{x} + B_2 \dot{x}^2), \quad (7)$$

где  $B_0, B_1, B_2$  – постоянные коэффициенты, которые определяются:

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

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

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

После подстановки (7) в (1) дифференциальное уравнение движения жернова без учета  $F_{ПКЭ}$  (при  $p > 4$ ), имеет вид:

$$J \frac{d\omega}{dt} = F_k \cdot (B_0 + B_1 \cdot \dot{x} + B_2 \cdot \dot{x}^2) \cdot R - (\beta \cdot \dot{x}) \cdot R \cdot k_{np} - F_{c.mp} \cdot R \cdot k_{np} \quad (8)$$

Уравнение (8) представляет собой дифференциальное уравнение Рикатти, которое решается относительно частоты вращения подвижного жернова в квадратурах. Решение для установившейся частоты вращения  $n$  [об/мин] имеет вид:

$$n = 60 \cdot \left[ Y - \frac{d}{2f} \right] / 2\pi R, \quad (9)$$

где  $Y = \sqrt{\frac{(\beta - F_k B_1)^2}{4(F_k B_2)^2} - \frac{F_k B_0 - F_{c.mp}}{F_k B_2}}$ ;  $\frac{d}{2f} = \frac{\beta - F_k B_1}{2F_k B_2}$  – безразмерные параметры, характеризующие работу ЛАД в приводе ЖМ;

Зная частоту вращения жернова мельницы, можно найти ее производительность по выражению:

$$Q = 60 \cdot k_1 k_2 \psi \rho D_D^2 \delta_{жс} n \quad (10)$$

где  $k_1$  – коэффициент производительности (обычно  $k_1 = 0,7$ );  $k_2$  – коэффициент частоты вращения ( $k_2 = 0,01$ );  $\psi$  – коэффициент заполнения зоны измельчения зерном между жерновами ( $\psi = 0,7 \div 0,8$ );  $\rho$  – плотность измельчаемого зерна, кг/м<sup>3</sup>;  $D_D$  – наружный диаметр жернова, м;  $\delta_{жс}$  – зазор между жерновами, м.

С учетом ПКЭ в ЛАД ( $F_{ПКЭ} \neq 0$ , при  $p \leq 4$ ), математическая модель движения привода решается только методами численного интегрирования (Matlab). Вид математической модели привода жерновой мельницы с ЛАД в среде Matlab (Simulink), механические характеристики двигателя и ЖМ, график зависимости частоты вращения жерновка от перемещения индукторов ЛАД, изображены на рисунках 4, 5, 6.

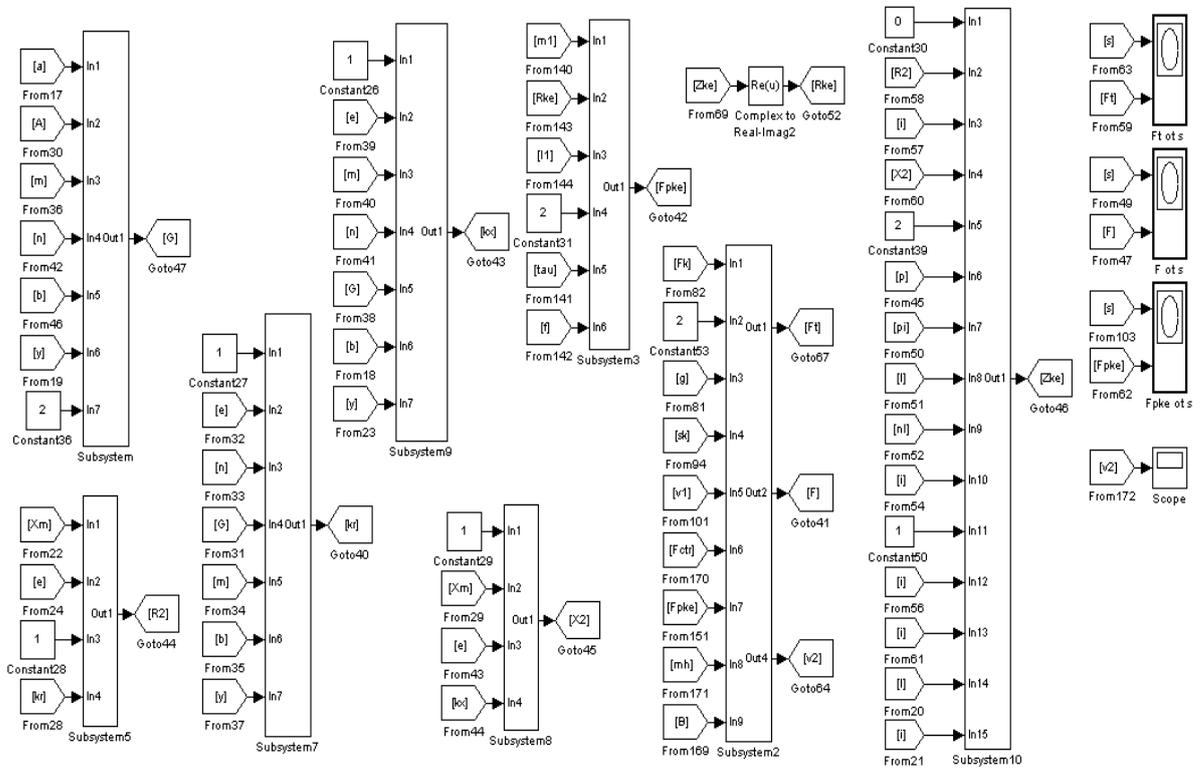


Рисунок 4 - Вид математической модели привода жерновой мельницы с ЛАД в Matlab (Simulink)

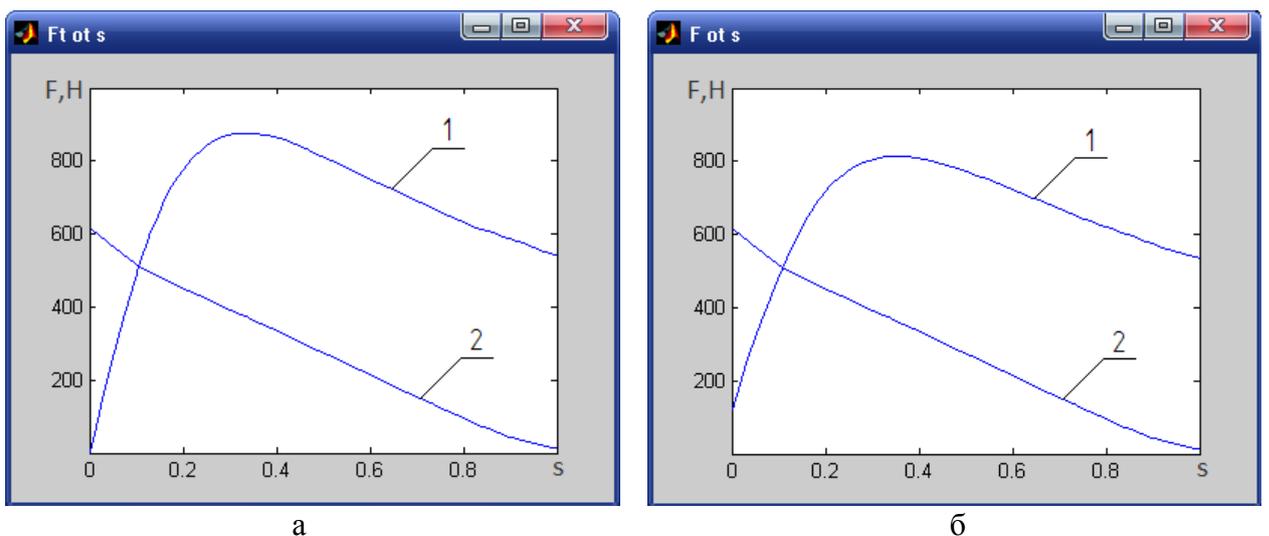


Рисунок 5 – Механические характеристики двигателя (1) и ЖМ (2):  
 $R_1=0.87(Ом)$ ,  $R_2=0.64(Ом)$ ,  $X_1=0.35(Ом)$ ,  $X_2=1.5(Ом)$ ,  $X_m=1.92(Ом)$ ,  $U=380 В$ ,  
 $\omega=314 рад/с$ ,  $p=2$ ;  $\tau=0,042 м$ ,  $v_1=4,2 м/с$ ;  $\beta=49,5 Н \cdot с/м$ ;  $F_{с.мп}=19,75 Н$   
 а – без учета влияния ПКЭ; б – с учетом влияния ПКЭ

При решении уравнения движения математической модели с учетом ПКЭ, выявлено, что сила ЛАД уменьшается на 4,9 -7,6 %. Из этого следует, что при инженерных расчетах частоту вращения подвижного жернова, можно найти по выражению (9).

На рисунке 6 приведен график зависимости частоты вращения жернова при перемещении индукторов ЛАД от оси мельницы.

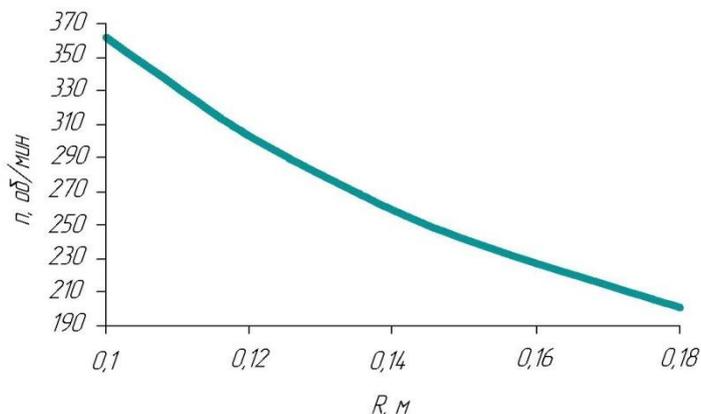
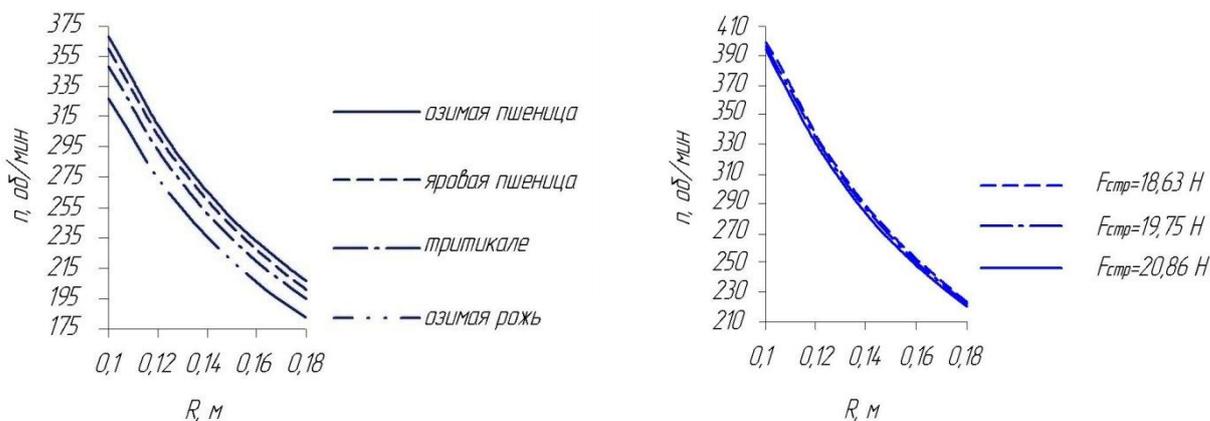


Рисунок 6 – Частота вращения жернова  $n$  (об/мин) при перемещении индукторов ЛАД на расстояние  $R$  (м) от оси мельницы

**В третьей главе** «Теоретическое исследование привода жерновой мельницы с линейным асинхронным двигателем» проведены исследования с целью определения взаимного влияния конструктивных и технологических параметров привода, наличия ПКЭ в ЛАД на работу жерновой мельницы.

Установлено, что наибольшее влияние на процесс измельчения оказывает вязкое (внутреннее) трение, которое, в свою очередь, зависит от рода зерна. Наибольшую силу сопротивления оказывает озимая рожь, коэффициент вязкости 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. Выявлено, что при малых диаметрах жерновов, сила сухого (внешнего) трения не оказывает столь большого влияния на работу, и при диаметрах жерновов  $\leq 0,2$  м, ею можно пренебречь (рисунок 7).



а

б

Рисунок 7 – Влияние на частоту вращения жернова при перемещении индукторов: а – коэффициента вязкого трения –  $\beta$ , Н·с/м; б – силы сухого трения –  $F_{с.тр}$ , Н

Применение двухстороннего плоского ЛАД позволяет регулировать не только частоту вращения жерновой мельницы, но и момент на вторичном элементе двигателя (рисунок 8), причем видно, что 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.

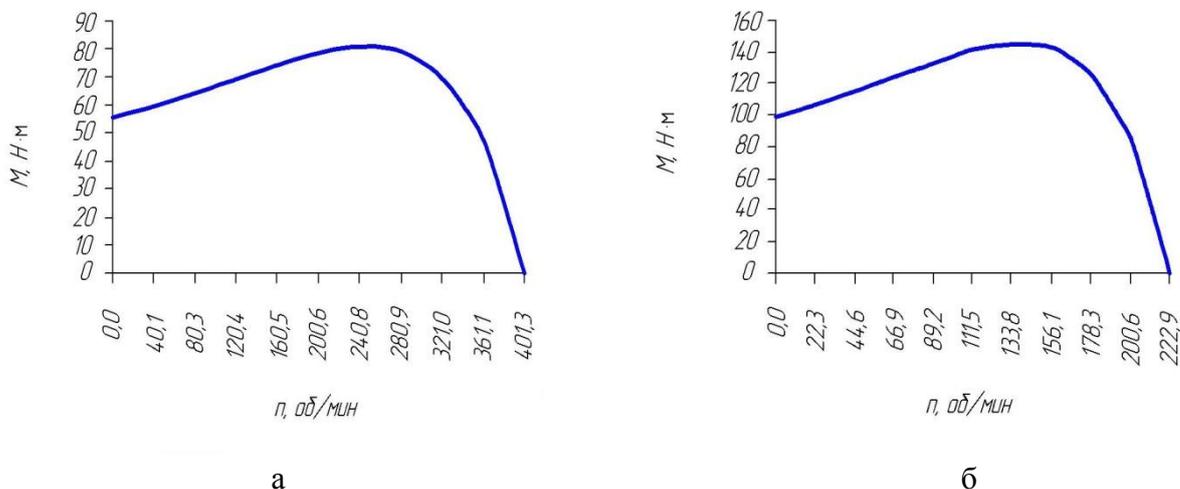


Рисунок 8 – Механическая характеристика двигателя при расположении индукторов ЛАД: а – 0,1 м от оси мельницы; б – 0,18 м от оси мельницы

Получены зависимости изменения производительности от частоты вращения жернова при изменении коэффициента заполнения зоны измельчения  $\psi$  от 0,7 до 0,8; зазора между жерновами от 0,001 до 0,0015 м (рисунок 9); изменения силы ЛАД от уменьшения, или увеличения числа пар полюсов (рисунок 10).

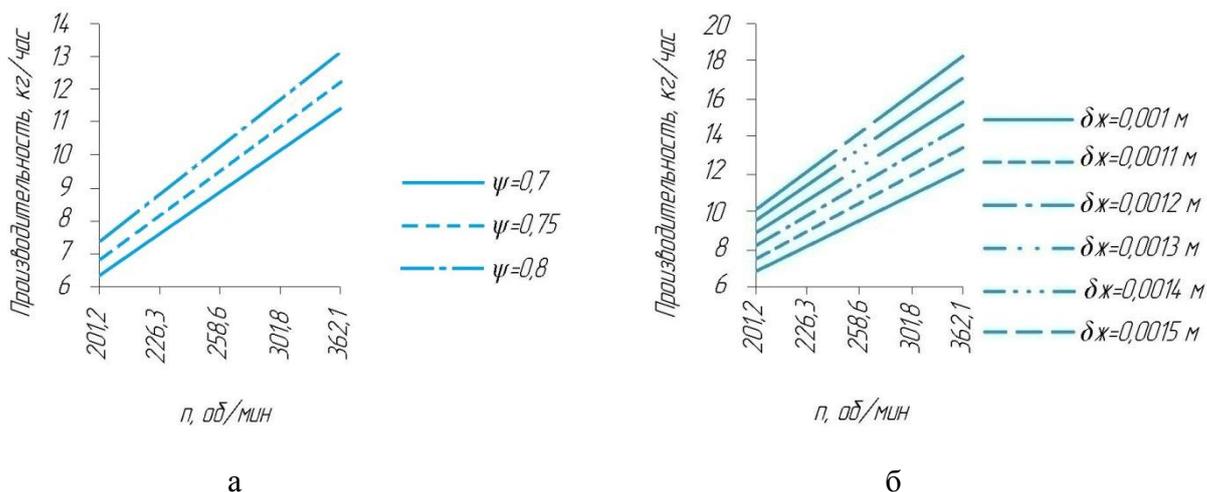


Рисунок 9 – Влияние на производительность мельницы: а – коэффициента заполнения зоны измельчения ( $\psi$ ); б – зазора между жерновами ( $\delta_{ж}$ )

Максимальное увеличение производительности ЖМ 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).

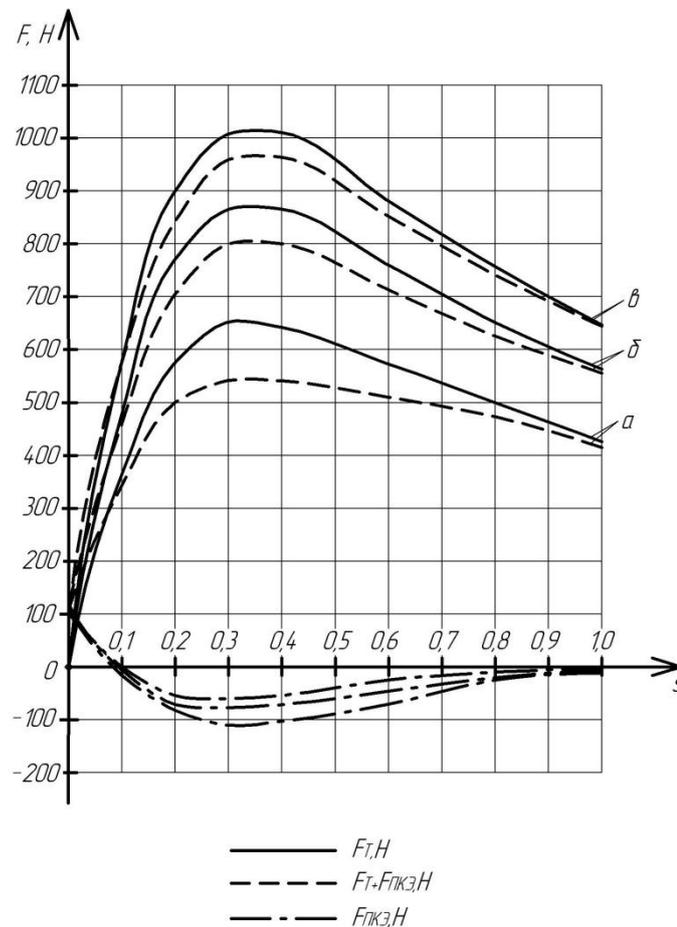


Рисунок 10 – Влияние ПКЭ на силу, развиваемую двигателем в зависимости от числа пар полюсов: а –  $p = 1$ ,  $X_m = 1,51 \text{ Ом}$ ; б –  $p = 2$ ,  $X_m = 1,92 \text{ Ом}$ ; в –  $p = 3$ ,  $X_m = 2,19 \text{ Ом}$

Из рисунка 10 видно, что с увеличением числа пар полюсов сужается область скольжений, где в наибольшей степени проявляется действие ПКЭ.

**В четвертой главе «Экспериментальное исследование привода жерновой мельницы с линейным асинхронным двигателем»** разработана методика экспериментальных исследований, на основе которой создана экспериментальная ЖМ с ЛЭП, которая обладает широкими возможностями:

- регулирование частоты вращения подвижного жернова изменяя расстояние между осью вращения мельницы и индукторами ЛАД (с приближением индукторов ЛАД к оси мельницы частота вращения жернова увеличивается, и наоборот, с отдалением индукторов от оси, частота вращения жернова уменьшается);

- увеличение диапазона регулирования частоты вращения и момента, 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);

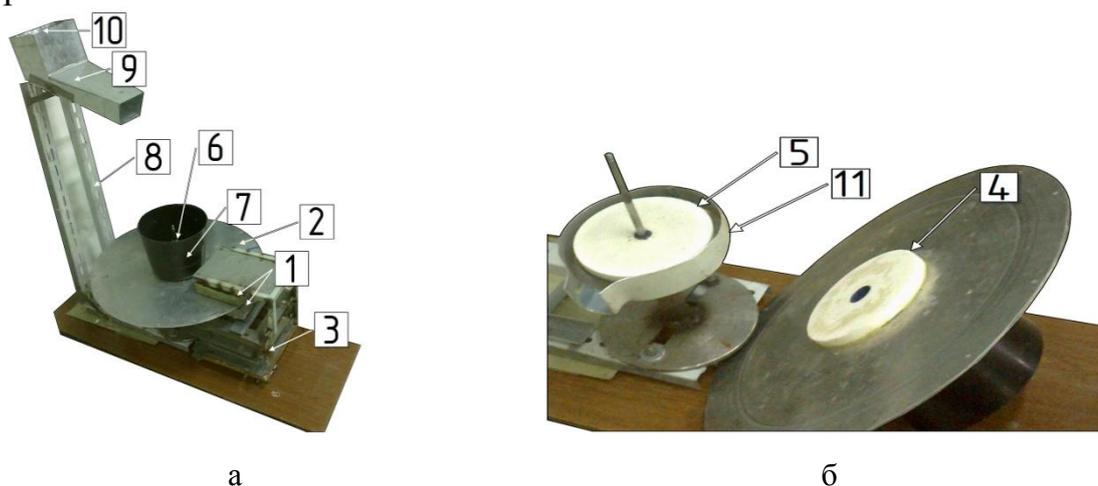
- энергосбережением (подключение только одного из индукторов ЛАД к источнику питания, второй при этом обеспечивает замыкание магнитных силовых линий работающего индуктора);

- изменением 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);

- предотвращение 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 ( $2p$ ): при параллельном соединении обмоток  $2p = 2 \div 4$  ( $p = 1 \div 2$ ), при последовательном  $2p = 4 \div 8$  ( $p = 2 \div 4$ ).

Для измерения частоты вращения вторичного элемента экспериментальной установки (рисунок 11) применялись два тахометра: цифровой фототахометр ДТ-2234А и дополнительный контактный цифровой тахометр ЖМ-ДТ-2235В с двумя детекторами, показания которого в последующем путем сравнения показаний двух приборов приняты в качестве действительного значения при математической обработке результатов экспериментов. Все измерительные приборы прошли поверку в электролаборатории ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ.



а б  
Рисунок 11 - Экспериментальная ЖМ с ЛЭП:

а) 1 – индукторы ЛАД, 2 – вторичный элемент ЛАД, 3 – тележка; б) 4 – верхний подвижный жернов мельницы, 5 – нижний неподвижный жернов мельницы, 11 – разгрузочный лоток

Проведены измерения частоты вращения жернова мельницы при помоле яровой пшеницы Омская – 36. Обработка результатов экспериментальных исследований из – за наличия корреляционной связи расстояния между индукторами и осью вращения мельницы, и частотой вращения жернова проведена по методике прямых измерений.

Анализ результатов измерений частоты вращений ВЭ ЛАД показал, что относительная погрешность измерений не превышает  $\pm 0,21\%$ . Расхождение результатов, полученных теоретическим и экспериментальным путем составило 7,32 % (рисунок 12).

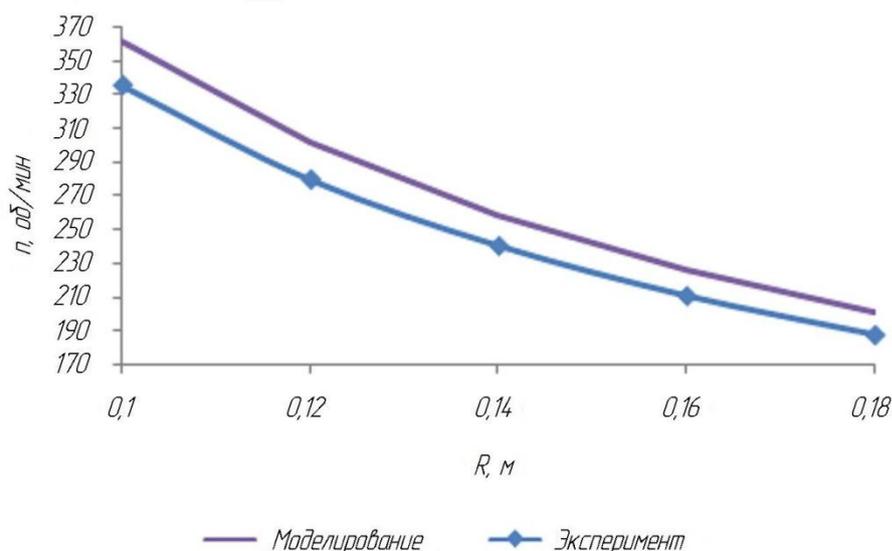


Рисунок 12 – Сравнительная оценка теоретических и экспериментальных данных

**В пятой главе** «Технико-экономическая эффективность внедрения ЖМ с ЛЭП» определен годовой экономический эффект в размере 36490,23 рублей при производительности 258,7 т, который достигнут за счет внедрения ЛАД с малым числом пар полюсов в электроприводе жерновой мельницы промышленного образца на предприятиях мукомольного производства, и, как следствие, экономии текущих затрат на оборудование при капитальных вложениях 206129,32 рублей со сроком окупаемости 5,6 лет.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 электропривода 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.

### **Рекомендации производству**

1. Проведенные исследования позволяют дать рекомендации по проектированию и применению разработанного электропривода для других технологических машин с регулируемой низкой частотой вращения рабочего органа.

2. Реализация выпуска предлагаемой конструкции электропривода для крестьянско-фермерских хозяйств и малых предприятий перерабатывающей промышленности.

### **Перспективы дальнейшей разработки темы**

1. Расширить сферы применения ЖМ с ЛЭП в отраслях АПК.

2. Совершенствовать ЖМ с ЛЭП путем разработки и исследования конструкции электропривода с двумя вторичными элементами разностороннего вращения, что позволит увеличить производительность и повысить энергоэффективность мельницы.

### **Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах**

*В изданиях, рекомендованных ВАК РФ*

1. **Нугуманов, Р.Р.** Мельница для производства "живой" муки/ Р. С. Аипов, Р.Р. Нугуманов // Сельский механизатор. - 2012. - № 8. - С. 27.

2. **Нугуманов, Р.Р.** 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.

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

## Патенты

4. Пат. 2482920 Российская Федерация, МПК В 02 С7/16. 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.

5. Пат. 2546860 Российская Федерация, МПК В 02 С7/08, В 02 С7/16. 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.

### *В материалах конференций и семинаров*

6. **Нугуманов, Р.Р.** 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.

7. **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.

8. **Нугуманов, Р.Р.** 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.

9. **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.

10. **Нугуманов, Р.Р.** 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. - Режим доступа: [http://journal.bsau.ru/directions/05-00-00-technical\\_sciences/index.php?ELEMENT\\_ID=369](http://journal.bsau.ru/directions/05-00-00-technical_sciences/index.php?ELEMENT_ID=369)

11. **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.

12. *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.

Подписано в печать \_\_\_\_ . \_\_\_\_ . 2016. Формат бумаги 60x84<sup>1/16</sup>. Усл. печ. л. 0,99. Бумага офсетная.  
Печать трафаретная. Гарнитура «Таймс». Заказ \_\_\_\_ . Тираж \_\_\_\_ экз.

---

Типография ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет»  
450001, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, 34