

УДК 621.313.333.2

На правах рукописи



ВАСИЛЬЕВ ДАНИИЛ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СУШКИ ЗЕРНА ЗА СЧЕТ
ОБОСНОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

4.3.2. Электротехнологии, электрооборудование и электроснабжение
агропромышленного комплекса

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ижевск 2024

Работа выполнена на кафедре «Электротехника, электрооборудование и электроснабжение» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Удмуртский государственный аграрный университет» (ФГБОУ ВО Удмуртский ГАУ).

Научный руководитель: **Пантелеева Лариса Анатольевна**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники, электрооборудования и электроснабжения

Официальные оппоненты: **Сторчевой Владимир Федорович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации и роботизации технологических процессов Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждения высшего образования Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева

Бакиров Сергей Мударисович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электрооборудование, энергоснабжение и роботизация» Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждения высшего образования «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Оренбургский государственный аграрный университет»

Защита состоится «25» июня 2024 г. в 11:00 часов на заседании диссертационного совета 35.2.043.03 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Удмуртский государственный аграрный университет» (ФГБОУ ВО Удмуртский ГАУ) по адресу: 426069, Российская Федерация, г. Ижевск, улица Студенческая, дом 11.

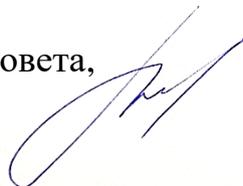
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО Удмуртский ГАУ и на официальном сайте <https://udsau.ru/> в разделе «Диссертационные советы».

Автореферат размещен на сайте Министерства науки и высшего образования Российской Федерации <http://vak.minobrvauki.gov.ru/> «___» _____ 2024 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, скрепленные гербовой печатью, просим направлять ученому секретарю диссертационного совета 35.2.043.03 по адресу: 426069, Российская Федерация, г. Ижевск, улица Студенческая, дом 11, а также на E-mail: 9048336842@mail.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



Широбокова
Татьяна Александровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Сушка зерна является энергоемким процессом. Стоимость испарения 1 кг влаги при использовании природного газа 0,96 руб./кг, дизельного топлива 4,77 руб./кг, греющего пара 1,44 руб./кг, электроэнергии 7,3 руб./кг. Самым дешевым способом сушки является сжигание природного газа и смешивание полученных дымовых газов с воздухом. Однако не все районы газифицированы, поэтому наряду с газовыми горелками используются мазутные горелки, а в некоторых случаях угольные котлы. На сегодняшний день в сельскохозяйственных организациях Удмуртской Республики 395 сушилок для зерна, из них 142 работают на природном газе, что соответствует 36 %, 83 – на дизельном топливе – 21 %, 146 – на печном топливе – 37 % и 24 используют дрова – 6 %.

В сельскохозяйственном производстве применяют разнообразное зерносушильное оборудование, которое отличается конструктивно-технологическими схемами исполнения. Суммарное энергопотребление зерносушилок различного типа составляет: шахтные 71-125 кВт·ч/т, барабанные 88-148 кВт·ч/т, бункерные 74-153 кВт·ч/т, карусельные 85-147 кВт·ч/т, модульные 72-82 кВт·ч/т, конвейерные 108-186 кВт·ч/т. Общее регулирование потребляемой мощности сушки зависит от многих факторов, в том числе: от работы приточной системы, системы подачи топлива, газоочистного оборудования (циклоны, фильтры для конвективных сушилок), механической системы перемещения зерна в сушильных камерах, основным оборудованием которых является электропривод.

Использование научно-обоснованных алгоритмов управления и режимов работы электропривода в системах сушильного агрегата является эффективным и инновационным решением, которое способствует снижению потерь энергии на 4-5%, увеличению производительности на 6-18% и сокращению энергопотребления на 1-4%. Это не только положительно сказывается на экономической эффективности сельскохозяйственных предприятий, но и способствует более эффективному использованию ресурсов и снижению негативного влияния на окружающую среду.

Степень разработанности темы. Вопросами регулирования параметров электропривода занимались многие ученые. Основоположником теории частотного управления М. П. Костенко сформулирован закон оптимального соотношения между амплитудой и частотой напряжения питания идеализированного двигателя с учетом момента нагрузки на его валу. Развитию теории частотного управления на основе более полного учета свойств асинхронных двигателей (АД) посвящены работы А.А. Булгакова, И.Я. Браславского, А.Б. Виноградова, Ю.А. Сабина, А.С. Сандлера, Р.С. Сарбатова, В.Н. Полякова, С.М. Бакирова, В.А. Каргина, Ю.А. Мощинского и многих других. Однако вопросы по регулированию параметров электропривода в совокупности различных систем (подача топлива, транспорт зерна, работа дутьевых вентиляторов и т.п.) при влиянии температурных полей в сушильных камерах, фактической влажности потока осушаемого зерна остаются недостаточно изученным.

Цель работы: повысить эффективность сушки зерна обоснованием режимов работы электропривода.

С учётом сформулированной цели необходимо решить следующие задачи исследования:

1. Разработать и реализовать математическую модель асинхронного двигателя, позволяющую определять активные и реактивные составляющие токов обмоток статора и ротора.

2. Теоретически обосновать условия, параметры и режимы наименьшего энергопотребления электропривода при эксплуатации сушильной установки.

3. Провести экспериментальные исследования режимов работы электропривода сушильной установки и сравнить их с теоретическими данными.

4. Выполнить технико-экономическую оценку принятых решений.

Объект исследования: электропривод зерносушильных агрегатов.

Предмет исследования: закономерности изменения параметров электропривода в различных условиях сушки зерна.

Научная новизна:

1. Разработана математическая модель асинхронного двигателя, которая отличается от известных тем, что параметры схемы замещения выражены через проводимости статора и ротора, что в свою очередь позволяет определить составляющие мощности и тока асинхронного двигателя при варьировании частоты питающего напряжения.

2. Получены энергетические характеристики асинхронного двигателя в функции скольжения, как обобщенного параметра режима работы двигателя, определены зависимости активных и реактивных составляющих тока асинхронного двигателя и возможность их перераспределения в пределах номинального значения тока фазы двигателя.

3. Сформулирован основной принцип частотно-токового управления асинхронного двигателя, отличающийся от известных тем, что в качестве показателя энергоэффективности используется значение максимального энергетического коэффициента полезного действия асинхронного двигателя, выраженный как отношение произведения активной проводимости цепи ротора и полной активной проводимости фазы к квадрату полной проводимости фазы.

4. Разработана математическая модель процесса сушки зерна в кипящем слое, позволяющая выполнять расчёт параметров процесса сушки в зависимости от свойств зерна и агента сушки. Получен усовершенствованный процесс управления сушкой зерна, позволяющий снижать неравномерность сушки и обеспечивающий снижение энергозатрат.

Теоретическая значимость работы заключается в исследовании энергетических характеристик асинхронного двигателя на предложенной схеме замещения, выраженной через проводимости статора и ротора. Теоретическая проработка вопросов, посвященных исследованию асинхронного двигателя, расширяет область знания в теории электрических машин. Разработанная математическая модель процесса сушки в кипящем слое позволяет выполнять расчёт параметров процесса сушки в зависимости от свойств зерна и агента сушки, дополняя методики расчетов режимов и параметров работы зерносушильного оборудования.

Практическая значимость работы:

1. Полученные зависимости активных и реактивных составляющих мощности асинхронного двигателя в функции скольжения могут быть использованы проектными организациями для выбора закона частотного управления при проектировании асинхронного электропривода.

2. Функциональная схема замещения фазы асинхронного двигателя позволяет осуществлять идентификацию активных и реактивных составляющих токов и мощности в обмотках статора и ротора.

3. Разработана программа по поиску значений амплитуды и частоты напряжения питания асинхронного двигателя и получения максимального значения энергетического коэффициента полезного действия.

4. Разработана математическая модель, которая позволяет оптимизировать процесс сушки зерна в кипящем слое. Модель учитывает свойства зерна и позволяет рассчитать необходимые параметры процесса сушки, снижая неравномерность сушки и уменьшая энергозатраты.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач мы применили широкий спектр методов исследования, включая теоретические и экспериментальные подходы, математическое и физическое моделирование, а также использование компьютерной техники и статистический анализ экспериментальных данных. Это позволило нам более полно и точно изучить процессы и режимы работы асинхронного двигателя и сушки.

Положения, выносимые на защиту:

1. Схема замещения фазы асинхронного двигателя отличается от известных тем, что параметры схемы замещения выражены через проводимости статора и ротора, при учете дополнительных потерь в стали ротора, формулы для определения активных и реактивных проводимостей схемы замещения по паспортным данным.

2. Закономерность изменения активных и реактивных составляющих тока в обмотках статора и ротора асинхронного двигателя, позволяющая обосновать энергоэффективные режимы работы электропривода.

3. Теоретическое обоснование режима тепловой обработки зерна, зависимости для определения параметров агента сушки, позволяющие обосновать рациональные режимы работы зерносушильного оборудования с кипящим слоем.

Степень достоверности результатов. Достоверность результатов обеспечена использованием поверенных средств измерений и испытательного оборудования, имеющих сертификат об утверждении типа средств измерений Госстандарта РФ в региональном отделении ФБУ «Удмуртский ЦСМ». Результаты испытаний пшеницы соответствии ГОСТ 9353-2016 «Пшеница. Технические условия» получены в испытательной лаборатории «Гранум». Для обеспечения достоверности полученных результатов в работе применяются общепринятые теоретические положения и методы. Результаты компьютерного моделирования сравниваются с экспериментальными данными для их подтверждения. Корректность полученных результатов и сделанных выводов подтверждается согласованностью с данными, полученными другими исследователями в данной области.

Результаты исследований по повышению энергоэффективности сушки зерна за счет обоснования режимов работы электропривода внедрены в СПК «Свобода» Увинского района Удмуртской Республики.

Реализация результатов исследований. Работа проведена в соответствии с планом НИР Удмуртского ГАУ по теме «Повышение эффективности работы технологических энергоустановок в сельском хозяйстве Удмуртской Республики», рег. №11601151005.

Апробация работы. Основные положения работы представлялись и обсуждались на следующих конференциях: на Всероссийской научно-практической конференции «Роль молодых ученых-инноваторов в решении задач по ускоренному импортозамещению сельско-хозяйственной продукции» (Россия, Ижевск, 27-29 октября 2015 г.); на Всероссийской научно-практической конференции «Научное и кадровое обеспечение АПК для продовольственного импортозамещения» (Россия, Ижевск, 16-19 февраля 2016 г.); на Международной научно-практической конференции «Научно обоснованные технологии интенсификации сельскохозяйственного производства» (Россия, Ижевск, 14-17 февраля 2017 г.); на Международной научно-практической конференции «Инновационные направления развития энергетики АПК» (Россия, Ижевск, 25 октября 2017 г.); на Международной научно-практической конференции Института агроинженерии «Развитие энергосистем АПК: перспективные технологии» (Россия, Челябинск, 2018 г.); на Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии для реализации программы научно-технического развития сельского хозяйства» (Россия, Ижевск, 13-16 февраля 2018 г.); на Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы энергетики АПК» (Россия, Саратов, апрель 2018 г.); на 9-ой Международной научно-технической конференции молодых ученых и специалистов «Агроинженерные инновации в сельском хозяйстве» (Россия, Москва, 30-31 мая 2018 г.); на Международной научно-практической конференции «Аграрная наука – сельскохозяйственному производству» (Россия, Ижевск, 12-15 февраля 2019 г.); на Международной научно-практической конференции «Аграрное образование и наука – в развитии отраслей животноводства» (Россия, Ижевск, 20 июля 2020 г.); на Международной научно-практической конференции «Развитие производства и роль агроинженерной науки в современном мире» (Россия, Ижевск, 16-17 декабря 2021 г.); на Национальной научно-практической конференции молодых ученых с международным участием «Наука и молодежь: новые идеи и решения в АПК» (Россия, Ижевск, 28 ноября - 1 декабря 2023 г.); на конференциях различного уровня, проводимых ФГБОУ ВО Удмуртский ГАУ в период с 2015 по 2024 гг.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Научные результаты диссертации соответствуют паспорту специальности 4.3.2. «Электротехнологии, электрооборудование и электроснабжение агропромышленного комплекса» следующего раздела «Электрооборудование, системы электроснабжения, автоматизированный электропривод, автоматизированный контроль и управление для мобильных установок, беспилотных аппаратов, технологических машин и поточных линий в АПК».

Публикации. По теме диссертационного исследования опубликовано 24 научных работы, в том числе 8 научных статей в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендуемых ВАК по группе научных специальностей диссертационного исследования, две научные статьи – в изданиях, входящих в международную реферативную базу данных Scopus. По результатам исследований получены 2 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора состоит в реализации основных теоретических положений диссертации. Результаты, представленные в диссертации и отраженные в публикациях, получены при непосредственном участии автора. Автор принимал непосредственное участие в определении целей и задач исследований, выборе методологической и информационной базы, проведения экспериментальных исследований. Автор принимал участие в обработке экспериментальных данных, обсуждении результатов, написании статей и представлении докладов на конференциях.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы из 153 наименований. Работа изложена на 211 страницах, на которых приведены 22 таблицы, 71 рисунок и 7 приложений. На заимствованные материалы и работы, выполненные в соавторстве, сделаны соответствующие ссылки.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

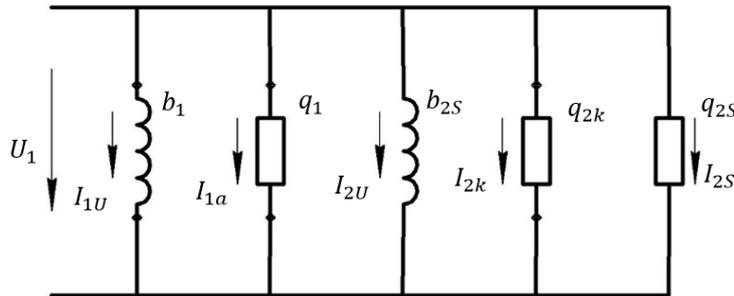
Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, отражены научная новизна и практическая значимость работы, предмет, объект и методы исследования, обозначены основные положения, выносимые на защиту, практическая и теоретическая значимость работы, приведено краткое изложение диссертации по главам.

В первой главе «Состояние научной проблемы, цель и задачи исследований» представлен аналитический обзор условий функционирования объектов послеуборочной обработки зерна в Удмуртской Республике, характерными особенностями которых является короткий период уборки и повышенные значения влажности зернового вороха, достигающей 30 %.

На сегодняшний день в сельскохозяйственных организациях Удмуртской Республики 395 сушилок различного типа. Анализ состояния зерносушильной техники выявил большой износ оборудования, недостаточное техническое обеспечение, что является основными причинами снижения производительности комплексов и повышенных затрат на обработку зерна. Суммарное энергопотребление зерносушилок составляет 70-200 кВт·ч/т. Рассмотрены особенности, преимущества и недостатки конвективных сушильных установок: в подвижном, кипящем, взвешенном и неподвижном слое. Общее регулирование потребляемой мощности сушильных агрегатов зависит от работы приточной системы, системы подачи топлива, газоочистного оборудования, механической системы перемещения зерна в сушильных камерах, основным оборудованием которых является электропривод.

Проведенный анализ литературных данных показал, что повышение энергоэффективности сушки зерна следует вести в направлении оптимизации режимов работы электропривода, что позволит снизить потери энергии на 4-5%.

Во второй главе «Теоретическое исследование асинхронного двигателя с частотным регулированием» рассмотрена теория и практика частотно-регулируемых АД, методы их расчета. Математические модели АД являются основой для исследования процессов электромеханического преобразования энергии и приобретают особую значимость при разработке энергосберегающих алгоритмов управления электропривода. Традиционно схему замещения АД принято представлять в виде параллельных и последовательно соединенных сопротивлений. При исследовании установившихся режимов работы АД важно знать активные и индуктивные составляющие тока фазы, посредством которых определяются активная и реактивная мощности, коэффициент мощности и другие составляющие рабочих характеристик АД. В связи с этим схему замещения АД целесообразнее представлять в виде логического набора проводимостей (рис. 1).



U_1 – первичное фазное напряжение, В;

$I_{1U}, I_{1a}, I_{2U}, I_{2k}, I_{2s}$ – токи, соответствующие проводимостям $b_1, q_1, b_{2s}, q_{2k}, q_{2s}$, А

Рисунок 1 – Схема замещения фазы асинхронного двигателя, выраженная через проводимости статора и ротора

Проводимости схемы замещения одной фазы АД определяются по параметрам схемы замещения, изображенной на рисунке 1:

$$\begin{aligned} b_1 &= X_0 Z_1^{-2}, q_1 = R_0 Z_1^{-2}, b_{2s} = X_{2k} Z_2^{-2}, \\ q_{2k} &= Z_2^{-2} (R_1 + R_2), q_{2s} = Z_2^{-2} R_2 (s^{-1} - 1), \\ Z_1^2 &= R_1^2 + X_0^2, Z_2^2 = (R_1 + R_2/s)^2 + X_{2k}^2, \end{aligned} \quad (1)$$

где b_1 – индуктивная проводимость цепи намагничивания, 1/Ом; q_1 – активная проводимость цепи намагничивания, 1/Ом; b_{2s} – индуктивная проводимость рассеяния цепи ротора, 1/Ом; q_{2k} – активная проводимость цепи ротора, по которой определяются потери активной мощности в фазе, 1/Ом; q_{2s} – активная проводимость цепи ротора, по которой определяется активная составляющая тока, и мощности при преобразовании электрической мощности в механическую, 1/Ом; R_0, X_0 – активное и реактивное сопротивления контура намагничивания, Ом; R_1 и R_2 – первичное и вторичное приведенные активные сопротивления, Ом; X_{2k} – приведенные реактивные сопротивления рассеивания, Ом; s – скольжение, о.е.; Z_1 и Z_2 – коэффициенты.

Одной из ключевых задач при разработке асинхронного электропривода является определение параметров схемы замещения АД (рис. 1). При расчете параметров схемы замещения введена зависимость изменения сопротивления ротора, вследствие вытеснения тока в стержнях и насыщения коронок зубцов ротора, а также проводимость, учитывающая механические потери ($q_m, 1/Ом$).

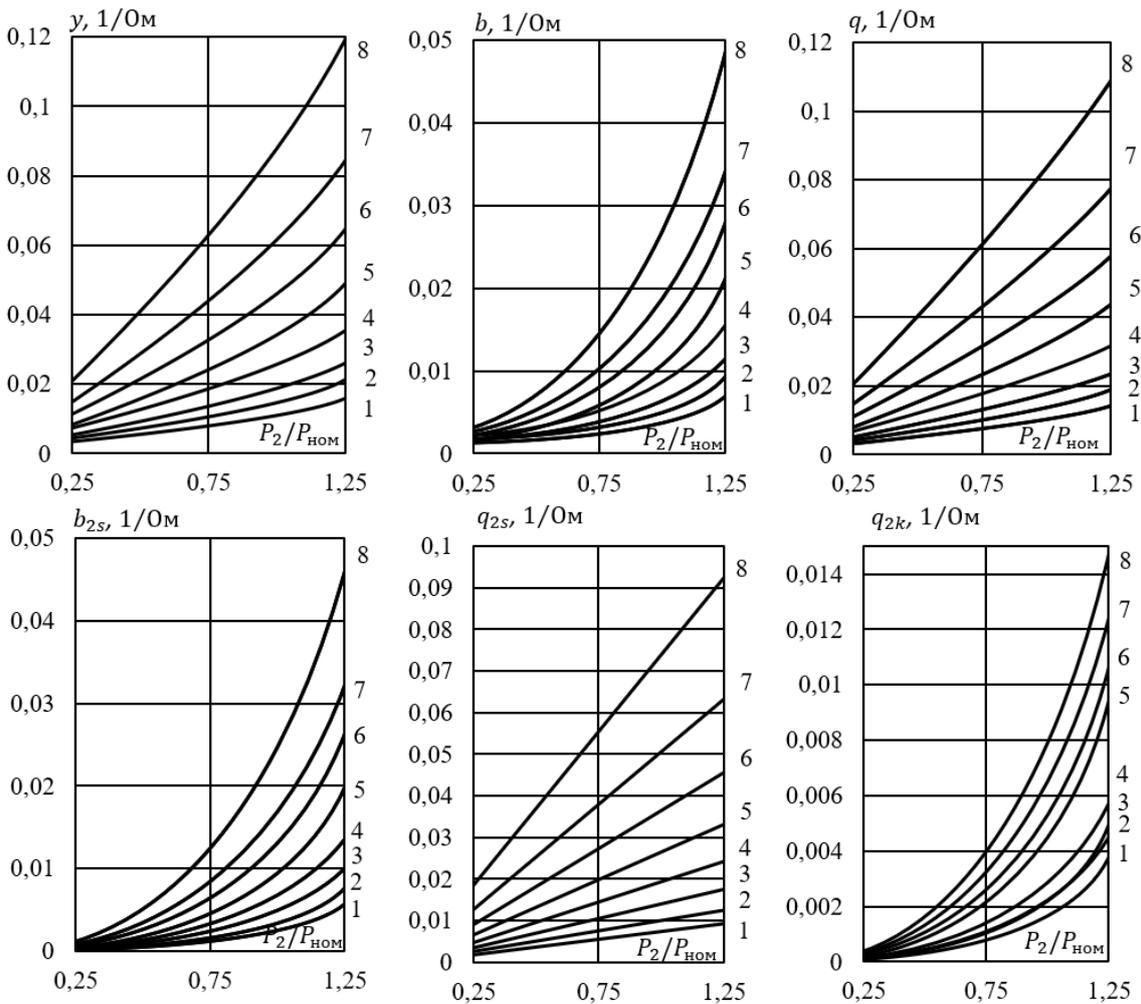
Принимая за основу методику предложенную Мощинским Ю.А. и выражения для расчета проводимостей (1), получены выражения для определения параметров схемы замещения АД (рис. 1) по каталожным данным:

$$q_1 = \frac{P_M I_0^2}{E_1^2 I_0^2 + P_M^2}, b_1 = \frac{E_1 I_0^3}{E_1^2 I_0^2 + P_M^2}, b_{2s} = \frac{B s^2 \sqrt{1 - 1,44 B s_K} \cdot (1,2 s_K + 1)}{A(2,4 s_K^2 B s + s_K^2 + s^2)}, \quad (2)$$

$$q_{2k} = \frac{B s^2 s_K (1,2 B + 1)(1,2 s_K + 1)}{A(2,4 s_K^2 B s + s_K^2 + s^2)}, q_{2s} = \frac{s_K (s - 1)(1,2 s_K + 1) B s}{A(2,4 s_K^2 B s + s_K^2 + s^2)}, q_m = \frac{1}{I_0^2 P_M},$$

где P_M – магнитные потери, Вт; E_1 – ЭДС ветви намагничивания, в номинальном режиме, В; s_K – критическое скольжение, о.е.; s – скольжение, о.е.; I_0 – ток холостого хода, А; A и B – коэффициенты.

Зависимости проводимостей двигателей (рис. 2), по которым определяются энергетические характеристики, серии АИР от нагрузки демонстрируют сходство. Это соответствует принципам, применяемым при проектировании электрических машин с использованием теории подобия. Полученные результаты анализа АД и закономерностей энергетических характеристик, полученные в диссертационном исследовании, могут рассматриваться как обобщенные.



1 – 1,1 кВт; 2 – 1,5 кВт; 3 – 2,3 кВт; 4 – 3 кВт; 5 – 4 кВт; 6 – 5,5 кВт; 7 – 7,5 кВт; 8 – 11 кВт

Рисунок 2 – Зависимости проводимостей фазы двигателей от нагрузки

По выражениям (2) определены параметры схемы замещения фазы АД, на примере АИР100S4 мощностью 3 кВт:

$$q_1 = 4,3298a_1^{-1}, b_1 = 1,3271fa_1^{-1}, b_{2s} = 0,12439fa_2^{-1},$$

$$q_{2s} = 2,2869(s^{-1} - 1)a_2^{-1}, q_{2k} = 6,6168a_2^{-1}, q_m = 0,7891 \cdot 10^{-3}, \quad (3)$$

где коэффициенты a_1 и a_2 определяются по выражениям:

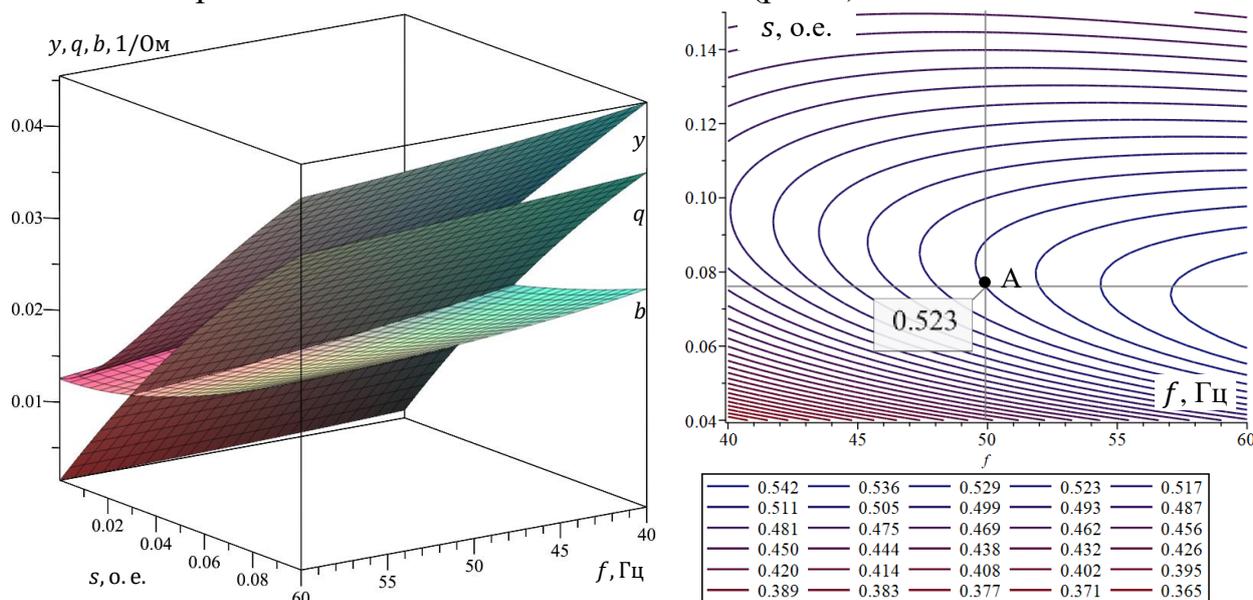
$$a_1 = 18,747 + 1,7612f^2, a_2 = (4,3298s + 2,2869/s)^2 + 0,015475f^2.$$

При анализе зависимостей на рисунке 3 и теоретическом исследовании проводимостей АД, выражения 3, установлено, что активная проводимость зависит прямо пропорционально от скольжения ротора, а индуктивная проводимость имеет слабую зависимость, так как в ее составе имеется постоянная составляющая. С учетом этих особенностей сформулирована гипотеза: в АД имеется возможность изменять соотношение между активной и индуктивной составляющими тока в пределах номинального значения тока фазы, путем одновременного воздействия амплитудой и частотой напряжения сети, подведенного к фазе АД, и, как следствие, изменять показатели энергоэффективности АД.

Предложен и теоретически обоснован показатель оценки эффективности работы АД, энергетический КПД (ξ , о.е.):

$$\xi = \cos^2 \varphi \cdot \eta = \frac{q_{2s}(q_1 + q_{2k} + q_{2s} + q_m)}{(q_1 + q_{2k} + q_{2s} + q_m)^2 + (b_1 + b_{2s})^2}. \quad (4)$$

Из формул (3) и (4) следует, что энергетический КПД АД определяется частотой напряжения и величиной скольжения (рис.4).



y – полная проводимости фазы, 1/Ом;
 q – активная проводимости фазы, 1/Ом;
 b – индуктивная проводимости фазы, 1/Ом

Рисунок 3 – Зависимости проводимостей двигателя АИР100S4 частоты питающей сети и скольжения

Рисунок 4 – Зависимости энергетического коэффициента полезного действия АД АИР100S4 от частоты питающей сети и скольжения

Способ повышения энергетического коэффициента полезного действия при эксплуатации трехфазных АД электроприводов, рассмотрен на примере работы двигателя АИР100S4 совместно с дутьевым вентилятором ВР 80-75-6,3. Критерием оптимизации является выражение:

$$\xi = \frac{q_{2s}q}{q^2 + b^2} = \frac{q_{2s}q}{y^2} \Rightarrow \max. \quad (5)$$

При решении выражения (5) получено выражение для определения оптимальной частоты, из условия минимума потерь в обмотках АД (f_{ξ} , Гц):

$$f_{\xi} = (105,336s^2 - 23,6753s + 1,2525) \cdot 10^{-3}. \quad (6)$$

Результаты решения задачи оптимизации показаны на рисунке 4. На основании результатов проведенного анализа характеристик АД следует, что двигатель будет работать с минимальными потерями, если изменять амплитуду напряжения питания так, чтобы скольжение асинхронного двигателя было равно критическому значению s_{ξ} для заданной частоты. Для исследуемого двигателя АИР100S4 критическое значение равно $s_{\xi} = 0,077$ при частоте сети 50 Гц (т. А рис. 4).

В третьей главе «Экспериментальные исследования энергосберегающих режимов работы асинхронного электродвигателя с частотным регулированием» разработан и создан лабораторный стенд для исследования асинхронного двигателя АИР100S4. Программа проведения экспериментальных исследований включает определение механической характеристики (рис. 5). Задача эксперимента – исследовать зависимость частоты вращения ротора от момента сопротивления рабочей машины, определить адекватность предложенной модели реальному двигателю в установившихся режимах работы. Принимая результаты эксперимента за эталон, имеем следующие максимальные значения относительных погрешностей: 4,15% – 40 Гц, 3,20% – 50 Гц, 3,18% – 60 Гц.

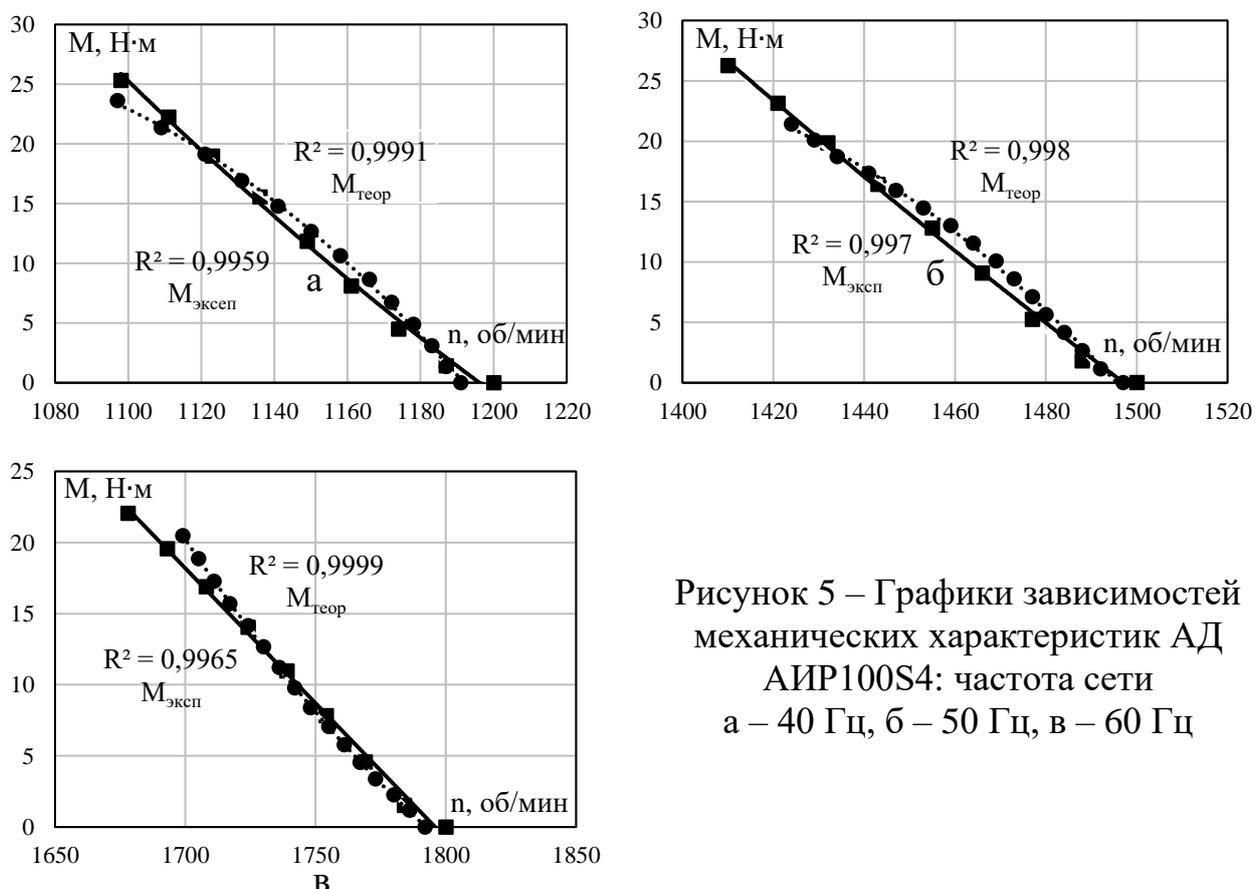
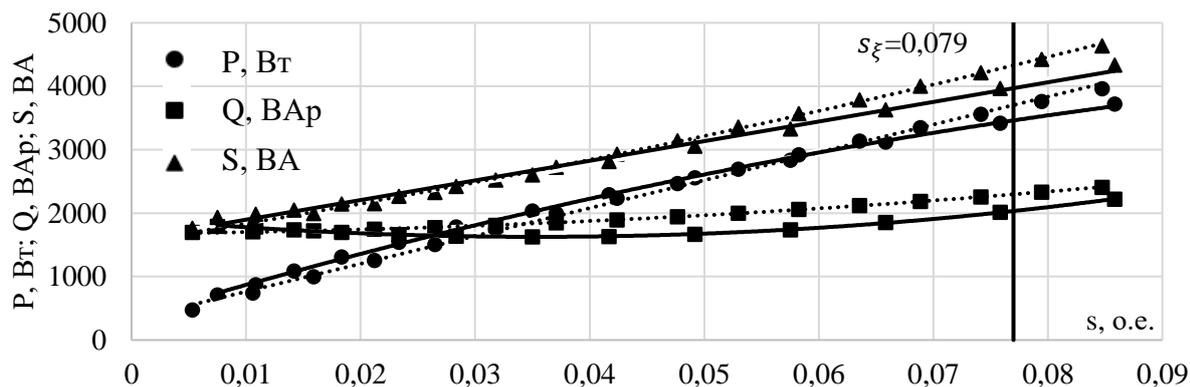


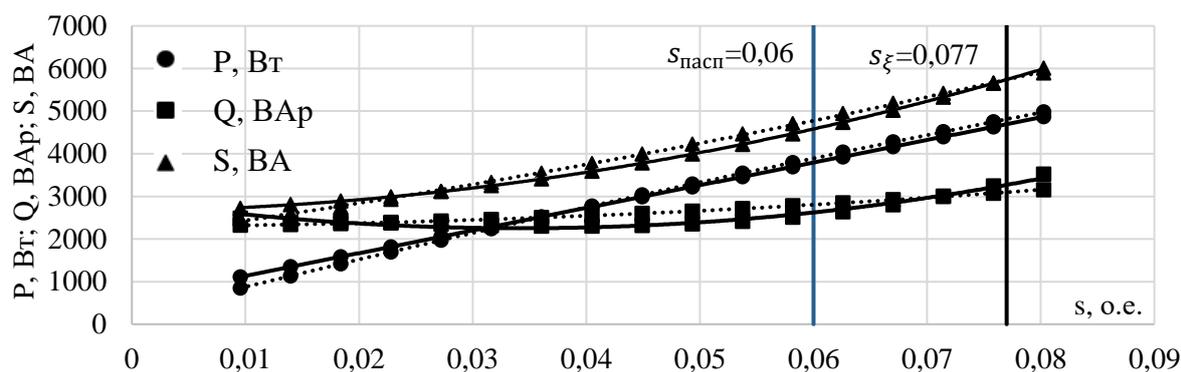
Рисунок 5 – Графики зависимостей механических характеристик АД АИР100S4: частота сети а – 40 Гц, б – 50 Гц, в – 60 Гц

Выполнено исследование зависимостей энергетических характеристик АД (активной, реактивной и полной мощности) при изменении частоты и напряжения питающей сети (рис. 6). Задача эксперимента – проанализировать изменение энергетических характеристик АД при регулировании частоты и

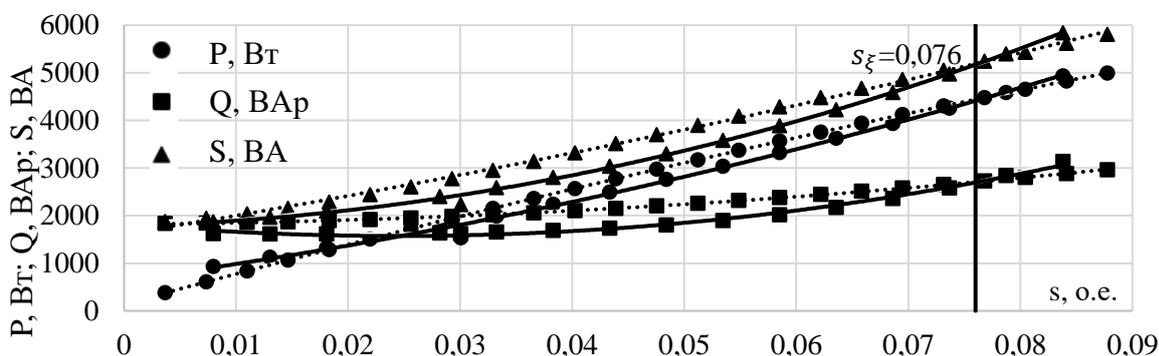
напряжения питающей сети.



а



б



в

Рисунок 6 – Графики зависимостей активной, реактивной и полной мощностей асинхронного двигателя АИР100S4 от скольжения: при частоте а – 40 Гц, б – 50 Гц, в – 60 Гц

Оптимальное частотно-токовое управление двигателем АИР100S4 в ходе эксперимента позволило получить энергетический КПД двигателя 52,4 % при скольжении $s_{\xi} = 0,077$ (рис. 6а). Согласно паспортным данным двигателя АИР100S4 в номинальном режиме энергетический КПД составляет 50,6 % при $s_{пасп} = 0,06$ (рис. 6а). Очевидно, что за счет оптимального частотно-токового управления удалось повысить энергетический КПД двигателя на 1,8 % при частоте сети 50 Гц. Таким образом, экспериментально подтверждены адекватность и высокая точность математической модели АД.

Вентиляторы не предоставляют доступ к вращающимся частям двигателя. Из-за этого возникают трудности при установке датчиков оборотов. Кроме того, использование таких датчиков может негативно сказаться на надежности системы управления, поскольку требует наличия дополнительных

компонентов, таких как сам датчик, крепежные элементы и соответствующие электронные преобразователи. В связи с этим предложен способ косвенного определения частоты вращения и электромагнитного момента АД. Выражения, полученные из уравнений (3) и формулы для расчета тока фазы $I = Uy$, представлены следующей системой уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega = \frac{3,795\pi f \left(\frac{0,12781Uf + 0,68382U -}{\sqrt{0,011236f^2U^2 + 0,83742fU^2 + 395,19IU - 24,7834U^2}} \right) + 30U\pi f}{30U} \\ M = \frac{137,214 (1 - s)U^3}{s((4,3298s + 2,2869/s)^2 + 0,015475f^2)} \cdot \left(3,795\pi f \left(\frac{0,12781Uf + 0,68382U + 30U\pi f -}{\sqrt{0,011236f^2U^2 + 0,83742fU^2 + 395,19IU - 24,7834U^2}} \right) \right) \end{array} \right. \quad (7)$$

Разработанный способ корректно определяет частоту вращения двигателя в диапазоне нагрузок от холостого хода до номинальной, при различной частоте основной гармоники напряжения, относительная погрешность измерения не превышает 0,55%.

В четвертой главе «Обоснование параметров и режимов работы сушильного агрегата» получена функциональная зависимость для определения параметров агента сушки пшеницы в кипящем слое от параметров поступающего на сушку зерна и параметров воздуха ($t_1, ^\circ\text{C}$):

$$t_1 = 370,9426 + 5936,568x_0 - 29,5463u_1 - 1,04241t_3 + 0,94621u_1^2 - 0,01027t_3^2 - 101,527x_0u_1 + 0,03473u_1t_3 - 73,07x_0t_3. \quad (8)$$

где t_1 – температура сушильного агента на входе аппарата, $^\circ\text{C}$; x_0 – влагосодержание поступающего воздуха, кг/кг; u_1 – начальная влажность зерна, %; t_3 – температура зерна на входе аппарата, $^\circ\text{C}$.

Разработана имитационная модель процесса сушки пшеницы в кипящем слое, позволяющая идентифицировать основные технологические параметры процесса сушки зерна в кипящем слое, исследовать энергетические характеристики и параметры электропривода. С целью установления адекватности предложенной модели проведены опыты в специально созданной экспериментальной сушильной установке, общий вид которой показан на рисунке 7.

На рисунке 8 представлены экспериментальные данные, характеризующие степень расширения кипящего слоя пшеницы. Кинетические кривые представлены на рисунке 9, по которым можно утверждать о хорошей сходимости модельных и экспериментальных данных изменения влажности в процессе сушки.

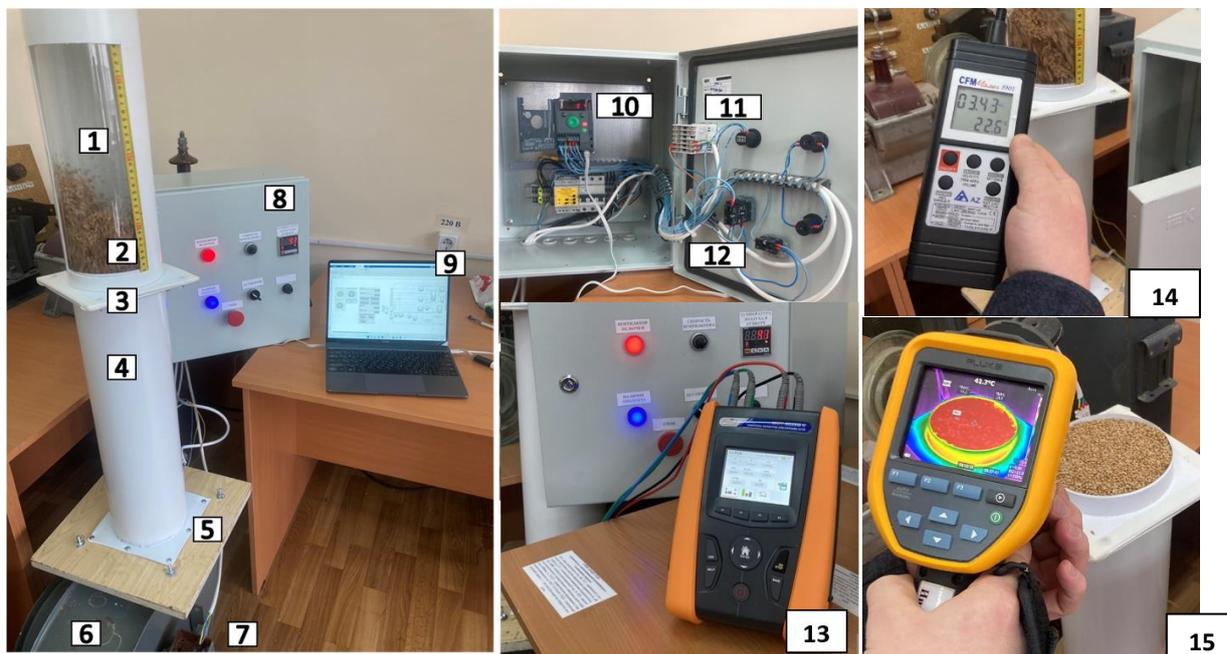
Существенным недостатком сушки дисперсных материалов в кипящем слое является неоднородность. Согласно теории протекания Ковенским Г.И., установлено, что вероятность частоты образования каналов в слое f_x , (Гц):

$$f_x = \frac{1}{\varepsilon(1 - \varepsilon)^{h/h_0}}.$$

где h/h_0 – относительное расширение.

Обработка экспериментальных данных позволила установить, что рабочая скорость, равная $4u_{кр2}$, где $u_{кр2}$ – скорость начала псевдооживления, м/с,

при относительном расширении 3,6, соответствует вихревому кипению с частотой образования каналов 10,9 Гц. Дальнейшее увеличение скорости ведет к началу интенсивного каналаобразования, так при $h_1 = 5h_0$ $f_{x1} = 19,9$ Гц, $h_2 = 6h_0$ $f_{x2} = 59,5$ Гц, что подтверждается проведенными экспериментальными исследованиями.



1 – сушильная камера; 2 – зерновой слой; 3 – газораспределительное устройство; 4 – термопреобразователь сопротивления; 5 – электрический ТЭН; 6 – вентилятор; 7 – двигатель асинхронный; 8 – шкаф управления; 9 – персональный компьютер; 10 – преобразователь частоты; 11 – измеритель температуры; 12 – регулятор температуры; 13 – измеритель параметров электрической сети; 14 – измерение скорости оживающего агента термоанемометром AZ8901; 15 – определение температуры зерна в процессе сушки тепловизором Fluke TiS45

Рисунок 7 – Экспериментальная установка

Для поддержания однородного псевдооживления необходимо учитывать снижение перепада давления в слое при уменьшении веса пшеницы в процессе сушки. Получена функциональная зависимость рабочей скорости от времени сушки (м/с):

$$u_p = 7,975u_{кр2} \sqrt[3]{1,215 + 2,748 \cdot 10^{-8}\tau^3 - 3,036 \cdot 10^{-5}\tau^2 + 1,214 \cdot 10^{-3}\tau}, \quad (9)$$

при граничных условиях:

$$\begin{cases} \frac{(d_0/d_2)^2}{1 + (d_0/d_2)^{3/2}} u_0 < u_p, \\ \frac{\nu_{ср}}{d_1 \cdot \rho_{ср}} \cdot \left(\frac{Ar}{18 + 0,575 \cdot \sqrt{Ar}} \right) \geq u_p, \end{cases}$$

где d_0 и u_0 размерные параметры; d_2 – наибольший эффективный диаметр зерновки, м; Ar – критерий Архимеда; $\nu_{ср}$ – вязкость агента сушки при средней температуре, м²/с; d_1 – меньший диаметр зерновки, м; $\rho_{ср}$ – плотность сушильного агента при средней температуре, кг/м³; τ – время сушки, мин.

Изменения рабочей скорости по выражению (9) позволяет поддерживать минимальную частоту образования каналов на уровне 10-15 Гц.

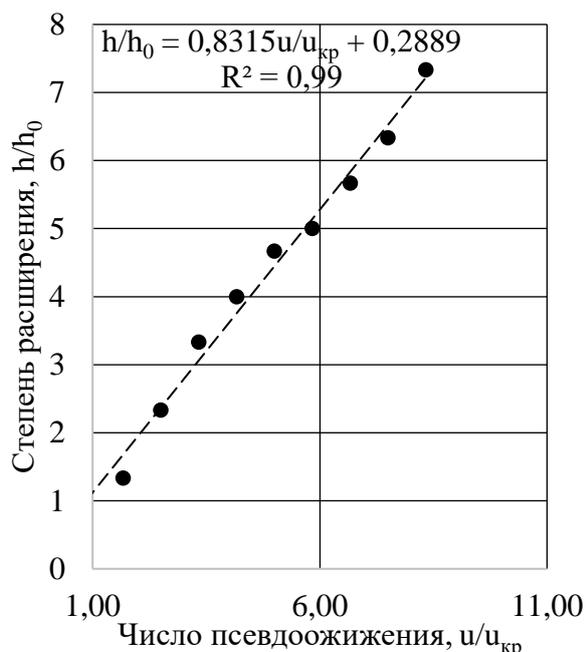


Рисунок 8 – Экспериментальная зависимость степени расширения кипящего слоя пшеницы от числа псевдоожигения

Для исследуемого АД АИР100S4 применение предложенного закона частотного управления (формула 6), позволило снизить реактивную мощность двигателя, в процессе сушки с 26,46 до 24,21 ВАр/кг или 9,1 %, и, как следствие, снизить активную мощность потерь в обмотках двигателя на 4,9%, за счет уменьшения полного тока.

По результатам испытаний: протокол испытаний № 001/J-12/07/23 от 12.07.2023 г., и № 002/A-12/07/23 от 12.07.2023 г., выданный испытательной лабораторией «Гранум», подтверждает расчет параметров сушки пшеницы на имитационной модели, относительная погрешность снижения влажности не превышает 3%.

Для оценки экономической эффективности внедрения послеуборочной обработки зернового материала выбран наиболее близкий существующий вариант подобной сушильной установки. Её модернизация на основе применения предложенных в работе технических средств приводит к увеличению стоимости оборудования на 39177 рублей, стоимости техническое обслуживания и амортизационных отчисления на 8619 рублей в год, по сравнению с базовым вариантом, за счёт установки дополнительного оборудования. Дополнительные капитальные вложения составляют 78354 рублей. Однако за счет снижения реактивной составляющей мощности АД, годовой экономический эффект от модернизации составляет свыше 36 тысяч рублей. Коэффициент эффективности капитальных вложений больше требуемой нормы доходности, $E_T = 0,1934 > ND = 0,1211$, что подчёркивает экономическую целесообразность предложенной модернизации. Срок окупаемости капитальных вложений составляет 3 года.

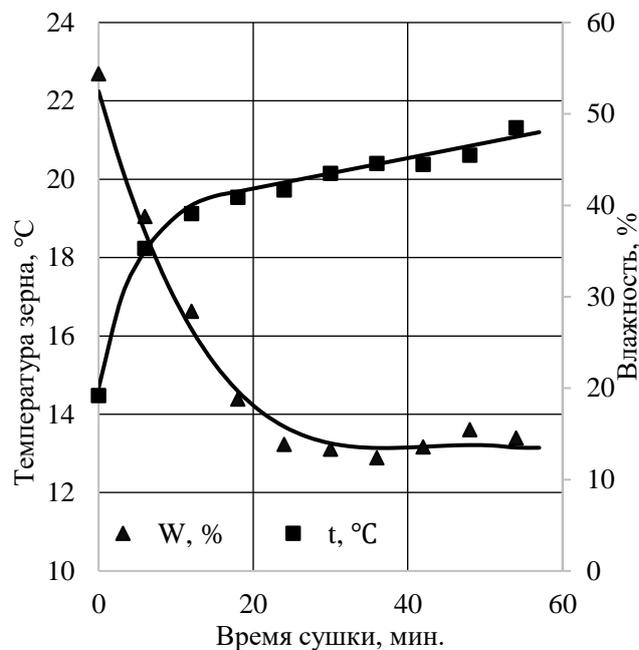


Рисунок 9 – Кривые сушки и нагрева зерен пшеницы при скорости воздуха 2,4 м/сек; температура агента сушки 50 °C; начальная влажность 22 %

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработанная математическая модель АД, позволяет определить активные и реактивные токи и мощности статора и ротора. Предложенная методика определения параметров схемы замещения АД, для использования в системе управления асинхронным электроприводом, позволяет определять индуктивные и активные проводимости схемы замещения.

2. Разработанные режимы работы асинхронного электропривода сушильной установки, определяющиеся целевыми функциями по заданному критерию эффективности, при этом реализация управления по минимуму потерь мощности в обмотках и сердечниках двигателя обеспечивает повышение энергетического КПД двигателя до 52,4 %, при частоте сети 50 Гц. Разработанный способ косвенного контроля электромагнитного момента и угловой скорости АД позволяет определить их в диапазоне нагрузок от холостого хода до номинальной с относительной погрешностью измерения не превышающей 0,55%.

3. На основании теоретических и экспериментальных исследований рабочего процесса сушки зерна в кипящем слое получены функциональные зависимости определения параметров агента сушки пшеницы, которые позволяют снизить интенсивность каналаобразования на 48,6 Гц и поддерживать минимальную частоту образования каналов оживающего агента на уровне 11 Гц.

4. Разработанная имитационная модель сушильной установки позволяет исследовать энергетические характеристики и параметры процесса сушки зерна, учитывая физико-механические свойства зернового вороха. Применение предложенного закона частотного управления, для исследуемого АД АИР100S4, позволило снизить удельную реактивную мощность двигателя, в процессе сушки с 26,46 до 24,21 ВАр/кг или 9,1 %, и, как следствие, снизить активную мощность потерь в обмотках двигателя на 4,9%, за счет уменьшения полного тока.

5. Годовой экономический эффект от предложенной системы управления асинхронным электроприводом при тепловой обработке зерна составляет свыше 36 тысяч рублей. Срок окупаемости капитальных вложений составит 3 года.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы. Результаты представленных научных исследований могут быть использованы при разработке, создании и модернизации зерносушильных комплексов. Дальнейшие исследования частотно-регулируемого асинхронного электропривода могут проводиться в направлении реализации системы управления реактивной мощностью, изучения рекуперации реактивной мощности и управления этими процессами. Уточнение режимных параметров сушильной установки при обработке всех возможных культур.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендуемых ВАК по группе научных специальностей диссертации:

1. **Васильев, Д.А.** Разработка математической модели асинхронной машины по М-образной схеме замещения в пакете Simulink / Д.А. Васильев, Е.В. Дресвянникова, Л.А. Пантелеева, В.А. Носков // Вестник НГИЭИ. - 2018. - № 4 (83). - С. 38-54.

2. **Васильев, Д.А.** Оценка энергетической эффективности асинхронного двигателя по М-образной схеме замещения / Д.А. Васильев, Л.А. Пантелеева, В.А. Носков // Международный технико-экономический журнал. - 2018. - № 1. - С. 34-40.

3. **Васильев, Д. А.** Энергоэффективное управление асинхронным электродвигателем / Д.А. Васильев, Л.А. Пантелеева, П.Н. Покоев, В.А. Носков // Вестник НГИЭИ. - 2019. - № 4 (95). - С. 100–115.

4. **Васильев, Д. А.** Энергоэффективное управление асинхронным электродвигателем / Д.А. Васильев, Л.А. Пантелеева // Естественные и технические науки. - 2020. - № 4 (142). - С. 143-147.

5. **Васильев, Д. А.** Исследование асинхронного электропривода с частотным регулированием / Д. А. Васильев, Л. А. Пантелеева // АгроЭкоИнфо. – 2021. – № 3(45).

6. **Васильев, Д. А.** Энергосберегающий режим работы асинхронного электропривода с частотным управлением / Д. А. Васильев, Л. А. Пантелеева // Сельский механизатор. – 2021. – № 7. – С. 19-21.

7. **Васильев, Д. А.** Разработка энергосберегающего режима работы асинхронного электропривода установок послеуборочной обработки зерна / Д. А. Васильев, Л. А. Пантелеева, Е. В. Дресвянникова, А. С. Корепанов // Вестник НГИЭИ. – 2022. – № 4(131). – С. 52-68.

8. **Васильев, Д. А.** Метод расчета активных и реактивных проводимостей схемы замещения асинхронного двигателя / Д. А. Васильев, Л. А. Пантелеева, И.В. Решетникова, Р.И. Гаврилов // Сельский механизатор. – 2024. – № 1. – С. 30-31.

Статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международной базе Scopus:

9. **Vasiliev, D.A.** Improving the efficiency of a variable frequency asynchronous electric drive / D.A. Vasiliev, L.A. Panteleeva, P.L. Lekomcev, K.V. Martynov, S.I. Kokonov, M.L. Shavkunov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science The proceedings of the conference AgroCON-2019. - 2019. - С. 012120.

10. **Vasilyev, D. A.** Energy-efficient variable frequency asynchronous electric drive / D. A. Vasilyev, R. I. Gavrilov, L. A. Panteleeva // Journal of Physics: Conference Series: International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2021), Novorossiysk, 15–16 июня 2021 года / IOP Publishing. – Novorossiysk: IOP PUBLISHING LTD, TEMPLE CIRCUS, TEMPLE WAY, BRISTOL, ENGLAND, BS1 6BE, 2021. – P. 012053. – DOI 10.1088/1742-6596/2061/1/012053. – EDN FZAPGT.

Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ:

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023664305 РФ. Программа «Программа расчета системы управления, обеспечивающей энергоэффективный режим работы асинхронного двигателя» / Л.А. Пантелеева, Д.А. Васильев. Зарегистрировано 03.07.2023.

12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023681025 РФ. Программа «Программа для моделирования режимов работы трехфазного асинхронного двигателя» / Л.А. Пантелеева, Д.А. Васильев. Зарегистрировано 09.10.2023.

Другие издания:

13. **Васильев, Д. А.** Оптимизации режима работы асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором / Д. А. Васильев, Л. А. Пантелеева, Е. И. Грачева // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2022. – Т. 24, № 6. – С. 92-101.

14. **Васильев, Д. А.** Теоретические предпосылки к оптимизации режимов работы асинхронного электропривода / Д. А. Васильев, Л. А. Пантелеева // Современные достижения селекции растений - производству: Материалы Национальной научно-практической конференции, Ижевск, 15 июля 2021 года. – Ижевск: Ижевская государственная сельскохозяйственная академия, 2021. – С. 34-44.

15. **Васильев, Д. А.** Анализ состояния зерносушильной техники в хозяйствах Удмуртской Республики, обоснование выбора технологического процесса сушки в кипящем слое / Д. А. Васильев, Л. А. Пантелеева // Развитие производства и роль агроинженерной науки в современном мире: Материалы Международной научно-практической конференции, Ижевск, 16–17 декабря 2021 года. – Ижевск: Ижевская государственная сельскохозяйственная академия, 2021. – С. 46-50.

16. **Васильев, Д.А.** Математическая модель потерь мощности в асинхронном двигателе по М-образной схеме замещения в пакете Simulink / Д.А. Васильев, Л.А. Пантелеева, В.А. Носков // Вестник ВИЭСХ. - 2018. - № 2 (31). - С. 53-56.

17. **Васильев, Д.А.** Способ снижения потребления реактивной мощности асинхронным двигателем / Д.А. Васильев, Л.А. Пантелеева, М.Л. Шавкунов // Инновации в сельском хозяйстве. - 2019. - № 3 (32). - С. 248-253.

18. **Васильев, Д.А.** Разработка алгоритма минимизации мощности потерь асинхронного электродвигателя и моделирование системы автоматизированного управления электроприводом / Д.А. Васильев, Л.А. Пантелеева // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. - 2018. - № 3 (56). - С. 50-65.

19. **Васильев, Д.А.** Оценка энергоэффективности асинхронного двигателя по М-образной схеме замещения в среде имитационного моделирования Matlab/Simulink / Д.А. Васильев, Л.А. Пантелеева, В.А. Носков // В сборнике: развитие энергосистем АПК: перспективные технологии. Материалы Международной научно-практической конференции Института агроинженерии. Под редакцией М. Ф. Юдина. - 2018. - С. 39-47.

20. **Васильев, Д.А.** Энергетические показатели асинхронного двигателя на основе М-образной схемы замещения / Д.А. Васильев // В сборнике: Инновационные технологии для реализации программы научно-технического развития сельского хозяйства. материалы Международной научно-практической конференции: в 3 томах. ФГБОУ ВО Ижевская государственная сельскохозяйственная академия. - 2018. - С. 12-16.

21. **Васильев, Д.А.** Моделирование преобразователя частоты в качестве источника питания асинхронного электродвигателя / Д.А. Васильев, Л.А. Пантелеева, В.А. Носков // В сборнике: Актуальные проблемы энергетики АПК Материалы IX международной научно-практической конференции. Под общ. ред. Трушкина В.А. - 2018. - С. 21-23.

22. **Васильев, Д.А.** Исследования асинхронной машины на основе М-

образной схемы замещения в математической системе Matlab с применением пакета Simulink / Д.А. Васильев, Л.А. Пантелеева, В.А. Носков, О.Г. Долговых // В сборнике: Инновационный потенциал сельскохозяйственной науки XXI века: вклад молодых ученых-исследователей. материалы Всероссийской научно-практической конференции: сборник статей. Министерство сельского хозяйства Российской Федерации, ФГБОУ ВО "Ижевская ГСХА". - 2017. - С. 187-190.

23. **Васильев, Д.А.** Исследование частотно-регулируемых асинхронных электроприводов в лабораторных условиях / Д.А. Васильев, Л.А. Пантелеева, В.А. Носков // В сборнике: Научно обоснованные технологии интенсификации сельскохозяйственного производства. Материалы Международной научно-практической конференции в 3-ех томах. Министерство сельского хозяйства Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Ижевская государственная сельскохозяйственная академия". - 2017. - С. 235-237.

24. **Васильев, Д.А.** Повышение энергосбережения при применении частотных преобразователей / Д.А. Васильев, Л.А. Пантелеева, В.А. Носков // В сборнике: Научно обоснованные технологии интенсификации сельскохозяйственного производства. Материалы Международной научно-практической конференции в 3-ех томах. Министерство сельского хозяйства Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Ижевская государственная сельскохозяйственная академия". - 2017. - С. 238-241.

ВАСИЛЬЕВ ДАНИИЛ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СУШКИ ЗЕРНА ЗА СЧЕТ
ОБОСНОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

4.3.2. Электротехнологии, электрооборудование и электроснабжение
агропромышленного комплекса

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать _____.
Формат 60x84 1/16. Усл. печ. л. 1,0 Заказ № ____
Тираж 100 экз.
ФГБОУ ВО Удмуртский ГАУ.
429069, Удмуртская Республика, г. Ижевск, ул. Студенческая, 11
Тел. 8(3412) 59-88-11, e-mail: info@udsau.ru