

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

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент

Пантелеева Лариса Анатольевна

Ижевск – 2024

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	6
1 СОСТОЯНИЕ НАУЧНОЙ ПРОБЛЕМЫ, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ .....	15
1.1 Современное состояние и пути совершенствования .....	15
послеуборочной обработки зерновых культур в Удмуртской Республике .....	15
1.2 Анализ способов послеуборочной обработки зернового материала .....	19
1.3 Современные тенденции применения частотно-регулируемого асинхронного электропривода при обработке зернового материала как одного из путей повышения его энергоэффективности .....	25
1.4 Теоретические предпосылки к оптимизации режимов работы регулируемого асинхронного двигателя .....	30
1.5 Цель и задачи исследования. Обоснование проблемы.....	34
Выводы по первой главе.....	35
2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ЧАСТОТНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ .....	37
2.1 Обоснование выбора схемы замещения асинхронного двигателя, выраженной через проводимости статора и ротора.....	37
2.2 Потери в асинхронном двигателе с частотным регулированием.....	46
2.3 Математическая модель асинхронного двигателя, выраженная через проводимости статора и ротора .....	51
2.4 Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя, выраженная через проводимости статора и ротора, по каталожным данным .....	63
2.5 Постановка задачи по снижению потребления электрической энергии асинхронным электроприводом, способы оценки эффективности работы асинхронного двигателя .....	77
2.6 Разработка частотного управления вентилятора системы послеуборочной обработки зерна .....	85

Выводы по второй главе .....	94
3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С ЧАСТОТНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ .....	96
3.1 Задачи экспериментальных исследований .....	96
3.2 Методика экспериментальных исследований .....	97
3.3 Разработка лабораторного стенда для испытаний асинхронного двигателя с возможностью частотного регулирования .....	100
3.4 Испытания асинхронного двигателя .....	102
3.5 Экспериментальные исследования энергосберегающего режима работы асинхронного двигателя с частотным управлением .....	110
3.6 Разработка способа контроля выходных переменных асинхронного двигателя в электроприводе .....	113
Выводы по третьей главе .....	116
4 ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ СУШИЛЬНОГО АГРЕГАТА .....	118
4.1 Определение условий существования кипящего слоя, рабочая скорость .....	118
4.2 Расчет сушки зерна в кипящем слое .....	124
4.3 Имитационная модель процесса сушки .....	133
4.4 Лабораторные исследования тепловой обработки зерна в кипящем слое .....	138
4.5 Сравнение энергетических показателей частотно-регулируемого асинхронного электропривода вентилятора .....	147
4.6 Технико-экономическое обоснование модернизации сушильной установки с кипящим слоем .....	153
Выводы по четвертой главе .....	159
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ .....	161
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	163
Приложения .....	181
Приложение А. Внедрение научных исследований в СПК «Свобода» Увинского района Удмуртской Республики .....	182

Приложение Б. Свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ .....	184
Приложение Б.1 – Программа расчета системы управления, обеспечивающей энергоэффективный режим работы асинхронного двигателя .....	184
Приложение Б.2 – Программа для моделирования режимов работы трехфазного асинхронного двигателя .....	185
Приложение В. Расчетные данные проводимостей фазы, коэффициента полезного действия, коэффициента мощности, энергетического КПД асинхронного двигателя АИР100S4 .....	186
Таблица В.1 – Расчетные данные проводимостей фазы, коэффициента полезного действия, коэффициента мощности, энергетического КПД асинхронного двигателя АИР100S4 в зависимости от скольжения ротора при частоте сети 40 Гц .....	186
Таблица В.2 – Расчетные данные проводимостей фазы, коэффициента полезного действия, коэффициента мощности, энергетического КПД асинхронного двигателя АИР100S4 в зависимости от скольжения ротора при частоте сети 50 Гц .....	187
Таблица В.3 – Расчетные данные проводимостей фазы, коэффициента полезного действия, коэффициента мощности, энергетического КПД асинхронного двигателя АИР100S4 в зависимости от скольжения ротора при частоте сети 60 Гц .....	188
Приложение Г. Расчетные значения проводимостей фазы двигателей серии АИР .....	189
Таблица Г.1 – Расчетные значения проводимостей фазы двигателя АИР80А4 ...	189
Таблица Г.2 – Расчетные значения проводимостей фазы двигателя АИР80В4 ...	190
Таблица Г.3 – Расчетные значения проводимостей фазы двигателя АИР90L4 ...	191
Таблица Г.4 – Расчетные значения проводимостей фазы двигателя АИР100S4..	192
Таблица Г.4 – Расчетные значения проводимостей фазы двигателя АИР100L4 .	193
Таблица Г.5 – Расчетные значения проводимостей фазы двигателя АИР112М4	194
Таблица Г.6 – Расчетные значения проводимостей фазы двигателя АИР132S4..	195

Таблица Г.7 – Расчетные значения проводимостей фазы двигателя АИР132М4	196
Приложение Д. Программа расчета частоты и амплитуды питающего напряжения на примере двигателя АИР100S4	197
Приложение Е. Данные по испытанию асинхронного двигателя АИР100S4, работающего от преобразователя частоты	200
Таблица Е.1 – Данные по испытанию асинхронного двигателя АИР100S4, работающего от преобразователя частоты при частоте $f=40$ Гц	200
Таблица Е.2 – Данные по испытанию асинхронного двигателя АИР100S4, работающего от преобразователя частоты при частоте $f=45$ Гц	202
Таблица Е.3 – Данные по испытанию асинхронного двигателя АИР100S4, работающего от преобразователя частоты при частоте $f=50$ Гц	204
Таблица Е.4 – Данные по испытанию асинхронного двигателя АИР100S4, работающего от преобразователя частоты при частоте $f=55$ Гц	206
Таблица Е.5 – Данные по испытанию асинхронного двигателя АИР100S4, работающего от преобразователя частоты при частоте $f=60$ Гц	208
Приложение Ж. Протоколы испытаний по теме исследования	210

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** 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 %. [114].

В сельскохозяйственном производстве используется различное зерносушильное оборудование, которое отличается разнообразными 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 [80]. 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 рациональному использованию ресурсов и снижению негативного влияния на окружающую среду.

Многие ученые занимались регулированием параметров электропривода. Момент нагрузки на валу идеализированного двигателя учитывается в законе оптимального соотношения между амплитудой и частотой напряжения питания, сформулированном М. П. Костенко - основоположнике теории частотного управления. Развитие теории частотного управления происходит на основе более полного учета свойств асинхронных двигателей (АД) посвящены работы А.А. Булгакова, И.Я. Браславского, А.Б. Виноградова, Ю.А. Сабинаина, А.С. Сандлера, Р.С. Сарбатов, В.Н. Полякова, С.М. Бакирова, В.А. Каргина [4, 13, 14, 15, 56, 59, 60, 69, 100, 105, 106] и других исследователей. Однако регулирование 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 остается недостаточно изученным.

В соответствии с планом научно-исследовательской работы Удмуртского ГАУ диссертационная работа была выполнена на тему «Повышение эффективности работы технологических энергоустановок в сельском хозяйстве Удмуртской Республики», рег. №11601151005, стратегией устойчивого развития сельских территорий Российской Федерации на период до 2030 года и энергетической стратегией России на период до 2035 года, федеральной целевой программой «Энергоэффективность и развитие энергетики» [96, 132].

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

Для достижения поставленной цели были поставлены и решены следующие **задачи:**

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.** Решение вышеперечисленных задач определило научную новизну выполненной работы, которая заключается в следующем:

1. Разработана математическая модель АД, 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 АД при варьировании частоты питающего напряжения.

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

3. Сформулирован основной принцип частотно-токового управления АД, отличающийся от известных тем, что в качестве показателя энергоэффективности используется значение максимального энергетического КПД АД, выраженный как отношение произведения активной проводимости цепи ротора и полной активной проводимости фазы к 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 и практическая значимость работы.** Теоретическая значимость 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 АД позволяет осуществлять идентификацию активных и реактивных составляющих токов и мощности в обмотках статора и ротора.

3. Разработана программа по поиску значений амплитуды и частоты питающего напряжения питания асинхронного двигателя, для получения максимального значения энергетического КПД.

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 и апробация 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 соответствия ГОСТ 9353-2016 «Пшеница. Технические условия» получены в испытательной лабораторией «Гранум» (Аттестат РОСС RU.31578.04ОЛН0.ИЛ31). Обеспечение достоверности полученных результатов осуществляется путем правильного и адекватного использования теоретических положений и методов в работе, а также подтверждается сравнением компьютерного моделирования с экспериментальными данными. Корректность полученных результатов и сделанных выводов согласуется с данными полученными другими исследователями по данной тематике.

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

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.

Основные положения работы представлялись и обсуждались на следующих конференциях:

- на всероссийской научно-практической конференции «Роль молодых ученых-инноваторов в решении задач по ускоренному импортозамещению сельскохозяйственной 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», посвященной 40-летию факультета энергетики и электрификации Ижевской ГСХА (Россия, Ижевск, 25 октября 2017 г.);

- на всероссийской научно-практической конференции «Инновационный потенциал сельскохозяйственной науки XXI века: вклад молодых учёных-исследователей» (Россия, Ижевск, 24-27 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», посвященной 75-летию Ижевской ГСХА (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», посвященная 70-летию заслуженного деятеля науки РФ, почетного работника высшего образования РФ, ректора ФГБОУ ВО «Ижевская ГСХА», доктора сельскохозяйственных наук, профессора

Любимова Александра Ивановича (Россия, Ижевск, 20 июля 2020 г.);

- на национальной научно-практической конференции «Современные достижения селекции растений – производству» (Россия, Ижевск, 15 июля 2021 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 «Инженерное обеспечение инновационного развития агропромышленного комплекса России», посвященной памяти кандидата технических наук, доцента Виталия Александровича Носкова (Россия, Ижевск, 20 декабря 2021 г.);

- на национальной научно-практической конференции молодых ученых с международным участием «Наука и молодежь: новые идеи и решения в АПК», посвященной Десятилетию науки и технологии и 80-летию Удмуртского ГАУ (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» 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, 1 по другой группе научных специальностей, две научные статьи – в изданиях, входящих в международную реферативную базу данных Scopus. По результатам исследований получено два свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

На заимствованные материалы и работы, выполненные в соавторстве, сделаны соответствующие ссылки.

**Личный вклад автора.** Результаты, представленные в диссертации и отражённые 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. Диссертация изложена на 211 страницах, на которых приведены 22 таблицы, 71 рисунок, 7 приложений.

Во введении подчеркнута актуальность рассматриваемой проблемы в рамках диссертационного исследования, сформулированы цели и задачи, подчеркнута их значимость и ценность для науки и практики, представлена структура работы в целом, приведена общая характеристика работы.

В первой главе рассмотрены условия функционирования объектов послеуборочной обработки зерна, дана характеристика состояния зерносушильной техники Удмуртской Республики. Рассмотрены современные тенденции применения частотно-регулируемого асинхронного электропривода при обработке зернового материала как одного из путей повышения его энергоэффективности. Определены теоретические предпосылки к оптимизации режимов работы регулируемого асинхронного двигателя. В завершении раздела формулируются основные научные и технические проблемы, определяются задачи исследования.

Во второй главе рассмотрена теория и практика асинхронных двигателей с частотным регулированием и методы их расчета с учетом современных возможностей. Представлены основные принципы, используемые при расчете асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Показана целесообразность развития теории асинхронных двигателей с учетом изменения частоты питания. Проведены

теоретические исследования, представлены схемы замещения асинхронного двигателя, обоснован переход к схеме замещения одной фазы, выраженной через проводимости статора и ротора. Разработана математическая модель асинхронного двигателя по предложенной схеме замещения. Разработан алгоритм определения параметров схемы замещения асинхронного двигателя, выраженной через проводимости статора и ротора, по каталожным данным. Обоснован способ оценки эффективности работы асинхронного двигателя по энергетическому коэффициенту полезного действия. Предложен способ частотного управления асинхронным двигателем.

В третьей главе представлены экспериментальные исследования энергосберегающих режимов работы асинхронного электродвигателя с частотным регулированием. Проведены экспериментальные исследования, которые подтверждают эффективность метода повышения энергетической эффективности асинхронного двигателя. Этот метод основан на перераспределении активных и реактивных составляющих токов в пределах номинального значения тока фазы. Разработаны алгоритм и способ косвенного контроля электромагнитного момента и угловой скорости асинхронного двигателя. Методы позволяют проводить контроль этих параметров высокой точностью и отличаются от известной своей простоты в реализации.

В четвертой главе было получено уравнение для определения параметров агента сушки пшеницы в кипящем слое. Для имитации процесса сушки зерна в кипящем слое разработана модель электропривода. С помощью разработанной модели определены энергетические характеристики и параметры процесса сушки зерна. Выполнены лабораторные исследования тепловой обработки зерна в кипящем слое. Представлена технико-экономическая оценка эффективности модернизации существующего комплекса послеуборочной тепловой обработки зернового материала путем применения разработанного закона частотного управления асинхронным электроприводом.

В заключении работы представлены основные результаты и общие выводы по диссертации. В приложениях приведены экспериментальные данные и их математическая обработка.

# 1 СОСТОЯНИЕ НАУЧНОЙ ПРОБЛЕМЫ, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

## 1.1 Современное состояние и пути совершенствования послеуборочной обработки зерновых культур в Удмуртской Республике

Природные условия позволяют успешно развиваться многоотраслевому сельскому хозяйству, производить достаточное количество продуктов питания и сырья для перерабатывающей промышленности. Следствием значительного изменения природных условий производство всех сельскохозяйственных культур носит неустойчивый характер по годам, с определенной цикличностью [1]. Сельское хозяйство республики специализируется на молочно-мясном животноводстве, свиноводстве и птицеводстве. Выращивают кормовые культуры, пшеницу, рожь, овес, ячмень, а также картофель. Развито льноводство. Успешно занимаются пчеловодством. Рисунок 1.1 [91] демонстрирует структуру посевной площади сельскохозяйственных культур в Удмуртской Республике в 2023 году.

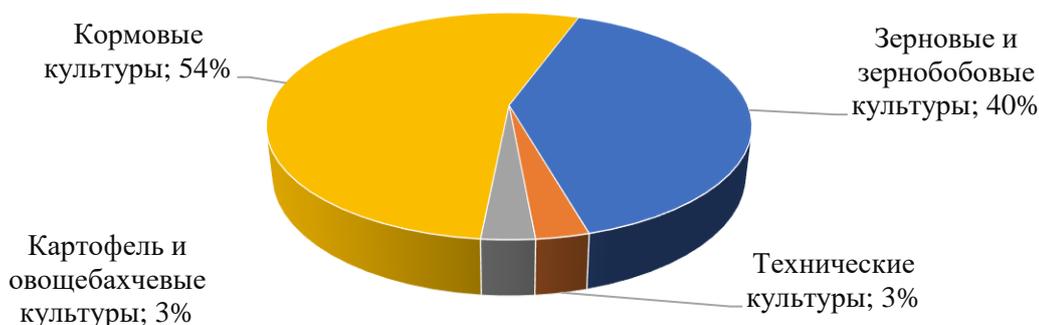


Рисунок 1.1 – Структура посевной площади сельскохозяйственных культур по Удмуртской Республике в 2023 году, % [91]

В 2022 году посевные площади в Удмуртии увеличились до 927 тыс. га, что на 12 тыс. га больше, чем в предыдущем году (рис. 1.2) [51]. Однако, по данным Всероссийской сельскохозяйственной микропереписи 2021 года [107], в целом по республике наблюдается тенденция к сокращению посевных площадей. За

последние 10 лет, с 2012 по 2022 год, площадь, выделенная под посевы, сократилась с 1062,4 до 927,3 тысяч гектар или на 15 % [51]. Это значительное уменьшение свидетельствует о трудностях, с которыми сталкивается сельское хозяйство Удмуртии. Это является тревожным сигналом и указывает на нестабильность в сельском хозяйстве региона. Причиной сокращения посевных площадей может быть отсутствие государственной поддержки на каждый гектар обрабатываемой земли, а также отмена субсидирования выращивания зерновых и трав. Эти меры существенно сказались на решениях фермеров и привели к уменьшению посевных площадей.

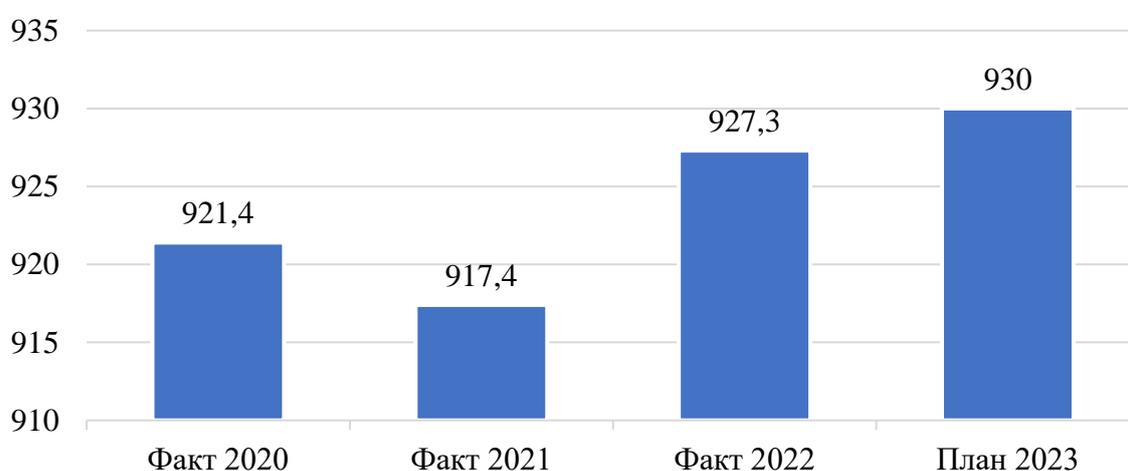


Рисунок 1.2 – Посевная площадь всех категорий хозяйства Удмуртской Республики, тыс. га [51]

Уборка зерновых культур на территории Удмуртской Республики производится двумя способами: прямое комбайнирование (однофазный способ) и раздельная уборка (двухфазный способ). Согласно многолетним исследованиям, проведенным в Удмуртском ГАУ и Удмуртском ГНИИСХ [119], наиболее предпочтительным является однофазный способ уборки, для которого характерными преимуществами является меньшая зависимость от погодных условий, уменьшение рисков и потерь зерна при уборке, высокие качественные показатели. Уборку зерновых культур при однофазном способе начинают в период восковой спелости при относительной влажности порядка 25 %.

Большое влияние на послеуборочную обработку зерна оказывают климатические условия, в частности повышенная влажность, так как большая часть осадков от среднегодового количества приходится именно на этот период. В результате этого поступающий с полей зерновой ворох при нахождении на площадках временного хранения может повысить влажность до 30 % [98, 6], что вызывает заплесневение, самонагревание, связанное с дыханием зерна высокой влажности, повышает энергозатраты на его обработку. Для успешной послеуборочной обработки зерна необходимо применять современные технологии и методы, которые позволяют минимизировать негативные влияния климата и обеспечивают сохранность и качество зерна на протяжении всего хранения.

Наличие соответствующей материально-технической базы является необходимым условием для качественного выполнения всех технологических операций по послеуборочной обработке зерна. Важно учесть, что качество семенного и фуражного зерна непосредственно зависит от состояния зерноочистительной и сушильной техники.

Как показал анализ сроков и способов уборки зерновых культур, для Удмуртской Республики наиболее эффективна однофазная уборка зерновых. Влажность зерна, поступающего от комбайнов во время такого способа уборки, зачастую выше. Для предотвращения самонагрева, развития болезней и снижения посевных и товарных качеств зерна необходимо своевременно очищать и просушивать его до оптимальной влажности. В свежемолоченном зерне содержатся сырые семена и части стеблей сорняков в качестве примесей, что приводит к дополнительному увлажнению зерна из-за наличия влаги в этих сырых примесях. Важно учитывать вид и назначение зерна. В зависимости от этих факторов технология послеуборочной обработки может быть значительно изменена. Если зерно имеет повышенную влажность, его обработку следует проводить немедленно после уборки, чтобы не замедлять работу комбайнов и сохранить высокое качество зерна.

Агропромышленный комплекс Удмуртской Республики продолжает демонстрировать стабильный рост и улучшение производительности труда. Однако, несмотря на это, сектор сталкивается с серьезной проблемой нехватки средств для

обновления своего оборудования и основных производственных фондов. Это влияет на эффективность работы сельскохозяйственных предприятий, которые испытывают трудности в обеспечении сельскохозяйственной техникой (табл. 1.1) [79].

Таблица 1.1 – Сведения о наличии и готовности сельскохозяйственной техники на 21 июня 2023 года [79]

№ п/п	Территории, район	Зерноуборочные комбайны			Зерноочистительные сушильные комплексы		
		Наличие	Исправные	% готовности	Наличие	Исправные	% готовности
1	Глазовский	28	25	89	18	15	83
2	Завьяловский	34	24	71	9	2	22
3	Игринский	27	24	89	14	11	79
4	Красногорский	16	14	88	16	11	69
5	Селтинский	33	20	61	9	3	33
6	Шарканский	51	51	100	28	22	79
7	Юкаменский	35	29	83	16	11	69
8	Якшур-Бодьинский	12	8	67	4	3	75
9	Ярский	13	8	62	8	8	100
	Итого	813	735	90	311	267	86
	Итого за 2023 год	789	700	89	344	305	89

Обеспеченность предприятий сельскохозяйственной техникой в Удмуртской Республике (табл. 1.1) [79] показывает, что многие предприятия в секторе АПК испытывают недостаток сельскохозяйственной техники, что мешает им эффективно выполнять свои задачи. Нехватка оборудования оказывает отрицательное влияние на производительность труда и рентабельность сельскохозяйственных предприятий. Это создает препятствия для дальнейшего развития агропромышленного

комплекса в регионе. Сокращение резервов повышения эффективности сельскохозяйственного производства в ряде районов Удмуртской Республики наблюдается даже при высоких средних показателях готовности сельскохозяйственной техники, которые не превышают 90 %, согласно таблице 1.1.

Условия функционирования объектов послеуборочной обработки зерна в Удмуртской Республике характеризуются коротким периодом уборки и повышенными значениями влажности, достигающей 30 %. Представленные характеристики являются основными причинами снижения производительности комплексов и повышения затрат на переработку зернового материала.

## 1.2 Анализ способов послеуборочной обработки зернового материала

В сельскохозяйственной практике наиболее распространенным методом сушки зерна и кормовых культур является конвективный способ, который основан на различных технических приемах и признаках. Классификация конвективных сушилок основана на принципе организации состояния слоя материала, от которого в значительной степени зависят тепло- и влагообменные показатели процесса сушки, рисунок 1.3.

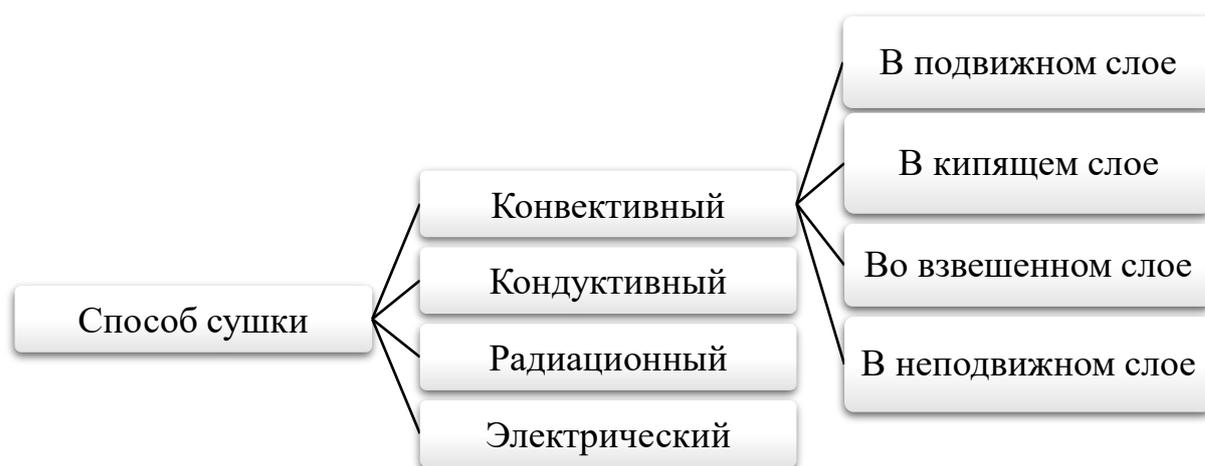


Рисунок 1.3 - Классификация конвективных сушилок по состоянию высушиваемого зернового слоя

Сушка в подвижном слое является широко распространенным методом

сушки, использующимся в барабанных и вибрационных сушилках. Этот тип установок отличается высокой скоростью сушки и непрерывным процессом. Благодаря непрерывному действию сушилок данного типа, процесс сушки становится более эффективным и экономичным.

Барабанные сушилки обладают особенностью в виде специально установленного наклонного барабана, который позволяет зерну активно перемещаться и эффективно воздействовать на него сушильным агентом, направляя его к месту выгрузки. Такой механизм обеспечивает равномерное и быстрое высушивание зерна. Барабанные сушилки обладают рядом преимуществ, среди которых можно выделить температуру сушильного агента, достигающую 250 °С, что позволяет обеспечивать высокую производительность и эффективно испарять влагу из зерна за один проход и снижать влажность до 8 %. Это обеспечивает высокую производительность, которая позволяет удалить до 40 кг влаги с 1 м<sup>3</sup> объема барабана за час, а удельный расход энергии не превышает 7 МДж энергии на 1 кг испаренной влаги.

Барабанные сушилки имеют несколько общих недостатков. Во-первых, существует риск повреждения семенного материала в процессе сушки, что может привести к потере до 13% [50]. Во-вторых, жесткие режимы сушки не позволяют сохранить целостность оболочки зерна. Среднее время, нахождения материала в сушильном барабане, составляет 15-20 минут [82], что недостаточно для полного удаления влаги из недозревших зерен. В результате, эти недозревшие зерна попадают в основную семенную фракцию, что делает невозможным получение качественного семенного материала.

В вибрационных сушилках материал перемещается с верхнего решета на нижнее благодаря их наклону и колебательным движениям, сушильный агент продувает сушимую массу снизу [104].

Недостатками вибрационных сушилок являются несколько факторов. Во-первых, зерно проходит через сушильную камеру несколько раз, что может привести к повреждению семян. Во-вторых, колебательные движения решет требуют более прочной конструкции и могут снизить надежность работы сушилки. Важно отметить, что вибрационные сушилки не могут использоваться для получения

высококачественных семян из вороха зерновых, кормовых, технических и других культур с повышенной влажностью.

Сушка в кипящем слое осуществляется путем перемещения сушильного агента со скоростью, равной средней скорости витания частиц зерновой массы.

В псевдооживленном состоянии слой материала из сушилки находится под низким давлением, что придает ему свойства жидкости. Существуют два типа сушилок, в которых можно проводить сушку материала в кипящем слое: аэрофонтанные сушилки и сушилки с псевдооживленным состоянием частиц материала. Характерными параметрами этих сушилок является высокая температура сушильного агента, достигающая  $260^{\circ}\text{C}$ , при этом расход тепла составляет порядка 12,56 МДж на 1 кг испаренной влаги.

Сушилки в кипящем слое обладают рядом преимуществ [103]. Они обеспечивают высокую равномерность нагрева и сушки семян, а также интенсивный тепломассообмен. Кроме того, они компактны и имеют низкую металлоемкость, что способствует повышению технико-экономических показателей. Однако у сушилок в кипящем слое есть свои недостатки, такие как высокая скорость сушильного агента в сочетании с высокой температурой может привести к перегреву зерна, возможно вынос непросушенных легких частиц в циклон, что приводит к потерям [67].

Сушка во взвешенном слое заключается в использовании специализированных сушилок, которые создают условия, при которых частицы материала поднимаются и поддерживаются в воздухе за счёт интенсивного потока сушильного агента. Отличительной чертой таких сушилок является то, что скорость потока сушильного агента не просто высока, но и значительно превосходит скорость витания.

Существуют определённые параметры, которые регулируют эффективность процесса сушки в данных устройствах. Температура сушильного агента может достигать до  $275^{\circ}\text{C}$ , что способствует более быстрому испарению влаги. Кроме того, энергетическая эффективность также играет ключевую роль, и расход тепловой энергии может составлять до 6,495 МДж на каждый килограмм испарённой влаги, что указывает на высокую производительность процесса [103].

Важно отметить, что сушка во взвешенном слое предпочтительна для определённых типов материалов, таких как зерновые, фармацевтические субстанции или химические порошки, где равномерная сушка и предотвращение агломерации важны для поддержания качества конечного продукта.

Сушка в неподвижном слое. Сушка в неподвижном слое характеризуется медленным движением сушильного агента через статичную массу материала. С этим способом связана серьёзная оговорка: эффективность передачи тепла не является высокой, что свидетельствует о среднем значении теплового КПД таких систем. Определяющими для сушилок такого типа являются ключевые операционные параметры. Температура сушильного агента, используемого в процессе, обычно поддерживается на уровне не выше 40°C. Это предохраняет материал от повреждения в результате перегрева, скорость снижения влажности составляет от 0,5 до 1,5% в час, что указывает на мягкие условия высушивания и предотвращает потерю качества обработанного материала [7, 93].

С точки зрения энергоэффективности, сушилки с неподвижным слоем также показывают приемлемые характеристики. Расход тепловой энергии для испарения каждого килограмма влаги варьируется от 8,39 до 20,94 МДж [103].

Карусельные сушилки с неподвижным слоем сушки считаются относительно эффективными. Они широко используются для сушки семенного урожая зерновых, кормовых и технических культур [87, 88]. Рабочий процесс сушилок основан на противотоке: материал загружается сверху в сушильную камеру, по мере высыхания материала его выгружают снизу. Сушильный агент движется снизу вверх, постепенно нагревая материал и испаряя из него влагу. На сегодняшний день все известные карусельные сушилки имеют несколько недостатков. Во-первых, они не обеспечивают равномерное распределение сушильного агента по всей площади сушильной камеры. Во-вторых, отсутствует возможность технологической регулировки скорости движения сушильного агента по материалу сушки. Также отсутствует контроль влажности отработавшего сушильного агента, карусельные сушилки не обеспечивают одинаковую температуру внутренних и наружных слоев материала сушки, что приводит к дополнительным затратам энергии на

перемещение влаги. Сушилки такого типа могут повредить семенной материал, травмирование может достигать 13% [50].

Сушилки с ленточными конвейерами широко применяются для сушки различных сельскохозяйственных культур, таких как зерно, кормовые культуры, травы, льносолома, лекарственные и пряные растения, хмель, овощные листья, а также измельченные фрукты и овощи [2, 74, 88]. У ленточных конвейерных сушилок есть несколько недостатков. Во-первых, они не обеспечивают равномерное распределение сушильного агента по всей площади ленты. Во-вторых, отсутствуют технологические регулировки для корректировки скорости движения сушильного агента по материалу на каждой ленте, не осуществляется контроль влажности отработанного сушильного агента на выходе, что мешает достижению оптимального и экономически обоснованного значения. Еще одна проблема заключается в том, что не обеспечивается одинаковая температура внутренних и наружных слоев материала сушки, что приводит к дополнительным затратам энергии для перемещения влаги к поверхности.

Существует большое разнообразие конструкций напольных сушилок, включая открытые и камерные, лотковые, ящичные и контейнерные. Наиболее качественными, простыми в использовании и надежными являются напольные сушилки с аэрожелобами [7, 50, 83, 88].

Применение напольных сушилок с аэрожелобами в промышленной и сельскохозяйственной сферах требует глубокого понимания их конструктивных особенностей и рабочих характеристик. И хотя такие устройства широко используются из-за их производительности, важно осознавать ограничения, с которыми можно столкнуться в процессе эксплуатации. Среди ключевых недостатков – отсутствие точного контроля влажности воздуха, выходящего после цикла сушки. Это приводит к дилемме: с одной стороны, нужно эффективно использовать ресурсы и минимизировать издержки, а с другой – обеспечить необходимое качество продукции, что происходит не всегда.

Дополнительно, при эксплуатации таких сушилок, сталкиваются с проблемой неравномерного распределения температуры по толщине материала.

Внутренние слои часто сохраняют больше влаги, когда как наружные пересушиваются. Эта разница вызывает потребность в увеличении энергозатрат на выравнивание влажностного баланса, что неизбежно ведёт к увеличению операционных расходов предприятия. Тем не менее, эти факторы можно частично компенсировать с помощью современных технологий управления процессами сушки.

Однако, самым заметным недостатком может быть процедура охлаждения и последующего изъятия готовой продукции из сушилки. Требуется приостановить работу топочных установок, что предполагает временный простой оборудования. Затем необходимо включение вентиляционных механизмов для обдува сухого материала окружающим воздухом, что также требует времени и ресурсов. Оптимизация этого процесса может стать направлением для усовершенствования традиционных методов сушки.

В завершение, несмотря на перечисленные трудности, потенциальные возможности для совершенствования напольных сушилок с аэрожелобами существуют. Разработка инновационных решений, направленных на точный контроль влажности и равномерное распределение температуры, а также улучшение механизмов охлаждения, может значительно повысить эффективность использования таких сушилок, сократить потребление энергии и снизить экологический след процесса сушки.

В современной промышленности практически каждый процесс стремятся максимально автоматизировать для повышения эффективности и снижения человеческого фактора. Одним из важных этапов в обработке материалов является их сушка, которая может разительно улучшиться благодаря внедрению продвинутых систем управления. В контексте обсуждаемой сушилки следует подчеркнуть, что несмотря на наличие определённого уровня автоматизации, зафиксированным благодаря элементам автоматики, система все еще далека от идеала. Устройство, к примеру, не обеспечивает автоматическое регулирование, адаптирующееся к вариациям влажности обрабатываемого субстрата.

Такие недостатки, как отсутствие автоматизированной настройки, сильно замедляют процесс адаптации к меняющимся внешним условиям и требуют

вмешательства оператора, что возлагает на него дополнительную ответственность и увеличивает возможность ошибок. Регулярный мониторинг влажности сушильного материала также не ведётся, это приводит к необходимости ручного контроля, что неэффективно и устарело по современным меркам.

Решение этих проблем могло бы заключаться в интеграции более сложных алгоритмов автоматизации, включая датчики влажности и программное обеспечение, способное оперативно анализировать данные и корректировать процесс сушки в соответствии с ними. Такая модернизация приведёт к значительному повышению эффективности процесса, обеспечив высокое качество обработки материалов и оптимизацию трудозатрат. В заключение, хотя на данный момент сушилка обладает базовыми элементами автоматизации, её потенциал остаётся нераскрытым без введения полноценной автоматизированной системы, способной динамично реагировать на изменения во влажности сырья.

Обобщая анализ различных методов сушки, мы можем сделать следующие выводы. Самым распространённым способом подводом тепла к материалу сушки зерна является конвективный. Основные затраты энергии при этом процессе связаны с созданием и поддержанием определенных параметров (температура, влажность, скорость движения) агента сушки на входе и выходе из сушильной камеры.

### **1.3 Современные тенденции применения частотно-регулируемого асинхронного электропривода при обработке зернового материала как одного из путей повышения его энергоэффективности**

Сушка зерна является энергоёмким процессом. Стоимость топлива или теплоносителя является важным экономическим аргументом при выборе способа сушки. Сравнительная стоимость испарения 1 кг влаги при использовании различных видов топлива или теплоносителя приведена в таблице 1.2 [80]. Самым дешёвым способом сушки является сжигание природного газа и смешивание полученных дымовых газов с воздухом. Самый дорогой способ сушки происходит при нагреве воздуха в электрокалорифере. Однако не все районы Удмуртской

Республики газифицированы, поэтому наряду с газовыми горелками и топками используются мазутные горелки, а в некоторых случаях угольные котлы.

Таблица 1.2 – Сравнительная стоимость испарения 1 кг влаги при использовании различных видов топлива или теплоносителя [80]

Вид топлива (теплоносителя)	Расход топлива на испарение 1 кг влаги	Стоимость испарения 1 кг влаги, руб./кг
Природный газ	0,158 нм <sup>3</sup> /кг	0,96
Дизельное топливо	0,124 кг/кг	4,77
Греющий пар	2,5 кг/кг	1,44
Электрическая энергия	1,52 кВт час/кг	7,3

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.

Регулированием параметров электропривода занимались многие ученые. Основоположителем 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 все 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 и других исследователей [114, 4, 13, 14, 15, 56, 60, 69, 100, 105, 106]. Однако регулирование 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 остается не изученным.

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.

На рисунке 1.4 представлена схема электропривода с частотным регулированием [123]. Электропривод состоит из следующих основных компонентов: асинхронного двигателя, преобразователя частоты, выпрямителя, трехфазного импульсного инвертора, датчиков тока и напряжения, входного и выходного дросселя, датчика скорости. Датчик скорости используется для регулирования скорости в системе управления электроприводом. Кроме того, в электроприводе присутствуют средства защиты. Некоторые элементы защиты включены в преобразователь частоты для обеспечения защиты выпрямителя и инвертора. Плавкие предохранители и автоматические выключатели являются внешними компонентами.

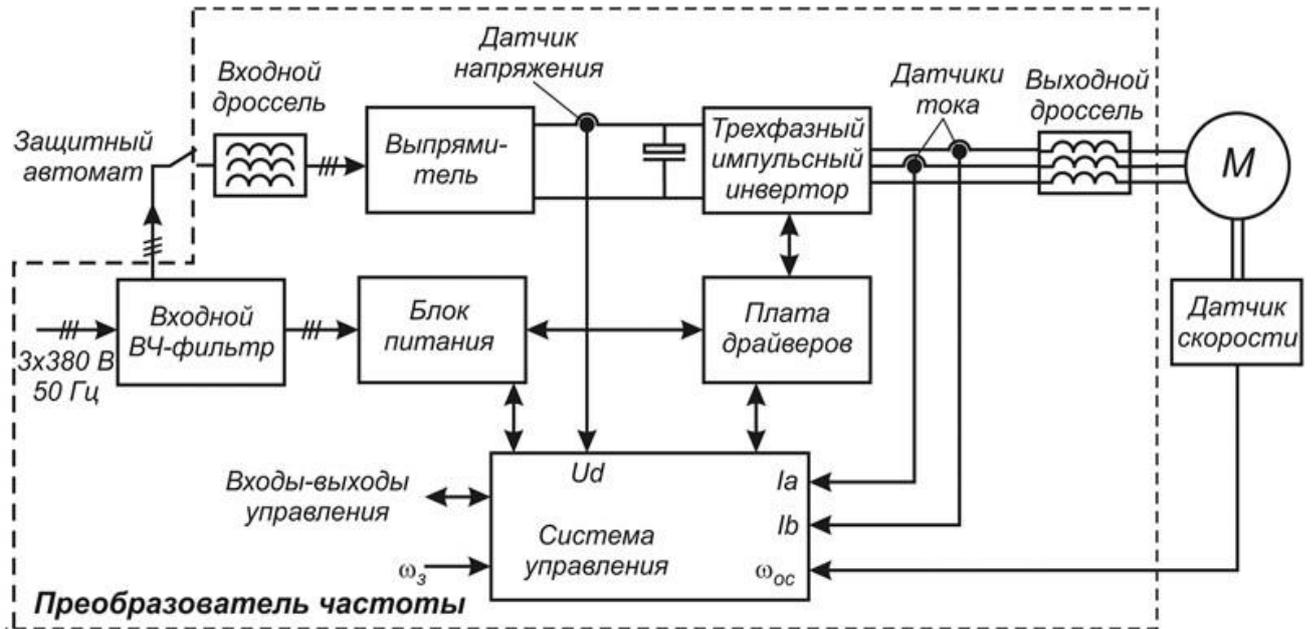


Рисунок 1.4 – Структурная схема асинхронного двигателя с частотным регулированием [123]

Управление скоростью асинхронного электропривода возможно благодаря использованию частотного преобразователя, который позволяет изменять амплитуду и частоту питающего напряжения, поступающего на статорные обмотки. Преобразование постоянного тока в трехфазное переменное напряжение с заданной частотой и амплитудой осуществляется с помощью инвертора, состоящего из IGBT-транзисторов. Управление электроприводом происходит через плату драйверов.

Регулирование скорости вращения ротора обеспечивается изменением частоты питающего напряжения, согласно выражению ( $\omega$ , рад/с):

$$\omega = \frac{\pi \cdot f}{p}, \quad (1.1)$$

где  $f$  – частота сети, Гц;

$p$  – количество пар полюсов в асинхронном электродвигателе.

При постоянной частоте величина максимального момента на валу двигателя определяется амплитудой питающего напряжения ( $M$ , Н·м):

$$M = \frac{U \cdot I}{\omega}, \quad (1.2)$$

где  $U$  – номинальное фазное напряжение, В;

$I$  – номинальный ток двигателя, А.

Регулирование частоты питания асинхронного двигателя позволяет обеспечить плавный разгон и торможение двигателя, управлять интенсивностью разгона и торможения, обеспечивать более точное выполнение технологического процесса. Использование плавного пуска асинхронного двигателя помогает избежать резких механических нагрузок и значительных скачков пускового тока, который может превышать номинальное значение в 5-7 раз [13]. Это позволяет увеличить срок службы двигателя и приводного механизма, а также улучшает их общую надежность, повышая межремонтный цикл.

Существуют два основных типа преобразователей частоты: те, которые имеют прямую связь с питающей сетью, и те, которые используют промежуточное звено постоянного тока [72, 120, 121]. Самые часто используемые преобразователи частоты на постоянном токе, основанные на инверторах напряжения [89], позволяющие генерировать частоты в любых диапазонах – как пониженные, так и повышенные. Для центробежных насосов и вентиляторов снижение скорости электропривода даже на небольшое значение может привести к значительному уменьшению потребляемой мощности, поскольку механическая характеристика описывается квадратичной зависимостью. Именно поэтому использование управляемого электропривода является наиболее эффективным для электроприводов с вентиляторными характеристиками нагрузок [13, 71].

Важно отметить недостатки использования преобразователей частоты для управления асинхронными электродвигателями, в частности влияние на энергетические характеристики. При эксплуатации асинхронных двигателей с преобразователями частоты коэффициент полезного действия снижается на 2-3%, а мощность – на 5 %. Также необходимо учесть дополнительные потери, вызванные искажением формы питающего напряжения, что приводит к дополнительному нагреву обмоток асинхронного двигателя и, как следствие, снижению коэффициента полезного действия [66, 71, 124].

## 1.4 Теоретические предпосылки к оптимизации режимов работы регулируемого асинхронного двигателя

Определение соотношения между амплитудой и частотой питающего напряжения является важной задачей при разработке закона частотного управления асинхронным электроприводом. Это соотношение играет ключевую роль в обеспечении оптимальных показателей экономической эффективности технологического процесса.

Монографии [14, 15, 60, 90, 100, 105, 106] содержат основные результаты исследований в области частотного управления асинхронным электроприводом, которые были проведены М.П. Костенко, А.А. Булгаковым, И.Я. Браславским, А.Б. Виноградовым, Ю.А. Сабининым, А.С. Сандлером, Р.С. Сарбатовым и В. Н. Поляковым. Эти исследователи расширили наши знания, представив законы, которые описывают соотношение между амплитудой и частотой питающего напряжения для идеализированного двигателя, принимая во внимание влияние момента нагрузки.

Характерной особенностью работ по изучению частотно регулируемого асинхронного электропривода – это стремление исследователей обеспечить приемлемое качество статических характеристик двигателя путем регулирования амплитуды напряжения в функции частоты и момента нагрузки приводного механизма [133, 134]. На основе этих исследований широкое распространение получили системы управления, основанные на непосредственной реализации законов регулирования напряжения в функции момента нагрузки  $U_1 = U(f_1, M)$  или частоты  $U_1 = U_1(f_1)$ . На практике наибольшее распространение получили системы управления, реализующие пропорциональный закон управления вида  $U_1/f_1 = const$ .

В теории частотного управления широкую популярность получили идеи о стабилизации магнитного состояния двигателя с помощью компенсации падений напряжения при изменении частоты и нагрузки. Прежде всего этот процесс осуществляется на активном сопротивлении статора и других элементах его схемы замещения [13, 42]. Это становится возможным благодаря различным законам

управления, таким, как  $U_1 = U(f_1, M)$  и их модификации.

Для иллюстрации основных принципов регулирования напряжения с учетом нагрузки рассмотрим схему замещения асинхронного двигателя при переменной частоте (рис. 1.5) [128].

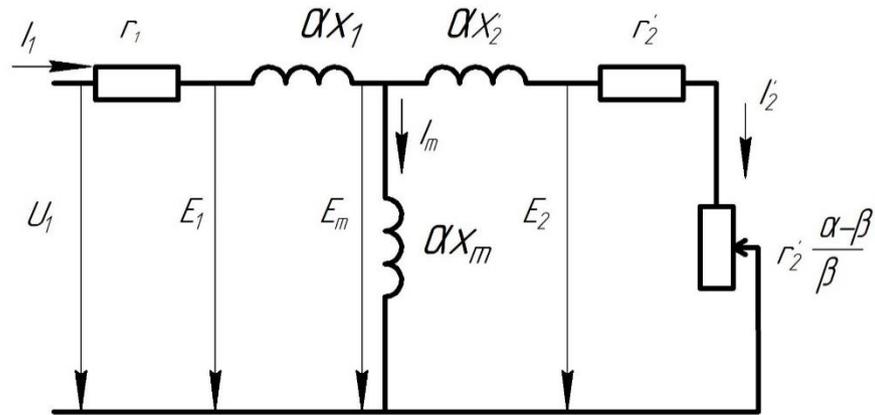


Рисунок 1.5 – Схема замещения АД при  $\alpha = f_1/f_{1ном}$  [128]

Для поддержания стабильного потокосцепления в обмотке статора при изменении нагрузки необходимо регулировать амплитуду напряжения таким образом, чтобы компенсировать падение напряжения на активном сопротивлении обмотки статора, обеспечивая постоянное соотношение  $E_1/f_1$ . Это позволяет расширить диапазон регулирования скорости двигателя при постоянных значениях критического момента и абсолютного скольжения, не зависящих от частоты. Важно учесть, что потокосцепления в обмотках статора и ротора с главным магнитным потоком зависят от момента нагрузки из-за влияния сопротивлений рассеяния  $\alpha x_1$  и  $\alpha x_2$ .

Компенсация снижения напряжения на компонентах  $r_1$  и  $\alpha x_1$  в соответствии с условием  $E_m/f_1 = const$  обеспечивает стабильность основного магнитного потока. В этом случае критические значения момента и скольжения двигателя становятся еще более высокими и остаются неизменными при изменении частоты. Полные потокосцепления обмоток статора и ротора при этом зависят от момента нагрузки [108].

Реализация рассмотренных законов управления возможна на основе принципов автоматического регулирования как по отклонению, так и по возмущению. Первый принцип иллюстрируется блок-схемой (рис. 1.6) [129-131]. Устройство

управления (УУ) формирует командные сигналы  $f_1^*$  и  $U_1^*$ , линейно зависящие от общего сигнала задания. Измерение фактических величин ЭДС ( $E_1$ ,  $E_m$  либо  $E_2$ ) осуществляется датчиком Д на основе информации о текущих значениях напряжения и тока статора. Сигнал управления  $U_1^*$  формируется регулятором ЭДС ( $p$ ) в функции отклонения фактических значений ЭДС от заданных. Такая система позволяет реализовать любой из описанных законов управления путем перестройки датчика в режим измерения соответствующей ЭДС. Практические структуры дополняются корректирующими устройствами для обеспечения устойчивости САУ на требуемое качество переходных процессов.

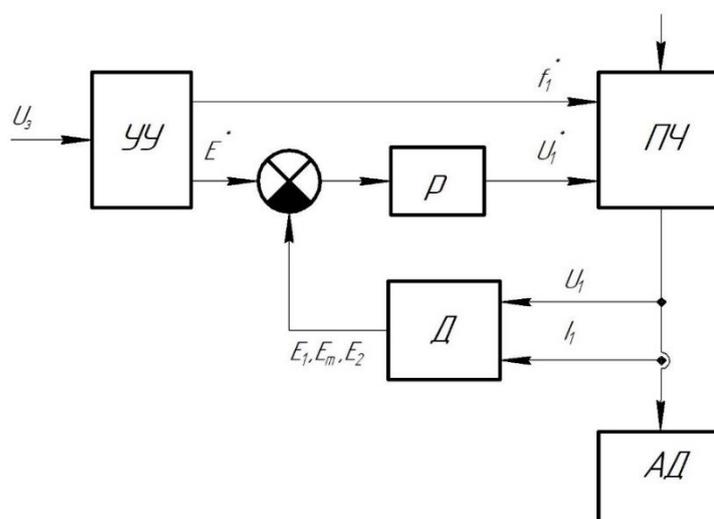


Рисунок 1.6 – Блок-схема электропривода при управлении с компенсацией [129]

Законы управления, рассмотренные ранее, были разработаны в целях компенсации некоторых недостатков асинхронного двигателя, но они не направлены на достижение оптимальных результатов в плане минимизации потерь. Они обеспечивают приемлемые механические характеристики и режимы работы для большинства практических случаев применения регулируемых асинхронных электроприводов. Оптимизация работы асинхронных двигателей с использованием различных целевых функций демонстрирует важность изменения магнитного состояния двигателя при изменении момента нагрузки. Результаты исследований подтверждают данную концепцию [128].

Легче реализовать оптимальные законы частотного управления с помощью

систем, обеспечивающих регулирование абсолютного скольжения двигателя. Законы, регулирующие потокосцепления обмоток и функции момента нагрузки при работе двигателя на естественной механической характеристике, существенно отличаются от законов, связывающих эти величины. Это позволяет использовать принципы регулирования скольжения на основе отклонения или возмущения, воздействуя на частоту или амплитуду напряжения на зажимах обмотки статора [128]. Технические решения, основанные на принципе регулирования скольжения двигателя с воздействием на частоту, являются наиболее эффективными.

Блок-схема одной из таких систем изображена на рисунке 1.7 [109]. Питание для асинхронного короткозамкнутого двигателя (АД) осуществляется через автономный инвертор напряжения (АИН) и преобразователь частоты с промежуточным звеном постоянного тока.

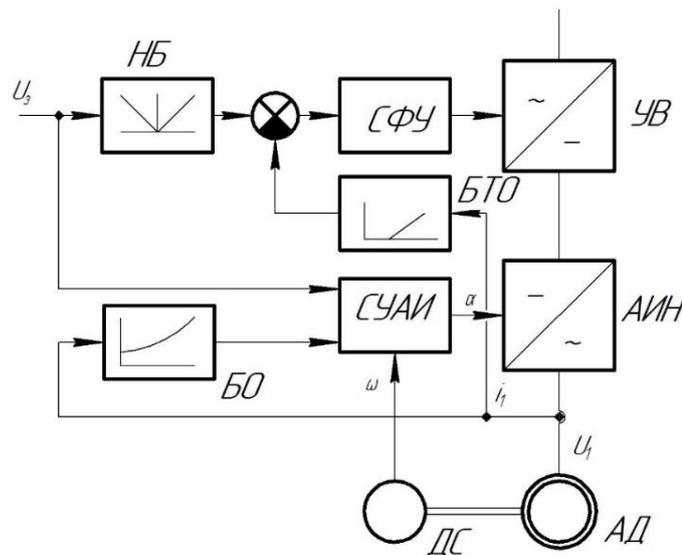


Рисунок 1.7 – Блок-схема оптимизированного по минимуму тока асинхронного электропривода с регулированием абсолютного скольжения по возмущению [109]

Величина напряжения  $U_1$ , подводимого к АД, задается сигналом  $U_3$ , воздействующим через нелинейный блок (НБ) на систему импульсно-фазового управления (СФУ) выпрямителя УВ. Частота  $\alpha = f_1/f_{1\text{ном}}$  напряжения питания АД формируется системой управления автономным инвертором по закону:

$$\alpha = \beta^* + \omega, \quad (2.3)$$

где  $\beta^*$  – заданное скольжение;

$\omega$  – частота вращения ротора, рад/с.

При фиксированных значениях  $U_3$  такой привод имеет механические характеристики, аналогичные характеристикам двигателя постоянного тока с последовательной обмоткой возбуждения. В электроприводе реализован закон оптимального регулирования по минимуму тока статора АД. Скольжение  $\beta$  регулируется в функции текущих эффективных значений тока статора  $i_1$ . Удовлетворяющий критерию минимума тока закон регулирования  $\beta(i_1)$  реализуется блоком оптимизации (БО). Ограничение тока и момента АД при перегрузках обеспечивается блоком токовой отсечки (БТО).

Несмотря на то, что существует много научных исследований, посвященных созданию регулируемого асинхронного электропривода и оптимизации его режимов работы, до сих пор не существует единого общепризнанного подхода к решению этой проблемы. Одним из подходов к решению этого вопроса является выбор оптимального управления, который позволяет достичь наилучших показателей энергоэффективности с учетом заданных ограничений.

### 1.5 Цель и задачи исследования. Обоснование проблемы

**Целью** нашей работы является возможность повысить эффективность сушки зерна обоснованием режимов работы электропривода.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие **задачи**:

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.

**Объектом исследования** является электропривод зерносушильных агрегатов.

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

### **Выводы по первой главе**

1. Условия функционирования объектов послеуборочной обработки зерна в Удмуртской Республике характеризуются коротким периодом уборки и повышенными значениями влажности и засорённости зернового вороха. Состояние зерноочистительной и зерносушильной техники Удмуртской Республики характеризуется большим износом оборудования, плохим обеспечением, моральным и физическим износом, что является основными причинами снижения производительности комплексов и повышенных затрат на переработку.

2. Как показывает сравнительный анализ различных методов сушки, конвективный способ сушки является наиболее доступным и широко используемым в сельскохозяйственном производстве. Среди конвективных способов стоит отметить перспективное направление – сушку зерна в кипящем слое.

3. 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.

4. 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.

5. После проведения библиографического анализа, можно сделать вывод о необходимости дальнейшего развития теории асинхронного электропривода, учитывая изменение частоты питания и частоты вращения ротора двигателя. Это предполагает разработку алгоритмов и программ для эффективного управления асинхронным двигателем, с минимизацией потерь и определением оптимальных зависимостей между амплитудой и частотой напряжения обмотки статора, частотой вращения ротора и требуемым электромагнитным моментом.

## 2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ЧАСТОТНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ

### 2.1 Обоснование выбора схемы замещения асинхронного двигателя, выраженной через проводимости статора и ротора

Математические модели асинхронного двигателя являются фундаментом для изучения процессов электромеханического преобразования энергии. Они особенно важны при разработке энергосберегающих алгоритмов управления автоматизированным асинхронным электроприводом.

Для анализа работы АД и составления баланса мощности в различных режимах работы используется упрощенная схема замещения. Схемы замещения АД, приводимые в разных библиографических источниках, варьируются [10, 11, 12, 13, 57, 61, 62, 63, 76, 106, 125, 126, 133, 143-145]. В [125, 126] представлена упрощенная схема замещения, изображенная на рисунке 2.1.

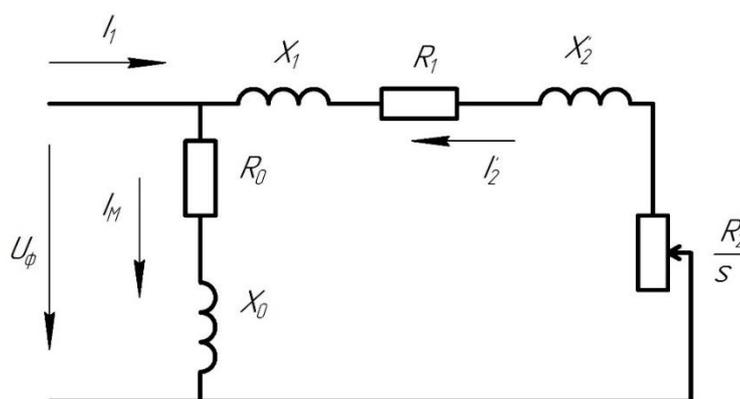


Рисунок 2.1 – Упрощённая схема замещения асинхронного двигателя, на схеме обозначены:  $U_\phi$  – первичное фазное напряжение, В;  $I_1$  – фазный ток статора, А;  $I_2'$  – приведенный ток ротора, А;  $X_1$  и  $X_2'$  – первичное и вторичное приведенные реактивные сопротивления рассеивания, Ом;  $R_0$ ,  $X_0$  – активное и реактивное сопротивления контура намагничивания, Ом;  $s = (\omega_0 - \omega)/\omega_0$  – скольжение двигателя, о.е.;  $\omega_0 = 2\pi n_0/60$  – синхронная угловая скорость двигателя, рад/с;  $\omega_0 = 2\pi f_1/p$ , рад/с;  $R_1$  и  $R_2'$  – первичное и вторичное приведенные активные сопротивления, Ом;  $f_1$  – частота сети, Гц;  $p$  – число пар полюсов [125]

Выражения для вторичного тока в соответствии с приведенной схемой замещения на рисунке 2.1 ( $I'_2$ , А):

$$I'_2 = \frac{U_\phi}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X'_2)^2}} . \quad (2.1)$$

Момент асинхронного двигателя может быть определен из выражения потерь  $M \cdot \omega_0 \cdot s = 3 \cdot (I'_2)^2 \cdot R'_2$ , откуда ( $M$ , Н·м):

$$M = \frac{3 \cdot (I'_2)^2 \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot s} . \quad (2.2)$$

Подставляя значение тока 2.1 в 2.2, получаем ( $M$ , Н·м):

$$M = \frac{3 \cdot U_\phi^2 \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot \left[ \left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X'_2)^2 \right] \cdot s} . \quad (2.3)$$

Важно отметить, что механические свойства асинхронного двигателя сильно зависят от изменения напряжения сети. Как показывает уравнение 2.3, момент двигателя пропорционален квадрату напряжения при заданном значении скольжения, что делает двигатель очень чувствительным к изменениям напряжения сети.

На рисунке 2.2 представлена схема замещения, приводимая в [12].

Ниже представлены основные соотношения для детализированной схемы замещения асинхронного двигателя.

Потери в меди цепи статора ( $P_{n1}$ , Вт):

$$P_{n1} \approx 3 \cdot (I_0^2 + (I'_2)^2) \cdot R_1 . \quad (2.4)$$

Потери в цепи ротора можно найти, если учесть, что приведенное сопротивление ротора равно  $R'_2$  ( $P_{n2}$ , Вт):

$$P_{n2} \approx 3 \cdot (I'_2)^2 \cdot R'_2 . \quad (2.5)$$

Суммарная электромагнитная мощность, передаваемая на ротор ( $P_{ЭМ}$ , Вт):

$$P_{ЭМ} = 3 \cdot (I'_2)^2 \cdot \frac{R'_2}{s} . \quad (2.6)$$

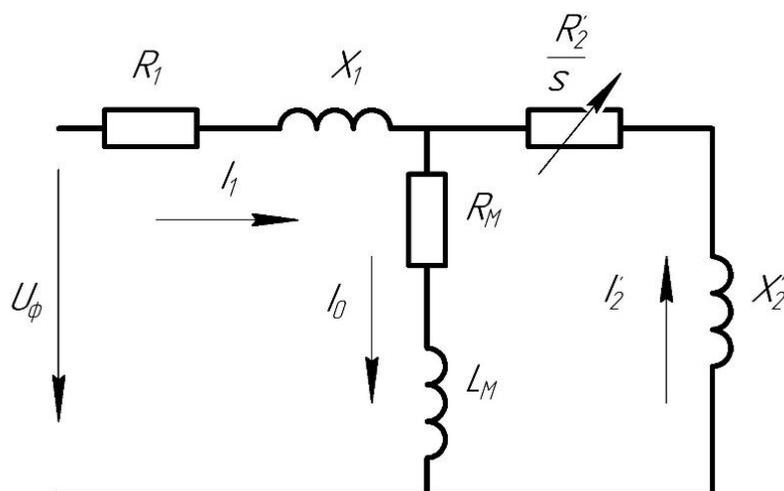


Рисунок 2.2 – Детализированная схема замещения асинхронного двигателя, на схеме обозначены:  $R_1, X_1$  – активное и реактивное сопротивления обмотки статора, Ом;  $X_2', R_2'$  – приведенные к первичной обмотке реактивное и активное сопротивления ротора, Ом;  $R_M, X_M$  – активное и реактивное сопротивления намагничивающего контура, Ом [12]

Мощность, вырабатываемую асинхронным двигателем, определяется как разница между электромагнитной мощностью и активной мощностью потерь в роторной цепи ( $P_{\text{МЕХ}}$ , Вт):

$$P_{\text{МЕХ}} = P_{\text{ЭМ}} - P_{\text{па}} = 3 \cdot (I_2')^2 \cdot R_2' \frac{1-s}{s}. \quad (2.7)$$

В [95] приведена T-образная схема замещения асинхронного двигателя при вращающемся роторе (рис. 2.3).

На рисунке 2.3 обозначены:  $X_2'$  – сопротивление обмотки заторможенного ротора:

$$X_2 = 2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot L_2, \quad (2.8)$$

где  $f_1$  – частота сети, Гц;

$L_2$  – индуктивное сопротивление обмотки ротора, Гн;

$R_2'$  – активного сопротивления обмотки ротора, по которой вычисляются активные электрические потери ротора, Ом;

$R_M, X_M$  – активное и реактивное сопротивления контура намагничивания, Ом.

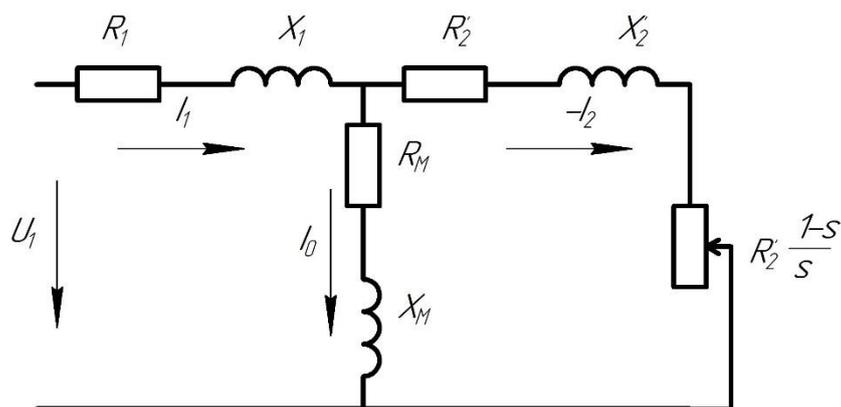


Рисунок 2.3 – Т-образная схема замещения асинхронного двигателя [95]

Мощность электрических потерь в цепи ротора в соответствии со схемой 2.3 может быть определена по формуле ( $P_p$ , Вт):

$$P_p = m_2 \cdot I_2^2 \cdot R_2, \quad (2.9)$$

где  $m_2$  – число фаз обмотки ротора.

Суммарная электромагнитная мощность, передаваемая на ротор ( $P_{эм}$ , Вт):

$$P_{эм} = m_2 \cdot I_2^2 \cdot \frac{R_2'}{s}. \quad (2.10)$$

Мощность асинхронного двигателя может быть определена путем вычитания активной мощности потерь цепи ротора из электромагнитной мощности ( $P_{мех}$ , Вт):

$$P_{мех} = P_{эм} - P_p = m_2 \cdot I_2^2 \cdot R_2' \frac{1-s}{s}. \quad (2.11)$$

На сопротивлении  $R_2'(1-s)/s$  выделяется мощность, равная механической мощности двигателя.

Индекс «штрих» на рисунке 2.3 относится к сопротивлениям, приведенным к цепи статора:

$$R_2' = k^2 \cdot R_2, \quad X_2' = k^2 \cdot X_2, \quad (2.12)$$

где  $k$  – коэффициент трансформации электродвигателя.

При изучении частотного регулирования скорости электродвигателей в [14], применяется схема замещения одной фазы асинхронного двигателя, которая представлена на рисунке 2.4:

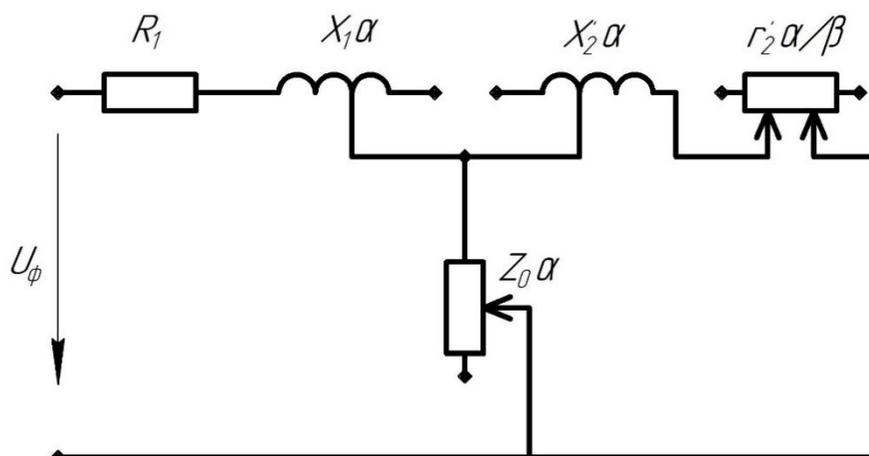


Рисунок 2.4 – Модель асинхронного двигателя с учётом частоты питания [14]

Параметры схемы замещения на рисунке 2.4 определяются для номинальных значений напряжения и частоты сети. Если параметры сети отклоняются от номинальных значений, необходимо пересчитать сопротивления по следующим формулам: индуктивные сопротивления статора, ротора и намагничивающей ветви увеличиваются пропорционально частоте ( $X_{1\alpha}$ , Ом;  $X'_{2\alpha}$ , Ом;  $X_{0\alpha}$ , Ом):

$$X_{1\alpha} = X_1 \cdot \alpha, \quad X'_{2\alpha} = X'_2 \cdot \alpha, \quad X_{0\alpha} = X_0 \cdot \alpha, \quad (2.13)$$

где  $\alpha = f_1/f_{1\text{ном}}$  – относительная частота статора.

Активное сопротивление статора не зависит от частоты  $R_{1\alpha} = R_1$ .

Активное сопротивление ротора обратно пропорционально скольжению  $s$  ( $R'_{2s}$ , Ом):

$$R'_{2s} = \frac{R'_2}{s}. \quad (2.14)$$

При этом скольжение зависит от частоты и определяется по выражению:

$$s = (\omega_1 - \omega)/\omega_1 = \omega_\Delta/\omega_1 = \frac{f_2}{f_1} = \frac{\beta}{\alpha}, \quad (2.15)$$

где  $f_1$  и  $f_2$  – частоты тока статора и ротора соответственно, Гц;

$\omega$  и  $\omega_1$  – угловые скорости вала ротора и поля статора соответственно, рад/с;

$\omega_\Delta = \omega_1 - \omega = 2\pi f_1/p - \omega = \omega_{1\text{ном}}\alpha - \omega$  – абсолютное скольжение ротора, рад/с;

$\beta = f_2/f_{1\text{ном}} = \omega_\Delta/\omega_{\text{ном}}$  – относительная частота ротора и вместе с тем

относительный параметр абсолютного скольжения, о.е.;

$p$  – число пар полюсов обмотки статора.

Представим магнитную цепь  $Z_0$  асинхронного двигателя как последовательную цепь, включающую активное сопротивление  $R_0$ , учитывающее потери в стали статора, и индуктивное сопротивление  $X_0$ , которое представляет индуктивность цепи намагничивания.

Активное сопротивление цепи намагничивания определяется с учетом следующих допущений: потери в стали изменяются пропорционально произведению квадрата потока в воздушном зазоре на первую степень частоты ( $P_{ст}$ , Вт):

$$P_{ст} \approx K_{ст} \cdot \Phi^2 \cdot f_{1ном} = m_1 \cdot I_{0ном}^2 \cdot r_0^2, \quad (2.16)$$

где  $m_1$  – число фаз обмотки статора;

$I_0$  – ток ветви  $Z_0$  схемы замещения, А.

Следовательно, активное сопротивление будет изменяться пропорционально частоте ( $R_{0\alpha}$ , Ом):

$$R_{0\alpha} = R_0 \cdot \alpha. \quad (2.17)$$

Все параметры схемы замещения с указанным приближением для  $R_0$  варьируются в зависимости от частоты. Они выражаются через параметры при номинальной частоте, которые можно найти с использованием доступного метода, например, через данные опытов холостого хода и короткого замыкания.

Из проведенного обзора литературы можно сделать вывод, что для оценки работы асинхронного электродвигателя существует несколько схем замещения. Эти схемы представлены электрическими цепями, включающими активные и индуктивные сопротивления.

Для более глубокого анализа работы асинхронного двигателя необходимо получить дополнительную информацию о напряжениях на отдельных сопротивлениях замещающей схемы, а также о токах фазы и их активных и индуктивных составляющих. Именно эти параметры играют важную роль в определении активной и реактивной мощностей, коэффициента мощности и других характеристик работы асинхронного двигателя.

Для более удобного представления замещающей схемы асинхронного

двигателя рекомендуется использовать логический набор проводимостей. Это позволит наглядно представить структуру схемы и упростить анализ ее работы.

Для того чтобы преобразовать Г-образную схему замещения с набором сопротивлений в эквивалентную схему с набором проводимостей (см. рис. 2.5), можно использовать известные формулы преобразования, которые описаны в литературе [10, 11, 25, 81].

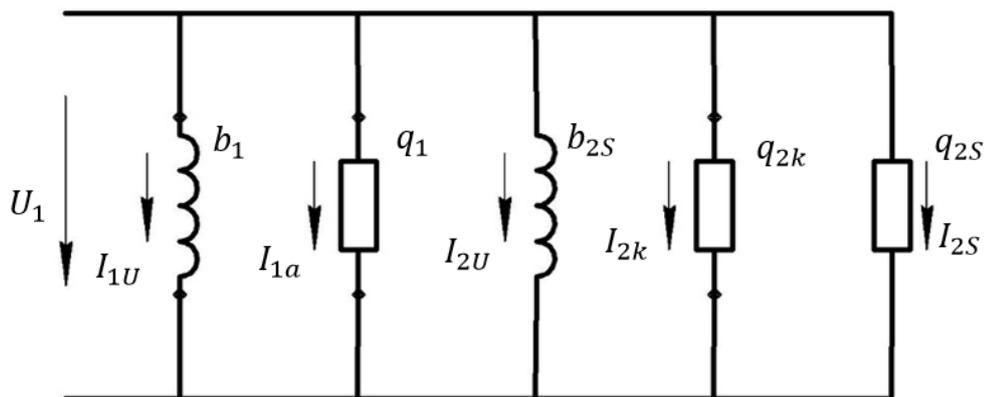


Рисунок 2.5 – Схема замещения одной фазы асинхронного двигателя, выраженная через проводимости статора и ротора

Проводимости схемы замещения одной фазы асинхронного двигателя, изображенной на рисунке 2.5:

активная проводимость цепи намагничивания ( $q_1$ , 1/Ом):

$$q_1 = \frac{R_0}{R_0^2 + X_0^2} = \frac{R_0}{Z_1^2}, \quad (2.18)$$

индуктивная проводимость цепи намагничивания ( $b_1$ , 1/Ом):

$$b_1 = \frac{X_0}{R_0^2 + X_0^2} = \frac{X_0}{Z_1^2}, \quad (2.19)$$

индуктивная проводимость рассеяния цепи ротора ( $b_{2s}$ , 1/Ом):

$$b_{2s} = \frac{X_{2k}}{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{2k}^2} = \frac{X_{2k}}{Z_{2k}^2}, \quad (2.20)$$

активная проводимость цепи ротора, по которой определяются потери активной мощности в фазе ( $q_{2k}$ , 1/Ом):

$$q_{2k} = \frac{R_1 + R_2}{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{2k}^2} = \frac{R_{2k}}{Z_{2k}^2}, \quad (2.21)$$

активная проводимость цепи ротора, по которой определяется активная составляющая тока и мощности при преобразовании электрической мощности в механическую ( $q_{2s}$ , 1/Ом):

$$q_{2s} = \frac{R_2 \cdot \frac{(1-s)}{s}}{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{2k}^2} = \frac{R_2 \cdot \frac{(1-s)}{s}}{Z_{2k}^2}, \quad (2.22)$$

где  $s$  – скольжение ротора, о.е.;

$R_0, R_1, R_2$  – активные сопротивления цепей Г-образной схемы замещения, Ом;

$X_0, X_{2k}$  – индуктивные сопротивления Г-образной схемы замещения, Ом.

Проводимостям  $b_1$  и  $q_1$  соответствуют токи ( $I_{1и}$ , А;  $I_{1а}$ , А), на схеме рисунка 2.9:

$$I_{1и} = U_\phi \cdot b_1, \quad (2.23)$$

$$I_{1а} = U_\phi \cdot q_1, \quad (2.24)$$

которые не зависят от скольжения ротора, не зависят от нагрузки асинхронного двигателя.

Проводимостям  $b_{2s}, q_{2k}, q_{2s}$  соответствуют токи ( $I_{2и}$ , А;  $I_{2k}$ , А;  $I_{2s}$ , А):

$$I_{2и} = U_\phi \cdot b_{2s}, \quad (2.25)$$

$$I_{2k} = U_\phi \cdot q_{2k}, \quad (2.26)$$

$$I_{2s} = U_\phi \cdot q_{2s}, \quad (2.27)$$

которые зависят от скольжения ротора, от нагрузки асинхронного двигателя.

В комплексной форме можно определить токи фазы асинхронного двигателя ( $I_1$ , А;  $I_a$ , А;  $I_{ин}$ , А), так как проводимости рассматриваются как комплексные числа:

$$I_1 = U_\phi \cdot y = U_\phi \cdot (q - j \cdot b), \quad (2.28)$$

$$I_a = U_\phi \cdot q = U_\phi \cdot (q_1 + q_{2k} + q_{2s}), \quad (2.29)$$

$$I_{ин} = U_\phi \cdot b = U_\phi \cdot (b_1 + b_{2s}). \quad (2.30)$$

Вычислены суммарные значения проводимостей одной фазы асинхронного двигателя: индуктивной ( $b$ , 1/Ом), активной ( $q$ , 1/Ом) и полной ( $y$ , 1/Ом) по

формулам:

$$b = b_1 + b_{2s}, \quad (2.31)$$

$$q = q_1 + q_{2k} + q_{2s}, \quad (2.32)$$

$$y = \sqrt{q^2 + b^2}. \quad (2.33)$$

Коэффициент мощности вычислен по формуле ( $\cos\varphi$ , о.е.):

$$\cos\varphi = \frac{q}{y}. \quad (2.34)$$

По активным и индуктивным проводимостям фазы можно определить соответствующие мощности:

активная мощность потерь цепи намагничивания фазы ( $P_{1a}$ , Вт):

$$P_{1a} = U_{\phi}^2 \cdot q_1, \quad (2.35)$$

индуктивная мощность цепи намагничивания фазы ( $Q_{1k}$ , ВАр):

$$Q_{1k} = U_{\phi}^2 \cdot b_1, \quad (2.36)$$

индуктивная мощность рассеяния фазы ( $Q_{2k}$ , ВАр):

$$Q_{2k} = U_{\phi}^2 \cdot b_{2s}, \quad (2.37)$$

активная мощность потерь фазы ( $P_{2k}$ , Вт):

$$P_{2k} = U_{\phi}^2 \cdot q_{2k}, \quad (2.38)$$

активная мощность преобразования из электрической в механическую ( $P_{2s}$ , Вт):

$$P_{2s} = U_{\phi}^2 \cdot q_{2s}. \quad (2.39)$$

Для схемы замещения, представленной на рисунка 2.5, можно записать выражение для электромагнитного момента асинхронного двигателя, выразив через отношение мощности на валу ротора к скорости вращения ротора ( $M_3$ , Н·м):

$$M_3 = \frac{mU_{\phi}^2 q_{2s}}{\omega}, \quad (2.40)$$

где  $m$  – число фаз статора;

$\omega$  – скорость вращения ротора, рад/с.

С учетом выражения 2.22, 2.39 и 2.40 можно записать значение момента на валу двигателя в виде ( $M_3$ , Н·м):

$$M_3 = \frac{mR_2 p U_\phi^2}{2\pi s f \cdot \left( \left( R_1 + \frac{R_2}{s} \right)^2 + (2\pi f L_2)^2 \right)}, \quad (2.41)$$

где  $U_\phi$  – первичное фазное напряжение, В;

$R_1$  – активное сопротивление обмотки статора, Ом;

$R_2$  – активное сопротивление обмотки ротора, Ом;

$L_2$  – индуктивное сопротивление обмотки ротора, Гн;

$s$  – скольжение двигателя, о.е.;

$f$  – частота сети, Гц.

Аналитические зависимости проводимостей позволяют рассчитать токи и мощности для предложенной схемы замещения. Схема замещения, выраженная через проводимости (рис. 2.5), позволяет более детально изучать и анализировать энергетические характеристики АД и оптимизировать его работу [35-38]. Использование проводимостей дает нам большую гибкость и удобство в изменении и расширении функциональности схемы замещения, позволяет создавать более сложные и эффективные схемы замещения и управления электропривода, которые могут адаптироваться к изменяющимся требованиям и условиям.

## 2.2 Потери в асинхронном двигателе с частотным регулированием

Одна из задач исследования – оценка влияния на потери в асинхронном двигателе частотного регулирования скорости вращения. Рассмотрим известные закономерности в области частотного регулирования и оценим ожидаемое влияние значения частоты на величину потерь в асинхронном двигателе.

При протекании электрического тока по токоведущим частям асинхронного двигателя неминуемо возникают потери мощности в виде тепловой энергии. Потери на нагрев определяются активным и составляющими потерь мощности в двигателе, возникающие вследствие протекания тока по проводу обмотки электродвигателя с активным сопротивлением [14, 42, 54].

Мощность, которая выделяется в проводнике при протекании тока,

определяется по выражению ( $P$ , Вт):

$$P = \int_0^t i^2(t) \cdot R \cdot dt, \quad (2.42)$$

где  $i$  – ток в цепи, А;

$R$  – активное сопротивление, Ом;

$t$  – длительность протекания тока, с.

Активное сопротивление  $R$  не постоянно и определяется характером тока: постоянным или переменным, что вызвано эффектом близости и поверхностным эффектом.

Для переменного тока сопротивление определяется по выражению ( $R$ , Ом):

$$R = R_{=} \cdot k_{\text{доб}}, \quad (2.43)$$

где  $R_{=}$  – сопротивление при постоянном токе, Ом;

$k_{\text{доб}}$  – коэффициент добавочных потерь, вызванных поверхностным эффектом и эффектом близости.

Поверхностный эффект зависит от удельного сопротивления проводника и частоты тока. Активное сопротивление увеличивается в  $k_n$  раз по сравнению с постоянным током, где  $k_n$  – коэффициент учета поверхностного эффекта. На рисунке 2.6 показан график зависимости коэффициента  $k_n$  от частоты тока, протекающего через проводник, и сопротивления проводника при постоянном токе [127].

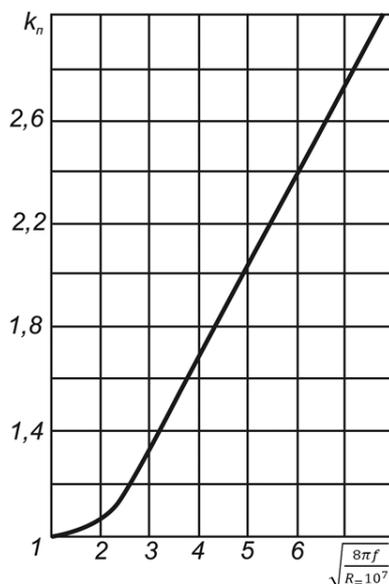


Рисунок 2.6 – Коэффициент учета поверхностного эффекта [127]

На рисунке 2.6 приняты следующие обозначения:  $f$  – частота тока, Гц;  $R_{\Sigma}$  – сопротивление проводника, Ом, при постоянном токе и длине 1 м.

Сопротивления проводника пропорционально квадратному корню от частоты тока (рис. 2.6). При неизменной величине напряжения на концах проводника активные потери в проводнике зависят от частоты тока ( $P_n$ , Вт):

$$P_n = \frac{U^2}{R_{\Sigma} \cdot \sqrt{\frac{8\pi f}{R_{\Sigma} \cdot 10^7}}} = \frac{U^2}{\sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot R_{\Sigma} \cdot 10^{-7}}}, \quad (2.44)$$

где  $U$  – напряжение на концах проводника, В;

$R_{\Sigma}$  – сопротивление проводника при постоянном токе, Ом.

Из проведенного выше анализа поверхностного эффекта можно сделать вывод, что не следует ожидать значительного возрастания активных потерь мощности в проводнике и, как следствие, его нагрева при увеличении частоты тока в частотном регулируемом электроприводе.

Потери в проводнике также возникают из-за эффекта близости, который приводит к дополнительным потерям. Появлением вихревых токов в проводнике под воздействием токов в соседних проводниках приводит к неравномерному распределению тока по сечению. Коэффициент близости  $k_b$  учитывает соотношение активного сопротивления проводника, находящегося в магнитном поле других проводников, к сопротивлению отдельного проводника. Если система состоит из более чем двух проводников, коэффициент близости для отдельных проводников может быть как больше, так и меньше единицы.

На рисунке 2.7 показана зависимость коэффициента близости проводников  $k_b$  от расстояния  $h$  между круглыми проводниками диаметром  $d$  при различной частоте  $f$  тока [127]. Взаимное влияние соседних проводников в случае системы из нескольких проводников имеет более сложный характер. Однако можно определить минимальные расстояния между соседними проводниками, при которых эффект близости почти не наблюдается. Для проводников малых сечений ( $d < 25$  мм) этот коэффициент находится в диапазоне от 1,01 до 1,1. Для проводников больших сечений ( $120 \times 10$  мм<sup>2</sup>) коэффициент близости достигает 1,25.

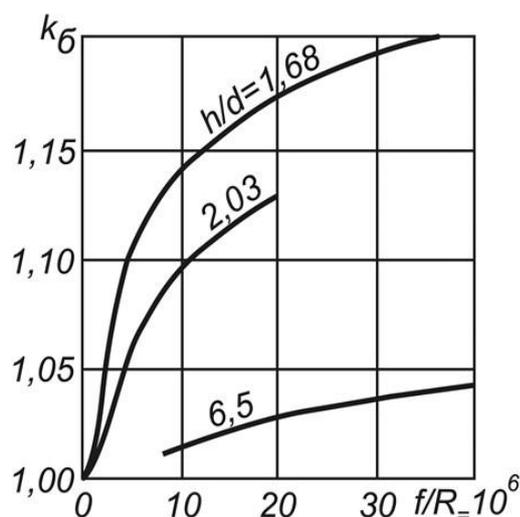


Рисунок 2.7 – Коэффициент близости проводника [127]

С учетом проведенного выше обзора проявления эффекта близости проводников нет оснований ожидать существенного увеличения потерь при увеличении частоты.

Если взять отношение активного сопротивления проводника системы  $R_{\approx}$ , находящегося под влиянием поля других проводников к сопротивлению проводника постоянному току  $R_{=}$ , то получим величину коэффициента добавочных потерь  $k_{\text{доб}}$ :

$$k_{\text{доб}} = \frac{R_{\approx}}{R_{=}} = nk_{\text{б}}. \quad (2.45)$$

Магнитный поток, которым пронизывается проводник, в значительной степени увеличивается в проводниках из стали (материала с ферромагнитными свойствами). Повышение магнитной проницаемости стали по сравнению с алюминием и медью способствует увеличению наведенной в проводнике электродвижущей силы. Это, в свою очередь, приводит к росту тока в проводнике и в итоге к увеличению потерь в нем.

В асинхронном двигателе, в котором ферромагнитные детали находятся в переменном магнитном поле, возникают потери энергии из-за вихревых токов. Нагрев этих деталей, вызванный вихревыми токами, приводит к дополнительным потерям энергии. Вихревых токов, которые создают магнитные потоки, противодействуют изменению основного магнитного потока. Распределение основного

магнитного потока по сечению становится неравномерным из-за противодействия вихревым токам. Глубина проникновения электромагнитного поля ( $a$ , мм):

$$a = \sqrt{\frac{\rho}{2\pi f \mu_a}}, \quad (2.46)$$

где  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление материала, (Ом·мм<sup>2</sup>)/м;

$f$  – частота, Гц;

$\mu_a$  – абсолютная магнитная проницаемость материала, Гн/м.

Следующая зависимость выражает удельную мощность потерь в массивной ферромагнитной части асинхронного двигателя ( $P_{уд}$ , Вт/м<sup>2</sup>):

$$P_{уд} = 2 \cdot 10^{-7} \sqrt{\rho \cdot f \cdot B_m \cdot F_{уд}^2}, \quad (2.47)$$

где  $F_{уд}$  – МДС на единицу длины стержня, А/м;

$f$  – частота, Гц;

$B_m$  – индукция, Тл.

Для достижения более эффективного функционирования электрических двигателей важно учитывать несколько факторов. Один из них – величины  $\rho$  и  $f$ , которые влияют на проявление эффекта вытеснения. Чем меньше  $\rho$  и выше  $f$ , соответственно, тем сильнее этот эффект. Помимо этого, магнитные потери увеличиваются, если ферромагнитные детали размещены вблизи проводника.

Для снижения потерь в магнитопроводе электрических двигателей можно использовать различные приемы. Один из них – использование листов электротехнической стали в конструкции магнитопровода. Эти листы должны быть изолированы друг от друга. Электротехническая сталь обладает высокими электромагнитными характеристиками, что способствует снижению потерь.

Все эти приемы и методы используются при проектировании асинхронных двигателей с целью минимизации дополнительных потерь.

В пределах рабочего диапазона частот нет оснований ожидать значительного увеличения потерь в электродвигателе при изменении частоты питания. Этот вывод основывается на проведенных исследованиях потерь в асинхронных

двигателях при изменении частоты питания, которые были рассмотрены выше.

### 2.3 Математическая модель асинхронного двигателя, выраженная через проводимости статора и ротора

Применение компьютерного моделирования является эффективным способом оценки работы асинхронного двигателя. Программный пакет Matlab демонстрирует лидерство перед своими конкурентами [3, 52, 99, 113, 115]. Matlab содержит специальный модуль Simulink, позволяющий проводить симуляции сложных технических систем. Основная задача по оценке энергоэффективности частотно-регулируемого асинхронного двигателя предлагается выполнить на виртуальной модели, по схеме замещения двигателя (рис. 2.5), в среде моделирования Matlab Simulink.

Для исследования выбран асинхронный электродвигатель АИР100S4. Цель состоит в определении параметров схемы замещения данного двигателя, которые на данный момент неизвестны. Проведены испытания исследуемого двигателя в режиме холостого хода и короткого замыкания в соответствии с ГОСТ Р 53472-2009 [48].

Исследование проводилось в лаборатории кафедры электротехники, электрооборудования и электроснабжения Удмуртского ГАУ [18, 19, 22, 23]. В лабораторной установке используется измерительный комплект приборов К505. Результаты испытания асинхронного двигателя АИР100S4 представлены в таблице 2.1.

Расчетные величины определяются в следующем порядке:

Величина тока холостого хода  $I_x$  (линейное значение) ( $I_x$ , А):

$$I_x = \frac{I_{Ax} + I_{Bx} + I_{Cx}}{3}. \quad (2.48)$$

Потери холостого хода и коэффициент мощности ( $P_x$ , Вт):

$$P_x = P_{Ax} + P_{Bx} + P_{Cx}, \quad (2.49)$$

$$\cos\varphi_x = \frac{P_x}{3U_x I_x}, \quad (2.50)$$

где  $P_{Ax}, P_{Bx}, P_{Cx}$  – измеренная мощность холостого хода одной фазы, Вт.

Таблица 2.1 – Данные опыта холостого хода асинхронного двигателя АИР100S4

$U_x$	$I_x$	$P_x$	$\cos\varphi_x$	$p_{\Sigma 1}$	$U_x^2$	$(p_{\text{мг}} + p_{\text{мех}})$	$p_{\text{мг}}$	$p_{\text{мех}}$
В	А	Вт	-	Вт	В <sup>2</sup>	Вт	Вт	Вт
240	4,10	315,80	0,11	128,60	57600	187,20	166,92	20,28
220	3,05	224,28	0,11	71,16	48400	153,12	132,84	20,28
200	2,30	172,57	0,13	40,47	40000	132,10	111,82	20,28
180	1,80	134,59	0,14	24,79	32400	109,80	89,52	20,28
160	1,50	108,78	0,15	17,21	25600	91,57	71,29	20,28
140	1,30	91,47	0,17	12,93	19600	78,54	58,26	20,28
120	1,10	76,46	0,19	9,26	14400	67,20	46,92	20,28

Разделение потерь (определение магнитных  $P_{\text{мг}}$  и механических  $P_{\text{мх}}$  потерь) производится следующим образом:

а) Определяются электрические потери в обмотке статора ( $p_{\Sigma 1}$ , Вт):

$$p_{\Sigma 1} = 3I_x^2 R_{1(75)}, \quad (2.51)$$

где  $R_{1(75)}$  – сопротивление фазы обмотки статора, приведенное к расчетной рабочей температуре двигателя, составляющей 75 °С, Ом.

$$R_{1(75)} = \frac{R_{1(t)}(235^\circ + 75^\circ)}{235^\circ + t}, \quad (2.52)$$

где  $t$  – температура воздуха при проведении испытаний, °С.

Величина сопротивления  $R_{1(t)}$  приведена в паспорте двигателя, а значение температуры  $t$  можно приближенно приравнять равным 20 °С:

б) Определяется сумма магнитных и механических потерь:

$$p_{\text{мг}} + p_{\text{мех}} = P_x - p_{\Sigma 1}, \quad (2.53)$$

в) Строится зависимость между суммой магнитных и механических потерь ( $p_{\text{мг}} + p_{\text{мех}}$ ) и квадратом скорости ( $U_x^2$ ) (рис. 3.1). Эта зависимость должна представлять собой прямую линию. Путем проведения прямой линии между экспериментальными точками данной зависимости до ее пересечения с осью ординат, мы можем получить значение механических потерь, которое равно отрезку,

отсекаемому этой прямой на оси ординат. Все значения, находящиеся выше горизонтальной линии механических потерь (разность  $((p_{\text{МГ}} + p_{\text{Мех}}) - p_{\text{Мех}})$ ), соответствуют магнитным потерям.

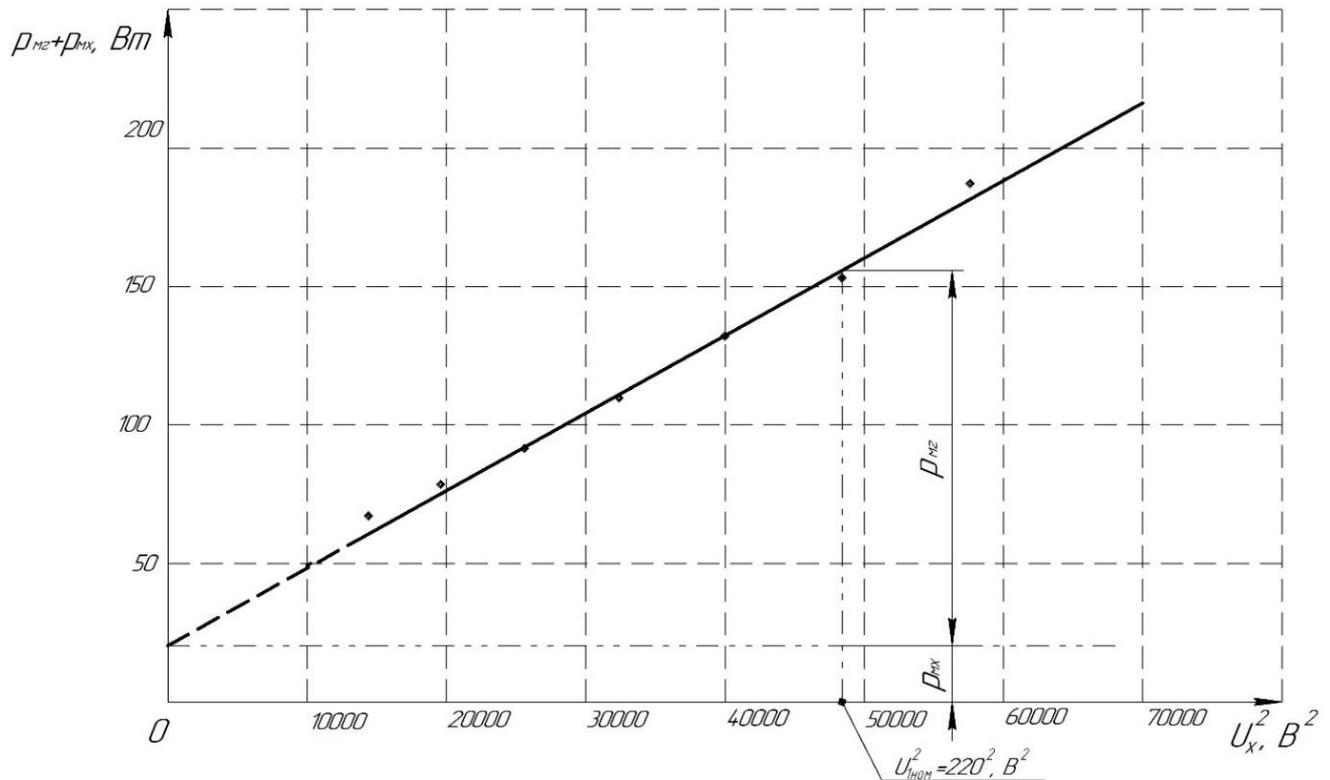


Рисунок 2.8 – Зависимость  $p_{\text{МГ}} + p_{\text{Мех}} = f(U_x^2)$  асинхронного двигателя АИР100S4

$$I_x = \frac{I_{Ax} + I_{Bx} + I_{Bx}}{3} = 3,05 \text{ А}, P_x = P_{Ax} + P_{Bx} + P_{Bx} = 224,28 \text{ Вт},$$

$$\cos\varphi_x = \frac{P_x}{3U_x I_x} = \frac{224,28}{3 \times 220 \times 3,05} = 0,11,$$

$$R_{1(75)} = \frac{R_{1(t)}(235^\circ + 75^\circ)}{235^\circ + t} = \frac{2,1 \times (235^\circ + 75^\circ)}{235^\circ + 20^\circ} = 2,55 \text{ Ом},$$

$$p_{\text{Э1}} = 3I_x^2 R_{1(75)} = 3 \times 3,05^2 \times 2,55 = 71,16 \text{ Вт},$$

$$p_{\text{МГ}} + p_{\text{Мех}} = P_x - p_{\text{Э1}} = 224,28 - 71,16 = 153,12 \text{ Вт},$$

$$P_2 = P_{1\text{НОМ}} - p_{\text{МГ}} - p_{\text{Мех}} - p_{\text{Э1}} = 224,28 - 132,84 - 20,28 - 71,16 = 0 \text{ Вт},$$

$$p_{\text{Мех}} = 20,28 \text{ Вт}, p_{\text{МГ}} = 132,84 \text{ Вт}.$$

По результатам анализа графических зависимостей на рисунке 2.8 можно заключить, что имеется некоторая погрешность, но она не превышает 3 %. Это позволяет утверждать, что данные, представленные аппроксимированной линией,

имеют хорошую сходимость с результатом эксперимента.

Ток намагничивания очень близок по модулю к полному току холостого хода. Сопротивления ветви намагничивания можно найти с достаточно высокой точностью по формулам, так как их значение всегда значительно больше остальных сопротивлений, входящих в схему замещения.

$$Z_{\mu} \approx \frac{U_0}{I_0} = \frac{220}{3,05} = 72,08 \text{ Ом}, R_{\mu} \approx \frac{\Delta P_{\text{МГ}}}{3I_0^2} = \frac{132,84}{3} \cdot 3,05^2 = 4,76 \text{ Ом},$$

$$X_{\mu} = \sqrt{Z_{\mu}^2 - R_{\mu}^2} = \sqrt{72,08^2 - 4,76^2} = 71,92 \text{ Ом}.$$

Индексом «к» помечены данные опыта холостого хода. В таблице 2.2 приведены результаты опытов короткого замыкания, где значения параметров короткого замыкания определены при номинальном значении тока.

Таблица 2.2 – Данные опыты короткого замыкания асинхронного двигателя АИР100S4

$U_{Ax}$	$U_{Bx}$	$U_{Cx}$	$I_{Ax}$	$I_{Bx}$	$I_{Cx}$	$P_{Ax}$	$P_{Bx}$	$P_{Cx}$
В	В	В	А	А	А	Вт	Вт	Вт
53,3	53,3	53,3	7,3	7,3	7,3	235	235	235

$$Z_{\text{фк}} = \frac{U_{\text{фк}}}{I_{\text{фк}}} = \frac{53,3}{7,3} = 7,3 \text{ Ом}, R_{\text{фк}} = \frac{P_{\text{к}}}{3I_{\text{фк}}^2} = \frac{705}{3 \cdot 7,3^2} = 4,41 \text{ Ом},$$

$$X_{\text{к}} = \sqrt{Z_{\text{фк}}^2 - R_{\text{фк}}^2} = \sqrt{7,3^2 - 4,41^2} = 5,82 \text{ Ом},$$

$$X_1 = X_2' = \frac{X_{\text{к}}}{2} = \frac{5,82}{2} = 2,91 \text{ Ом}, R_{1(75)} = 2,55 \text{ Ом},$$

$$R_2' = R_{\text{фк}} - R_{1(75)} = 4,41 - 2,55 = 1,86 \text{ Ом}.$$

$$L = \frac{X}{2\pi f}, L_2 = L_1 = \frac{2,91}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,00926 \text{ Гн}, L_{\mu} = \frac{71,92}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,229 \text{ Гн}.$$

Параметры схемы замещения электродвигателя АИР100S4 сведены в таблицу 2.3.

Таблица 2.3 – Параметры схемы замещения электродвигателя АИР100S4

$R_1$	$X_1$	$L_1$	$R'_2$	$X'_2$	$L'_2$	$R_\mu$	$X_\mu$	$L_\mu$
Ом	Ом	Гн	Ом	Ом	Гн	Ом	Ом	Гн
2,55	2,91	0,00926	1,86	2,91	0,00926	4,76	71,92	0,229

При переходе от Т-образной схемы (рис. 2.3) к Г-образной схеме (рис. 2.1) модуль коэффициента приведения сопротивления обмотки ротора определен по формуле:

$$C_1 = 1 + \frac{X_1}{X_\mu} = 1 + \frac{2,91}{71,92} = 1,04, C_1 R_1 = 1,04 \cdot 2,55 = 2,652 \text{ Ом},$$

$$C_1^2 R_2 = 1,04^2 \cdot 1,86 = 2,012 \text{ Ом}, R_1 + R_\mu = 2,55 + 4,76 = 7,31 \text{ Ом},$$

$$X_1 + X_\mu = X_0 = 71,92 + 2,91 = 74,83 \text{ Ом}, C_1^2 X_2 = 1,04^2 \cdot 5,82 = 6,295 \text{ Ом}.$$

Для расчета и анализа характеристик асинхронного двигателя на рисунке 2.1 представлена схема замещения со следующими обозначенными параметрами:  $R_0$ ,  $X_0$ ,  $X_1$ ,  $R_1$ ,  $X_2$ ,  $R'_2$ . Параметры остаются постоянными и не зависят от скольжения ротора.

При моделировании асинхронного двигателя использовалась модель (Приложение Б), разработанная на основе схемы замещения фазы двигателя (рис. 2.5). Используя стандартную библиотеку пакета Simulink, осуществляем подбор необходимых блоков модели, представляя их в виде структурной схемы. Схема модели фазы двигателя АИР100S4, выраженной через проводимости статора и ротора, представлена на рисунке 2.9 [20, 21, 24-29].

Схема замещения электрического двигателя состоит из следующих элементов:  $R_0$ ,  $L_0$ ,  $L_2$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ . Блоки  $R_0$  и  $L_0$  учитывают активное и реактивное сопротивления, связанные с намагничиванием контура. Блок  $L_2$  учитывает приведенные реактивные сопротивления двигателя. Блоки  $R_1$  и  $R_2$  позволяют учесть первичные и вторичные приведенные активные сопротивления соответственно.

Блоки  $f$  и  $U$  служат для ввода параметров сети: в блоке  $f$  задается частота сети (Гц), а в  $U$ , соответственно, первичное фазное напряжение (В). Для

определения скольжения асинхронного двигателя используется блок  $s$ , который вычисляет значение  $s$  по формуле  $(\omega_0 - \omega)/\omega_0$ .

В модели также имеются другие блоки, которые применяются для измерения и вычисления электрических параметров установившегося режима работы электродвигателя. В установившемся режиме работы электродвигателя измеряются следующие параметры:

$q_1$  – активная проводимость цепи намагничивания, 1/Ом;

$b_1$  – индуктивная 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, 1/Ом;

$b$  – суммарное значение индуктивной проводимости одной фазы асинхронного двигателя, 1/Ом;

$q$  – суммарное значение активной проводимости одной фазы асинхронного двигателя, 1/Ом;

$u$  – значение полной проводимости одной фазы асинхронного двигателя, 1/Ом.

По активным и индуктивным проводимостям фазы определяются соответствующие мощности и токи.

Для проверки адекватности разработанной модели электродвигателя АИР100S4 была создана вторая модель асинхронного двигателя, основанная на общепринятой Т-образной схеме замещения.

При получении схемы замещения АД (рис. 2.5) никаких дополнительных зависимостей или коэффициентов не вводилось, преобразование (2.18-2.22) является абсолютно эквивалентным. Результаты исследований подтверждают отсутствие расхождений в схемах замещения.

Графики проводимостей одной фазы двигателя АИР100S4, полученные в ходе моделирования работы на разработанной модели (рис. 2.9), представлены на рисунке 2.11. Моделирование проводилось в пределах изменения скольжения от 0 до 1 (Приложение В).

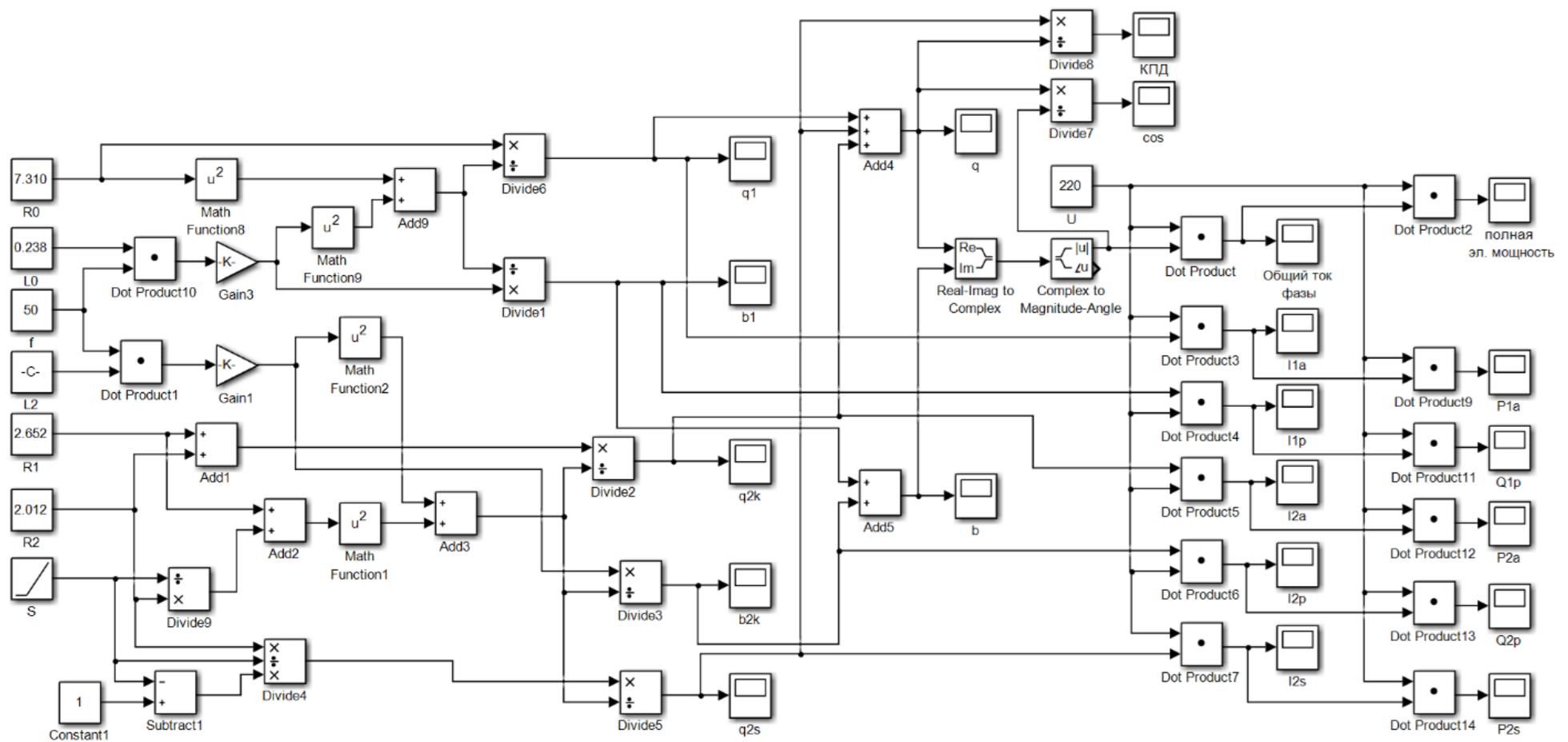


Рисунок 2.9 – Модель асинхронного двигателя АИР100S4, выраженная через проводимости статора и ротора

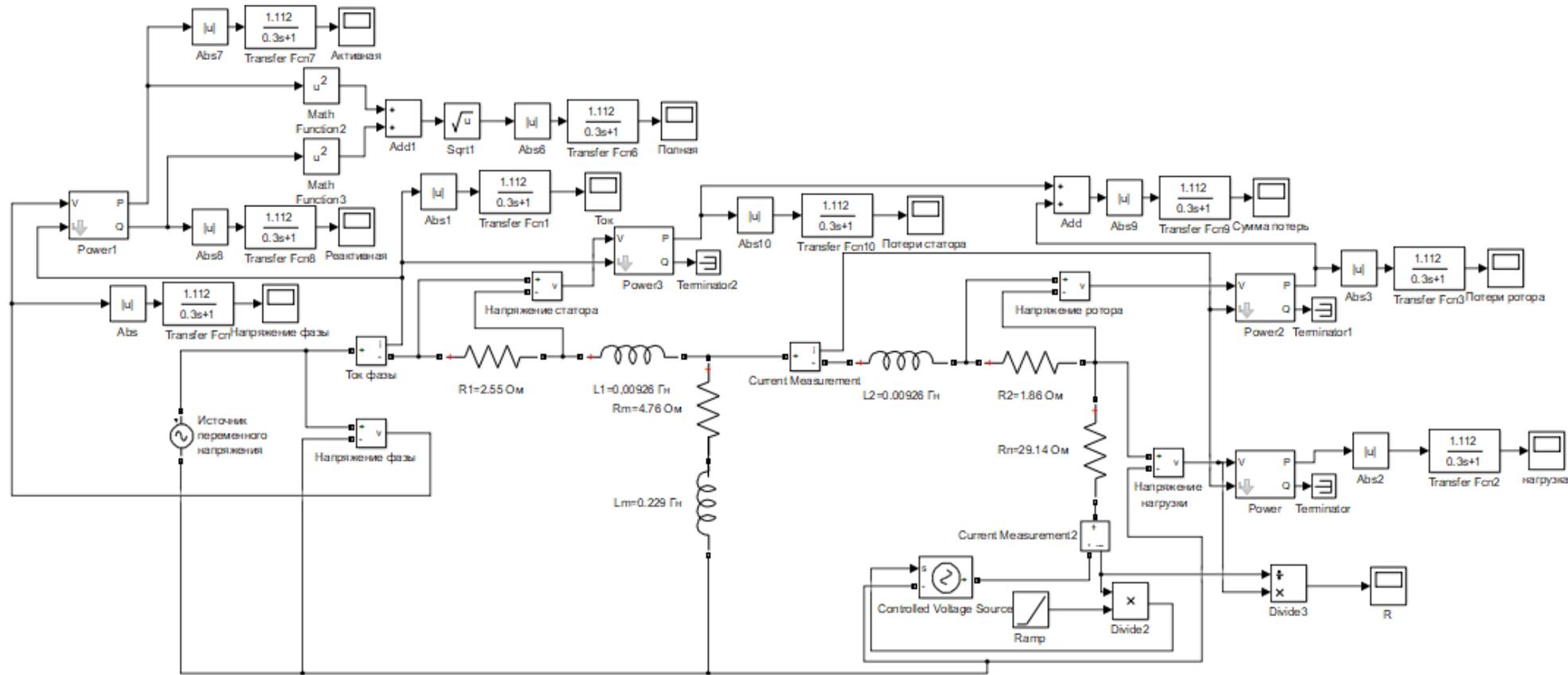


Рисунок 2.10 – Модель электродвигателя AIP100S4 по T-образной схеме замещения

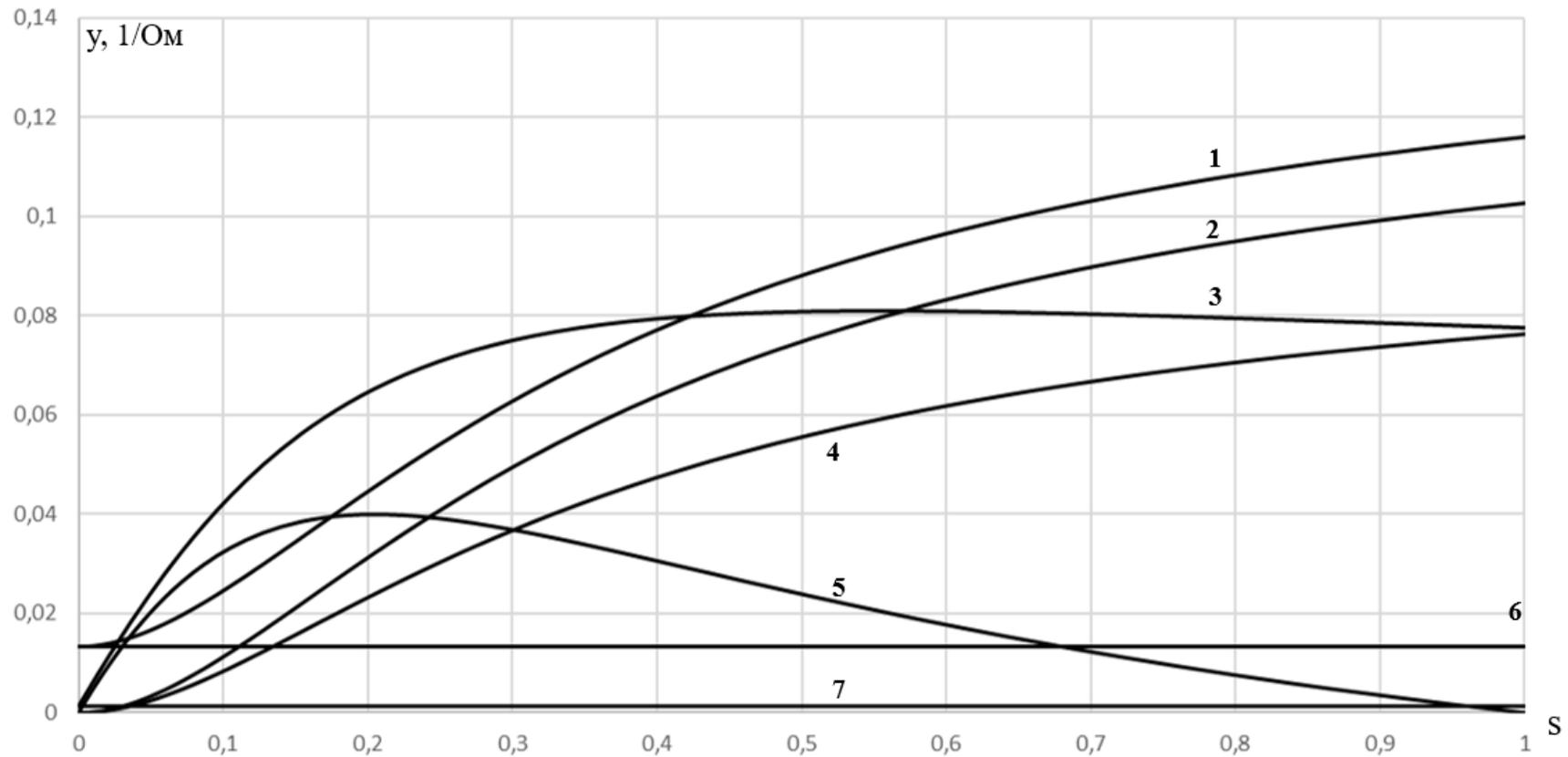


Рисунок 2.11 – Зависимости проводимостей одной фазы двигателя АИР100S4 от скольжения ротора  $s$ :

- 1 – суммарное значение индуктивной проводимости фазы  $b$ ,  $1/\text{Ом}$ ; 2 – индуктивная проводимость цепи ротора  $b_{2s}$ ,  $1/\text{Ом}$ ;  
 3 – суммарное значение активной проводимости фазы  $q$ ,  $1/\text{Ом}$ ; 4 – активная проводимость цепи ротора  $q_{2k}$ ,  $1/\text{Ом}$ ;  
 5 – активная проводимость цепи ротора  $q_{2s}$ ; 6 – индуктивная проводимость цепи намагничивания статора  $b_1$ ,  $1/\text{Ом}$ ;  
 7 – активная проводимость цепи намагничивания обмотки статора  $q_1$ ,  $1/\text{Ом}$

Сравнительный анализ кривых на рисунке 2.11 показывает, что активная проводимость цепи ротора, кривая 5 (по которой определяется электрическая мощность, выделяемая на эквивалентной нагрузке ротора), имеет экстремальные точки. Определить значение скольжения ротора в экстремальных точках можно при решении уравнения, приравняв первую производную к нулю:

$$\frac{dq_{2s}}{ds} = 0. \quad (2.54)$$

При решении уравнения 2.54 найдена зависимость критического скольжения преобразования электрической энергии в механическую:

$$s_{кр1} = \frac{-R_2^2 + R_2 \sqrt{(R_1 + R_2)^2 + X_{2k}^2}}{R_1^2 + 2R_1R_2 + X_{2k}^2}. \quad (2.55)$$

Максимальное значение активной электрической мощности, выделяемой на эквивалентной нагрузке ротора, достигается при скольжении двигателя  $s_{кр1}$ .

Величина активной проводимости фазы  $q$ , по которой определяется активная мощность асинхронного двигателя, имеет максимум, который можно определить при решении уравнения:

$$\frac{dq}{ds} = 0. \quad (2.56)$$

При решении уравнения (3.26) определено значение критического скольжения активной проводимости фазы  $q$ :

$$s_{кр2} = \frac{R_2}{X_{2k} - R_1}. \quad (2.57)$$

Критические точки являются не единственным важным фактором, также необходимо учитывать ограничение использования асинхронного двигателя в пределах номинального тока. Номинальные данные двигателя АИР100S4 позволяют определить полную проводимость фазы:

$$y = \frac{I_{\phi H}}{U_{\phi H}}. \quad (2.58)$$

При номинальном скольжении ротора  $s_H = 0,06$  получено расчетное значение полной проводимости  $y_{рас} = 0,0318$  1/Ом.

При условии, что расчетная проводимость составляет  $0,0318 \text{ 1/Ом}$ , возможно выделить рабочую зону, где проводимость ограничена скольжением ротора на уровне  $0,1$  (с учетом возможности перегрузки асинхронного двигателя).

На рисунке 2.12, графики проводимостей были построены для анализа зависимостей фазы проводимости в рабочем диапазоне изменения скольжения ротора от  $0$  до  $0,1$ . Этот диапазон изменения скольжения представляет интерес для анализа.

При анализе зависимостей на рисунке 2.12 и проведении теоретического исследования проводимостей асинхронного двигателя (см. выражения 2.18 – 2.22), было установлено, что активная проводимость прямо пропорциональна скольжению ротора (см. линию 3 на рис. 2.12 и формулу 2.31), в то время как индуктивная проводимость имеет слабую зависимость, поскольку содержит постоянную составляющую (см. линию 1 на рис. 2.12 и формулу 2.32).

С учетом вышеуказанных особенностей, была сформулирована гипотеза о возможности изменения соотношения активной и индуктивной составляющих тока в асинхронном двигателе в пределах номинального значения тока фазы. Это достигается путем одновременного изменения амплитуды и частоты напряжения сети, подводимого к фазе асинхронного двигателя, что в конечном итоге позволяет изменять показатели энергоэффективности работы данного двигателя [17, 30, 31, 32].

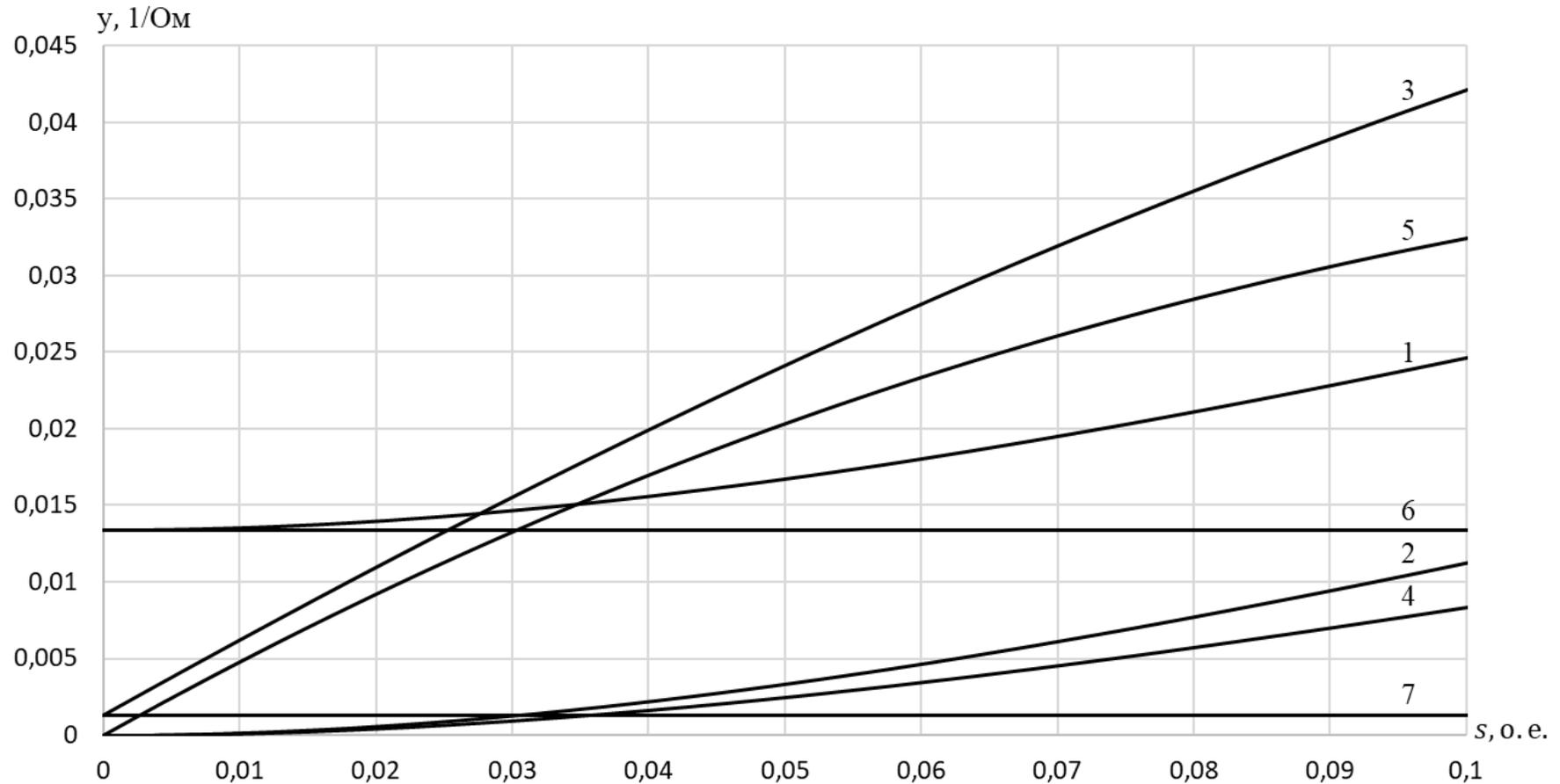


Рисунок 2.12 – Зависимости проводимостей одной фазы двигателя АИР100S4 от скольжения ротора  $s$ :

- 1 – суммарное значение индуктивной проводимости фазы  $b$ ,  $1/\text{Ом}$ ; 2 – индуктивная проводимость цепи ротора  $b_{2s}$ ,  $1/\text{Ом}$ ;  
 3 – суммарное значение активной проводимости фазы  $q$ ,  $1/\text{Ом}$ ; 4 – активная проводимость цепи ротора  $q_{2k}$ ,  $1/\text{Ом}$ ;  
 5 – активная проводимость цепи ротора  $q_{2s}$ ; 6 – индуктивная проводимость цепи намагничивания статора  $b_1$ ,  $1/\text{Ом}$ ;  
 7 – активная проводимость цепи намагничивания обмотки статора  $q_1$ ,  $1/\text{Ом}$

## 2.4 Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя, выраженная через проводимости статора и ротора, по каталожным данным

Проведение опытов для определения параметров схемы замещения двигателя и выполнение точных измерений не всегда возможно, особенно в тех случаях, когда двигатель смонтирован с нагрузкой в общем корпусе. Поэтому одной из ключевых задач при разработке асинхронного электропривода является определение параметров схемы замещения АД, показанной на рисунке 2.5.

Известен ряд научных подходов, позволяющих определить параметры схемы замещения АД по паспортным данным. Методы расчета параметров схемы замещения представлены в работах [49, 64, 65, 75, 77, 122]. Для получения результатов используются методы подбора и упрощения расчетов, а проверка результатов осуществляется по справочнику практически для всех работ.

Для определения параметров схемы замещения АД, по справочным техническим данным, двигателя воспользуемся методикой изложенной в [77], предложенной Мощинским Ю.А., Беспаловым В.Я., Кирякиным А.А. Предлагаемая методика основана на общепринятых в теории электрических машин допущениях и следующих приводимых в каталогах данных двигателя:  $P_H$  – номинальная полезная мощность на валу, кВт;  $U_d$  – номинальное линейное напряжение, В;  $s_H$  – номинальное скольжение (или  $\omega_H$  – номинальная скорость, рад/с);  $K_m = M_{\max} / M_H$  – кратность максимального момента;  $K_{\Pi} = M_{\text{пуск}} / M_H$  – кратность пускового момента;  $K_i = I_{\text{пуск}} / I_H$  – кратность пускового тока;  $\eta_H, \cos\varphi_H$  – КПД и коэффициент мощности в номинальном режиме;  $\eta_p, \cos\varphi_p$  – КПД и коэффициент мощности в режиме частичной загрузки.

Используя известные из электротехники формулы преобразования в электрических цепях, получены выражения для определения параметров схемы замещения АД (рис. 2.5):

активная проводимость цепи намагничивания ( $q_1, 1/\text{Ом}$ ):

$$q_1 = \frac{P_M I_0^2}{E_1^2 I_0^2 + P_M^2}, \quad (2.59)$$

индуктивная проводимость цепи намагничивания ( $b_1$ , 1/Ом):

$$b_1 = \frac{E_1 I_0^3}{E_1^2 I_0^2 + P_M^2}, \quad (2.60)$$

индуктивная проводимость рассеяния цепи ротора ( $b_{2s}$ , 1/Ом):

$$b_{2s} = \frac{Bs^2 \sqrt{1 - 1,44Bs_K} \cdot (1,2s_K + 1)}{A(2,4s_K^2 Bs + s_K^2 + s^2)}, \quad (2.61)$$

активная проводимость цепи ротора, по которой определяются потери активной мощности в фазе ( $q_{2k}$ , 1/Ом):

$$q_{2k} = \frac{Bs^2 s_K (1,2B + 1)(1,2s_K + 1)}{A(2,4s_K^2 Bs + s_K^2 + s^2)}, \quad (2.62)$$

активная проводимость цепи ротора, по которой определяется активная составляющая тока, и мощности при преобразовании электрической мощности в механическую ( $q_{2s}$ , 1/Ом):

$$q_{2s} = \frac{s_K (s - 1)(1,2s_K + 1)Bs}{A(2,4s_K^2 Bs + s_K^2 + s^2)}. \quad (2.63)$$

Где критическое скольжение ( $s_K$ , о.е.):

$$s_K = \frac{s_H \left( K_m + \sqrt{K_m^2 - 1 - 2,4s_H (K_m - 1)} \right)}{1 - 2,4s_H (K_m - 1)},$$

магнитные потери ( $P_M$ , Вт):

$$P_M = 0,66 \left( \Delta P_H - \frac{3I_s^2 (\Delta P_n - \Delta P_p)}{3(I_s^2 - I_p^2)} \right),$$

суммарные потери для номинального режим ( $\Delta P_n$ , Вт):

$$\Delta P_H = P_H \left( \frac{1}{\eta} - 1 \right) - \frac{0,005P_H}{\eta},$$

суммарные потери для режима с нагрузкой  $p$  ( $\Delta P_p$ , Вт):

$$\Delta P_p = P_p \left( \frac{1}{\eta_p} - 1 \right) - \frac{0,005P_p}{\eta_p},$$

номинальный ток ( $I_s$ , А):

$$I_s = \frac{P_H}{\sqrt{3}U_L \eta_H \cos \varphi_H},$$

ток при частичной нагрузке  $p$  ( $I_p$ , А):

$$I_p = \frac{pP_H}{\sqrt{3}U_L\eta_p\cos\varphi_p},$$

ЭДС ветви намагничивания в номинальном режиме ( $E_1$ , В):

$$E_1 = \sqrt{\left(\frac{\cos\varphi_H U_L}{\sqrt{3}} - \frac{1,2U_L(1-s_H)K_i I_S^2}{K_m P_H(1,2+s_K^{-1})(2K_i I_S + I_0)}\right)^2 + \left(\frac{0,54U_L}{\sqrt{3}} - X_1 I_S\right)^2},$$

$$X_1 = \frac{0,42U_L(1-s_H)K_i I_S}{K_m P_H(1,2+s_K^{-1})(2K_i I_S + I_0)} \sqrt{\left(\frac{2K_i I_S}{s_K(2K_i I_S + I_0)}\right)^2 - 1,44},$$

ток холостого хода ( $I_0$ , А) и коэффициенты А, В определяются по выражениям:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_p^2 - \left(\frac{I_S p(1-s_H)}{1-p s_H}\right)^2}{1 - \left(\frac{p(1-s_H)}{1-p s_H}\right)^2}}, A = \frac{U_L(1-s_H)K_i I_S}{K_m P_H(2K_i I_S + I_0)}, B = \frac{2K_i I_S + I_0}{2K_i I_S}.$$

Разработан алгоритм (рис. 3.6) для определения параметров схемы замещения АД, выраженной через проводимости статора и ротора, по справочным техническим данным. По приведенной выше методике, формулы 2.59 – 2.63 и согласно алгоритму, рисунок 2.13, были определены параметры схемы замещения для асинхронного двигателя серии АИР, результаты представлены в таблице 2.5, которые сравнивались с параметрами, заложенным в проектные расчеты (табл. 2.4).

Таблица 2.4 – Энергетические показатели и параметры схемы замещения электродвигателя

Типоразмер электродвигателя	Энергетические показатели									
	КПД, % при $P_2/P_{2ном}$ ,					$\cos\varphi$ , % при $P_2/P_{2ном}$				
	0,25	0,5	0,75	1	1,25	0,25	0,5	0,75	1	1,25
АИР100S4	75,5	82,0	83,0	82,0	79,5	0,43	0,65	0,77	0,83	0,85

Продолжение таблицы 2.4

Параметры схемы замещения, о.е.				
$X_M$	в номинальном режиме работы			
	$R'_1$	$X'_1$	$R''_2$	$X''_2$
2,1	0,098	0,076	0,060	0,13

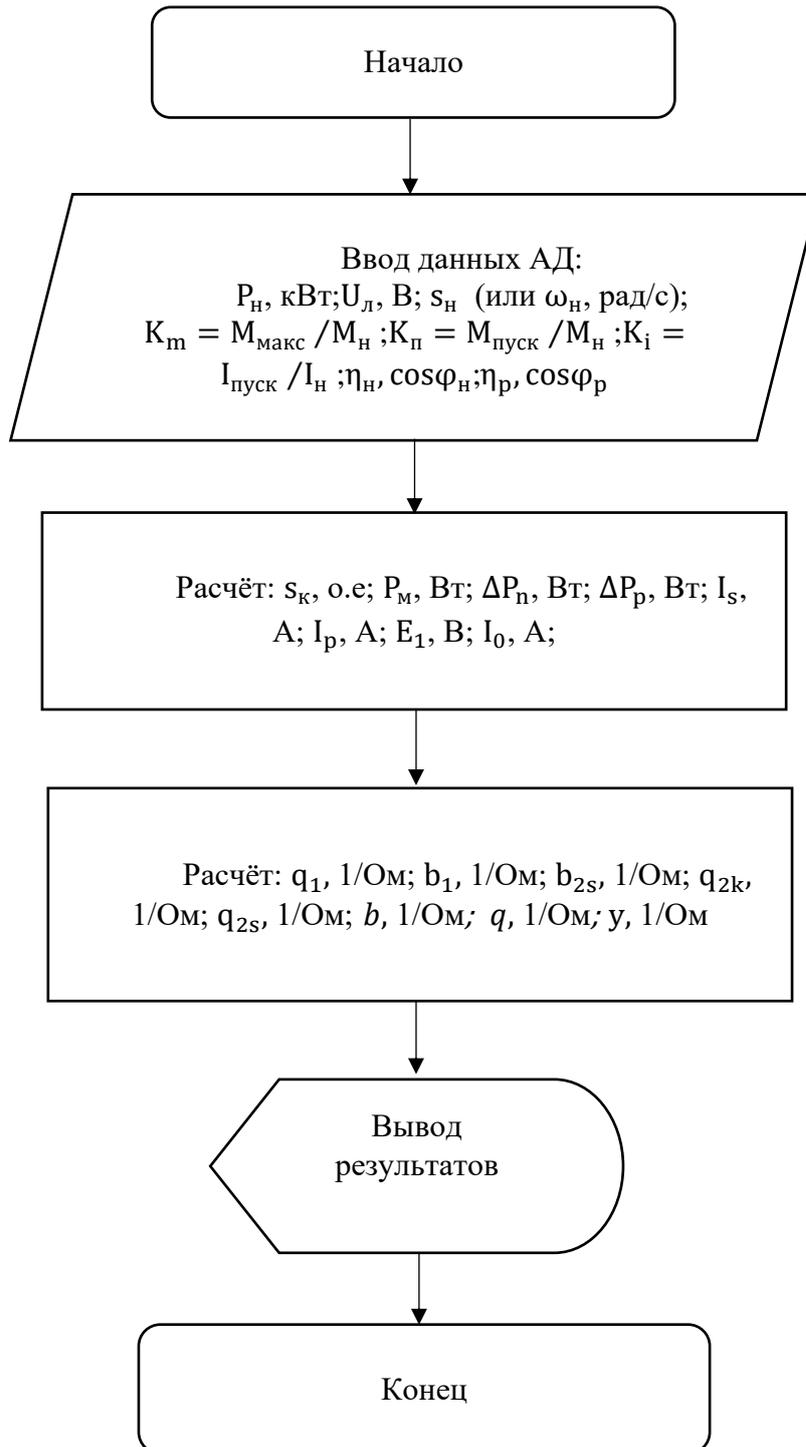


Рисунок 2.13 – Алгоритм расчета параметров схемы замещения АД, выраженный через проводимости статора и ротора

Параметры схемы замещения (рис. 2.5), заложенные в проектные расчеты, определяются выражениям:

$$q_1 = \frac{R_1}{R_1^2 + (X_0 + X_M)^2}, b_1 = \frac{X_1}{R_1^2 + (X_0 + X_M)^2}, b_{2s} = \frac{X'_1 + X''_2}{\left(R_1 + \frac{R''_2}{s}\right)^2 + (X'_1 + X''_2)^2},$$

$$q_{2k} = \frac{R'_1 + R''_2}{\left(R'_1 + \frac{R''_2}{s}\right)^2 + (X'_1 + X''_2)^2}, q_{2s} = \frac{R''_2 \cdot \frac{(1-s)}{s}}{\left(R'_1 + \frac{R''_2}{s}\right)^2 + (X'_1 + X''_2)^2}. \quad (2.64)$$

Где параметры цепи намагничивания определяются по выражениям:

$$X_0 = \frac{2X'_1 X_M}{X_M + \sqrt{X_M^2 + 4X'_1 X_M}}, R_1 = \frac{R'_1 X_0}{X'_1}.$$

Перевод сопротивлений в абсолютные единицы выполняется путем умножения на базовое значение проводимости ( $y_{\text{баз}}, 1/\text{Ом}$ ):

$$y_{\text{баз}} = \frac{I_{\text{фн}}}{U_{\text{фн}}}.$$

По приведенной выше методике были определены параметры двигателя АИР100S4. В таблице 2.5 представлены параметры, рассчитанные по каталожным данным и заложенные в проектные расчеты.

Таблица 2.5 – Проводимости фазы асинхронного двигателя АИР100S4, заложенные в проектные расчеты и рассчитанные по каталожным данным

Параметры схемы замещения	$q_1 \cdot 10^3, 1/\text{Ом}$	$b_1 \cdot 10^3, 1/\text{Ом}$	$b_{2s} \cdot 10^3, 1/\text{Ом}$	$q_{2k} \cdot 10^3, 1/\text{Ом}$	$q_{2s} \cdot 10^3, 1/\text{Ом}$
Заложенные в проектные расчеты	0,327	12,011	7,707	4,012	25,429
Рассчитанные по каталожным данным	0,341	11,408	7,988	4,128	25,224
Относительные погрешности расчёта, %	4,23	-5,02	3,65	2,89	-0,80

В таблице 2.6 представлены расчетные значения проводимостей фазы, коэффициента полезного действия, коэффициента мощности АД 4А100S4 в

зависимости от скольжения, рассчитанные по каталожным данным, согласно выражениям 3.34.

Таблица 2.6 – Расчетные данные проводимостей фазы, коэффициента полезного действия, коэффициента мощности асинхронного двигателя 4А100S4 в зависимости от скольжения ротора

$P_2/P_{2ном}$	$q_1, 1/Ом$	$b_1, 1/Ом$	$b_{2s}, 1/Ом$	$q_{2k}, 1/Ом$	$q_{2s}, 1/Ом$
0,5	0,00034	0,01141	0,00175	0,00091	0,01324
0,75	0,00034	0,01141	0,00427	0,00220	0,01961
1	0,00034	0,01141	0,00799	0,00413	0,02522
1,25	0,00034	0,01141	0,01384	0,00715	0,03042

Продолжение таблицы 2.6

$P_2/P_{2ном}$	$q, 1/Ом$	$b, 1/Ом$	$y, 1/Ом$	$\cos\varphi, \%$	КПД, %
0,5	0,01448	0,01316	0,01957	74,01	91,39
0,75	0,02216	0,01567	0,02714	81,64	88,51
1	0,02969	0,01940	0,03547	83,72	84,95
1,25	0,03791	0,02525	0,04555	83,23	80,24

По расчетным значениям проводимостей фазы рассчитаны энергетические показатели асинхронного двигателя: коэффициента полезного действия, коэффициента мощности в зависимости от нагрузки (рис. 2.14).

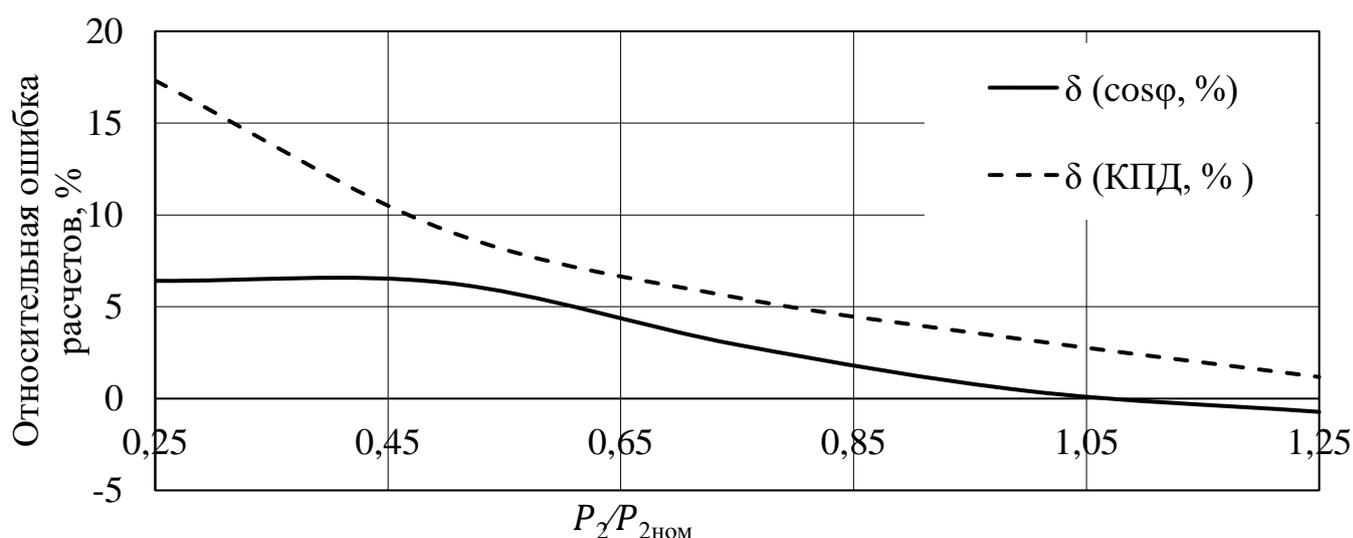


Рисунок 2.14 – Относительные погрешности расчёта энергетических показателей двигателей АИР100S4 в диапазоне нагрузок  $0,25 - 1,25P_{2ном}$

Из полученных зависимостей (рис. 2.14), следует, что относительная погрешность расчетов увеличивается при изменении нагрузки относительно номинальной. Дальнейшее исследование выявило, что это объясняется тем, что рассматриваемые схемы не учитывают механические потери и изменения сопротивления ротора вследствие вытеснения тока в стержнях и насыщения коронок зубцов ротора.

При изменении скольжения сопротивления ротора изменяются вследствие вытеснения тока в стержнях и насыщения коронок зубцов ротора. На данном этапе принято решение ввести функции, полученные аппроксимацией усредненных зависимостей коэффициентов, приведенных в работах Иванова-Смоленского [54]:

$$R'_2(s) = \begin{cases} R'_{2n}; & 0 \leq s \leq s_H; \\ R_a + R_b f_1(s). & s_H \leq s \leq 1. \end{cases} \quad (2.65)$$

$$X'_2(s) = \begin{cases} X'_{2n}; & 0 \leq s \leq s_H; \\ X_a + X_b f_2(s). & s_H \leq s \leq 1. \end{cases} \quad (2.66)$$

$$R_a = \frac{R'_{2n} - R'_{2\Pi} f_1(s_H)}{1 - f_1(s_H)}; \quad R_b = \frac{R'_{2\Pi} - R'_{2n}}{1 - f_1(s_H)}; \quad (2.67)$$

$$X_a = \frac{X'_{2n} - X'_{2\Pi} f_1(s_H)}{1 - f_2(s_H)}; \quad X_b = \frac{X'_{2\Pi} - X'_{2n}}{1 - f_2(s_H)}. \quad (2.68)$$

После аппроксимации зависимостей 2.65 – 2.68 получены функциональные зависимости коэффициентов, учитывающие изменение сопротивления ротора:

$$\begin{cases} f_1(s) = \frac{0,0182s - 0,375s^2 + s^2\sqrt{s}}{0,035 + 0,612s^2\sqrt{s}} \\ f_2(s) = \frac{0,0358 - 0,556s^2 + s^2\sqrt{s}}{0,0187 - 0,0151s^2 + 0,446s^2\sqrt{s}} \end{cases} \quad (2.69)$$

Уточненная схема замещения одной фазы асинхронного двигателя, выраженная через проводимости статора и ротора, представлена на рисунке 2.15.

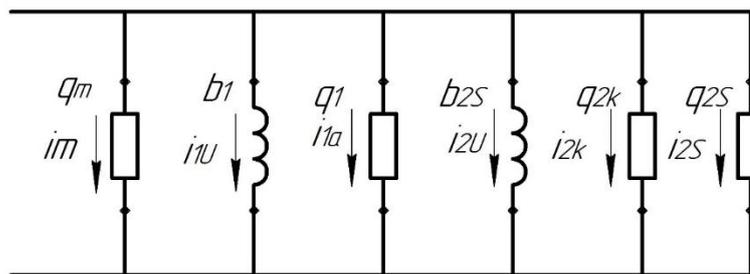


Рисунок 2.15 – Уточненная схема замещения одной фазы асинхронного двигателя, выраженная через проводимости статора и ротора

В ранее представленный алгоритм (рис. 2.13) расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя, добавлены коэффициенты, учитывающие изменение сопротивления ротора, формула 2.69, что позволило повысить точность расчета параметров схемы замещения АД.

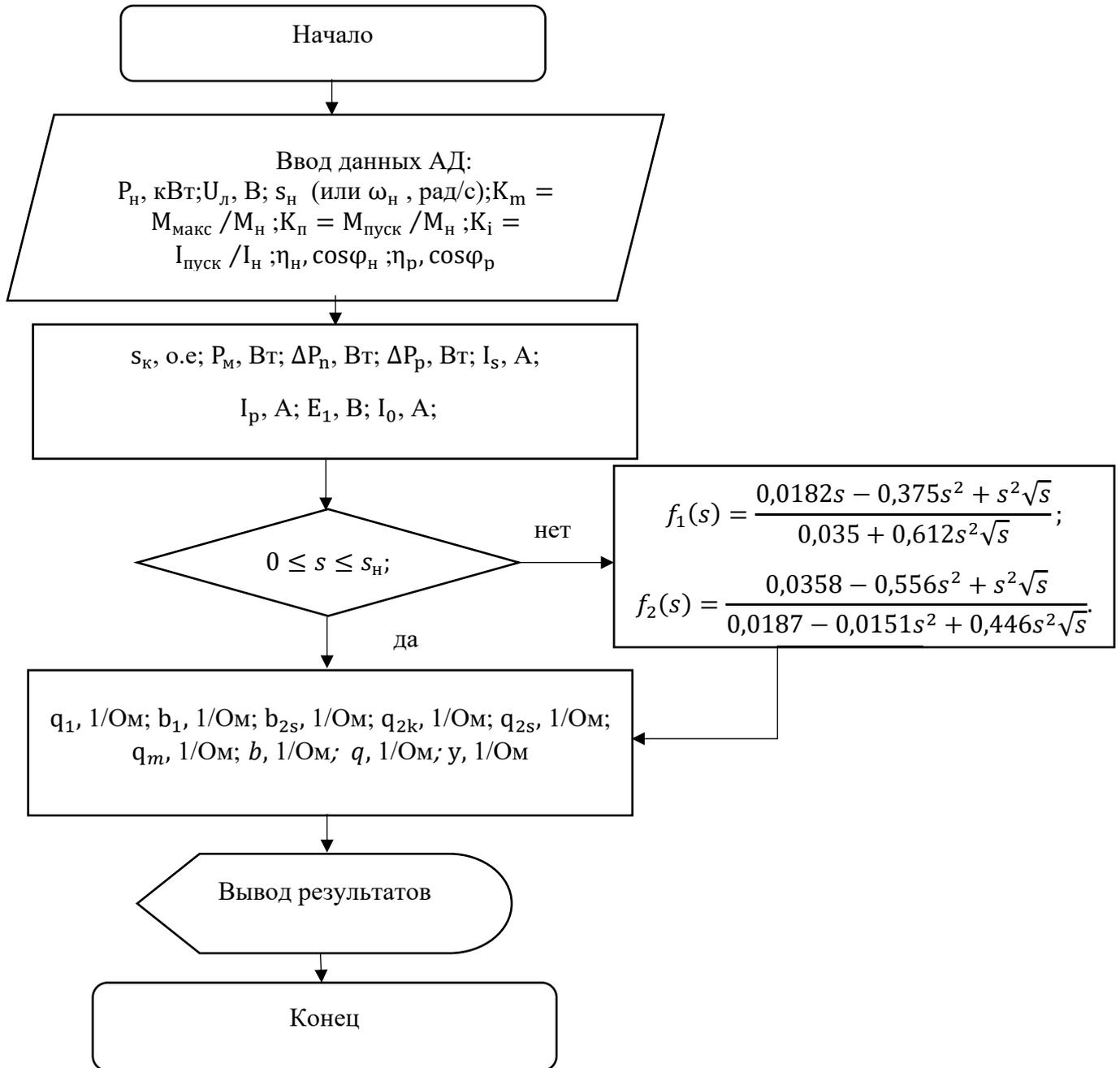


Рисунок 2.16 – Алгоритм расчета параметров уточненной схемы замещения АД, выраженной через проводимости статора и ротора

По разработанному алгоритму (рис. 2.16), были определены параметры АД

мощностью 3 кВт серии АИР. Проводимости схемы замещения одной фазы АД АИР100S4 определяются по параметрам схемы замещения, рисунок 2.15:

активная проводимость цепи намагничивания,  $q_1$ , 1/Ом:

$$q_1 = \frac{4,3298}{18,747 + 1,7612f^2}, \quad (2.70)$$

индуктивная проводимость цепи намагничивания,  $b_1$ , 1/Ом:

$$b_1 = \frac{1.3271f}{18,747 + 1,7612f^2}, \quad (2.71)$$

индуктивная проводимость рассеяния цепи ротора,  $b_{2s}$ , 1/Ом:

$$b_{2s} = \frac{0,12439f}{\left(\frac{4,3298s - 2.2869}{s^2}\right)^2 + 0,015475f^2}, \quad (2.72)$$

активная проводимость цепи ротора, по которой определяются потери активной мощности в фазе,  $q_{2k}$ , 1/Ом:

$$q_{2k} = \frac{4,275s^2}{12,114s^2 + 12,797s + 3,3798 + 0,01s^2f^2}, \quad (2.73)$$

активная проводимость цепи ротора, по которой определяется активная составляющая тока, и мощности при преобразовании электрической мощности в механическую,  $q_{2s}$ , 1/Ом:

$$q_{2s} = \frac{2,2869(1-s)}{s \left( \left( \frac{4,3298s - 2.2869}{s^2} \right)^2 + 0,015475f^2 \right)}, \quad (2.74)$$

активная проводимость, по которой определяются механические потери асинхронного двигателя,  $q_m$ , 1/Ом:

$$q_m = 0,78906 \cdot 10^{-3}. \quad (2.75)$$

Зависимости проводимостей одной фазы двигателя АИР100S4 от скольжения и частоты питающего напряжения, построены по выражениям 2.70 - 2.75, представлены на рисунках 2.17-2.22.

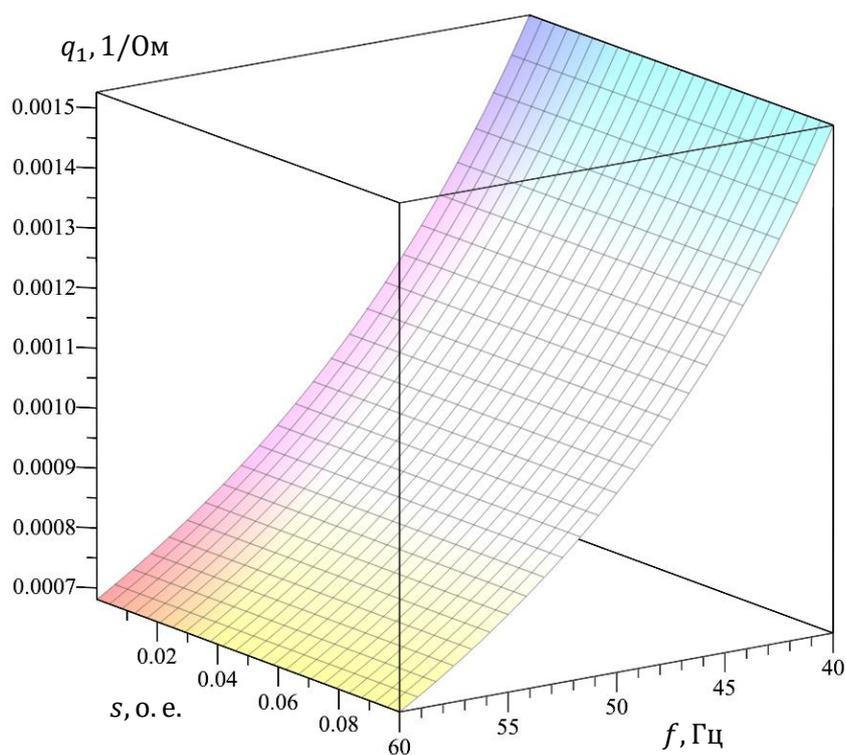


Рисунок 2.17 – Активная проводимость цепи намагничивания,  $q_1$ , 1/Ом, схемы замещения одной фазы АД, выраженной через проводимости статора и ротора

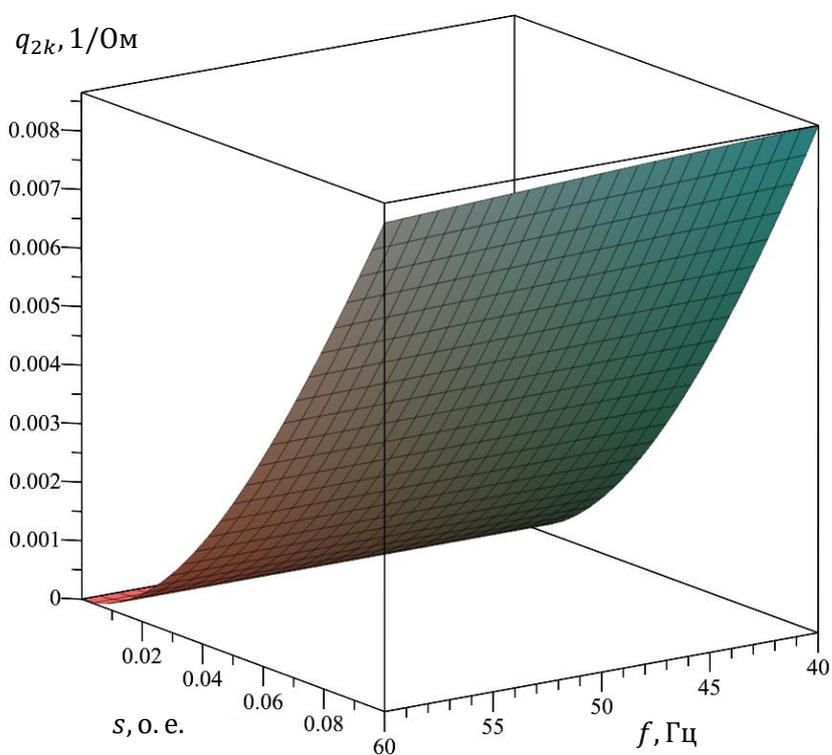


Рисунок 2.18 – Активная проводимость цепи ротора, по которой определяются потери активной мощности в фазе,  $q_{2k}$ , 1/Ом, схемы замещения одной фазы АД, выраженной через проводимости статора и ротора

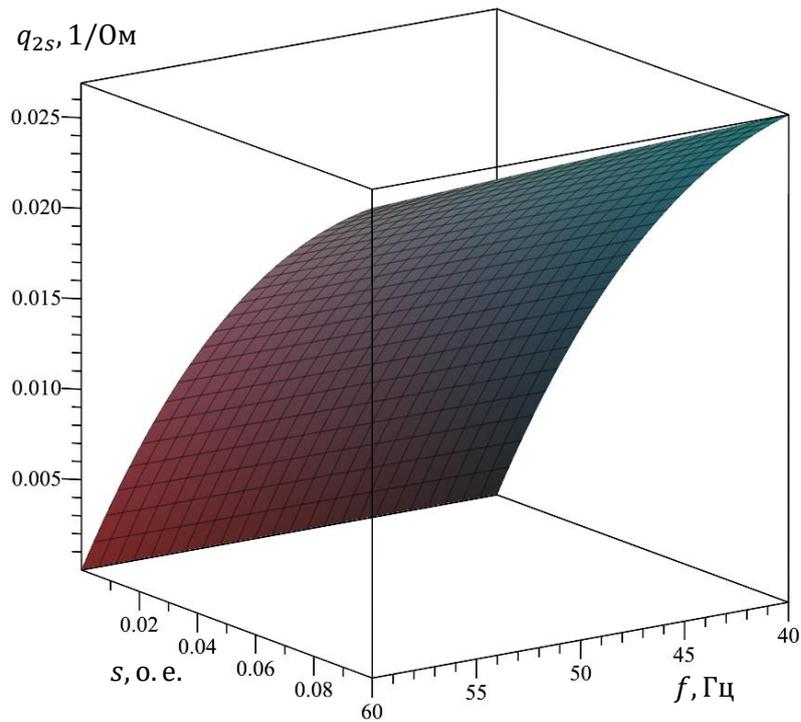


Рисунок 2.19 – Активная проводимость цепи ротора, по которой определяется активная составляющая тока, и мощности при преобразовании электрической мощности в механическую,  $q_{2s}$ , 1/Ом, схемы замещения одной фазы АД, выраженной через проводимости статора и ротора

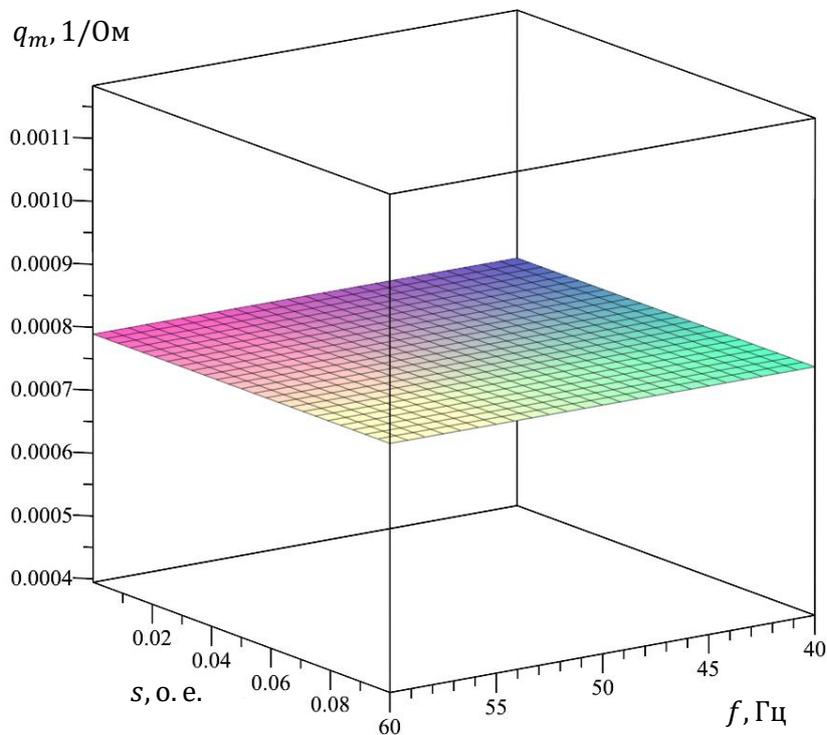


Рисунок 2.20 – Активная проводимость цепи ротора, по которой определяются механические потери,  $q_m$ , 1/Ом, схемы замещения одной фазы АД, выраженной через проводимости статора и ротора

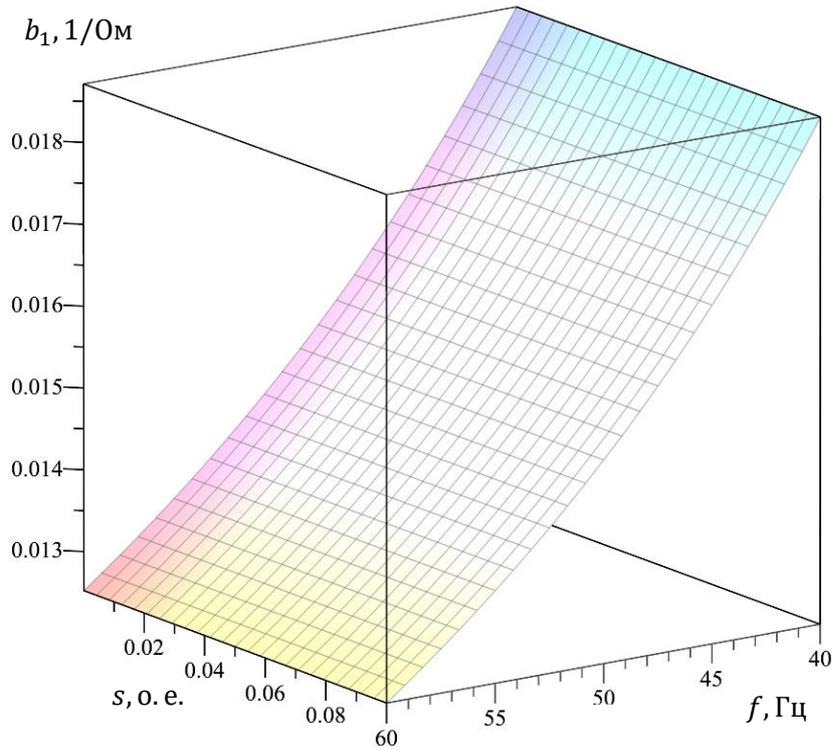


Рисунок 2.21 – Индуктивная проводимость цепи намагничивания,  $b_1$ ,  $1/\Omega$ , схемы замещения одной фазы АД, выраженной через проводимости статора и ротора

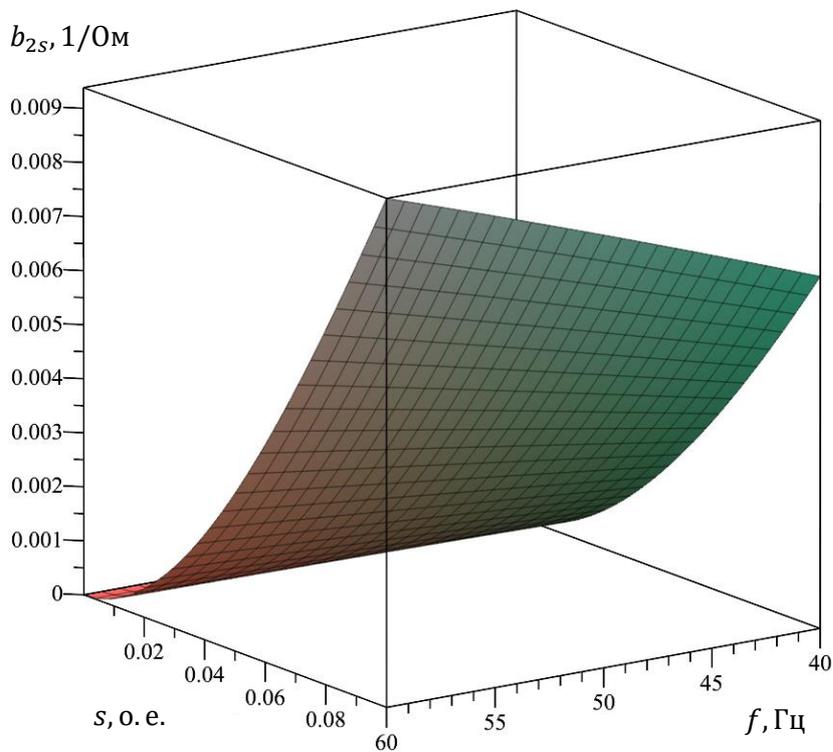


Рисунок 2.22 – Индуктивная проводимость рассеяния цепи ротора,  $b_{2s}$ ,  $1/\Omega$ , схемы замещения одной фазы АД, выраженной через проводимости статора и ротора

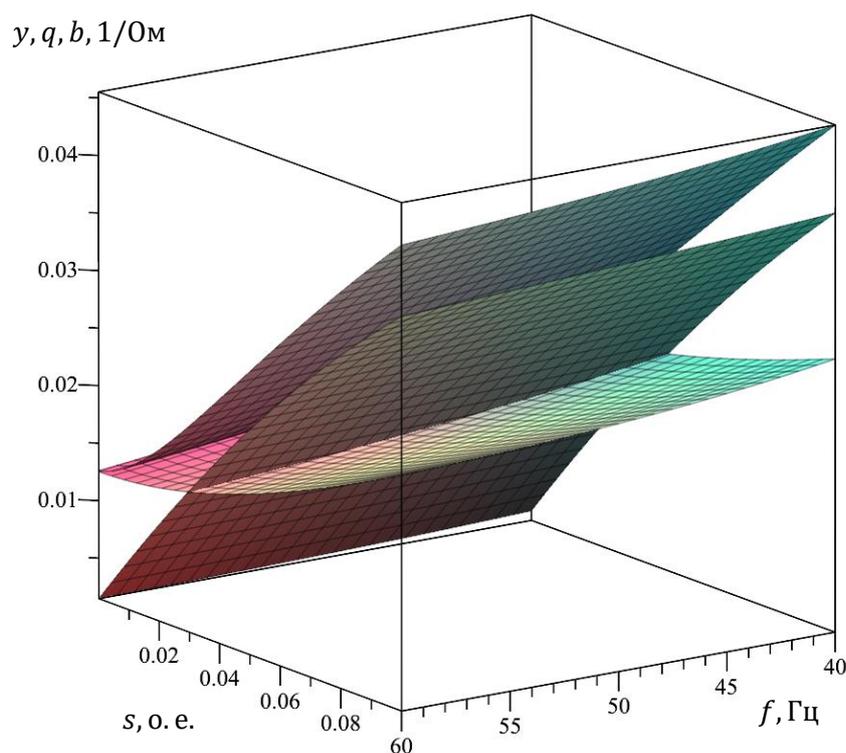


Рисунок 2.23 – Полная проводимости фазы  $y$ ,  $1/\text{Ом}$ , суммарное значение активной проводимости фазы  $q$ ,  $1/\text{Ом}$ ; суммарное значение индуктивной проводимости фазы  $b$ ,  $1/\text{Ом}$

Реактивная мощность асинхронного двигателя состоит из двух компонент: реактивная мощность намагничивания  $Q_{1k}$ , которая зависит от проводимости  $b_1$  и используется для создания магнитного потока, а также реактивная мощность полей рассеяния  $Q_{2k}$ , которая зависит от проводимости  $b_{2s}$ :

$$Q_{\text{Ад}} = Q_{1k} + Q_{2k}. \quad (2.76)$$

Из выражения 2.71 следует, что реактивная мощность  $Q_{1k}$ , определяемая проводимостью  $b_1$ , не зависит от скольжения, в отличие от реактивной мощности  $Q_{2k}$ , определяемая проводимостью  $b_{2s}$ , выражение 2.72, изменяется пропорционально квадрату скольжения асинхронного двигателя.

Проводимости являются функцией скольжения и частоты питающего напряжения. Зависимости проводимостей фазы двигателей серии АИР от нагрузки (Приложение Г), номинальные мощности от 1,1 до 11 кВт приведены на рисунке 2.24.

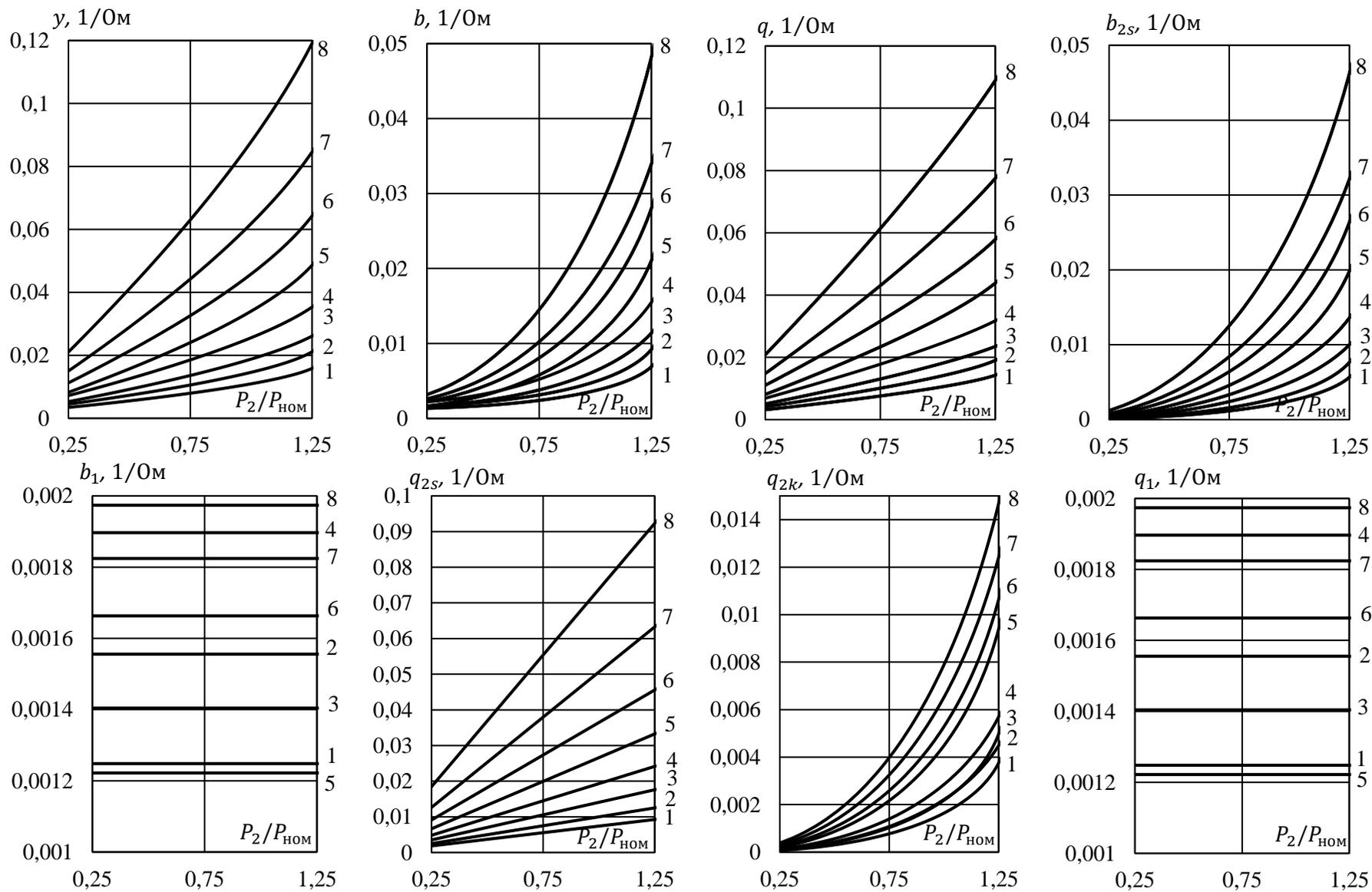


Рисунок 2.24 – Зависимости проводимостей фазы двигателей серии АИР от нагрузки, номинальные мощности АД

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

Графики проводимостей, представленные для двигателя АИР100S4 на рисунке 2.17-2.23, позволяют сделать важное обобщение. Мы можем уверенно утверждать, что эти графики не просто уникальны для данного двигателя, но и применимы для других двигателей общего назначения, рисунок 2.24. Несмотря на различия в параметрах двигателей, они все же подчинены определенной закономерности, которая отражается в соотношении этих параметров для каждого двигателя. Это открытие открывает новые горизонты в области исследования двигателей и может иметь значимое практическое значение для разработки и оптимизации двигателей в различных отраслях. Таким образом, изучение графиков проводимостей становится не только интересной академической задачей, но и важным этапом в оптимизации асинхронных двигателей.

## **2.5 Постановка задачи по снижению потребления электрической энергии асинхронным электроприводом, способы оценки эффективности работы асинхронного двигателя**

Для решения задачи по оптимизации режимов частотно-регулируемого асинхронного электропривода необходимо определить целевую функцию, множество допустимых решений, критерий оптимизации [110-112, 128, 143]. Для регулируемых асинхронных электроприводов основополагающим по энергетическим соображениям и надежности являются потери мощности.

Поставлена цель: реализация энергоэффективных режимов частотно-регулируемых асинхронных двигателей для минимизации энергозатрат в технологических процессах сушки зерна.

Принципиальная схема силовой части преобразователя частоты с промежуточным звеном постоянного тока, нагрузкой которой является асинхронный двигатель, представлена на рисунке 2.25.

В частотно-регулируемом асинхронном двигателе полная мощность  $S$  состоит из активной мощности  $P$ , реактивной мощности  $Q$  и мощности искажения  $T$ . Инвертор состоит из IGBT-транзисторов, преобразующих напряжение

постоянного тока в трёхфазное переменное напряжение с заданной частотой и амплитудой выходного напряжения. Высокая несущая частота транзисторов обеспечивает приближение формы тока двигателя к синусоидальной, и, как следствие, влияние высших гармоник на асинхронный двигатель становится несущественным [8, 9, 55, 137, 139, 149]. В анализе эти составляющие мощности не учитываются, поэтому основополагающим фактором для определения эффективности работы асинхронного двигателя являются потери от протекания активной и реактивной составляющих тока. В звене постоянного тока конденсатор обеспечивает реактивную мощность для создания поля двигателя, в то время как потребляется из сети только активная мощность. Важно отметить, что реактивная мощность не выполняет полезную работу, а служит лишь для формирования магнитных полей в индуктивных элементах. Она циркулирует в электрической цепи между источником электроэнергии и приемниками [39-41].

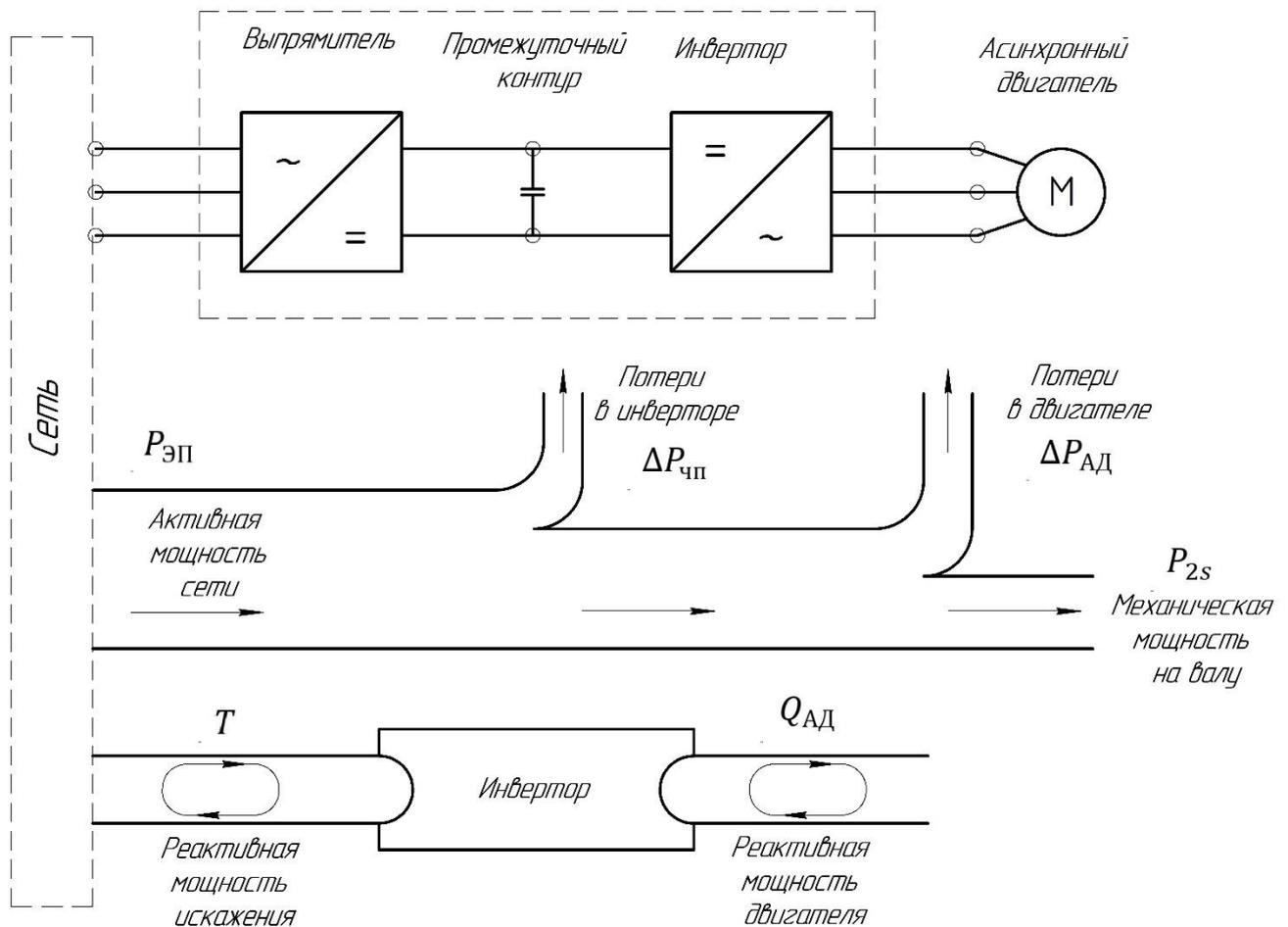


Рисунок 2.25 – Структурная схема: частотный преобразователь – асинхронный двигатель, баланс мощности

КПД электропривода определяется отношением полезной механической мощности на валу  $P_{\text{мех}}$  (с принятыми ранее обозначениями для предлагаемой схемы замещения (рис. 2.15), обозначим  $P_{2s}$ ) к мощности, потребляемой из сети частотным преобразователем электропривода  $P_{\text{ЭП}}$ :

$$\eta_{\text{ЭП}} = \frac{P_{2s}}{P_{\text{ЭП}}}. \quad (2.77)$$

КПД электропривода, содержащего в своем составе преобразователь частоты и асинхронный двигатель, можно выразить как произведение двух составляющих: КПД преобразователя частоты  $\eta_{\text{ПЧ}}$  и КПД асинхронного двигателя  $\eta_{\text{АД}}$ :

$$\eta_{\text{ЭП}} = \eta_{\text{ПЧ}} \eta_{\text{АД}}. \quad (2.78)$$

Так как в данной работе производится оценка энергетической эффективности асинхронного двигателя, КПД частотного преобразователя принимается неизменным и в дальнейшем не анализируется:

$$\eta_{\text{ЭП}} = \eta_{\text{АД}}. \quad (2.79)$$

С учетом вышесказанного можно принять активную мощность, которая потребляется электроприводом:

$$P_{\text{ЭП}} = \Delta P_{\text{АД}} + P_{2s}. \quad (2.80)$$

Одним из путей решения задачи снижения потребления электроэнергии асинхронным электроприводом является уменьшение потерь мощности в самом асинхронном электродвигателе. При  $\cos\varphi$ , для создания активной мощности на валу асинхронного двигателя,  $P_{2s}$ , кВт, к активному току будет добавляться реактивный ток, полный ток при этом:

$$I = \sqrt{I_p^2 + I_a^2}, I = \frac{I_a}{\cos\varphi}. \quad (2.81)$$

Реактивная составляющая тока:

$$I_p = \sqrt{I^2 - I_a^2} = \sqrt{\left(\frac{I_a}{\cos\varphi}\right)^2 - I_a^2} = I_a \sqrt{\left(\frac{1}{\cos\varphi}\right)^2 - 1}. \quad (2.82)$$

Оценим затраты активной мощности в трехфазном асинхронном двигателе от протекания активной и реактивной составляющих тока:

$$P = 3I^2R = 3(I_a^2 + I_p^2)R = P_a + P_p, \quad (2.83)$$

где  $R$  – общее активное сопротивление фазы асинхронного двигателя, Ом.

Потери мощности на активном сопротивлении при протекании по нему реактивной составляющей тока, с учетом выражений (2.82) и (2.83), можно определить по выражению:

$$P_p = 3I_p^2 R = 3 \left( I_a \sqrt{\left(\frac{1}{\cos\varphi}\right)^2 - 1} \right)^2 R = P_a \left( \left(\frac{1}{\cos\varphi}\right)^2 - 1 \right). \quad (2.84)$$

Тогда суммарные затраты активной мощности асинхронного двигателя:

$$P = P_a + P_p = P_a + P_a \left( \left(\frac{1}{\cos\varphi}\right)^2 - 1 \right) = \frac{P_a}{\cos^2\varphi} = \frac{qU_\phi^2}{\cos^2\varphi}, \quad (2.85)$$

где  $q$  – суммарное значение активной проводимости одной фазы асинхронного двигателя ( $q$ , 1/Ом).

КПД двигателя для предложенной схемы замещения определяется отношением активной проводимости цепи ротора, по которой определяется активная составляющая тока, и мощности при преобразовании электрической мощности в механическую ( $q_{2s}$ , 1/Ом), к суммарному значению активной проводимости одной фазы асинхронного двигателя ( $q$ , 1/Ом):

$$\eta = \frac{q_{2s}}{q}, \quad (2.86)$$

Откуда активная проводимость одной фазы асинхронного двигателя:

$$q = \frac{q_{2s}}{\eta}. \quad (2.87)$$

Суммарная активная мощность от протекания активной и реактивной составляющих тока составит, с учетом выражений (2.84) и (2.86):

$$P_{\text{ЭП}} = P = \frac{q_{2s}U_\phi^2}{\cos^2\varphi\eta} = \frac{P_{2s}}{\cos^2\varphi\eta}. \quad (2.88)$$

Таким образом, целевая функция оптимизации:

$$\cos^2\varphi \cdot \eta \Rightarrow \max. \quad (2.89)$$

Для того, чтобы получить максимальную эффективность работы частотно-регулируемого асинхронного электропривода, необходимо исследовать

энергетические показатели коэффициента мощности и полезного действия асинхронного двигателя:

$$\xi = \cos^2 \varphi \cdot \eta. \quad (2.90)$$

В связи с вышесказанным предлагается использовать в качестве показателя эффективности работы асинхронного электропривода в установившихся режимах работы минимальное значение активных потерь двигателя, значение которого определяется отношением произведения активной проводимости цепи ротора  $q_{2s}$  и полной активной проводимости фазы  $q$  к полной проводимости  $y$ , выражение 2.90. Обозначим данное отношение как энергетический коэффициент полезного действия, выраженный в процентах  $\xi, \%$ :

$$\xi = \frac{q \cdot q_{2s}}{y^2} \cdot 100\%. \quad (2.91)$$

Учитывая вышеизложенное, предлагается систему управления асинхронным двигателем реализовать в виде системы регулирования, в качестве показателя энергетической эффективности выбирается максимальное значение энергетического КПД асинхронного двигателя, выражение 2.91, которое соответствует минимальному значению потерь двигателя [22, 23, 33, 34, 152, 153]. Система поиска оптимальных параметров (Приложение Д) разработана на основе предложенной ранее схемы замещения одной фазы асинхронного двигателя, выраженной через проводимости статора и ротора (рис. 2.15).

Для более глубокого исследования составляющих токов двигателя и повышения его эффективности рекомендуется проанализировать не только активные составляющие, но и реактивные составляющие тока асинхронного двигателя. Целью исследования является разработка рекомендаций по уменьшению реактивных составляющих токов и, как следствие, снижению потерь энергии.

Важно отметить, что определение зависимостей каждого из множителей от режима работы, параметров сети и параметров схемы замещения АД требует тщательного анализа и исследования. На основе полученных данных можно будет разработать алгоритмы, которые будут оптимально управлять электродвигателем в различных условиях.

Рассмотрим первый множитель – коэффициент мощности  $\cos\varphi$ , согласно схеме замещения фазы асинхронного двигателя, можно записать:

$$\cos\varphi = \frac{q}{y} = \frac{q_1 + q_{2k} + q_{2s} + q_m}{\sqrt{q^2 + b^2}} = \frac{q_1 + q_{2k} + q_{2s} + q_m}{\sqrt{(q_1 + q_{2k} + q_{2s} + q_m)^2 + (b_1 + b_{2s})^2}}. \quad (2.92)$$

Подставим в выражение 2.92 значения проводимостей асинхронного двигателя в соответствии с формулами 2.70-2.75 и получим зависимость коэффициента мощности от частоты питающего напряжения и скольжения (рис. 2.26).

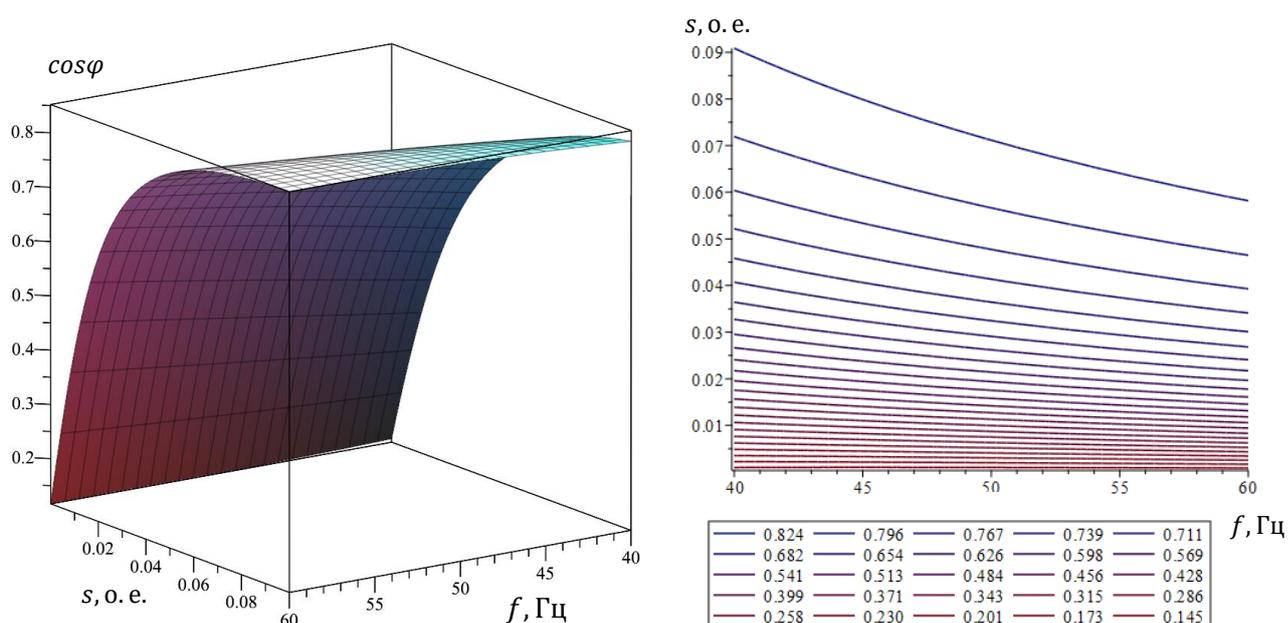


Рисунок 2.26 – Зависимости коэффициента мощности АД АИР100S4 от частоты питающей сети и скольжения

Исследования показали, что резкое уменьшение коэффициента мощности асинхронного двигателя происходит при скольжении ниже 0,05 для двигателя АИР100S4. Графические зависимости, представленные на рисунке 2.26, ясно показывают эту зависимость. При скольжении в пределах 0,06-0,15 наблюдается слабая зависимость коэффициента мощности, и его изменение составляет около 5 % от максимального значения. Это важно учитывать при проектировании и эксплуатации асинхронных двигателей, чтобы минимизировать потери мощности.

Влияние скольжения на коэффициент мощности асинхронного двигателя проявляется слабо в пределах 0,06-0,15, и его изменение составляет около 5 % от

максимального значения. Регулирование асинхронного двигателя рекомендуется проводить в данном диапазоне коэффициента мощности, чтобы избежать резкого увеличения реактивного тока и, следовательно, реактивной мощности.

Для более полного понимания необходимо провести анализ второго множителя – коэффициента полезного действия, и его влияния на энергетический коэффициент полезного действия.

В соответствии с ранее выбранной схемой замещения фазы асинхронного двигателя коэффициент полезного действия:

$$\eta = \frac{q_{2s}}{q_1 + q_{2k} + q_{2s} + q_m}. \quad (2.93)$$

На рисунке 2.27 представлена графическая зависимость коэффициента полезного действия асинхронного двигателя от скольжения и частоты. Эта зависимость рассчитана для двигателя АИР100S4 и отражает математическую связь между этими двумя параметрами.

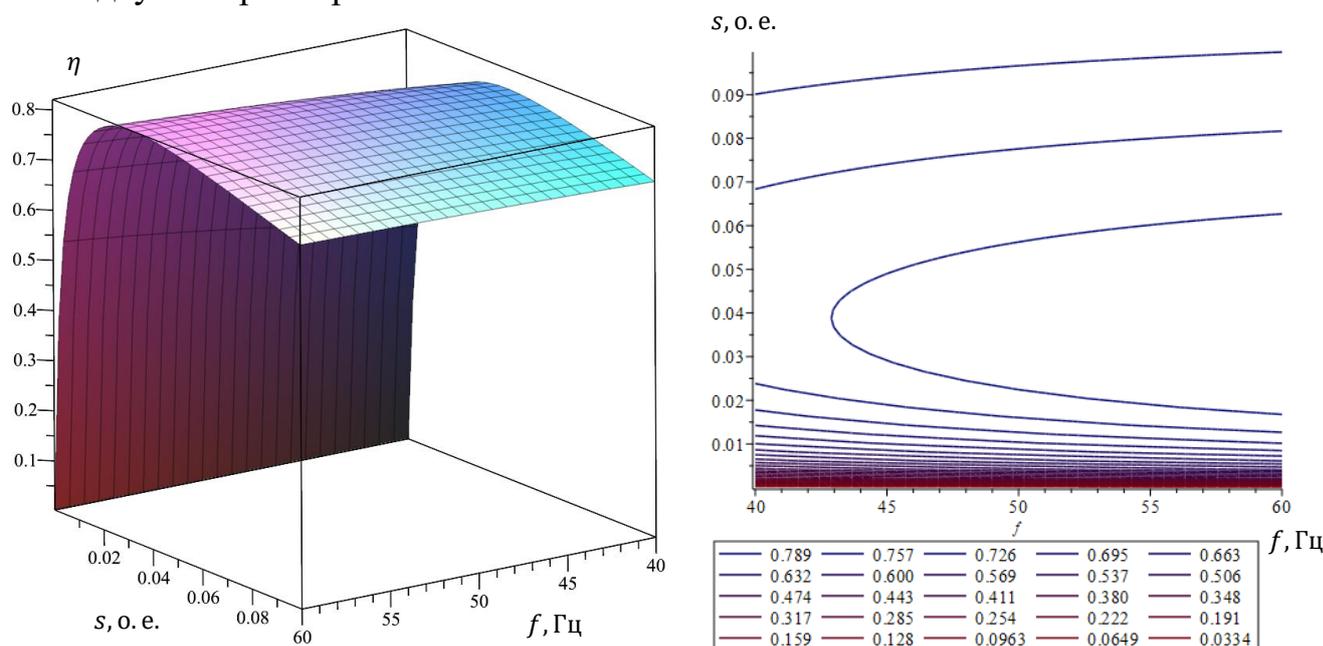


Рисунок 2.27 – Зависимости коэффициента полезного действия АД АИР100S4 от частоты питающей сети и скольжения

При анализе зависимостей, представленных на рисунке 2.27, а также выражений 2.93 и 2.70-2.75, можно сделать вывод о том, что асинхронный двигатель будет иметь наименьшую активную потерю в обмотках статора и ротора при скольжении

в диапазоне от 0.025 до 0.055. Однако уменьшение скольжения ниже 0.01 у асинхронного двигателя типа АИР100S4 приведет к резкому снижению его КПД.

При анализе зависимостей на рисунках 2.26 и 2.27, коэффициента полезного действия и коэффициента мощности от скольжения ротора, можно отметить, что они достигают разных максимумов. Коэффициент полезного действия имеет ярко выраженный максимум, и его зависимость от скольжения более выражена.

Максимальное значение энергетического КПД следует использовать при разработке оптимальной системы управления асинхронным двигателем, учитывая его свойства как электрического преобразователя энергии и потребителя энергии.

$$\xi = \frac{q_{2s}(q_1 + q_{2k} + q_{2s} + q_m)}{(q_1 + q_{2k} + q_{2s} + q_m)^2 + (b_1 + b_{2s})^2}. \quad (2.94)$$

Из формул 2.94 и 2.70-2.75 видно, что энергетический КПД асинхронного двигателя определяется параметрами схемы замещения, частотой питающего напряжения и величиной скольжения (рис. 2.28).

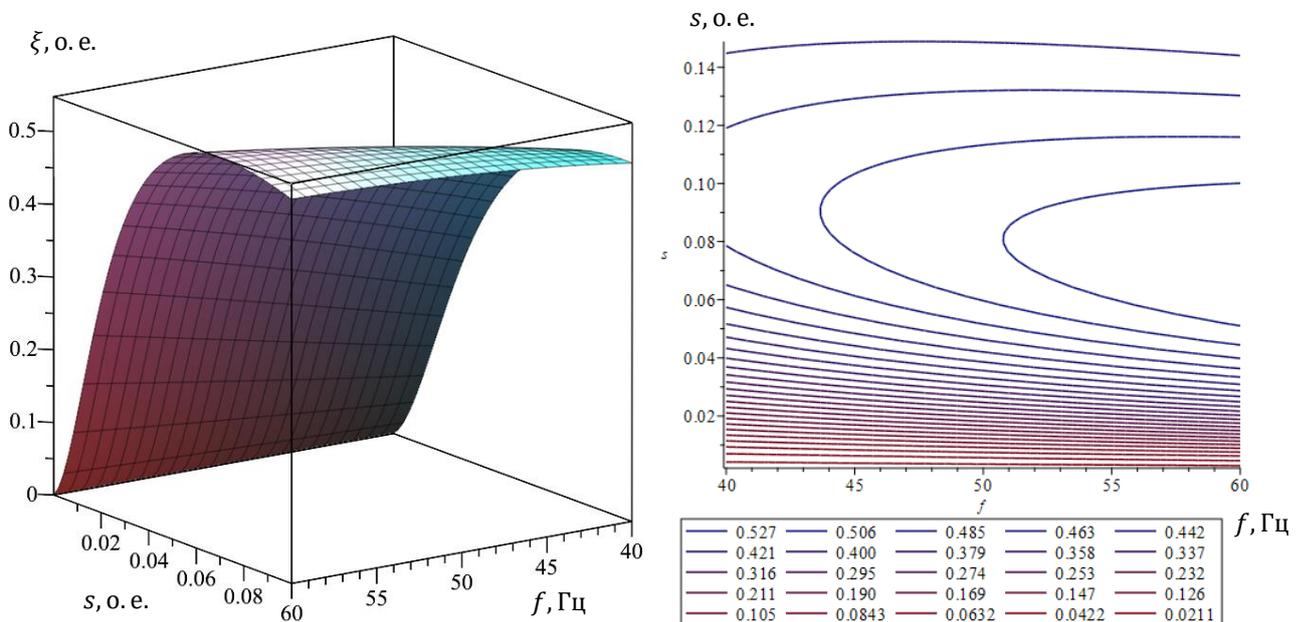


Рисунок 2.28 – Зависимости энергетического коэффициента полезного действия АД АИР100S4 от частоты питающей сети и скольжения

Нахождение оптимальных условий для работы асинхронного двигателя заключается в определении частоты сети и скольжения, обеспечивающих экстремум

функции:

$$\xi = f(f_i, s_i).$$

Определим значение скольжения ротора в экстремальных точках, приравняв первую производную к нулю:

$$\frac{d(\xi)}{ds} = 0. \quad (2.95)$$

При решении уравнения найдена зависимость критического скольжения энергетического КПД:

$$s_\xi = (112,38 - 0,63882\sqrt{(1810,3 + 23,263f)}) \cdot 10^{-3}. \quad (2.96)$$

Анализ выражений 2.96 показывает, оптимальное скольжение не зависит от требуемого момента и от угловой скорости ротора, определяется параметрами схемы замещения асинхронного двигателя и частотой питающей сети.

В результате решения задачи оптимизации потерь в асинхронном электродвигателе получена зависимость частоты питающей сети на базе асинхронного двигателя АИР100S4 от скольжения при условии минимума потерь в обмотках статора и ротора:

$$f_\xi = (105,336s^2 - 23,6753s + 1,2525) \cdot 10^{-3}. \quad (2.97)$$

Анализ характеристик асинхронного двигателя позволяет сделать следующий вывод: для минимизации потерь необходимо регулировать амплитуду напряжения таким образом, чтобы скольжение асинхронного двигателя было равным критическому значению  $s_\xi$  при заданной частоте. Для исследуемого асинхронного двигателя АИР100S4 с частотой сети 50 Гц критическое значение скольжения  $s_\xi$  составляет 0,077.

## **2.6 Разработка частотного управления вентилятора системы послеуборочной обработки зерна**

Система послеуборочной обработки зерна работает с радиальным вентилятором ВР 80-75-6,3. Вентилятор имеет диаметр рабочего колеса  $D_n = 630$  мм, колесо

вращается со скоростью 1450 оборотов в минуту. Вентилятор непосредственно соединен с электродвигателем.

На рисунке 2.29 представлена область аэродинамических характеристик вентилятора ВР 80-75-6,3. Штрихпунктирные линии обозначают линии постоянных значений установочной мощности  $N_y$  двигателей с учетом номинального ряда мощностей.

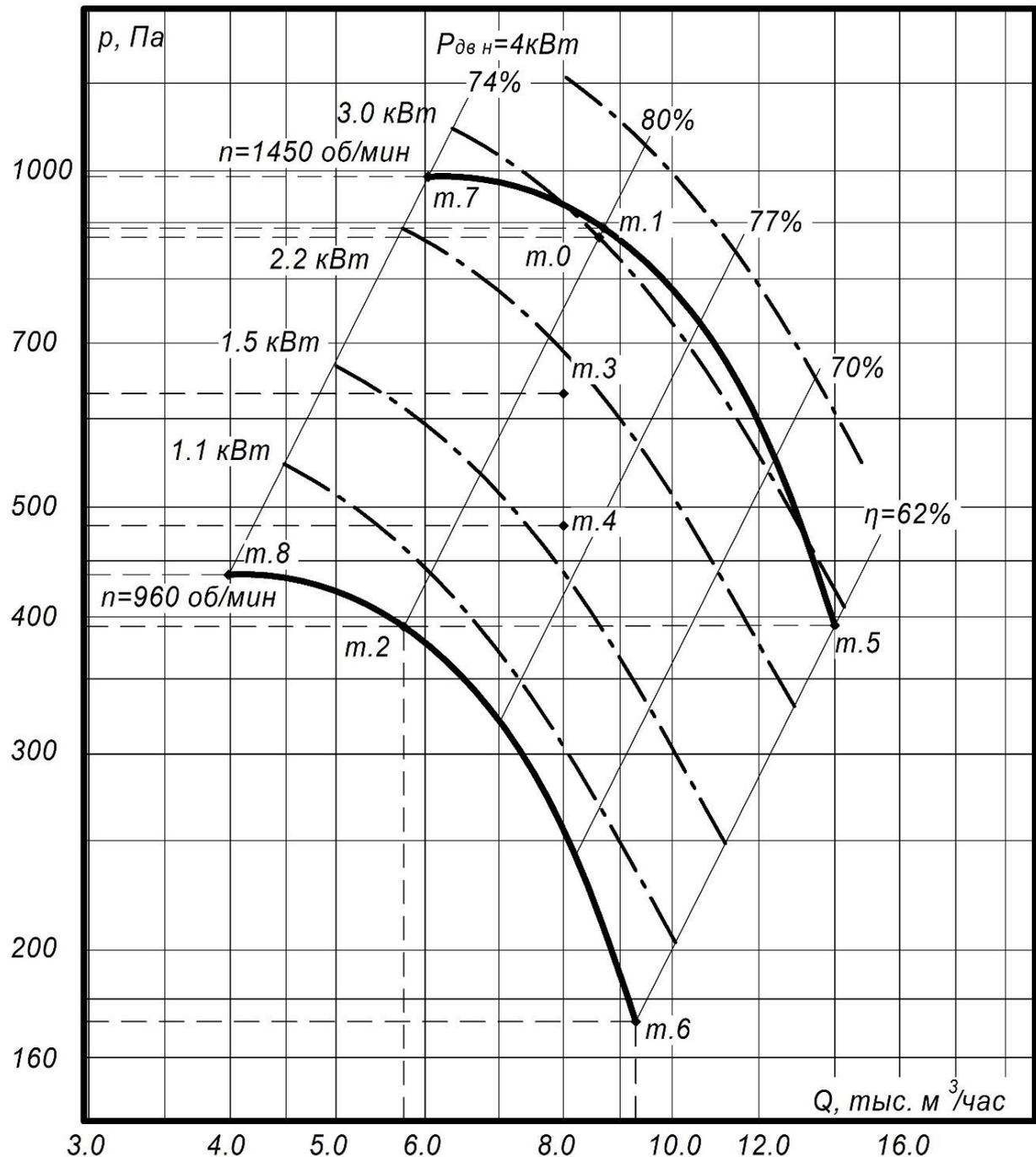


Рисунок 2.29 – Область аэродинамических характеристик вентилятора ВР 80-75-6,3

Для данного вентилятора указаны характеристики при нормальных атмосферных условиях: барометрическое давление  $p_n = 101320 \text{ Па} = 760 \text{ мм рт. ст.}$ , температура воздуха  $t_n = 20 \text{ }^\circ\text{С}$ , относительная влажность  $\varphi_n = 50 \%$ .

Рассчитывается полная и полезная мощность, полный и полезный момент на валу вентилятора, а также скорость вращения приводного двигателя для выбранной точки работы  $i$ . Эти параметры являются результатом анализа аэродинамических свойств и определяют производительность, создаваемое давление и КПД вентилятора.

Выбирается опорная точка перед началом процесса, которая имеет известное значение мощности или скорости вращения приводного двигателя. Расчет мощности возможно произвести, используя общую опорную точку, но для определения скорости вращения двигателя для каждой рабочей точки  $i$  следует выбрать свою собственную опорную точку, находящуюся на линии с постоянным значением КПД вентилятора и проходящую через точку  $i$ .

Полная мощность на валу вентилятора, кВт:

$$N_{\text{вад } i} = N_{\text{баз}} \cdot \frac{Q_i}{Q_{\text{баз}}} \cdot \frac{p_i}{p_{\text{баз}}} \cdot \frac{\eta_{\text{баз}}}{\eta_i}$$

Полезная мощность на валу вентилятора, кВт:

$$N_{\text{пол } i} = N_{\text{вад } i} \cdot \eta_i$$

Скорость вращения приводного двигателя в выбранной точке работы, рад/с:

$$\omega_i = \omega_{\text{баз}} \sqrt{\frac{p_i}{p_{\text{баз}}}} \text{ или } \omega_i = \omega_{\text{баз}} \cdot \frac{Q_i}{Q_{\text{баз}}}$$

Полный момент нагрузки на валу вентилятора, Н·м:

$$M_{\text{вал } i} = \frac{N_{\text{вал } i}}{\omega_i}$$

Полезный момент нагрузки на валу вентилятора, Н·м:

$$M_{\text{пол } i} = \frac{N_{\text{пол } i}}{\omega_i}$$

Согласно аэродинамическим характеристикам вентилятора, точка 1 является точкой номинального режима работы. Значения параметров при этой точке соответствуют значениям:

$$Q_H = 8700 \text{ м}^3/\text{ч}, p_H = 890 \text{ Па}, \eta_H = 80 \%, \\ n_H = 1450 \text{ об/мин или } \omega_H = 151,84 \text{ рад/с.}$$

Для всех точек работы вентилятора в расчетной мощности используются параметры базовой точки 0:

$$N_{\text{баз}} = 3,0 \text{ кВт}, Q_{\text{баз}} = 8630 \text{ м}^3/\text{ч}, p_{\text{баз}} = 874 \text{ Па}, \eta_H = 80 \%.$$

Параметры точки 1:

$$N_{\text{вал т.1}} = 3,0 \cdot \frac{8700}{8630} \cdot \frac{890}{874} \cdot \frac{0,8}{0,8} = 3,08 \text{ кВт}; N_{\text{пол т.1}} = 3,08 \cdot 0,8 = 2,464 \text{ кВт};$$

$$M_{\text{вал т.2}} = \frac{3,08 \cdot 1000}{151,84} = 20,28 \text{ Н} \cdot \text{м}; M_{\text{пол т.2}} = \frac{2,464 \cdot 1000}{151,84} = 16,23 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

В таблице 2.7 представлены результаты расчетов для остальных точек, произведенных аналогично.

Рисунок 2.29, точка 1, показывает характеристики вентилятора в номинальном режиме работы, который соответствует максимальному значению полного КПД. Они описывают следующие параметры работы вентилятора:

- номинальный КПД  $\eta_H = 80 \%$ ;
- номинальная скорость  $n_H = 1450 \text{ об/мин}$  или  $\omega_H = 151,84 \text{ рад/с}$ ;
- номинальная производительность  $Q_H = 8700 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;
- номинальное давление  $p_H = 890 \text{ Па}$ .

Когда значение КПД постоянно ( $\eta_i = const$ ), механическая характеристика вентилятора может быть представлена следующей формулой:

$$M_{\text{с вент } i}(\omega) = a_i \cdot M_{\text{пол } i} + (1 + b_i) \cdot M_{\text{пол } i} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_H}\right)^x,$$

где  $a_i$  – коэффициент постоянных потерь вентилятора;

$b_i$  – коэффициент переменных потерь вентилятора.

Определение момента постоянных потерь на валу вентилятора осуществляется путем использования выражения:

$$a_i \cdot M_{\text{полн } i} = \Delta M_{\text{пост}} = const.$$

Таблица 2.7 – Расчетные параметры точек в соответствии с аэродинамическими характеристиками вентилятора

Точка	Параметры точки в соответствии с аэродинамическими характеристиками вентилятора				Расчетные параметры точки			
	$Q_H, \text{м}^3/\text{ч}$	$p_H, \text{Па}$	$\eta_H, \%$	$\omega_H, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	$N_{\text{вал}}, \text{кВт}$	$N_{\text{пол}}, \text{кВт}$	$M_{\text{вал}}, \text{Нм}$	$M_{\text{пол}}, \text{Нм}$
1	8630	874	80	151,84	3,08	2,46	20,28	16,23
2	5760	393	80	100,52	0,9	0,72	8,95	7,16
3	9280	840	79	151,84	2,47	1,95	18,87	12,84
4	10040	770	77,8	151,84	2,07	1,61	17,1	10,6
5	14000	393	62	151,84	2,82	1,75	18,57	11,53
6	9300	172	62	100,52	0,82	0,51	8,16	5,07
7	6030	980	74	151,84	2,54	1,88	16,73	12,38
8	3980	430	74	100,52	0,73	0,54	7,26	5,37

Механическая характеристика вентилятора в режиме работы с номинальным КПД  $\eta_H = 80 \%$  (точки 1 и 2).

Определим значения коэффициентов потерь при работе вентилятора в точках работы 1 и 2 с номинальным КПД  $\eta_H = 80 \%$  на основе условия равенства постоянных и переменных потерь вентилятора в номинальном режиме работы, точка 1:

$$a_H = b_H = \frac{1 - \eta_H}{2 \cdot \eta_H} = \frac{1 - 0,8}{2 \cdot 0,8} = 0,125.$$

Момент постоянных потерь на валу вентилятора:

$$\Delta M_{\text{пост}} = a_H = b_H \cdot M_{\text{полн H}} = 0,125 \cdot 16,23 = 2,03.$$

Из условия

$$M_{\text{вал т.2}} = \Delta M_{\text{пост}} + (1 + b_H) \cdot M_{\text{полн H}} \cdot \left( \frac{\omega_{\text{т.2}}}{\omega_H} \right)^x,$$

после подстановки численных значений

$$8,95 = 2,03 + (1 + 0,125) \cdot 16,23 \cdot \left( \frac{100,52}{151,84} \right)^x.$$

Для значения  $x = 2,35$ , выражение для механической характеристики вентилятора в режиме регулирования производительности с номинальным значением КПД  $\eta_H = 80\%$ :

$$M_{\text{с вент}}(\omega) = 2,03 + (1 + 0,125) \cdot 16,23 \cdot \left(\frac{\omega}{151,84}\right)^{2,35}. \quad (2.100)$$

Выражение для механической характеристики вентилятора в режиме регулирования производительности с постоянным КПД  $\eta=62\%$ , точки 5 и 6.:

$$M_{\text{с вент}}(\omega) = 2,03 + (1 + 0,437) \cdot 11,53 \cdot \left(\frac{\omega}{151,84}\right)^{2,41}. \quad (2.101)$$

Выражение механической характеристики вентилятора в режиме регулирования производительности с постоянным КПД  $\eta=74\%$ , точки 7 и 8:

$$M_{\text{с вент}}(\omega) = 2,03 + (1 + 0,187) \cdot 12,38 \cdot \left(\frac{\omega}{151,84}\right)^{2,49}. \quad (2.102)$$

На рисунке 2.30 представлены механические характеристики вентилятора, которые были получены в результате расчета выражений 2.100 – 2.102.

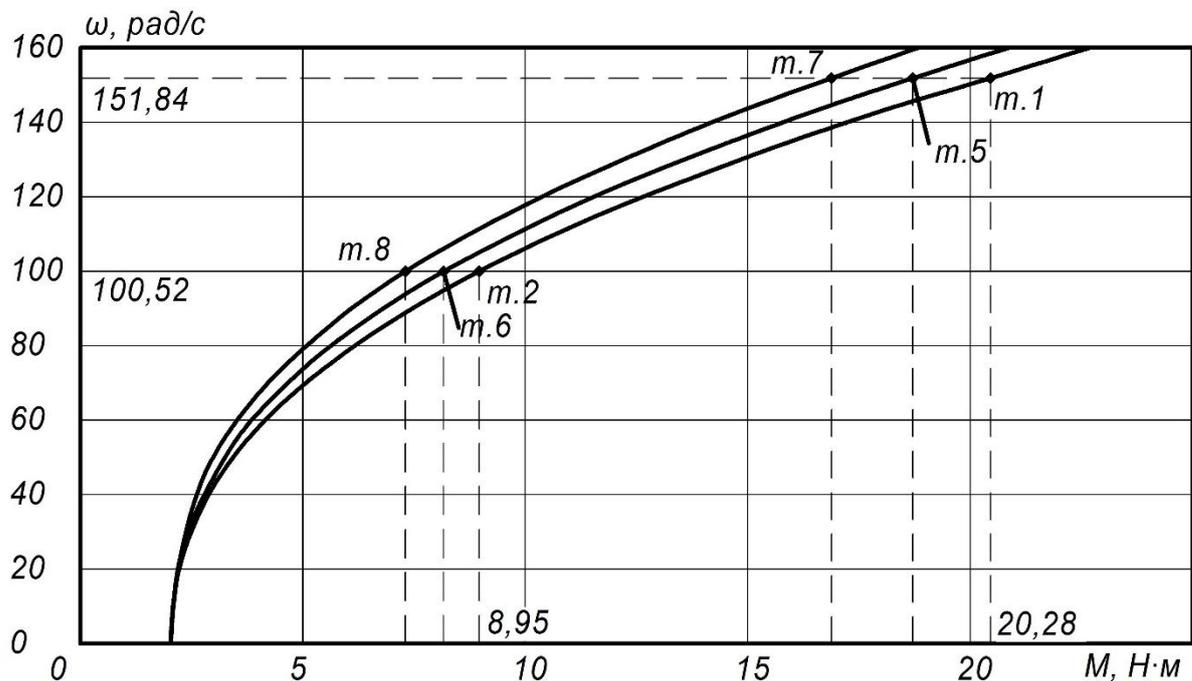


Рисунок 2.30 – Механические характеристики вентилятора  $M_{\text{с вент}} = f(\omega)$

Все последующие вычисления будут осуществляться только для одной характеристики вентилятора, которая соответствует режиму регулирования производительности с номинальным значением КПД  $\eta = 80\%$  (рис. 2.29, точки 1 и 2):

$$M_{\text{с вент}}(\omega) = 2,03 + (1 + 0,125) \cdot 16,23 \cdot \left(\frac{\omega}{151,84}\right)^{2,35}.$$

Закон регулирования, соответствующий режиму работы вентилятора с номинальным КПД, найдем путем совместного решения уравнений для механических характеристик двигателя и нагрузки относительно частоты:

$$a_i \cdot M_{\text{пол } i} + (1 + b_i) \cdot M_{\text{пол } i} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_H}\right)^x = \frac{mR_2 p U^2}{2\pi s f \cdot \left(\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (2\pi f L_2)^2\right)}. \quad (2.103)$$

По результатам расчета выражения 2.103 на рисунке 3.24 построена вольт-частотная характеристика регулирования системы асинхронный двигатель АИР100S4 – вентилятор ВР 80-75-6,3.

Вольт-частотная характеристика определяется зависимостью:

$$U(f) = 0,1145f^2 - 1,5696f + 22,04. \quad (2.104)$$

Для моделирования работы вентилятора мы разработали модель, основываясь на проведенных ранее расчетах. Для этого мы использовали стандартную библиотеку пакета Simulink и подобрали необходимые блоки модели, представив их в виде структурной схемы (рис. 2.31).

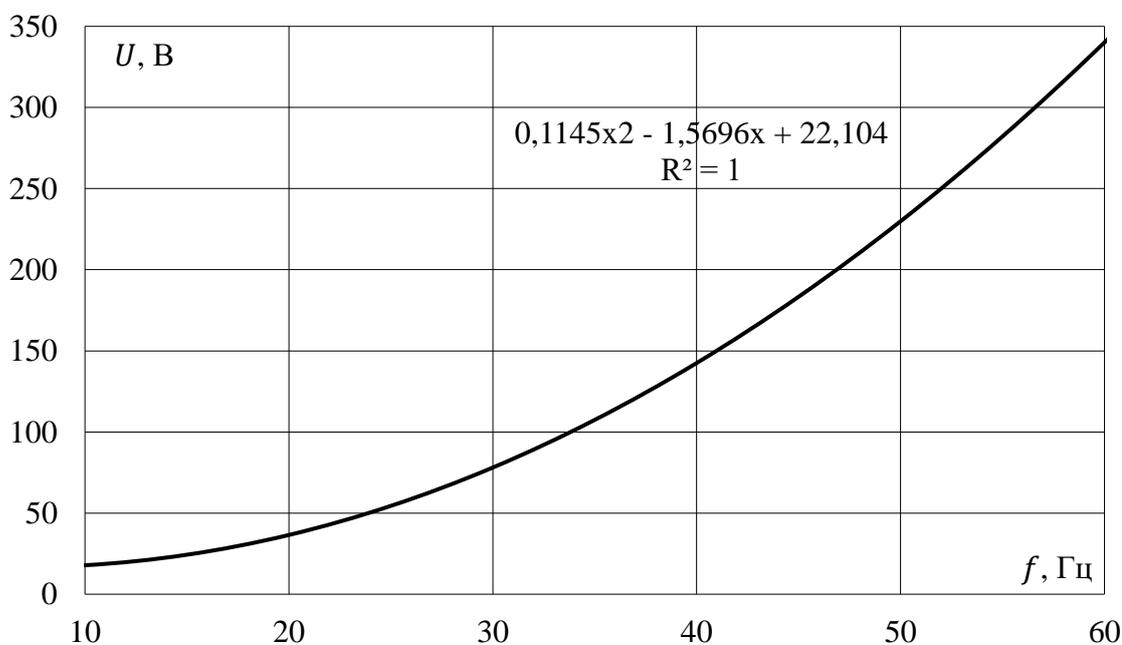


Рисунок 2.31 – Вольт-частотная характеристика регулирования системы асинхронный двигатель АИР100S4 – вентилятор ВР 80-75-6,3

Модель на рисунке 2.32 реализует математическую функцию механической характеристики вентилятора, соответствующую режиму регулирования производительности с номинальным значением КПД:

$$M_{\text{вент}}(\omega) = 2,03 + 18,26 \cdot \left(\frac{\omega}{151,84}\right)^{2,35}.$$

На рисунке 2.32 представлена схема для моделирования работы электропривода вентилятора с частотным регулированием. В его состав входит радиальный вентилятор низкого давления ВР 80-75-6,3 и асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором АИР100S4. Параметры настройки этого электропривода включают в себя напряжение и частоту электродвигателя, а также скольжение.

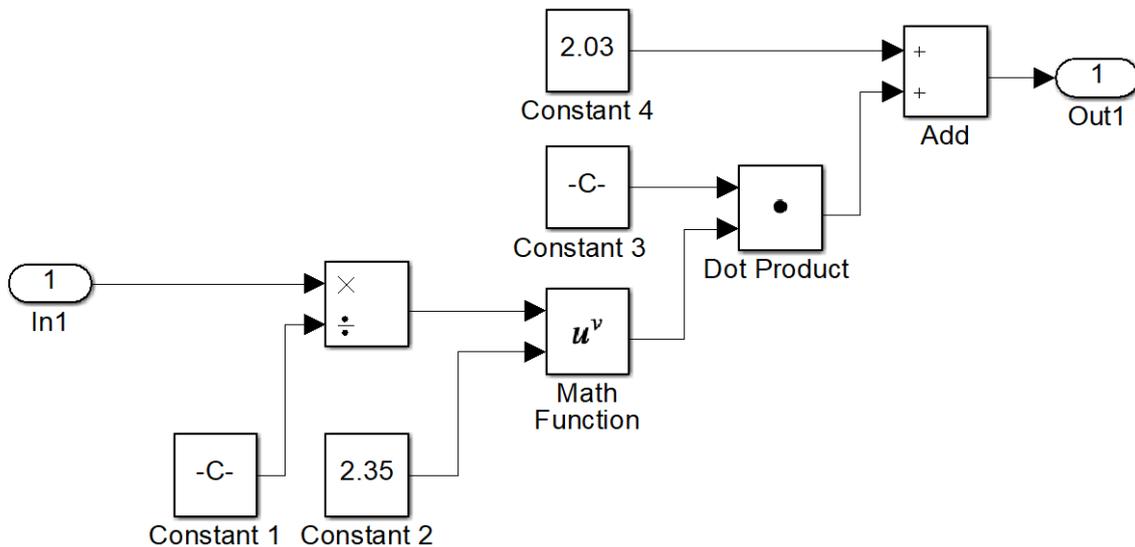


Рисунок 2.32 – Модель вентилятора ВР 80-75-6,3

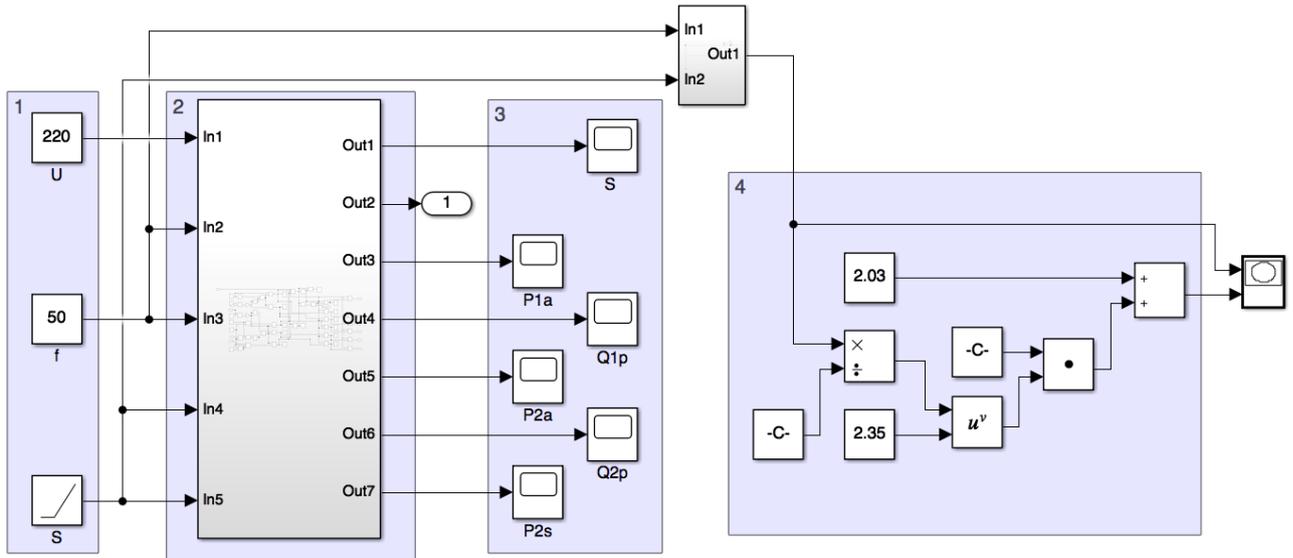


Рисунок 2.33 – Схема частотно-регулируемого асинхронного электропривода:

- 1 – задающие параметры; 2 - модель асинхронного двигателя АИР100S4;
- 3 – составляющие мощности асинхронного двигателя АИР100S4;
- 4 - модель вентилятора ВР 80-75-6,3

На рисунке 2.34 приведены механические характеристики системы асинхронный двигатель - вентилятор, которые были получены в результате моделирования с расчетной настройкой вольт-частотной характеристики.

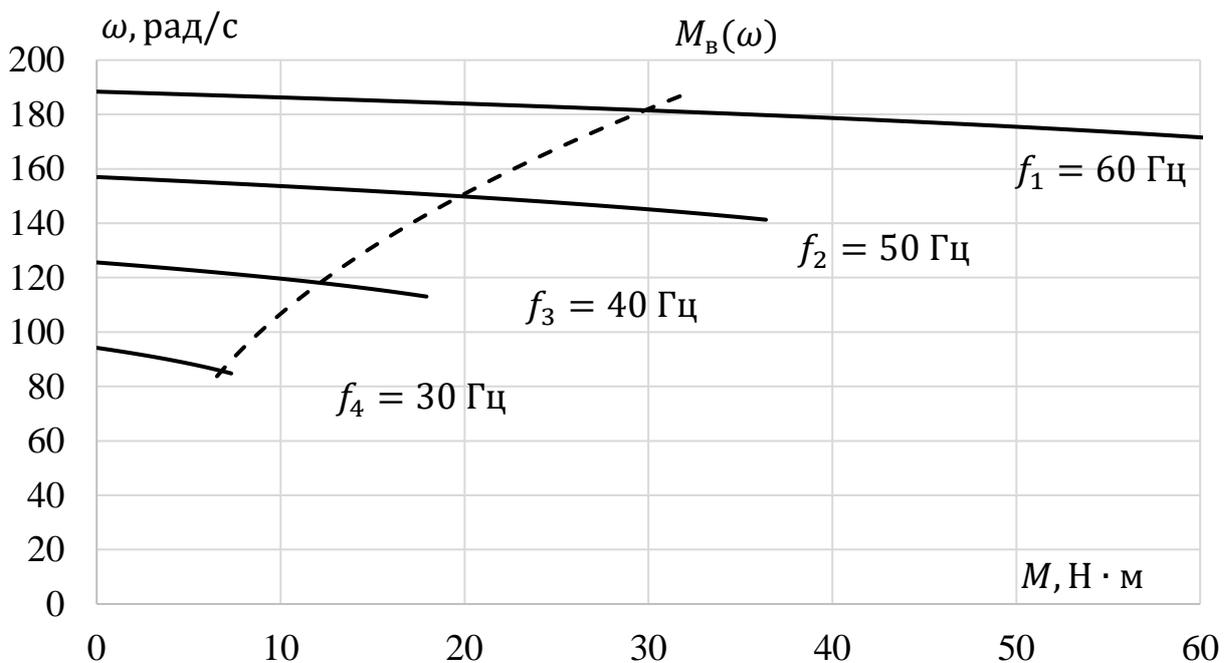


Рисунок 2.34 – Механические характеристики системы асинхронный двигатель – вентилятор

Возможности регулирования скорости вентилятора в большом диапазоне достигаются с использованием частотно-регулируемого асинхронного электродвигателя, работающего в соответствии с выбранной вольт-частотной характеристикой. Результаты, полученные в ходе моделирования, подтверждают эту техническую возможность.

### **Выводы по второй главе**

1. Актуальной задачей является разработка эффективных алгоритмов и программ для управления асинхронным электроприводом. Одной из ключевых задач является определение оптимальных зависимостей между амплитудой и частотой напряжения на обмотке статора. При этом необходимо учитывать скорость вращения ротора, требуемый электромагнитный момент.

2. Выполнен анализ параметров и схем замещения фаз асинхронного двигателя. Было определено, что разработка методов для идентификации и выявления составляющих потерь в установившихся режимах работы асинхронного двигателя представляет собой практическую значимость.

3. Построение математической модели асинхронного двигателя, учитывающей разделение потерь на активные и реактивные составляющие в обмотках статора и ротора, является важным шагом в разработке энергосберегающих алгоритмов для управления частотно-регулируемым асинхронным электроприводом.

4. Для более детального анализа работы асинхронного двигателя предлагается использовать схемы замещения через проводимости статора и ротора. Используя аналитические зависимости проводимостей, полученные в ходе исследования, можно определить соответствующие значения токов и мощностей.

5. Исследования имитационных моделей асинхронного электродвигателя АИР100S4 позволяют более детально изучить режимы работы данного двигателя и определить мощность потерь при различных способах его нагрузки и питания. Важной особенностью разработанных моделей является их гибкость, которая позволяет настраивать их на различные формы выходного напряжения

электропитания. Это делает модели применимыми для анализа экспериментальных данных и обеспечивает более детальное изучение работы двигателя.

6. Исследован вопрос измерений параметров режимов работы электрического двигателя на имитационной модели. Результаты, полученные при изучении моделей, совпадают с известными техническими характеристиками двигателя, что свидетельствует об адекватности разработанных моделей.

7. Графики проводимостей построены на основе результатов моделирования режима работы асинхронного двигателя АИР100S4 в зависимости от скольжения. Скольжение выступает в качестве обобщенного показателя режима работы асинхронного двигателя.

8. В процессе анализа зависимостей проводимостей двигателя от скольжения и при проведении теоретического исследования проводимостей асинхронного двигателя было обнаружено, что активная проводимость прямо пропорциональна скольжению ротора, в то время как индуктивная проводимость слабо зависит от него, так как в ее составе присутствует постоянная составляющая.

9. Определена возможность изменять соотношение активной и индуктивной составляющих тока в асинхронном двигателе, в пределах номинального значения фазового тока, путем одновременного воздействия амплитудой и частотой сетевого напряжения, подаваемого на фазу асинхронного двигателя. Это в свою очередь позволяет изменить показатели энергоэффективности данного двигателя.

10. Минимальное значение полных потерь или энергетический КПД двигателя в установившихся режимах работы принимается как показатель эффективности работы АД, значение которого определяется отношением произведения активной проводимости цепи ротора  $q_{2s}$  и полной активной проводимостью фазы  $q$  к полной проводимости  $u$ .

11. Для достижения минимальных потерь в работе двигателя необходимо изменять амплитуду напряжения питания таким образом, чтобы скольжение асинхронного двигателя было равно критическому значению  $s_{\xi}$ , соответствующему заданной частоте. Для двигателя АИР100S4 при частоте сети 50 Гц критическое значение скольжения  $s_{\xi}$  составляет 0,077.

### **3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С ЧАСТОТНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ**

#### **3.1 Задачи экспериментальных исследований**

Анализ точности математических моделей асинхронного двигателя проводился в лаборатории кафедры электротехники, электрооборудования и электроснабжения Удмуртского ГАУ. В рамках эксперимента была проверена гипотеза о существовании оптимального скольжения для заданной частоты питающего напряжения. Обеспечивающее минимальные потери в обмотках асинхронного двигателя.

Целью проводимых исследований является сравнение экспериментальных и теоретических данных с целью установления адекватности предложенной модели реальному двигателю в установившихся режимах работы.

Экспериментальные исследования ставят следующие задачи в соответствии с проведенными теоретическими исследованиями:

1. Разработать лабораторный стенд, который позволит проводить эксперименты с частотно-регулируемым асинхронным двигателем.
2. Снять рабочие характеристики асинхронного двигателя при разных нагрузках.

Программа проведения экспериментальных исследований включает следующие направления:

- определение механической характеристики. Задача эксперимента – исследовать зависимость частоты вращения ротора от момента сопротивления рабочей машины, определить адекватность предложенной модели реальному двигателю в установившихся режимах работы;
- анализ рабочих характеристик. Задача эксперимента – в установившихся режимах работы выявить сходство между реальным функционированием асинхронного двигателя и предлагаемой моделью;

– исследование зависимости энергетических характеристик асинхронного электродвигателя (активной, реактивной и полной мощности) при изменении частоты и напряжения. Задача эксперимента – проанализировать изменение активной, реактивной и полной мощности асинхронного электродвигателя при регулировании амплитуды и частоты напряжения сети питания;

3. Провести проверку способа повышения энергетического коэффициента полезного действия.

### 3.2 Методика экспериментальных исследований

Для измерений энергетических характеристик асинхронного двигателя использованы приборы К-505, которые позволяют измерить напряжение, ток и мощность на выходе двигателя по каждой фазе отдельно. В установившемся режиме работы были получены следующие расчетные величины: ток фазы  $I_{\phi} = (I_A + I_B + I_C)/3$ , А; напряжение фазы  $U_{\phi} = (U_A + U_B + U_C)/3$ , В; мощность асинхронного двигателя  $P_{\text{вых}} = P_A + P_B + P_C$ , Вт.

Момент на выходе асинхронного двигателя определяется при помощи нагрузочного устройства. В качестве нагрузки был использован генератор постоянного тока, тип П41УХЛ4. Тормозящий момент, развиваемый генератором постоянного тока, изменяется пропорционально току якоря. Общая компоновка электродвигателя АИР100S4 с генератором постоянного тока приведена на рисунке 3.1.

Генератор постоянного тока обеспечивает хорошую точность измерений в диапазоне моментов в пределах номинальных нагрузок. Для определения частоты вращения вала асинхронного двигателя используется электронный тахометр ТЭМП-4.

Методики, на основе которых были получены рабочие характеристики, описаны в [44-47].

Для достижения нужной точности и надежности взяты во внимание следующие принципы:

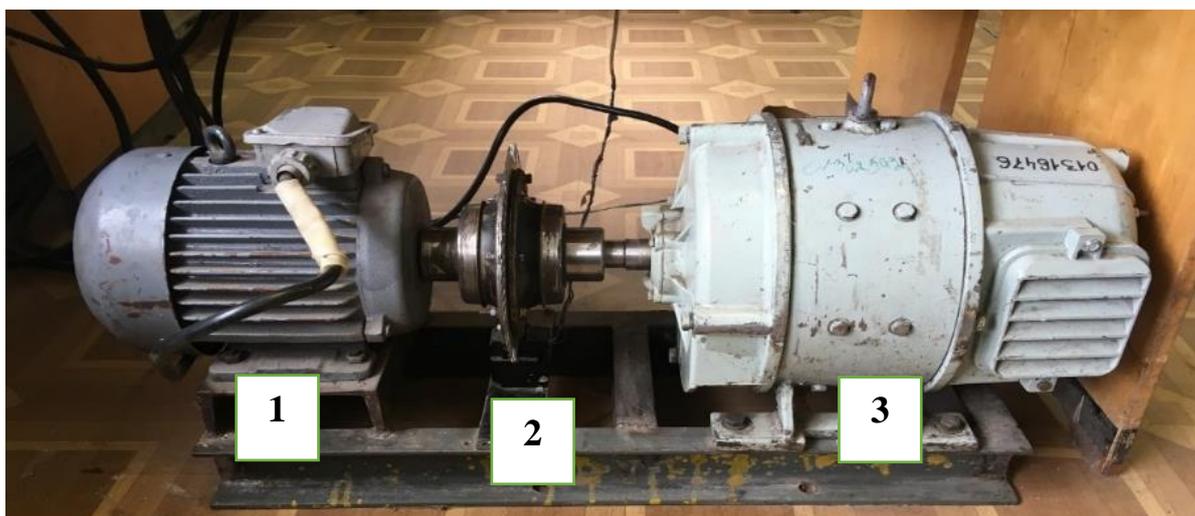


Рисунок 3.1 – Экспериментальная установка для измерения момента вращения на валу двигателя АИР100S4: 1 – электродвигателя АИР100S4; 2 – фотоэлектрический датчик оборотов тахометра ТЭМП-4; 3 – генератор постоянного тока П41УХЛ4

а) Количество экспериментов определено на основе предварительных теоретических исследований. Сложная кривая рассматривается как комбинация простых линий и простых зависимостей. Экспериментальные данные собираются последовательным, шаговым методом. Каждый излом кривой дополнительно изучается и описывается не менее чем тремя точками. Для улучшения точности исследований используют повторные эксперименты, а затем вычисляют среднюю арифметическую величину параметра. Для достижения надежности с вероятностью 0,99 необходимо провести эксперименты четыре раза. Это правило применяется при измерении характеристик асинхронных двигателей.

б) При проведении эксперимента измерения и запись значений производятся в заранее подготовленные таблицы.

в) После исследования проводится обработка данных с использованием известных методов. Некоторые измеряемые величины определяются с помощью косвенного вычисления. Погрешность значений оценивается с учетом выполняемых действий. Например, при выполнении умножения и деления погрешность вычислений оценивается как сумма относительных погрешностей множителей, делителя и делимого.

Рассмотрим в качестве примера определение мощности генератора, которая определяется косвенным путем в соответствии с выражением ( $P$ , Вт):

$$P = UI. \quad (3.1)$$

Поскольку мощность определяется как произведение двух измеряемых величин, то предел относительной погрешности измерения мощности ( $\delta_{Pi}$ , %):

$$\delta_{Pi} = |\delta_{Ui}| + |\delta_{Ii}|, \quad (3.2)$$

где  $\delta_{Ui}$  и  $\delta_{Ii}$  – относительные погрешности измерения напряжения и тока соответственно, %.

Поскольку инструментальная и методическая составляющие погрешности не зависят друг от друга, результирующие погрешности измерения напряжения и тока рассчитываются по формулам ( $\delta_U$ , %;  $\delta_I$ , %):

$$\delta_U = \sqrt{\delta_{инсU}^2 + \delta_{МУ}^2}, \quad (3.3)$$

$$\delta_I = \sqrt{\delta_{инсI}^2 + \delta_{MI}^2}. \quad (3.4)$$

Относительная инструментальная погрешности измерения напряжения и тока, %:

$$\pm \delta_{инсU} = \pm K \frac{U_K}{U_x}, \quad (3.5)$$

$$\pm \delta_{инсI} = \pm K \frac{I_K}{I_x}, \quad (3.6)$$

где  $K$  – класс точности прибора;

$U_K, I_K$  – значения верхнего предела диапазона измерения прибора;

$U_x, I_x$  – значение измеряемого напряжения и тока.

Методическая погрешность измерения тока обусловлена тем, что амперметр измеряет не ток генератора, а сумму токов генератора и вольтметра.

Относительная методическая погрешность измерения тока при  $R_r \gg R_A$ , %:

$$\delta_{MI} \approx \frac{R_A}{R_r} 100. \quad (3.7)$$

При обработке экспериментов относительная ошибка находится в пределах  $\pm 5$  %.

д) В ходе исследования строятся предварительные графики, отражающие результаты экспериментов. Основная задача состоит в выявлении и подробном изучении отклонений от ожидаемого плавного развития явления.

е) Предполагается, что температура электрических машин и устройств достигает постоянных значений и незначительно меняется, что не оказывает существенного влияния на измеряемые параметры во время проведения эксперимента.

### **3.3 Разработка лабораторного стенда для испытаний асинхронного двигателя с возможностью частотного регулирования**

Диссертационное исследование требовало создания специального лабораторного стенда для достижения поставленной цели. Электрическая принципиальная схема стенда представлена на рисунке 3.2. В его состав входит асинхронный двигатель типа АИР100S4 с номинальной мощностью 3 кВт, номинальным напряжением 380 В, номинальным током 7,3 А и номинальной частотой вращения 1410 мин<sup>-1</sup>. Также в стенде присутствует генератор постоянного тока типа П41УХЛ4 с номинальной мощностью 3,2 кВт, номинальным напряжением 220 В, номинальным током 18,5 А и номинальной частотой вращения 1500 мин<sup>-1</sup>. Для измерения частоты вращения используется тахометр электронный ТЭМП-4. Для измерения трехфазного напряжения, тока и мощности на выходе преобразователя используется комплект измерительный К-505. Комплект измерительный К-505 включает в себя вольтметр, амперметр электромагнитной системы и ваттметр электродинамической системы с переменными пределами измерений. Эти приборы позволяют измерять действующие значения напряжений, токов и активных мощностей фаз обмотки статора. Преобразователь частоты типа МРС 311, мощность преобразователя 3,0 кВт. Напряжение на выходе может варьироваться от 0 до 380 В, а частота от 0,5 до 200 Гц. Номинальный выходной ток составляет 9 А.

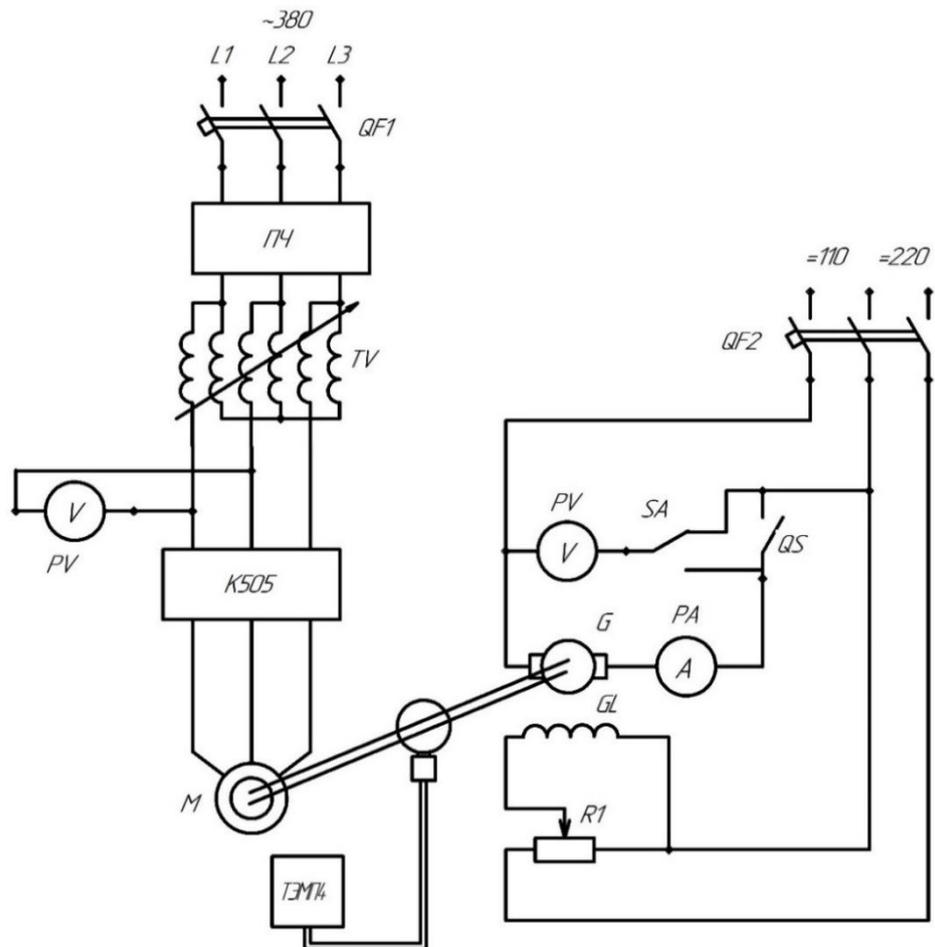


Рисунок 3.2 – Схема электрическая принципиальная стенда для испытания частотно-регулируемого асинхронного двигателя

Эксперименты проводились на стенде для испытания асинхронного двигателя с частотным регулированием, общая композиция которого представлена на рисунке 3.3. В ходе экспериментов была произведена запись параметров, таких, как мгновенные значения фазного напряжения и тока статора, мгновенная потребляемая мощность, частота вращения ротора и электромагнитный момент. Для установления значений момента на валу использовался генератор постоянного тока. Рабочие характеристики были получены в соответствии с методами, описанными в источниках [44-47].



Рисунок 3.3 – Экспериментальная установка для испытания частотно-регулируемого асинхронного двигателя АИР100S4

Выполнена настройка собранного оборудования и протестирована его работоспособность, результаты свидетельствуют о возможности проведения испытаний частотно-регулируемого асинхронного двигателя с номинальными нагрузками на данном стенде.

### 3.4 Испытания асинхронного двигателя

В соответствии с разработанной программой проведения исследований (глава 3.1), были проведены экспериментальные исследования. Полученные данные представлены в приложении Д, математическая обработка результатов опытов производилась стандартными средствами Microsoft Excel.

Первый эксперимент заключается в сравнении теоретических и экспериментальных механических характеристик асинхронного двигателя с целью установления адекватности предложенной модели реальному двигателю в установившихся режимах работы.

На разработанном лабораторном стенде (глава 3.3), были сняты экспериментальные зависимости (таблиц. 3.1-3.3), которые сравнивались с данными, полученными ранее на математической модели двигателя, выраженной через проводимости статора и ротора (Приложение Е).

Таблица 3.1 – Расчетные данные теоретической механической характеристики асинхронного двигателя АИР100S4

<b>f=40Гц</b>	<b>n</b> , об/мин	1200	1187	1174	1161	1149	1136	1123	1111	1098
	<b>M</b> , Нм	0,00	1,43	4,49	8,12	11,84	15,57	19,00	22,25	25,31
<b>f=50Гц</b>	<b>n</b> , об/мин	1500	1488	1477	1466	1455	1443	1432	1421	1410
	<b>M</b> , Нм	0,00	1,81	5,25	9,07	12,80	16,43	19,86	23,14	26,26
<b>f=60Гц</b>	<b>n</b> , об/мин	1800	1784	1769	1754	1739	1724	1708	1693	1678
	<b>M</b> , Нм	0,00	1,53	4,58	7,83	10,98	14,04	16,90	19,58	22,06

Таблица 3.2 – Экспериментальные данные механической характеристики асинхронного двигателя АИР100S4

<b>f=40Гц</b>	<b>n</b> , об/мин	1184	1180	1176	1171	1165	1159	1151	1143	1134	1124	1114	1102
	<b>M</b> , Нм	0,00	1,37	3,10	4,89	6,75	8,66	10,65	12,69	14,79	16,94	19,14	21,38
<b>f=50Гц</b>	<b>n</b> , об/мин	1476	1476	1476	1475	1473	1470	1466	1462	1457	1452	1446	1440
	<b>M</b> , Нм	0,00	1,14	2,65	4,15	5,65	7,13	8,61	10,09	11,56	13,02	14,48	15,92
<b>f=60Гц</b>	<b>n</b> , об/мин	1792	1786	1780	1773	1767	1761	1755	1748	1742	1736	1730	1724
	<b>M</b> , Нм	0,00	1,19	2,26	3,38	4,55	5,79	7,07	8,40	9,79	11,22	12,69	14,17

Анализ теоретической и экспериментальной зависимостей механических характеристик АД АИР100S4, приведенных на рисунках 3.4 – 3.6, показал, что максимальная относительная погрешность момента на валу ротора не превышает 5 %. Сходимость теоретического и экспериментального графиков механических характеристик двигателя хорошая, из чего можно сделать вывод, что математическая модель адекватно описывает электротехнические процессы в двигателе.

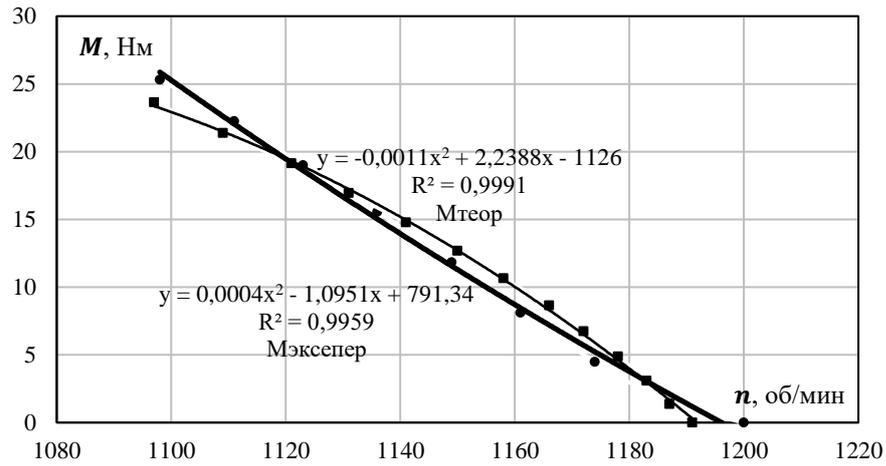


Рисунок 3.4 – Графики зависимостей механических характеристик асинхронного двигателя АИР100S4 при частоте сети 40 Гц

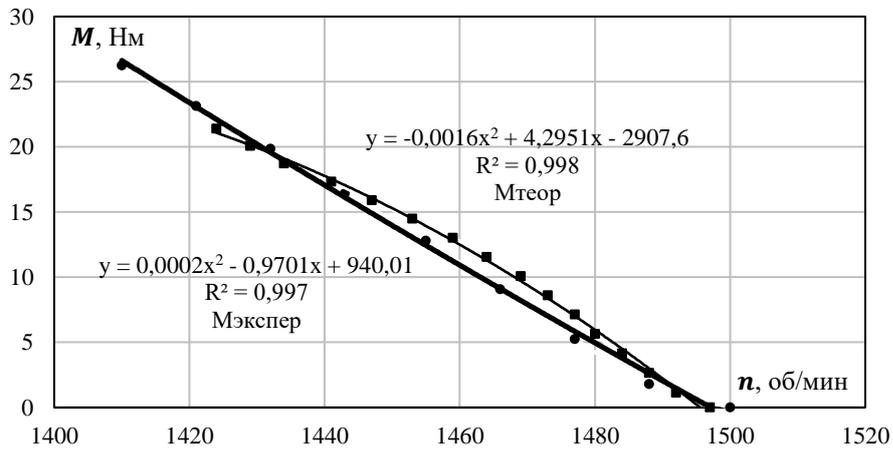


Рисунок 3.5 – Графики зависимостей механических характеристик асинхронного двигателя АИР100S4 при частоте сети 50 Гц

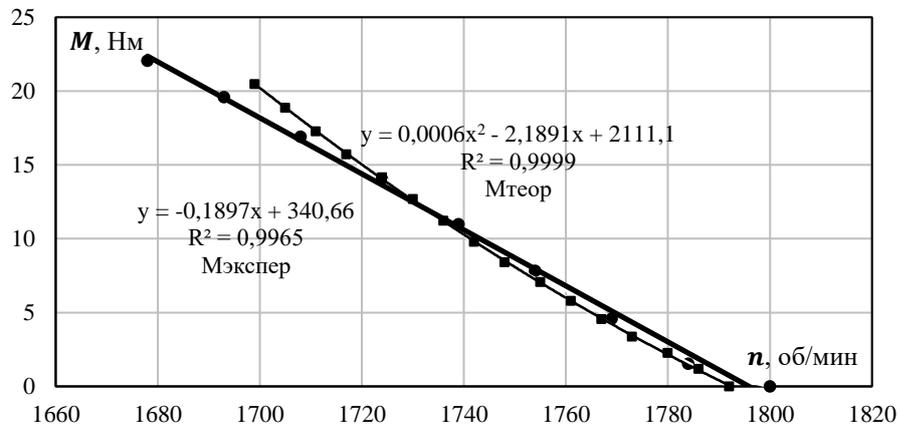


Рисунок 3.6 – Графики зависимостей механических характеристик асинхронного двигателя АИР100S4 при частоте сети 60 Гц

В ходе экспериментов были исследованы рабочие характеристики двигателя АИР100S4. В первой части исследования был проведен сравнительный анализ между результатами, полученными на математической модели асинхронного двигателя, и результатами, полученными на реальном лабораторном стенде. Основная цель данного эксперимента заключалась в проверке точности математической модели двигателя. На рисунках 3.7 – 3.9 представлены рабочие характеристики двигателя АИР100S4.

Графические зависимости 3.7 – 3.9 демонстрируют, что максимальная ошибка в частоте вращения ротора не превышает 10 %, коэффициент полезного действия и активной мощности также не превышает 10 %. Поэтому применение математической модели, основанной на проводимостях статора и ротора, позволяет моделировать электромагнитные и электромеханические процессы в трехфазном асинхронном двигателе в статических режимах.

Далее проведен ряд экспериментов, чтобы подтвердить гипотезу о закономерностях изменения потребляемой мощности при изменении частоты вращения. Ранее мы уже провели теоретические исследования по этой теме.

Полученные экспериментальные зависимости активной, реактивной и полной мощностей от скольжения при различной частоте питающего напряжения приведены на рисунках 3.10 – 3.12. Аналогично механическим характеристикам экспериментальные данные сравнивались с зависимостями, полученными ранее на математической модели асинхронного электродвигателя.

Анализируя зависимости составляющих мощности от скольжения, (рис. 3.9-3.12) можно сделать вывод: активная и индуктивная составляющие мощности имеют разную степень зависимости от скольжения. Выдвинутая ранее гипотеза имеет экспериментальное подтверждение: в асинхронном двигателе 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 асинхронного двигателя, и, как следствие, – изменять показатели энергоэффективности асинхронного двигателя.

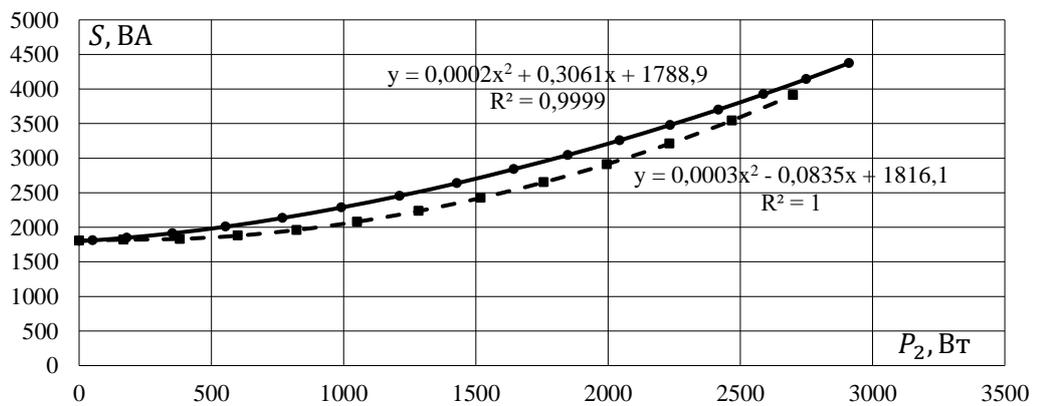
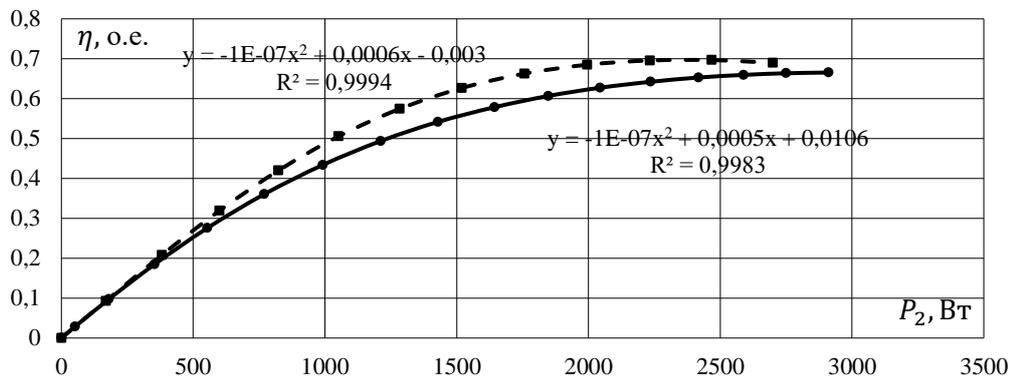
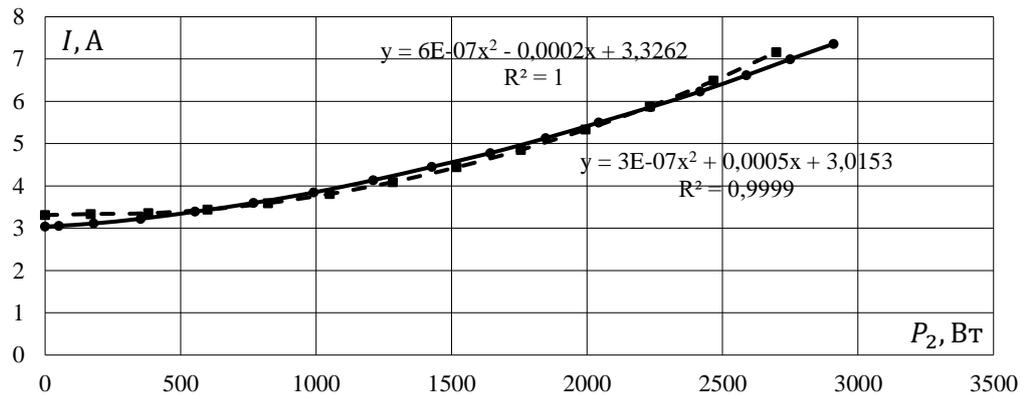
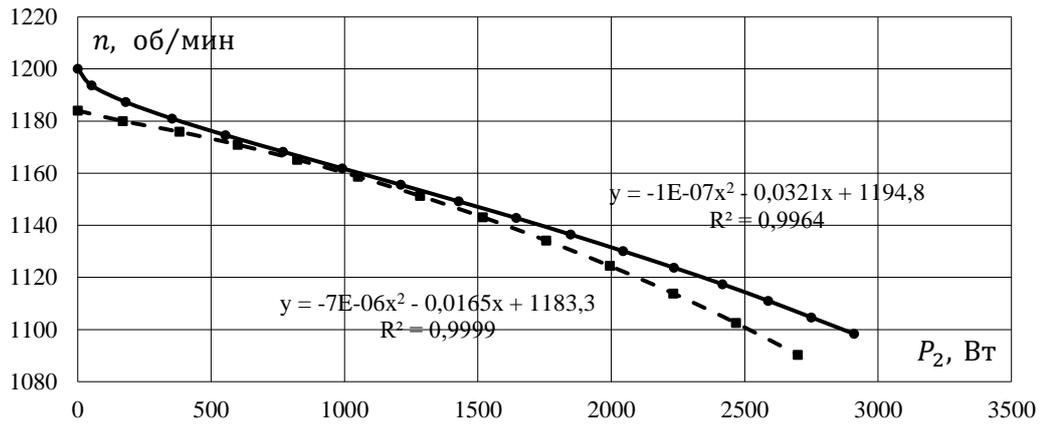


Рисунок 3.7 – Сравнительный анализ рабочих характеристик двигателя АИР100S4 при частоте сети 40 Гц, — расчетная, - - экспериментальная

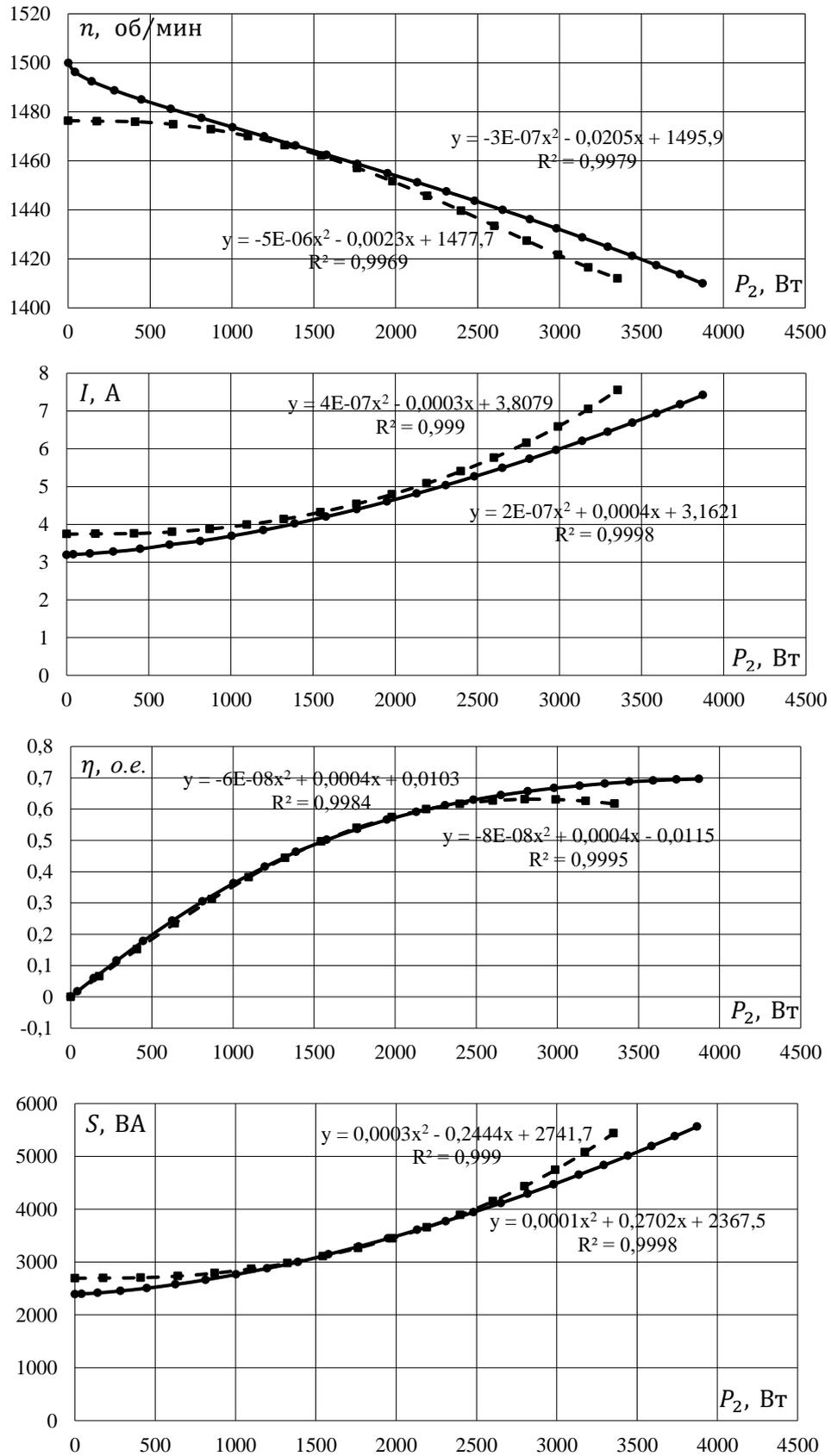


Рисунок 3.8 – Сравнительный анализ рабочих характеристик двигателя АИР100S4 при частоте сети 50 Гц, — расчетная, - - экспериментальная

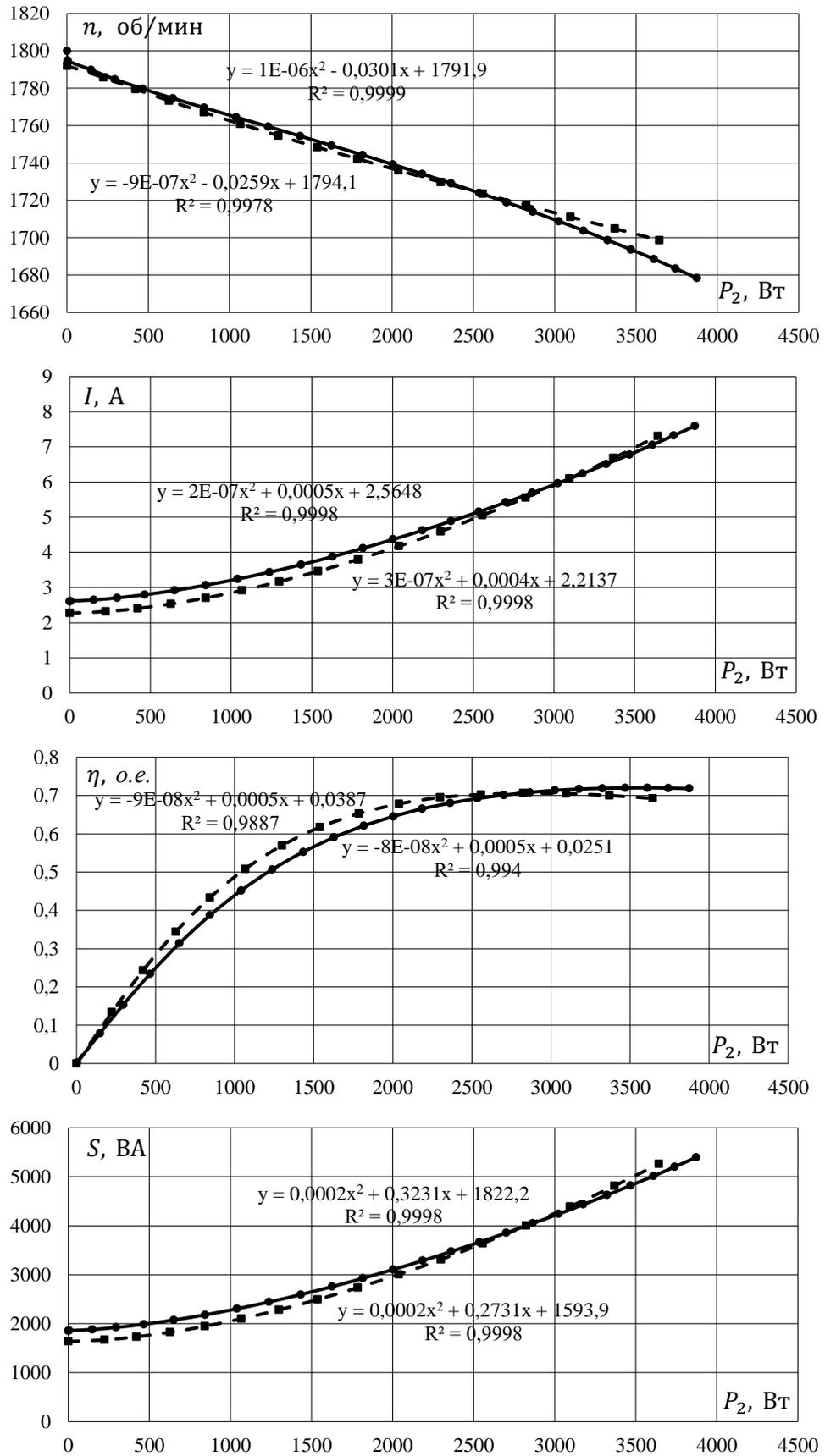


Рисунок 3.9 – Сравнительный анализ рабочих характеристик двигателя АИР100S4 при частоте сети 60 Гц, — расчетная, - - экспериментальная

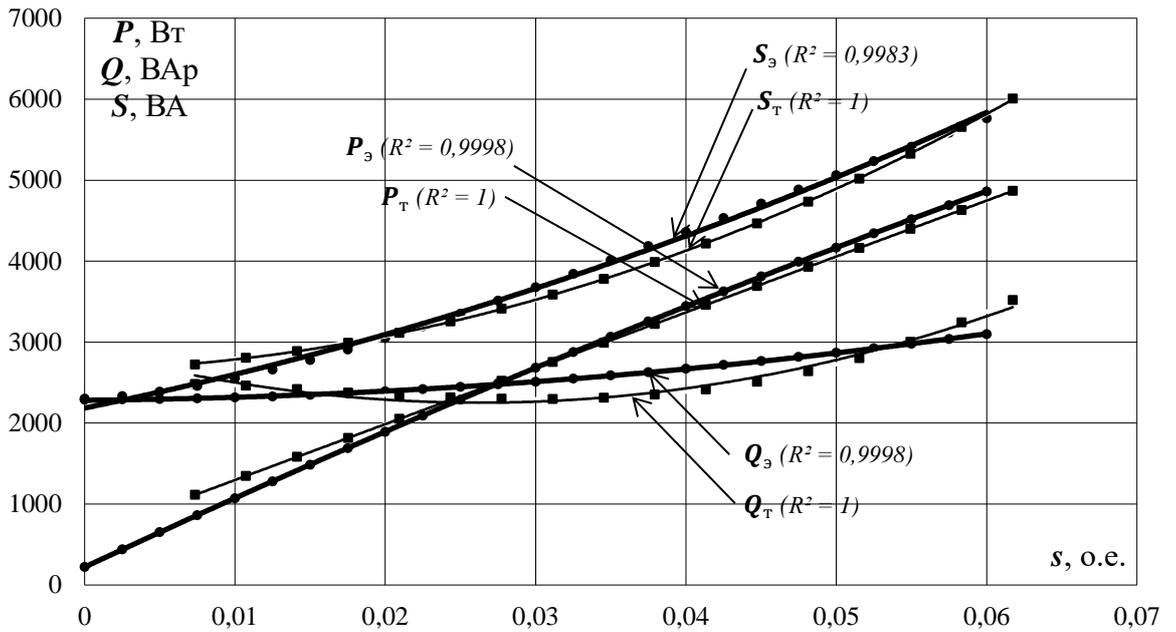


Рисунок 3.10 – Графики зависимостей активной, реактивной и полной мощностей асинхронного двигателя АИР100S4 от скольжения при частоте питающего напряжения 50 Гц, — расчетная, — экспериментальная

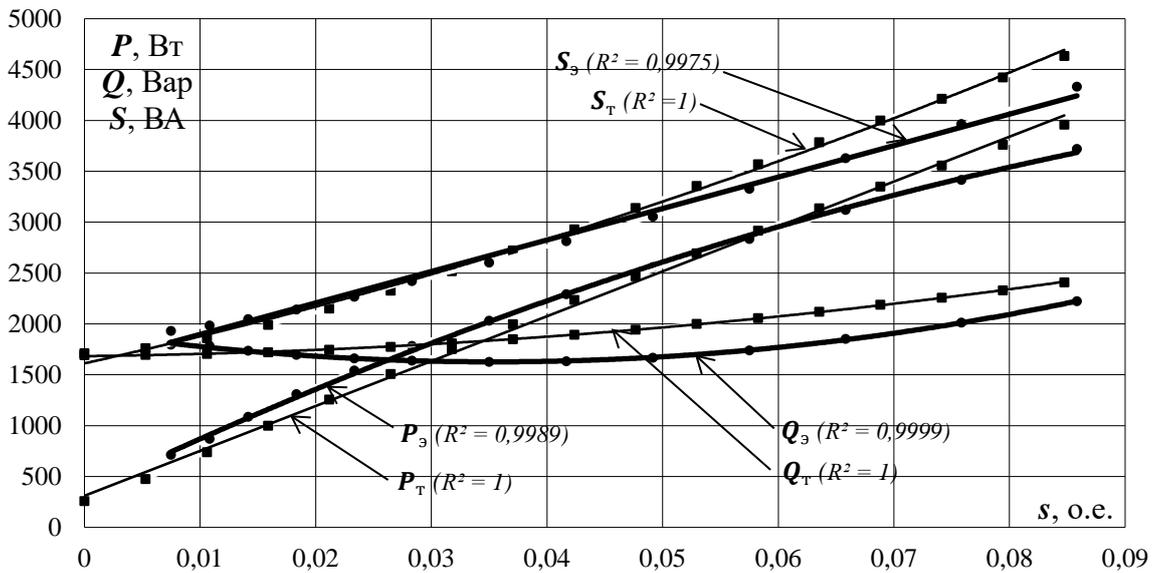


Рисунок 3.11 – Графики зависимостей активной, реактивной и полной мощностей асинхронного двигателя АИР100S4 от скольжения при частоте питающего напряжения 40 Гц, — расчетная, — экспериментальная

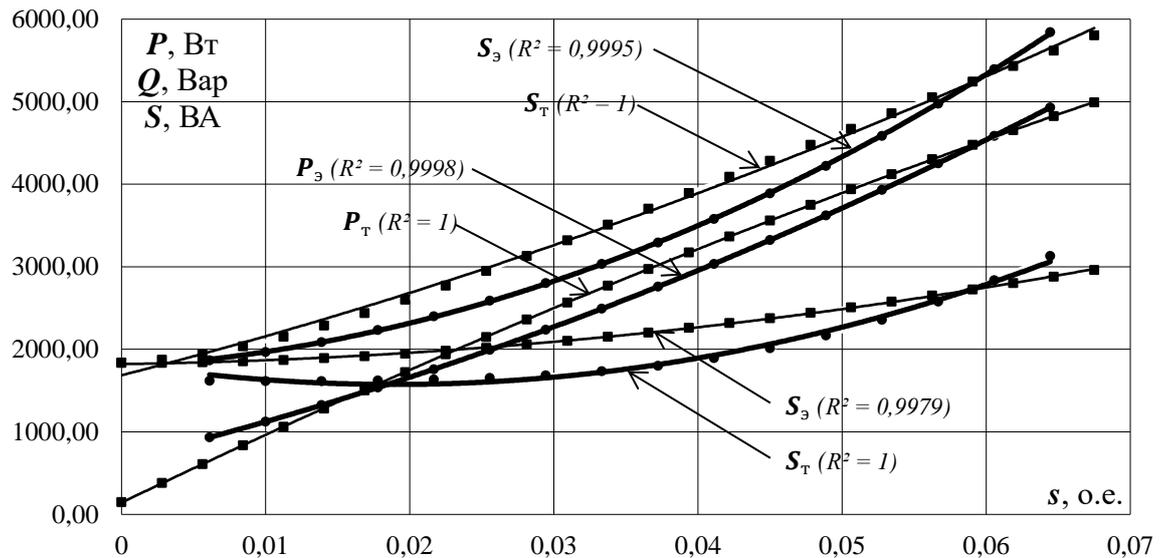


Рисунок 3.12 – Графики зависимостей активной, реактивной и полной мощностей асинхронного двигателя АИР100S4 от скольжения при частоте питающего напряжения 60 Гц, — расчетная, — экспериментальная

Зависимости, представленные на рисунках 3.9 – 3.12, подтверждают наличие оптимального скольжения для каждой частоты питающего напряжения, так, при частоте 50 Гц оптимальным по критерию максимального значения энергетического КПД является скольжение в диапазоне  $s_{\text{опт}} = 0,07 \div 0,08$  (что подтверждает найденное ранее при теоретическом исследовании, оптимальное скольжение  $s_{\text{опт}} = 0,077$ ).

### 3.5 Экспериментальные исследования энергосберегающего режима работы асинхронного двигателя с частотным управлением

В ходе исследований было проведено оценивание влияния различных частот питания на работу электродвигателя АИР100S4 в целом и на мощность потерь в частности. Зависимость скорости вращения вала двигателя  $n$  от частоты питания  $f$  ( $n$ , об/мин):

$$n = \frac{60f}{p}(1 - s_{\xi}), \quad (3.8)$$

где  $f$  – частота питающей сети, Гц;

$p$  – число пар полюсов (для АИР100S4  $p = 2$ );

$s_{\xi}$  – критическое скольжение максимального энергетического КПД асинхронного электродвигателя, значение которого определяется по формуле, 3.6б.

В таблице 3.3 приведена зависимость скорости вращения вала электродвигателя АИР100S4 от частоты питания. Номинальная частота питания составляет 50 Гц, что соответствует угловой скорости вращения вала 147,26 рад/с (1406 об/мин).

Таблица 3.3 – Зависимость угловой скорости вращения вала АИР100S4 от частоты питания, по критерию максимального энергетического коэффициента полезного действия

Частота, Гц	40	50	60
$s_{\xi}$ , от.ед.	0,07241	0,06142	0,05347
Номинальная скорость, рад/с	116,58	141,71	178,44

Амплитуда напряжения питания при изменении частоты изменяется таким образом, чтобы обеспечить постоянство крутящего момента ( $M, \text{Н}\cdot\text{м}$ ):

$$M = P_{\text{H}}/\omega = \text{const}, \quad (3.9)$$

т.е. в этом случае выдерживается постоянным отношение мощности на валу к угловой скорости вращения вала. Величину  $P_{\text{H}}$  определим для номинального режима:

$$M = \frac{3000}{141,71} = 21,17 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Для обеспечения постоянства  $M$  при изменении частоты питания необходимо изменять амплитуду напряжения электродвигателя таким образом, чтобы обеспечить полезную мощность на валу:

$$P_{\text{H}} = M \cdot \omega = 21,17 \cdot \omega.$$

Расчетные значения мощности приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Связь мощности на валу двигателя АИР100S4 с частотой питания при постоянстве крутящего момента  $M = 20,37 \text{ Н}\cdot\text{м}$

Частота, Гц	40	50	60
Мощность на валу, Вт	2326,79	3000,00	3763,86

На лабораторном стенде проводились эксперименты с постоянным моментом. В процессе изменения частоты питания напряжение также менялось, чтобы обеспечить получение необходимой мощности на валу, как указано в таблице 3.4. Для оценки были изучены и проанализированы зависимости параметров работы электродвигателя от частоты. При условном питании от сети электродвигатель получает гармоническое напряжение, частота которого может варьироваться. Такой сценарий является оптимальным для асинхронного электродвигателя. Результаты исследований представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Параметры установившегося режима работы АИР100S4 с постоянным крутящим моментом на валу  $M = 20,37 \text{ Н}\cdot\text{м}$

Параметр режима	Частота, Гц		
	40	50	60
Фазное напряжение, В	168	202	235
Полная мощность, ВА	3387	4200	4942
Активная мощность, Вт	2883	3547	4181
Полезная мощность, Вт	2295	2910	3519
Ток, А	6,72	6,93	7,01
Частота вращения ротора, об/мин	1027	1348	1643
КПД, %	0,80	0,83	0,85
cosφ	0,84	0,84	0,84

Результаты экспериментального исследования показывают, что способ повышения энергетического коэффициента полезного действия асинхронного двигателя имеет экспериментальное подтверждение.

### 3.6 Разработка способа контроля выходных переменных асинхронного двигателя в электроприводе

Центробежные вентиляторы, оборудованные фланцевым соединением, часто 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. Косвенные методы вычисления необходимой информации обычно применяются для определения выходных переменных электродвигателя, вместе с задачей идентификации параметров, решение которой посвящена глава 2.

Предложен метод определения частоты вращения и электромагнитного момента ротора АД. В основе способа лежит способ определения активных и реактивных составляющих сопротивления статора и ротора, которые являются функциями скольжения и частоты. Математические выражения для определения электромагнитного момента и угловой скорости АД, полученные из системы уравнений 2.70-2.75 и выражения  $I = Uy$ , представлено следующей системой уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega = \frac{3,795\pi f \left( \frac{0,12781Uf + 0,68382U - \sqrt{0,011236f^2U^2 + 0,83742fU^2 + 395,19IU - 24,7834U^2}}{30u} \right) + 30U\pi f}{137,214(1-s)U^3} \\ M = \frac{30u}{s((4,3298s + 2,2869/s)^2 + 0,015475f^2)} \cdot \left( 3,795\pi f \left( \frac{0,12781Uf + 0,68382U + 30U\pi f - \sqrt{0,011236f^2U^2 + 0,83742fU^2 + 395,19IU - 24,7834U^2}}{30u} \right) \right) \end{array} \right. \quad (3.10)$$

Построена обобщенная функциональная схема косвенного контроля выходных механических переменных АД (рис. 3.14). Алгоритм косвенного контроля электромагнитного момента и угловой скорости АД приведен на рисунке 3.13. В алгоритме (рис. 3.13), учитывая данные АД, постоянные коэффициенты и значения фазных напряжений и токов, полученных с соответствующих датчиков,

определяются выходные механические переменные АД в блоках вычисления электромагнитного момента и угловой скорости.

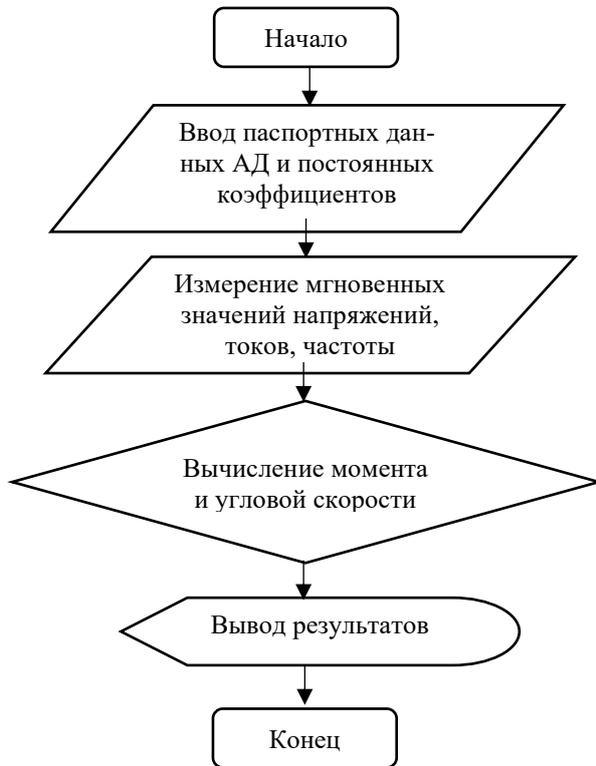


Рисунок 3.13 – Алгоритм контроля электромагнитного момента и угловой скорости АД

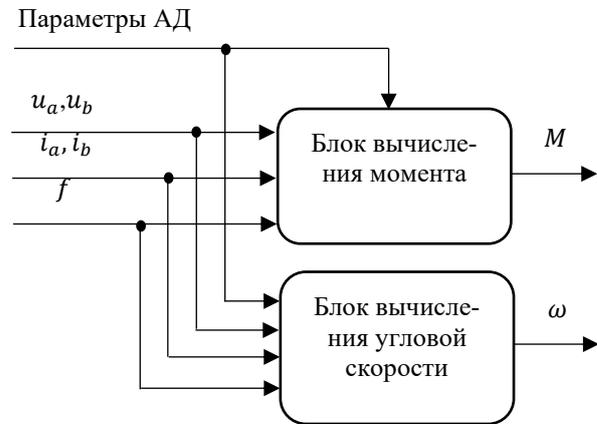


Рисунок 3.14 – Функциональная схема контроля электромагнитного момента и угловой скорости АД

В таблице 3.6 представлены значения частоты вращения ротора АД АИР100S4 при различных нагрузках. Значения  $n_{до}$  обозначают частоту вращения, полученную от датчика оборотов (рис. 3.15), измеряемую в оборотах в минуту (об/мин). Значения  $n_{бс}$  отражают частоту вращения, полученную с использованием предложенного метода измерения, также измеряемую в об/мин.  $\Delta$  представляет собой абсолютную погрешность определения частоты вращения, измеряемую в об/мин.  $\varepsilon$  обозначает относительную погрешность определения частоты вращения, выраженную в процентах. Эти результаты были сопоставлены со значениями, полученными с контрольного датчика оборотов ТЭМП-4. Допустимая погрешность измерения частоты вращения не превышает 0,2 %.



Рисунок 3.15 – Тахометр электронный ТЭМП-4, предназначенный для измерения частоты вращения ротора АД а) фотоэлектрический датчик оборотов б) ТЭМП-4

Таблица 3.6 – Результаты измерений частоты вращения ротора АД

40 Гц			
$n_{бс}$ , об/мин	$n_{до}$ , об/мин	$\Delta$ , об/мин	$\varepsilon$ , %
1213	1217	4	0,33
1187	1193	6	0,50
1139	1143	4	0,35
50 Гц			
$n_{бс}$ , об/мин	$n_{до}$ , об/мин	$\Delta$ , об/мин	$\varepsilon$ , %
1502	1510	8	0,53
1495	1494	-1	-0,07
1464	1470	6	0,41
60 Гц			
$n_{бс}$ , об/мин	$n_{до}$ , об/мин	$\Delta$ , об/мин	$\varepsilon$ , %
1802	1808	6	0,33
1781	1783	2	0,11
1744	1751	7	0,40

Проведено сравнение предлагаемого способа с другими способами косвенного определения частоты вращения ротора АД. Результаты сравнения приведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Сравнение способов косвенного определения частоты вращения ротора АД

Способ	Предлагаемый	Использующий флуктуацию времени перехода сигнала тока статора через «ноль»	Использующий адаптивный регулятор	Основанный на оценке потока ротора
$\varepsilon, \%$	0,53	0,61	3,00	0,67

Разработаны алгоритм и способ косвенного контроля электромагнитного момента и угловой скорости АД позволяют проводить контроль этих переменных с повышенной точностью и отличаются от известных относительной простотой реализации. По результатам экспериментальных исследований сделаны следующие выводы: разработанный способ корректно определяет частоту вращения двигателя в диапазоне нагрузок от холостого хода до номинальной; при различной частоте основной гармоники напряжения, происходит корректное определение частоты вращения ротора, относительная погрешность измерения не превышает 0,55%.

### Выводы по третьей главе

1. Разработан и создан лабораторный стенд для исследования частотно-регулируемого асинхронного двигателя АИР100S4.
2. Определены механические характеристики, выполнен анализ рабочих характеристик АД, исследована зависимость частоты вращения ротора от момента сопротивления рабочей машины, подтверждена адекватность предложенной модели реальному двигателю в установившихся режимах работы.
3. Исследованы энергетические зависимости характеристик асинхронного электродвигателя (активной, реактивной и полной мощности) при изменении

частоты и напряжения питающей сети. Выдвинутая ранее гипотеза получила экспериментальное подтверждение: в асинхронном двигателе имеется возможность изменять соотношение между активной и индуктивной составляющими мощности путем одновременного воздействия частотой напряжением сети, подведенного к фазе, и скольжением ротора, и, как следствие, изменять энергетические характеристики асинхронного двигателя.

4. Полученные в ходе экспериментальных исследований энергетические зависимости характеристик асинхронного электродвигателя (активной, реактивной и полной мощности), подтверждают наличие оптимального скольжения для каждой частоты питающего напряжения. При частоте 50 Гц оптимальным по критерию энергоэффективности является скольжение в диапазоне  $s_{\text{опт}} = 0,065 \div 0,075$  (что подтверждает найденное ранее при теоретическом исследовании, оптимальное скольжение  $s_{\text{опт}} = 0,077$ ).

5. Проведена проверка способа повышения энергетической эффективности асинхронного двигателя. Совпадение экспериментальных данных с результатами компьютерного моделирования показало относительную погрешность не более 5 %.

6. Разработан способ косвенного контроля электромагнитного момента и угловой скорости асинхронного двигателя (3.10). Разработанный способ корректно определяет частоту вращения двигателя в диапазоне нагрузок от холостого хода до номинальной, при питании двигателя от частотного преобразователя. Относительная погрешность измерения не превышает 0,55%.

## 4 ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ СУШИЛЬНОГО АГРЕГАТА

### 4.1 Определение условий существования кипящего слоя, рабочая скорость

В состоянии кипящего слоя для процессов имеет значение выполнение условия, при котором скорость рабочего агента должна быть выше предельных значений. Для полидисперсного материала необходимо учитывать рабочую скорость ожижающего агента  $u_p$ . Нижняя граница скорости кипящего слоя  $u_{кр2}$  соответствует скорости псевдооживления крупной фракции, верхняя граница  $u_{кр1}$  представляет собой скорость витания мелкой фракции [68, 118]. На рисунке 4.1 представлена кривая псевдооживления [118], которая наглядно демонстрирует взаимосвязь скорости и состояния кипящего слоя.

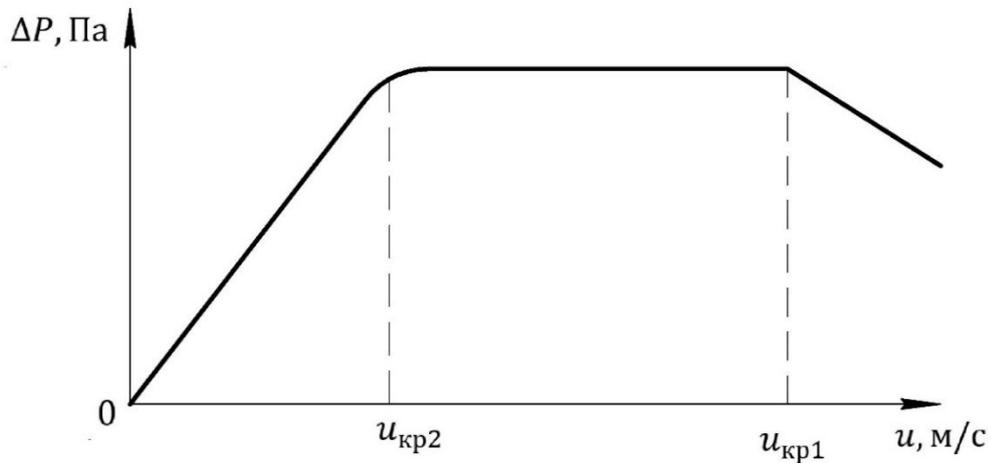


Рисунок 4.1 – Кривая псевдооживления [118]

Рисунок 4.1 представляет собой график, который иллюстрирует начало псевдооживления для полидисперсного материала. В нашем случае материалом служит зерно различных культур, которое рассматривается как две фракции с разными размерами частиц —  $d_1$  и  $d_2$ , где  $d_2 > d_1$ . В зависимости от фракций начало псевдооживления происходит при различных критических скоростях. Таким образом, область псевдооживления материала определяется нижней границей —  $d_2 \rightarrow u_{кр2}$  и верхней границей —  $d_1 \rightarrow u_{кр1}$ . Это означает, что при значениях скорости

воздушного потока между этими границами материал проявляет признаки псевдоожижения. Размытость начала псевдоожижения объясняется различными критическими скоростями для разных фракций материала.

В нашем исследовании мы столкнулись с проблемой ограничений методов дисперсионного анализа, которые не позволяют полностью охарактеризовать каждую частицу дисперсной системы [6, 85, 101, 118]. Принято решение использовать аппроксимацию, представляющую размеры зерен в виде эквивалентных частиц. Эти частицы имеют правильную геометрическую форму и позволяют нам более точно оценить параметры системы. Эффективный диаметр зерна,  $d_i$ , мм, может быть определен с использованием соотношения [97, 102]:

$$d_i = \sqrt[3]{\frac{6m_i}{\pi\rho_m}}, \quad (4.1)$$

где  $m_i$  – масса исходной зерновки, кг,

$\rho_m$  – плотность исходного зерна, кг/м<sup>3</sup>.

В таблице 4.1 приведены характеристики семян различных культур.

Таблица 4.1 – Характеристики семян различных культур [93]

Наименование культуры	Размеры семян, мм						Вес 1000 семян, г		Удельный вес, г/см <sup>3</sup>	
	ширина		толщина		длина		от	до	от	до
	от	до	от	до	от	до				
Гречиха	3,0	5,2	2,0	4,2	8,0	18,6	23,5		0,51	0,7
Кукуруза	5,0	11,5	2,5	8	7,0	14,6	286		0,6	0,82
Овес	1,4	4,0	1,2	3,6	5,5	13,5	20	42	0,39	0,5
Просо	1,2	3,0	1,0	2,2	4,4	8,0	6,0	6,5	0,66	0,85
Пшеница	1,6	4,0	1,5	3,8	от	до	22	42	1,2	1,5
Рожь	1,4	3,6	1,2	3,5	4,2	8,6	13	32	1,2	1,5
Ячмень	2,0	5,0	1,4	4,5	5,0	10,0	31	51	1,3	1,4

Для расчета скорости сушильного агента необходимо учесть условие, при

котором частицы материала наименьшего диаметра  $d_1$  не будут уноситься потоком. По формуле для определения скорости витания [118] можно вычислить скорость уноса, которую обозначим как  $u_{кр1}$ , м/с:

$$u_{\text{вит}} = u_{\text{кр1}} = \frac{\nu_{\text{ср}}}{d_1 \cdot \rho_{\text{ср}}} \cdot \left( \frac{Ar}{18 + 0,575 \cdot \sqrt{Ar}} \right), \quad (4.2)$$

Критерий Архимеда:

$$Ar = \frac{g \cdot d_1^3}{\nu_{\text{ср}}^2} \cdot \frac{\rho_{\text{м}} - \rho_{\text{ср}}}{\rho_{\text{ср}}}, \quad (4.3)$$

где  $\nu_{\text{ср}}$  – вязкость агента сушки при средней температуре, м<sup>2</sup>/с;

$d_1$  – меньший диаметр зерновки, м;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$\rho_{\text{м}}$  – плотность влажного зерна, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_{\text{ср}}$  – плотность сушильного агента при средней температуре, кг/м<sup>3</sup>.

Рекомендации [5] подчеркивают, что для расчета скорости начала псевдоожижения необходимо учитывать влияние температуры агента сушки, а также температуры и давления, которые входят в формулу вязкости и плотности оживающего агента. В таблице 4.2 представлены значения кинематической вязкости воздуха при различных температурах. Эта информация позволяет более точно оценить влияние температуры на процесс псевдоожижения.

Таблица 4.2 – Кинематическая вязкость воздуха при различных температурах [16]

t, °C	$\nu \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$	t, °C	$\nu \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$	t, °C	$\nu \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$
-30	10,8	30	16	130	26,63
-25	11,21	40	16,96	140	27,8
-20	11,61	50	17,95	150	28,95
-15	12,02	60	18,97	160	30,09
-10	12,43	70	20,02	170	31,29
-5	12,86	80	21,09	180	32,49
0	13,28	90	22,1	190	33,67
10	14,16	100	23,13	200	34,85
15	14,61	110	24,3		
20	15,06	120	25,45		

На основе значений, представленных в таблице 4.2, получено уравнение регрессии для определения кинематической вязкости воздуха при различных температурах:

$$\nu = (13,1952 + 0,104634 \cdot t^2) \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с}. \quad (4.4)$$

В дальнейшем моделировании и расчетах использована полученная функциональная зависимость (4.4), адекватность обработки данных подтверждена коэффициентом детерминации 0,9969.

Для определения скорости уноса зерна  $u_{\text{кр}1}$ , м/с, учтем формулы (4.2) и (4.3):

$$u_{\text{кр}1} = \frac{d_1^2 \cdot g(\rho_M - \rho_{\text{ср}})}{\nu_{\text{ср}} \rho_{\text{ср}}^2 \left( 18 + 0,575 \cdot \sqrt{\frac{g \cdot d_1^3}{\nu_{\text{ср}}^2} \cdot \frac{\rho_M - \rho_{\text{ср}}}{\rho_{\text{ср}}}} \right)}, \quad (4.5)$$

где  $d_1$  – меньший диаметр зерновки, м;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$\rho_{\text{ср}}$  – плотность сушильного агента при средней температуре, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_M$  – плотность влажного зерна, кг/м<sup>3</sup>;

$\nu_{\text{ср}}$  – вязкость сушильного агента при средней температуре, м<sup>2</sup>/с.

Формула, предложенная Годесом О.М. и Цитовичем О.Б. [118], может быть использована для определения критической скорости начала псевдооживления, обозначаемой как  $u_{\text{кр}2}$ , м/с:

$$u_{\text{кр}2} = \frac{(d_a/d_2)^2}{1 + (d_a/d_2)^{3/2}} u_0, \quad (4.6)$$

где  $d_0$  и  $u_0$  размерные параметры:

$$d_0 = 41,6 \sqrt[3]{\frac{\nu_{\text{ср}}^2}{g} \cdot \frac{\rho_{\text{ср}}}{\rho_M - \rho_{\text{ср}}}}, \quad (4.7)$$

$$u_0 = 1,24 \sqrt[3]{g \nu_{\text{ср}} \frac{\rho_M - \rho_{\text{ср}}}{\rho_{\text{ср}}}}, \quad (4.8)$$

где  $u_{\text{кр}2}$  – скорость начала псевдооживления, м/с;

$d_2$  – наибольший эффективный диаметр зерновки, м;

$\nu_{\text{ср}}$  – вязкость сушильного агента при средней температуре, м<sup>2</sup>/с;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$\rho_{\text{ср}}$  – плотность сушильного агента при средней температуре, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_{\text{м}}$  – плотность влажного зерна, кг/м<sup>3</sup>.

Подставляя выражения (4.7), (4.8) в (4.6), получим выражение для определения скорости начала псевдооживления зерна,  $u_{\text{кр}2}$ , м/с:

$$u_{\text{кр}2} = \frac{71,6531 \cdot 10^6 \cdot d_2^2 \cdot \sqrt[3]{\frac{g\nu_{\text{ср}}(\rho_{\text{м}} - \rho_{\text{ср}})}{\rho_{\text{м}}}}}{\sqrt[3]{\frac{\nu_{\text{ср}}^2 \rho_{\text{м}}}{g(\rho_{\text{м}} - \rho_{\text{ср}})}} \cdot \left( \sqrt[3]{\frac{\nu_{\text{ср}}^2 \rho_{\text{м}}}{g(\rho_{\text{м}} - \rho_{\text{ср}})}} + 37,27 \cdot 10^4 d_2 \cdot \sqrt[3]{\frac{d_2}{\frac{\nu_{\text{ср}}^2 \rho_{\text{м}}}{g(\rho_{\text{м}} - \rho_{\text{ср}})}}}} \right)}. \quad (4.9)$$

Псевдооживленный слой существует в ограниченной области, где начало псевдооживления характеризуется критической скоростью  $u_{\text{кр}2}$ , а разрушение слоя и вынос частиц происходят при скорости витания частиц  $u_{\text{кр}1}$ . Основное условие сушки – равномерное перемешивание кипящего слоя, поэтому скорость сушильного агента должна находиться между критическими пределами  $u_{\text{кр}2}$  и  $u_{\text{кр}1}$ . Увеличение рабочей скорости  $u_{\text{р}}$  позволяет уменьшить диаметр основного аппарата и повысить удельную производительность, однако она также снижает время контакта сушильного агента с зерном и приводит к неоднородности слоя и обратному перемешиванию, что уменьшает эффективность процесса сушки [118].

Для достижения режима псевдооживления требуется выбрать рабочую скорость, по исследованиям, проведенным Муштаевым В.И., значение должно быть в пределах  $u_{\text{р}} = (1,5 \div 2,5) \cdot u_{\text{кр}2}$  [78], в работах Лыскова М.В. рабочая скорость находится в пределах  $(0,15 \div 0,2) \cdot u_{\text{кр}1}$  [73]. Используя несколько методов обезоживания, минимальное значение  $u_{\text{р}}$  для частиц размером = 1 ÷ 5 мм можно определить эмпирически (рис. 4.2) [118]. Возрастание  $u_{\text{р}}$  может привести к увеличению удельной производительности, однако это может вызвать снижение выхода

продукции и соответствующее ухудшение технико-экономических показателей.

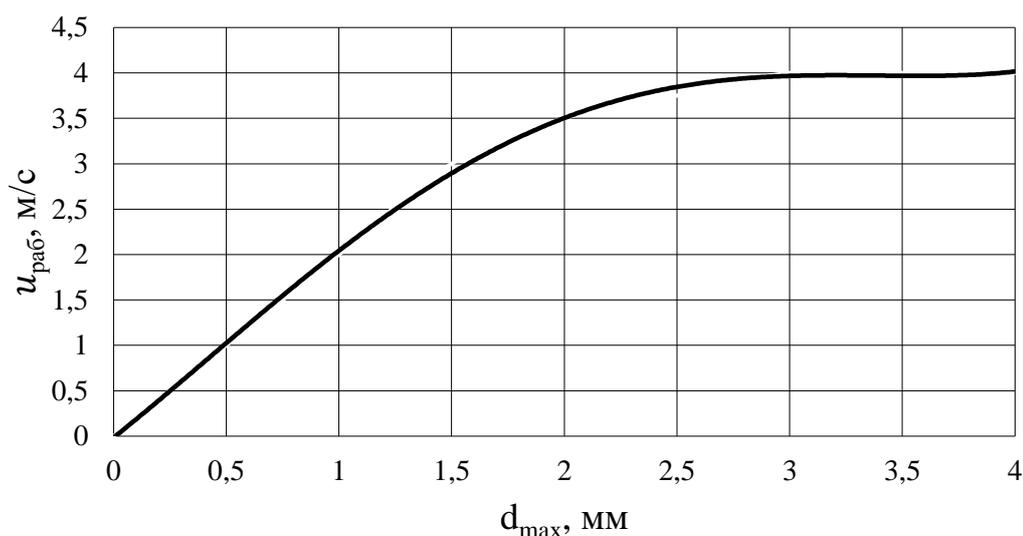


Рисунок 4.2 – Зависимость рабочей скорости газа от размера частиц [118]

Рассмотрев вышеуказанные рекомендации, мы пришли к выводу, что для обеспечения устойчивого режима псевдоожижения в аппарате необходимо установить рабочую скорость сушильного агента,  $u_p$ , м/с:

$$u_p = 4 \cdot u_{\text{кр}2}. \quad (4.10)$$

Получены физико-механические свойства зерна различных культур при различных температурах сушильного агента (табл. 4.3).

Таблица 4.3 – Физико-механические свойства зерна различных культур при различных температурах сушильного агента

Наименование культуры	50°C			60°C			70°C		
	$u_{\text{кр}1}$ м/с	$u_{\text{кр}2}$ м/с	$u_p$ м/с	$u_{\text{кр}1}$ м/с	$u_{\text{кр}2}$ м/с	$u_p$ м/с	$u_{\text{кр}1}$ м/с	$u_{\text{кр}2}$ м/с	$u_p$ м/с
Пшеница	6,98	0,36	1,44	6,58	0,28	1,12	6,17	0,23	0,92
Рожь	5,86	0,31	1,24	5,41	0,24	0,96	4,98	0,19	0,76
Ячмень	7,77	0,40	1,6	7,41	0,31	1,24	7,03	0,26	1,04
Кукуруза	11,09	0,72	1,45	2,88	0,61	1,23	2,44	0,52	1,04
Овес	4,67	0,25	1	4,38	0,19	0,76	4,1	0,16	0,64
Гречиха	5,45	0,20	0,39	0,8	0,15	0,31	0,6	0,12	0,25
Просо	3,62	0,10	0,4	3,23	0,08	0,32	2,9	0,06	0,24

Полученные данные позволили сделать вывод о необходимости учета

физико-механических свойств зерна и изменения характеристик сушильного агента при выборе рабочей скорости для процесса сушки зерна в кипящем слое [135, 140, 146, 150]. С учетом этих факторов было определено значение рабочей скорости сушильного агента, выражение (4.10), которая позволит более эффективно проводить сушку зерна.

Рассмотренные вопросы указывают на важность разработки и внедрения нового оборудования для сушки и переработки зерна. Особое внимание необходимо уделить поддержанию устойчивого кипящего слоя зерна в сушильной камере, так как это способствует равномерному нагреву и сохранению высокого качества обрабатываемого зерна. Разработка частотно-регулируемого асинхронного электропривода может значительно повысить эффективность процесса путём регулирования скорости агента сушки.

## 4.2 Расчет сушилки зерна в кипящем слое

Рассмотрим расчет сушки по готовому продукту  $G_1$ , кг; начальная влажность зерна  $u_1$ , %, конечная  $u_2$ , %; температура сушильного агента на входе аппарата  $t_1$ , °С, на выходе  $t_2$ , °С; температура материала на входе аппарата  $\theta_1$ , °С, на выходе  $\theta_2$ , °С; влагосодержание поступающего воздуха  $x_0$ , кг/кг, при температуре  $t_0$ , °С; энтальпия поступающего в калорифер воздуха  $i_0$ , кДж/кг; минимальный размер зерна  $d_1$ , мм, максимальный  $d_2$ , мм; средняя плотность зерна  $\rho_{cp}$ , кг/м<sup>3</sup>; средняя теплоемкость  $c_n$ , кДж/кг · К; экспозиции зерна  $\tau$ , мин. Сечение сушильной камеры  $F$ , м<sup>2</sup>.

Материальный баланс.

Высота насыпного слоя  $H_0$  определяет гидравлическую потерю напора  $\Delta p = \rho_T(1 - \varepsilon_0)gH_0$ , то есть энергетический расход на взвешивание, степень расширения и реальная высота кипящего слоя определяется рабочей скоростью. Характеристическая высота, на которой практически сосредотачиваются процессы межфазного теплообмена, зависит от диаметра зерна и составляет [118]:

$$H_0 = 20d_{cp} = 10(d_1 + d_2). \quad (4.11)$$

Объём зерна в сушильной камере  $V_3$  с учетом (4.11) определяется выражением,  $\text{м}^3$ :

$$V_3 = FH_0 = 10(d_1 + d_2)H_0. \quad (4.12)$$

Масса зерна в сушилке  $G_1$  с учетом (4.12), кг:

$$G_1 = V_3\rho_{\text{ср}} = 10(d_1 + d_2)H_0\rho_{\text{ср}}. \quad (4.13)$$

Масса высушенного зерна  $G_2$ , кг:

$$G_2 = G_1 \cdot \frac{100 - u_1}{100 - u_2}. \quad (4.14)$$

Целью составления материального баланса является определение массы влаги  $W$ , удаляемой при сушке, кг:

$$W = G_1 - G_2. \quad (4.15)$$

Рассмотрим процесс конвективной сушки на примере воздушной сушилки, принципиальная схема конвективной сушилки представлена на рисунке 4.3, воздух нагревается в калорифере перед сушилкой и однократно проходит через сушильную камеру.

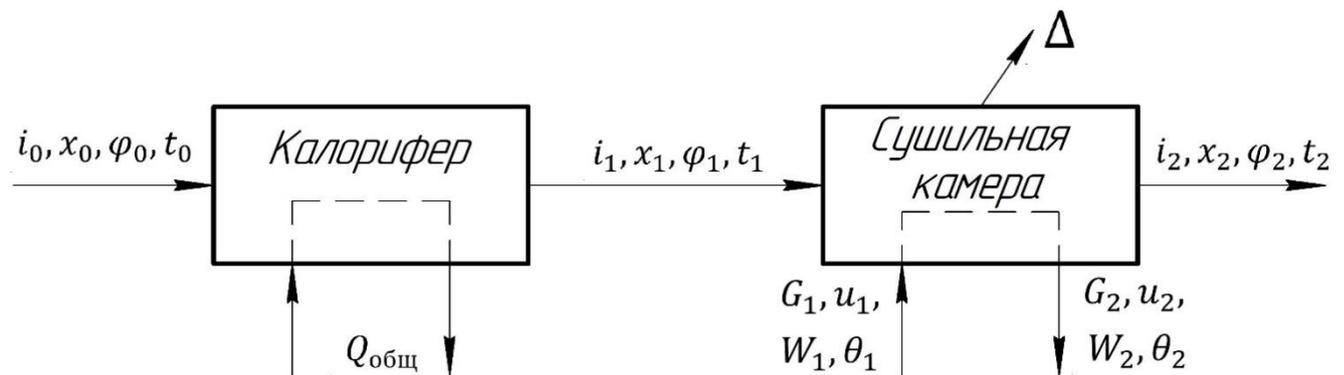


Рисунок 4.3 – Принципиальная схема конвективной сушилки

Пусть на сушку поступает воздух с влагосодержанием  $x_0$ , кг/кг сухого воздуха, причем расход абсолютно сухого воздуха составляет  $G_{\text{уд}}$ , кг. Из сушилки (при отсутствии потерь воздуха) выходит такое же количество абсолютно сухого воздуха, а его влагосодержание меняется до  $x_2$  кг/кг сухого воздуха. Масса влаги, испаряющейся из материала в сушилке, составляет  $W$  кг.

Энтальпия воздуха, выходящего из калорифера  $i_1$ , кДж/кг:

$$i_1 = (1 + 1,96x_0)t_1 + 2480x_0. \quad (4.16)$$

Тепловая денатурация – один из основных физических агентов, которые оказывают влияние на зерновые культуры. Под действием высоких температур разрушаются водородные связи и нарушается взаимодействие гидрофобных групп. Нагрев до температуры 45 °С при сушке не влияет на всхожесть зерна, но при дальнейшем увеличении температуры содержание клейковины снижается, а качество ухудшается, снижается выход муки, снижается энергия прорастания и, как следствие, показатели всхожести уменьшаются [94]. Чтобы сохранить высокое качество обработанного зерна, примем  $\theta_2 = 45^\circ\text{C}$ .

Температура сушильного агента на входе аппарата  $t_2, ^\circ\text{C}$ , как показывают результаты экспериментов, можно принять [105, 106]:

$$t_2 = \theta_2 + 4^\circ\text{C}. \quad (4.17)$$

Энтальпия воздуха, поступающего в калорифер  $i_0$ , кДж/кг:

$$i_0 = (1 + 1,96x_0)t_0 + 2480x_0. \quad (4.18)$$

Удельные потери теплоты  $\Delta$ , кДж/кг:

$$\Delta = q_m + q_{\text{пот}} - 4,19\theta_1, \quad (4.19)$$

где  $q_m$  – удельные потери теплоты с материалом, кДж/кг;  $q_{\text{пот}}$  – потери теплоты в окружающую среду, приняты 10 % от суммы потерь с материалом, на испарение влаги и на нагрев материала и воздуха до температуры  $\theta_2$ , кДж/кг:

$$q_m = \frac{G_2 c_m}{W_1} (\theta_2 - \theta_1); \quad (4.20)$$

$$q_{\text{пот}} = 0,1(2480 + 1,96\theta_2 + q_m - 4,19\theta_1). \quad (4.21)$$

Для определения энтальпии воздуха, выходящего из сушилки, необходимо знать влагосодержание выходящего воздуха, которое определяется системой уравнений (4.22) и (4.23):

$$i_2 = (1 + 1,96x_2)t_2 + 2490x_2, \quad (4.22)$$

удельный расход теплоты  $q$ , кДж/кг:

$$q = \frac{i_1 - i_0}{x_2 - x_0}, \quad (4.23)$$

из которого имеем влагосодержание выходящего воздуха из сушилки,  $x_2$ , кг/кг:

$$x_2 = \frac{i_1 - x_0 \Delta - t_2}{\Delta + 1,96 \cdot t_2 + 2480}. \quad (4.24)$$

Тепловой КПД ( $r$  при  $\theta_2, ^\circ\text{C}$ ):

$$\eta = \frac{r}{q}. \quad (4.25)$$

Подставив значения (4.22-4.24) в (4.25), получим значение теплового КПД:

$$\eta = \frac{r \left( - \left( \frac{0,022 d_{cp} F \rho (100 - u_1) c_m (t_2 - 4 - \theta_1)}{(100 - u_2) \left( \frac{d_{cp} F \rho}{50} - \frac{d_{cp} F \rho (100 - u_1)}{5000 - 50 u_2} \right)} + \right) x_0 + \right.}{\left. \frac{+247,216 + 0,196 t_2 - 4,609 \theta_1}{(1 + 1,96 x_0) t_1 + 2490 x_0 - t_2} - x_0 \right)}{\frac{0,022 d_{cp} F \rho (100 - u_1) c_m (t_2 - 4 - \theta_1)}{(100 - u_2) \left( \frac{d_{cp} F \rho}{50} - \frac{d_{cp} F \rho (100 - u_1)}{5000 - 50 u_2} \right)} + 247,216 + 0,196 t_2 - 4,609 \theta_1}. \quad (4.26)$$

Трёхмерный график зависимости теплового КПД от начальной влажности и температуры агента сушки пшеницы  $\eta = f(t_1, u_1)$  представлен на рисунке 4.4. Температура зерна, поступающего на сушку, и наружного воздуха принята равной  $25^\circ\text{C}$ .

Из выражения (4.26) и зависимости на рисунке 4.4 можно сделать вывод о том, что работа сушильной камеры с кипящим слоем в балансовом режиме приводит к увеличению температуры сушильного агента на входе аппарата ( $t_1, ^\circ\text{C}$ ) и температуры поступающего зерна ( $\theta_1, ^\circ\text{C}$ ), что в свою очередь увеличивает тепловой КПД. Это позволяет сократить объем газа-теплоносителя и уменьшить размеры основного и вспомогательного оборудования. Однако следует учесть, что увеличение температуры сушильного агента может вызвать перегрев зерна на выходе газораспределительного устройства из-за повышенной скорости сушильного агента на поверхности слоя и в отверстиях решетки, что следует из условия неразрывности потока.

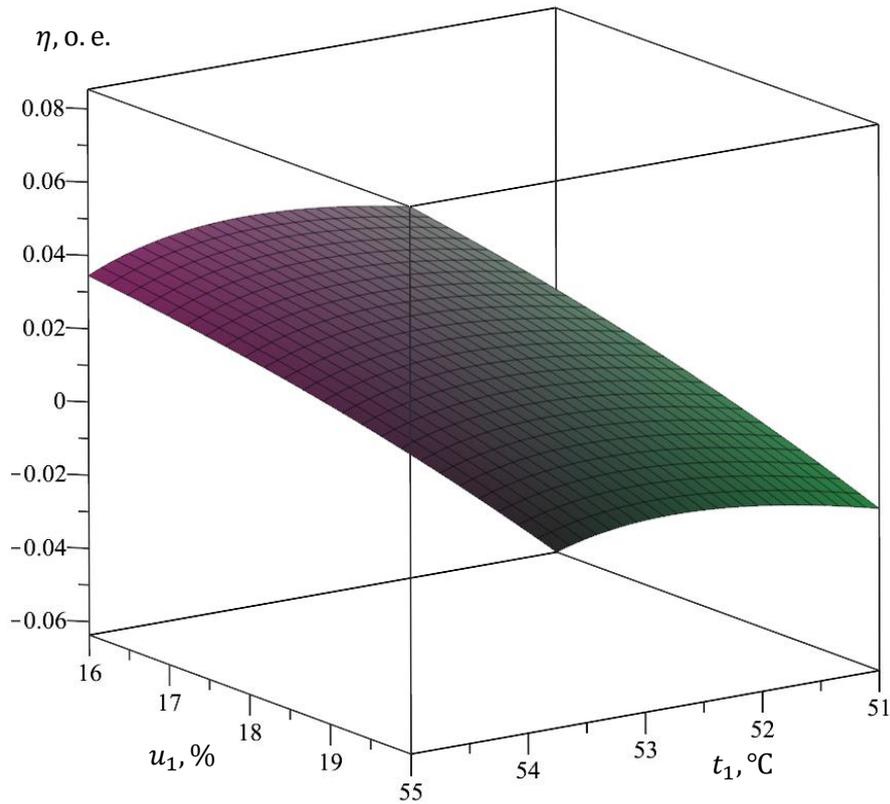


Рисунок 4.4 – Графическая зависимость теплового КПД от начальной влажности температуры агента сушки  $\eta = f(t_1, u_1)$

Общий расход теплоты  $Q_{\text{общ}}$ , кДж:

$$Q_{\text{общ}} = q \cdot W. \quad (4.27)$$

Параметры уходящего воздуха, общий и удельный расход.

Удельный расход  $G_{\text{уд}}$ , кг/кг:

$$G_{\text{уд}} = \frac{1}{x_2 - x_0}. \quad (4.28)$$

Общий расход  $G$ , кг:

$$G = G_{\text{уд}} W. \quad (4.29)$$

Относительная влажность уходящего воздуха  $\varphi_2$ , %:

$$\varphi_2 = \frac{x_2 \cdot P \cdot 100}{P_{\text{нас}}(x_2 + 0,622)}. \quad (4.30)$$

Объём влажного выхода на выходе из сушилки при  $\varphi_2$  и  $t_2$ , м<sup>3</sup>:

$$V_{\text{в}} = G \frac{29.27 \cdot (T_0 + t_2)}{10000 \cdot \left(1 - \frac{\varphi_2}{100}\right)}. \quad (4.31)$$

Объём воздуха, продуваемый при рабочей скорости через площадь сушилки,  $\text{м}^3/\text{с}$ :

$$V_p = F \cdot u_p. \quad (4.32)$$

Время, необходимое для сушки при рабочей скорости сушильного агента, мин:

$$\tau_p = \frac{V_B}{60 \cdot V_p}. \quad (4.33)$$

Уравнение (4.33) выражает зависимость скорости сушки от температуры сушильного агента. общее время, необходимое для сушки при рабочей скорости сушильного агента:

$$\tau_p = \frac{\left( 0,24392 \left( 0,02d_{cp}F\rho - \frac{0,02d_{cp}F\rho(100 - u_1)}{100 - u_2} \right) (273 + t_2) \right)}{Fu_{кр1} \left( \frac{-qx_0 + i_0 - t_2}{q + 2479,996 + 1,96t_2} - x_0 \right) \times} \times \left( 10^3 - \frac{7,6 \cdot 10^6 (-qx_0 + i_0 - t_2)}{(q + 2479,996 + 1,96t_2) \left( \frac{299(-qx_0 + i_0 - t_2)}{q + 2479,996 + 1,96t_2} + 185,98 \right)} \right), \quad (4.34)$$

где

$$i_0 = (1 + 1,96x_0)t_1 + 2480x_0,$$

$$q = \frac{0,022d_{cp}F\rho(100 - u_1)c_m(t_2 - 4 - \theta_1)}{(100 - u_2) \left( 0,02d_{cp}F\rho - \frac{0,02d_{cp}F\rho(100 - u_1)}{100 - u_2} \right)} + 247,22 + 0,196t_2 - 4,61\theta_1,$$

$$u_{кр1} = \frac{d_1^2 \cdot g(\rho - \rho_B)}{v_{cp}\rho^2 \left( 18 + 0,575 \cdot \sqrt{\frac{g \cdot d_1^3 \cdot \rho - \rho_B}{v_{cp}^2 \cdot \rho_B}} \right)}.$$

В выражении (4.34) неизвестной величиной является температура сушильного агента на входе  $t_2$ , °С, которая при заданных остальных параметрах определяет необходимое время сушки  $\tau_p$ .

На основе изучения термоустойчивости зерна различных культур С.Д. Птицын [93] установил зависимость максимально допустимой температуры нагрева зерна для злаковых культур, °С:

$$t_{max} = \frac{2350}{0,37(100 - \omega_3) + \omega_3} + 20 - 10 \lg \tau_{max}, \quad (4.35)$$

где  $\omega_3$  – относительная влажность зерна, %;

$\tau_{max}$  – экспозиция (время выдержки) зерна, мин.

Значение  $t_{max}$ , определяемое по формуле (4.35), для различных значений экспозиции сушки, показали: чем выше влажность зерна и больше его выдержка в нагретом состоянии, тем ниже максимально допустимая температура нагрева зерна.

Из выражения (4.35) получим формулу для определения допустимого времени сушки зерна для заданных значений температуры и влажности:

$$\tau_{max} = e^{\frac{(290.126 - 14.506 t_{max}) \omega_3 - 851.956 t_{max} + 71149.879}{3700 + 63 \omega_3}}. \quad (4.36)$$

С учетом принятого ранее решения выбора расчетного значения максимальной температуры нагрева зерна  $t_{max} = 45$  °С в процессе сушки, определяемая тепловой денатурацией, уравнение (4.36) может быть представлено в виде:

$$\tau_{max} = e^{\frac{32811,83 - 362,6572 \omega_3}{3700 + 63 \omega_3}}.$$

Также необходимо учитывать допустимую величину влагосъема при сушке зерна, так как быстрое удаление влаги может вызвать появление трещин на поверхности зерна и снизить его качество [93]. Хотя трещины на оболочке семян не влияют на их всхожесть, но эти семена становятся неустойчивыми при хранении. Кроме того, трещины в зерне могут способствовать размножению вредоносных микроорганизмов после высева семян или в процессе их хранения. По опытным данным, для семян пшеницы величину влагосъема, не влияющую на качество, можно определить по эмпирической зависимости [117]:

$$\Delta u = u_1 - u_2 = 0,185 \tau_u + 3, \quad (4.37)$$

для кукурузы:

$$\Delta u = u_1 - u_2 = 0,09 \tau_u + 1.$$

Проведение дальнейших исследований будет осуществляться с учетом конкретной культуры зерна - пшеницы, в связи с тем, что культура семян оказывает влияние на различные аспекты, такие как размер и форма, а также внутреннее

строение зерновки, что, в свою очередь, сказывается на физико-химических свойствах и параметрах сушки.

Из выражения (4.37) определяем время сушки, при котором не превышает допустимая величина влагосъема:

$$\tau_{\Delta u} = \frac{\Delta u - 3}{0,185}. \quad (4.38)$$

При ограничивающих условиях, обусловленных технологическими требованиями, такими как максимально допустимая температура нагрева, допустимая экспозиция и максимальный влагосъем, необходимо определить параметры оптимального режима процесса тепловой обработки зерна. Эти параметры должны обеспечивать наибольшую эффективность процесса в соответствии с выбранным критерием оптимизации. Граничные условия (4.38) и (4.36) определяют область расчетного времени сушки:  $\tau_{max} > \tau_p > \tau_{\Delta u}$ . Учитывая вышеизложенное, мы приняли решение определить расчетное время  $\tau_p$  для процесса сушки.

$$\tau_p = 2\tau_{\Delta u}, \quad (4.39)$$

что позволяет обеспечить необходимую экспозицию теплового воздействия при обработке зерна и обеспечивает равномерность тепловой обработки, что в конечном итоге позволяет сохранить высокое качество обрабатываемого зерна.

При совместном решении системы уравнений (4.39) и (4.34) определим температуру сушильного агента на входе  $t_1$ , °C:

$$t_1 = \frac{\left( (5,41q + 233)x_0 + 132 \right) u_1 - 81,1q + 1500}{5,29u_{кр2}(u_1 - 15)(z_2 - 100)(x_0 + 0,51)} + \frac{(-21,5q - 553)u_1 + 2,58q + 6640}{5,29u_{кр2}(u_1 - 15)(z_2 - 100)(x_0 + 0,51)}. \quad (4.40)$$

В данном случае, удельный расход теплоты  $q$  определяется по формуле (4.23), а критическая скорость начала псевдооживления  $u_{кр2}$  определяется по выражению (4.9). Скорость псевдооживления зависит от вязкости воздуха, которая определяется формулой (4.5), а та, в свою очередь, зависит от температуры сушильного агента  $t_1$ . Проведенный анализ показал, что изменение значений температуры (4.40) от начальной влажности и температуры зерна, а также влагосодержания

воздуха, можно с достаточной степенью точности описать с помощью множественной линейной регрессии, записываемой в виде:

$$t_1 = \beta_1 + \beta_2 x_0 + \beta_3 u_1 + \beta_4 t_3 + \beta_5 x_0^2 + \beta_6 u_1^2 + \beta_7 t_3^2 + \beta_8 x_0 u_1 + \beta_9 u_1 t_3 + \beta_{10} x_0 t_3, \quad (4.41)$$

где  $\beta_1, \beta_2, \beta_3 \dots \beta_{10}$  – коэффициенты модели.

Для оценки неизвестных параметров  $\beta_j$  ( $j = 1 \dots 10$ ) уравнения регрессии (4.41), все регрессоры, их квадраты и попарные произведения были использованы в качестве независимых переменных. Для этой оценки была взята выборка объемом 1860 измерений при ограничивающих условиях, определяемых технологическими требованиями. Результаты регрессионного анализа приведены на рисунке 4.5.

Вывод итогов

Регрессионная статистика	
Множественный R	0,99380776
R-квадрат	0,987653864
Нормированный R-квадрат	0,987573651
Стандартная ошибка	0,842782377
Наблюдения	1860

Дисперсионный анализ

	df	SS	MS	F	Значимость F
Регрессия	12	104947,3589	8745,613241	12312,87233	0
Остаток	1847	1311,891103	0,710282135		
Итого	1859	106259,25			

	Коэффициенты	Стандартная ошибка	t-статистика	P-Значение	Нижние 95%	Верхние 95%	Нижние 95,0%	Верхние 95,0%
Y-пересечение	374,2151927	6,378112336	58,67177826	0	361,7061249	386,7242604	361,7061249	386,7242604
Переменная X 1	5846,805865	159,2483074	36,71502675	4,5699E-222	5534,480249	6159,131481	5534,480249	6159,131481
Переменная X 2	-29,54625059	0,628073887	-47,04263494	0	-30,77806	-28,31444118	-30,77806	-28,31444118
Переменная X 3	-1,449628472	0,423410853	-3,423692293	0,000631256	-2,28004267	-0,619214275	-2,28004267	-0,619214275
Переменная X 4	4098,196988	27070,22915	0,151391293	0,87968359	-48993,26838	57189,66236	-48993,26838	57189,66236
Переменная X 5	0,946209945	0,023102525	40,95699248	1,8623E-261	0,900900136	0,991519754	0,900900136	0,991519754
Переменная X 6	0,017418051	0,019826538	0,878522052	0,379774746	-0,021466732	0,056302834	-0,021466732	0,056302834
Переменная X 7	151370,5531	1496997,704	0,101116089	0,919469281	-2784615,003	3087356,109	-2784615,003	3087356,109
Переменная X 8	-0,01026653	0,000279716	-36,70335634	5,8555E-222	-0,010815124	-0,009717937	-0,010815124	-0,009717937
Переменная X 9	-0,00024553	0,000303593	-0,808745329	0,418765809	-0,000840952	0,000349892	-0,000840952	0,000349892
Переменная X 10	-101,5274126	1,531983456	-66,27187276	0	-104,532014	-98,52281131	-104,532014	-98,52281131
Переменная X 11	0,034729569	0,001188213	29,22839312	1,104E-154	0,032399186	0,037059952	0,032399186	0,037059952
Переменная X 12	-71,88247128	2,143662493	-33,53255073	5,9917E-193	-76,08672764	-67,67821492	-76,08672764	-67,67821492

Рисунок 4.5 – Вывод итогов построения регрессии

По значениям t – статистики или P-значениям (рис. 4.5), видно, что значимое влияние на зависимую переменную, температура агента сушки  $t_1$ , оказывают переменные X1, X2, X3, X5, X6, X8, X10, X11, X12 и незначимые – переменные X4, X7, X9.

Исключим незначимые переменные, для которых значение вероятности значимости наибольшее, то есть переменные X4, X7, X9. Результат представлен на рисунке 4.6.

Вывод итогов								
Регрессионная статистика								
Множественный R	0,99378348							
R-квадрат	0,987605604							
Нормированный R-квадрат	0,987552036							
Стандартная ошибка	0,843515061							
Наблюдения	1860							
Дисперсионный анализ								
	df	SS	MS	F	Значимость F			
Регрессия	8	104942,2308	13117,77885	18436,33633	0			
Остаток	1851	1317,019185	0,711517658					
Итого	1859	106259,25						
	Коэффициенты	Стандартная ошибка	t-статистика	P-Значение	Нижние 95%	Верхние 95%	Нижние 95,0%	Верхние 95,0%
Y-пересечение	370,9426035	5,661317626	65,52230911	0	359,8393645	382,0458424	359,8393645	382,0458424
Переменная X 1	5936,568235	56,51656991	105,0411984	0	5825,725314	6047,411156	5825,725314	6047,411156
Переменная X 2	-29,54625059	0,628619912	-47,00177332	0	-30,77912914	-28,31337204	-30,77912914	-28,31337204
Переменная X 3	-1,042412553	0,034179937	-30,49779038	7,3371E-166	-1,109447832	-0,975377274	-1,109447832	-0,975377274
Переменная X 4	0,946209945	0,02312261	40,9214169	2,8467E-261	0,90086081	0,99155908	0,90086081	0,99155908
Переменная X 5	-0,01026653	0,00027996	-36,6714755	8,9621E-222	-0,0108156	-0,009717461	-0,0108156	-0,009717461
Переменная X 6	-101,5274126	1,533315306	-66,21430845	0	-104,5346218	-98,52020348	-104,5346218	-98,52020348
Переменная X 7	0,034729569	0,001189246	29,20300509	1,6148E-154	0,032397164	0,037061974	0,032397164	0,037061974
Переменная X 8	-73,0699605	1,781092135	-41,02536812	3,0463E-262	-76,56312108	-69,57679992	-76,56312108	-69,57679992

Рисунок 4.6 – Вывод итогов построения регрессии

Как видно из рисунка 4.6, по сравнению с рисунком 4.5 значения коэффициентов детерминации практически не изменились. Получили «короткую» регрессию, включающую только переменные X1, X2, X3, X5, X6, X8, X10, X11, X12. Полученная регрессия имеет вид:

$$t_1 = 370,9426 + 5936,568x_0 - 29,5463u_1 - 1,04241t_3 + 0,94621u_1^2 - 0,01027t_3^2 - 101,527x_0u_1 + 0,03473u_1t_3 - 73,07x_0t_3. \quad (4.42)$$

Коэффициент детерминации  $R^2 = 0,987$  показывает, что модель достаточно хорошо описывает данные. Для определения температуры агента сушки в дальнейших расчетах и моделировании была использована полученная функциональная зависимость (4.42).

### 4.3 Имитационная модель процесса сушки

Для моделирования процесса сушки использовали Simulink, имеющий широкий спектр возможностей для компьютерного моделирования процессов. Используя стандартную библиотеку пакета Simulink, осуществляем подбор

необходимых блоков модели, представляя их в виде структурной схемы. После установки блоков необходимо выполнить соединение элементов схемы, после чего получаем единую модель (рис. 4.7).

С помощью блоков задаются следующие исходные данные:

$\theta_2$  – температура материала на выходе аппарата, °С;

$\theta_1$  – температура материала на входе аппарата, °С;

$t_1$  – температура сушильного агента на входе аппарата, °С;

$x_0$  – влагосодержание поступающего воздуха, кг/кг;

$u_1$  – начальная влажность зерна, %;

$u_2$  – конечная влажность зерна, %;

$\rho_{\text{ср}}$  – средняя плотность зерна, кг/м<sup>3</sup>;

$F$  – площадь верха слоя высушиваемого зерна (сечения аппарата), м<sup>2</sup>;

$d_1$  – минимальный размер материала, м;

Остальные блоки модели используются для измерения и вычисления параметров технологического процесса сушки.

Модель позволяет определять следующие характеристики и параметры процесса сушки:

$d_i$  – эффективный диаметр зерновки определяется из соотношения (4.1), пример реализации блока подсистемы представлен на рисунке 4.8.

$H_0$  – высота насыпного слоя определяется по выражению (5.11), м;

$V_3$  – объём зерна в сушильной камере (4.12), м<sup>3</sup>;

$G_1$  – масса зерна в сушилке (4.13), кг;

$G_2$  – масса высушенного зерна (4.14), кг;

$W$  – массы влаги, удаляемой при сушке (4.15), кг;

$t_1$  – температура сушильного агента на входе аппарата (4.17), °С;

$q_m$  – удельные потери теплоты с материалом (4.20), кДж/кг;

$q_{\text{пот}}$  – потери теплоты в окружающую среду (4.21), кДж/кг;

$i_0$  – энтальпия воздуха, поступающего в калорифер, кДж/кг;

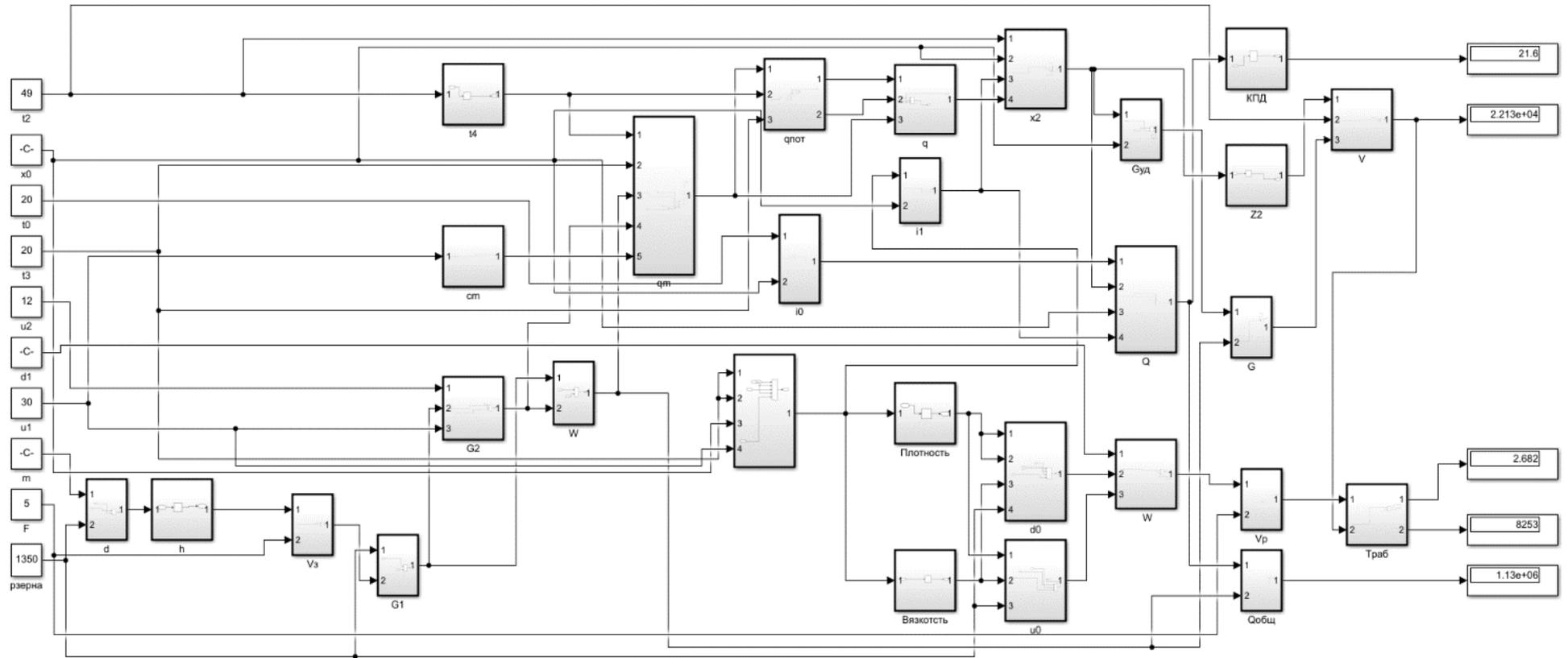


Рисунок 4.7 – Имитационная модель процесса сушки

$t_1$  – температуру сушильного агента на входе (4.42), °C;

$\Delta$  – дельные потери теплоты (4.19), кДж/кг;

$x_2$  – влагосодержание выходящего воздуха из сушилки (4.24), кг/кг;

$\nu$  – вязкости агента сушки (4.4), м<sup>2</sup>/с;

$i_2$  – энтальпия воздуха, выходящего из сушилки (4.22), кДж/кг;

$q$  – удельный расход теплоты (4.23), кДж/кг;

$x_2$  – влагосодержание выходящего воздуха из сушилки (4.24), кг/кг;

$\eta$  – тепловой КПД ( $r$  при  $\theta_2$ , °C), (4.25);

$Q$  – общий расход теплоты (4.27), кДж;

$G_{уд}$  – дельный расход (4.28), кг/кг;

$G$  – общий расход (4.29), кг;

$\varphi_2$  – относительная влажность уходящего воздуха (4.30), %;

$V_b$  – объём влажного выхода на выходе из сушилки (4.31), м<sup>3</sup>;

$V_p$  – объём воздуха, продуваемый при рабочей скорости через площадь сушилки (4.32), м<sup>3</sup>/с;

$u_p$  – рабочая скорость сушильного агента (4.10), м/с;

$\tau_p$  – время, необходимое для сушки при рабочей скорости сушильного агента (4.39), мин.

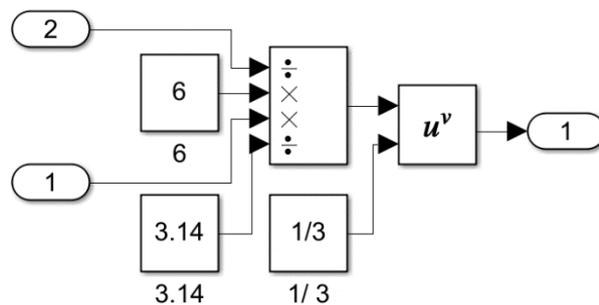


Рисунок 4.8 – Блок подсистемы, реализующий вычисление эффективного диаметра зерновки

Полученную модель процесса сушки пшеницы можно рассматривать как перспективный вариант совершенствования управления процессом сушки с возможностью идентифицировать необходимые параметры.

В соответствии с имитационной моделью (рис. 4.7) был разработан пример реализации внешнего вида графического интерфейса ПО «Подбор параметров работы АД-РВ» (рис. 4.9). Оператору необходимо ввести следующие параметры:

- исходная влажность зерна;
- исходная температура зерна;
- температура воздуха;
- влагосодержание воздуха.

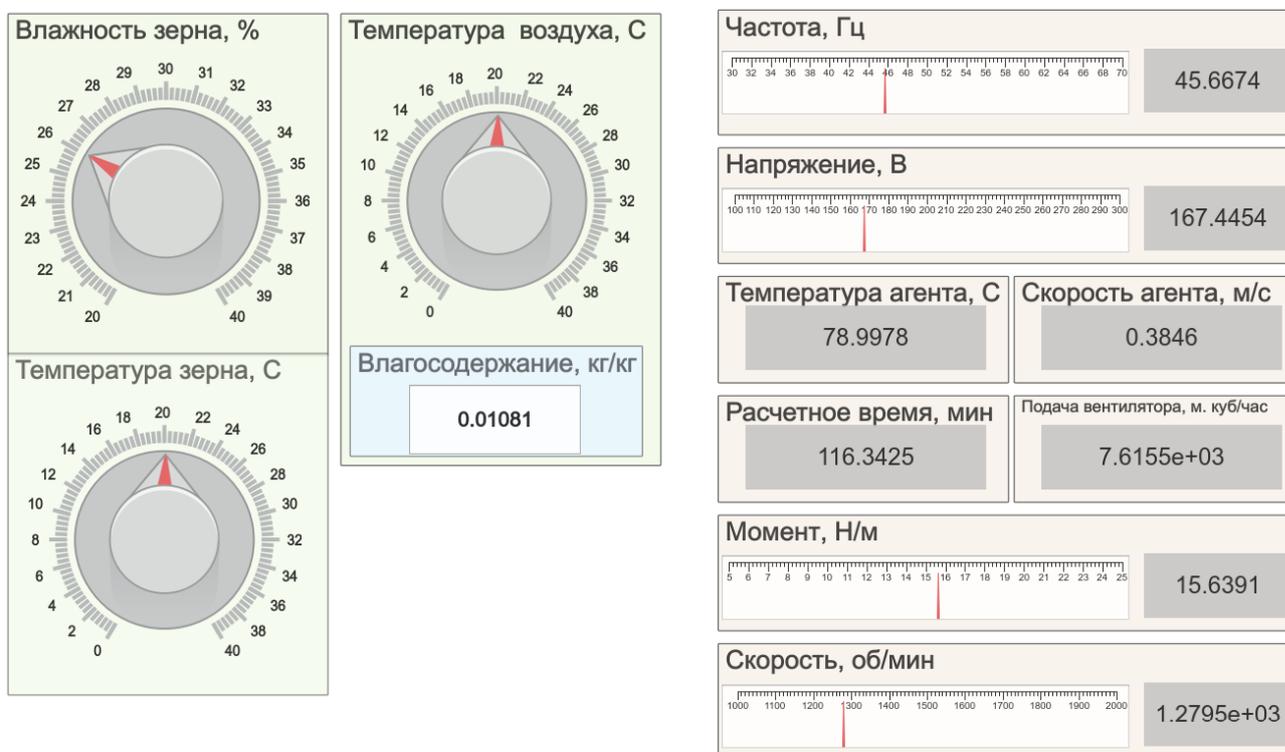


Рисунок 4.9 – Пример реализации внешнего вида графического интерфейса ПО «Подбор параметров работы АД-РВ»

После ввода данных выводятся результаты расчета: частота и напряжение преобразователя, через который подключен электродвигатель вентилятора. Оператору требуется только установить требуемое значение частоты и напряжение.

Результатом расчёта также является время, в течение которого можно просушить зерно воздухом, нагретым до расчетного значения температуры агента сушки.

Результаты моделирования позволяют сделать вывод, что протекание процесса сушки, время сушки, а, следовательно, и энергозатраты на процесс сушки существенно зависят от исходного материала и параметров воздуха.

В этом случае совершенствование системы управления приводом позволит увеличить его производительность.

#### **4.4 Лабораторные исследования тепловой обработки зерна в кипящем слое**

Задачей настоящего этапа являлась реализация разработанных моделей и определение энергетических затрат на удаление влаги. Опыты проводились в специально созданной экспериментальной сушильной установке, общий вид которой показан на рисунке 4.10.

Сушильная камера выполнена в трубе круглого сечения диаметром 150 мм, высотой 1000 мм, высота насыпного слоя в ходе эксперимента, изменялась от 20 до 50 мм. Через смотровое окно осуществляли визуальные наблюдения. Кипящий слой имел рабочую высоту, не превышающую 0,5 м. Горячий воздух отводился из верхней части камеры через вывод. В качестве газораспределителя использовалась цельнометаллическая просечно-вытяжная сетка с размером ячейки 1x1 мм.

Скорость воздушного потока регулируется частотой вращения вентилятора, измерение скорости оживающего агента производилось термоанемометром типа AZ8901. Оживающий агент движется через слой пшеницы в режиме фильтрации при скорости, меньшей второй критической скорости, которая находится в диапазоне от 0 до 0,5 м/с, по результатам проведенных экспериментальных исследований. Когда оживающий агент достигает второй критической скорости, слой переходит в псевдооживающее состояние и начинаются перемещения зерновок. При скоростях выше 1,5 м/с возникают «фонтаны» и нарушается однородность слоя. Увеличение скорости приводит к расширению слоя. При достижении оживающим агентом первой критической скорости (скорости уноса) слой разрушается и

частицы уносятся из аппарата в режиме пневмотранспорта. При каждой фиксированной скорости воздушного потока проводились визуальные наблюдения за характером движения и перемешивания зерен (рис. 4.11).



Рисунок 4.10 – Экспериментальная установка для испытания частотно-регулируемого асинхронного электропривода установки послеуборочной обработки зерна: 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

При проведении исследований визуальное наблюдение за высотой кипящего слоя оказывается затруднительным. Верхняя граница такого слоя непрерывно колеблется, и с увеличением скорости воздушного потока неоднородность

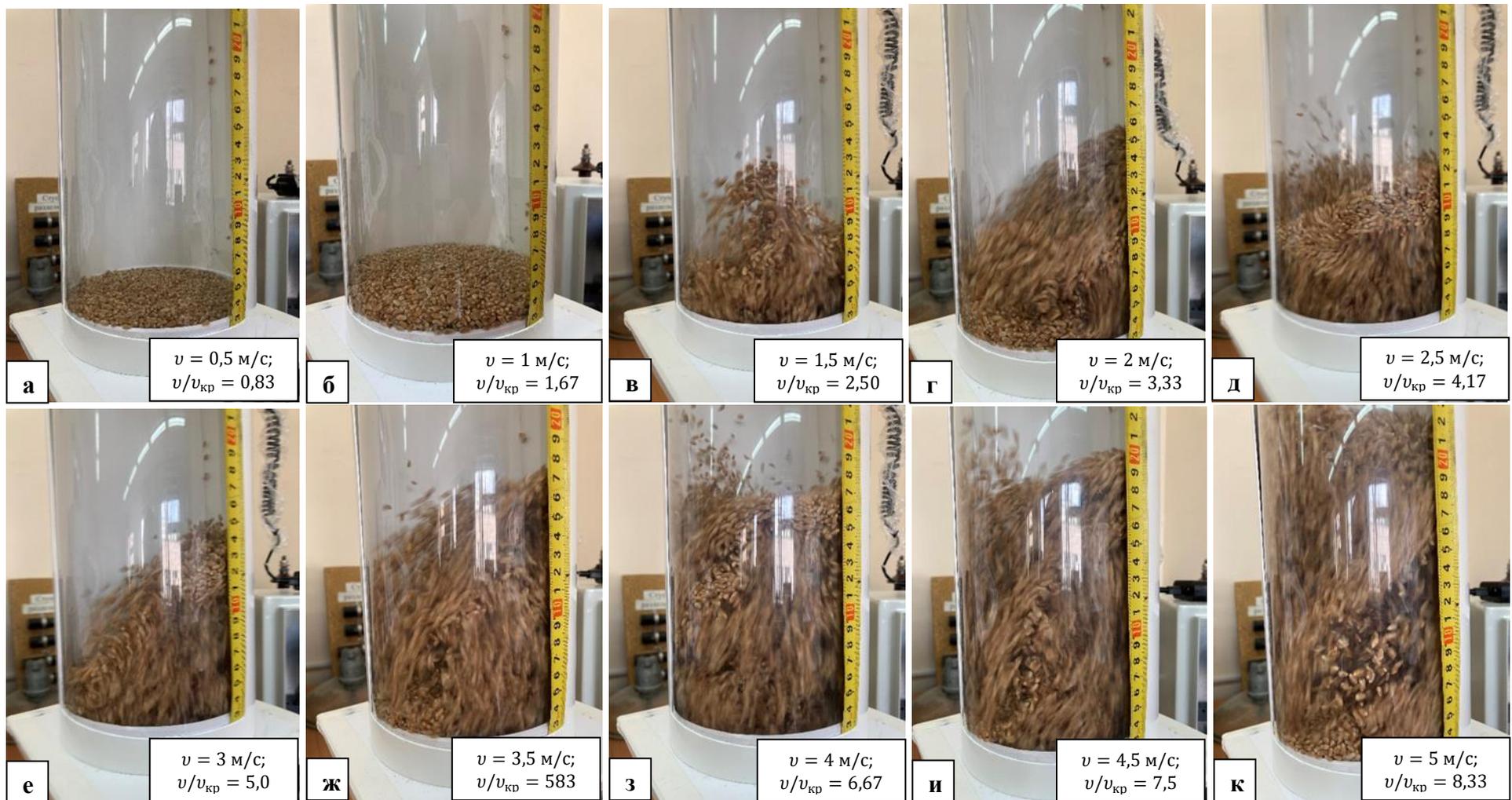


Рисунок 4.11 – Состояние слоя пшеницы, в зависимости от числа псевдооживления, при прохождении через него потока оживающего агента а)  $v/v_{кр} = 0,83$ ; б)  $v/v_{кр} = 1,67$ ; в)  $v/v_{кр} = 2,50$ ; г)  $v/v_{кр} = 3,33$ ; д)  $v/v_{кр} = 4,17$ ; е)  $v/v_{кр} = 5,0$ ; ж)  $v/v_{кр} = 5,83$ ; з)  $v/v_{кр} = 6,67$ ; и)  $v/v_{кр} = 7,50$ ; к)  $v/v_{кр} = 8,33$

кипящего слоя только усиливается. Он теряет определенную верхнюю границу из-за того, что часть зерен находится над ней во взвешенном состоянии, образуя отдельные скопления. Для того чтобы все же определить высоту кипящего слоя, в наших исследованиях использовали понятие «условной» высоты. Эта высота равна расстоянию от газораспределительной решетки до верхней точки кипящего слоя.



Рисунок 4.12 – Проведение экспериментальных исследований: а) измерение скорости оживающего агента термоанемометром AZ8901 б) определение температуры зерна в процессе сушки тепловизором Fluke TiS45

В процессе эксперимента фиксировалось десять мгновенных значений высоты слоя через каждые 0,5 минуты от начала продувания зернового слоя нагретым воздухом. Такой подход позволяет учесть особенности колебания границы слоя и взвешенного состояния частиц. Проведение таких исследований является важным для понимания процессов, происходящих в кипящих слоях (рис. 4.13).

На рисунке 4.14 представлены экспериментальные данные, характеризующие степень расширения кипящего слоя пшеницы, в эксперименте высота неподвижного слоя пшеницы составляет 30 мм. Для определения влияния скорости сушильного агента на процесс сушки были проведены опыты при постоянной

температуре сушильного агента 50 °С и постоянной скорости агента сушки 2.4 м/сек. Кинетические кривые представлены на рисунке 4.15.



Рисунок 4.13 – Слой пшеницы при прохождении через него потока оживающего агента при  $v/v_{кр} = 4$

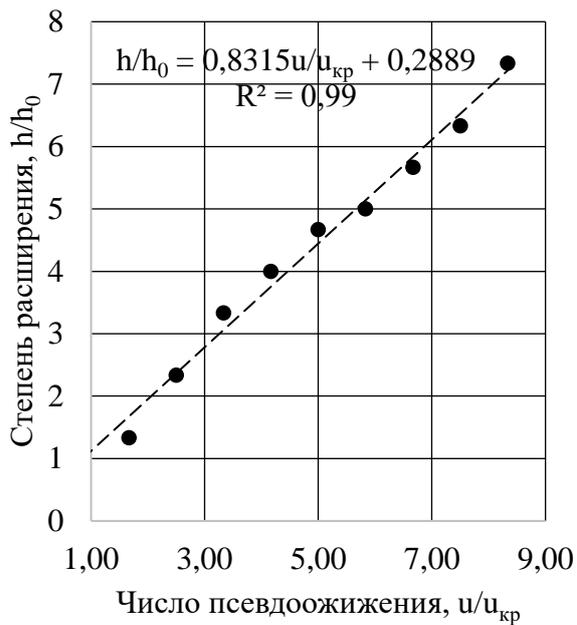


Рисунок 4.14 – Экспериментальная зависимость степени расширения кипящего слоя пшеницы от числа псевдооживления

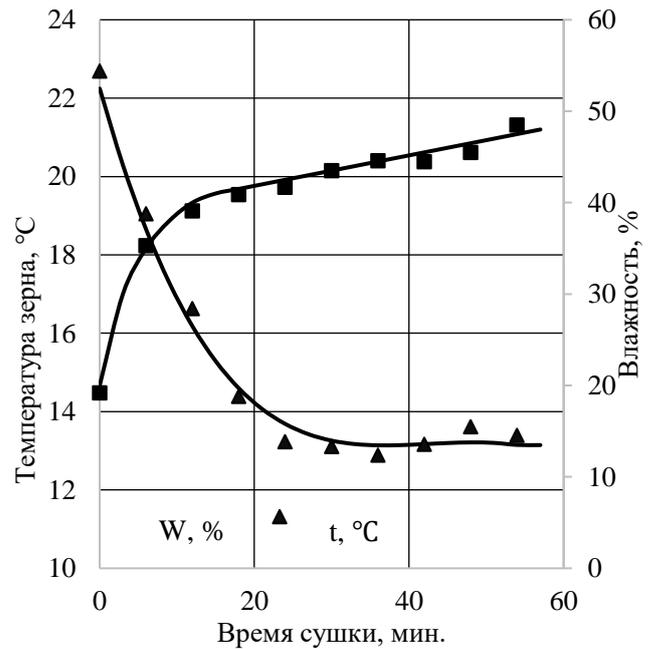


Рисунок 4.15 – Кривые сушки и нагрева зерен пшеницы при скорости воздуха 2,4 м/сек; температура агента сушки 50 °С; начальная влажность 22 % (точки – экспериментальные данные по сушке, сплошные линии – расчетные данные)

Представленные на графиках (рис. 4.15) кинетические зависимости также показывают высокую адекватность модельных и экспериментальных данных по изменению влажности во времени процесса, что позволяет восстановить температурные кривые с помощью математической модели по данным кинетики сушки.

Из уравнения (4.43) и рисунка 4.14 следует, что при неустановившемся циклическом движении зерен в объеме высота зернового слоя пшеницы увеличивается примерно вдвое от начальной высоты засыпки. При числах псевдооживления порядка трех, высота кипящего слоя возрастает втрое по сравнению с начальной.

Обработка экспериментальных данных позволила установить, что рабочая скорость, равная  $u_p = 4u_{кр2}$ , соответствует вихревому кипению, для которого характерно интенсивное движение зерна в объеме слоя, относительным уменьшением влияния каналов и улучшением контакта между воздухом и зерном. При выборе скорости агента сушки, обеспечивающего вихревое кипение, учитывалось, что созданный лабораторный стенд не предусматривает дополнительного механического перемешивания пшеницы в процессе сушки, в частности вибрацией. В стадии вихревого кипения уменьшается влияние канального прорыва воздуха, обеспечивается активное перемешивание всего объема слоя.

Благодаря поддержанию оптимальной скорости воздушного потока, соответствующей вихревому кипению, достигается более равномерное распределение воздуха в слое зерна, увеличению активных поверхностей для теплообмена между зернами и агентом сушки, а также равномерному нагреву зерна.

Анализ литературных источников показал, что не существует единого мнения относительно зависимости коэффициента теплообмена от скорости оживающего агента. Авторы получили различные зависимости, по данным И.М. Федорова  $\alpha \sim u^{0,65}$ , К. Киттенринга  $\alpha \sim u^{1,3}$ , Н.А. Шахова  $\alpha \sim u^{1,55}$ , Д. Уолтона  $\alpha \sim u^{1,7}$ , по данным В. Вамслея и Л. Иогансона коэффициент теплообмена не зависит от скорости оживающего агента. Существенным недостатком псевдооживленных газом слоев дисперсного материала является неоднородность – появление газовых пузырей, при этом часть газа проскакивает через слой, практически не принимая участия в

теплообменных процессах. Характеристикой однородности слоя, может быть его относительное расширение. Весьма актуальной становится проблема оценки числа псевдооживления и его относительного расширения на однородность слоя.

Для определения числовой оценки качества псевдооживления современной литературе известен ряд критериев и подходов. Одним из наиболее ранних является соотношение для определения типа псевдооживления, предложенное на основании анализа экспериментальных данных Вильгельмом и Квауком [70]. Они полагают, что тип псевдооживления определяется величиной критерия Фруда

$$F_r = \frac{w_{\Phi}^2}{D_p g}. \quad (4.44)$$

При  $F_r < 0$  слой рассматривается как однородный, а при  $F_r > 1$  - как неоднородный.

Хиби [142] предложил вибрационный критерий для характеристики перехода однородного псевдооживления в неоднородное. На основании экспериментальных данных было установлено, что частота собственных колебаний всех частиц в тонком слое одинакова. Скорость относительного движения частиц предполагается постоянной. Если последнее условие не соблюдается, колебания быстро затухают. При  $Re < 0, \varepsilon \leq 0,8, \rho_s \gg \rho_f$  (в условиях, наиболее характерных для оживленного газом слоя) частота колебаний частиц

$$v = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g(2 - \varepsilon)}{L\varepsilon}}. \quad (4.45)$$

Минимальная высота слоя, при которой возможно образование пузырей,

$$L_b = \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon - \varepsilon_0} D_p. \quad (4.46)$$

Пузыри будут зарождаться при  $L \geq L_b$ .

В работе [141] авторы предлагают критерий перехода, основанный на соотношении скоростей непрерывных и динамических волн. В неоднородном псевдооживленном слое наблюдаются периодические нарушения порозности, которые, подобно непрерывным волнам, движутся вдоль слоя со скоростью  $c_{\varepsilon}$ . Внутри

непрерывных волн из-за взаимодействия частиц зарождаются динамические волны. Скорость перемещения динамических волн  $c_e$ . Если  $c_\varepsilon > c_e$ , то в слое образуются пустоты. Наоборот, при  $c_\varepsilon < c_e$  пустоты быстро заполняются частицами. Переход от однородного псевдоожигения к неоднородному происходит в случае  $c_\varepsilon \geq c_e$ . С учетом уравнения состояния Лева:

$$c_\varepsilon = \frac{3 - 2\varepsilon}{\varepsilon} u, \quad (4.47)$$

$$c_e = \left( \frac{E}{\rho_s} \right)^{0,5}. \quad (4.48)$$

Равномерность псевдоожигения определяется конструкцией газораспределительных устройств, обеспечивающих равномерное распределение по объему слоя потока ожигающего агента и отсутствие застойных зон. Она может быть ориентировочно охарактеризована так называемым гидростатическим коэффициентом полезного действия псевдоожигенного слоя  $\eta_0$ . Этот коэффициент представляет собой отношение экспериментально измеренного полного перепада давления в слое  $\Delta P_{\text{оп}}$  к теоретическому значению, равному произведению высоты слоя  $H$  на весовую концентрацию материала  $\gamma_{\text{сл}}$ :

$$\eta_0 = \frac{\Delta P_{\text{оп}}}{\gamma_{\text{сл}} H}. \quad (4.49)$$

Величина  $\eta_0$  является наглядной и простой характеристикой равномерности псевдоожигения, основанной на допущении, что  $\Delta P_{\text{оп}}$  определяется только долей взвешенного материала. При этом  $\Delta P_{\text{оп}}$  может зависеть от конструктивных и технологических особенностей аппарата (вставок в виде теплообменных поверхностей и т. д.). Поэтому  $\Delta P_{\text{оп}}$  используется только как приближенная оценка полноты псевдоожигения.

Анализ критериев оценки качества слоя, предложенных в литературе и описанных выше, показывает, что при использовании некоторых критериев [70, 142, 141] необходимо проводить натурные измерения на уже построенных установках (принцип моделирования неприменим). Причем эти измерения, несмотря на сложность, могут быть весьма неточными.

Ковенским Г.И. [59], согласно теории протекания, установлено, что вероятность частоты образования каналов в слое  $f_x$ , способных преобразоваться при дальнейшем повышении скорости и вихреобразовании в пузырь, подсчитывается по формуле (Гц):

$$f_x = \frac{1}{\varepsilon(1 - \varepsilon)^{h/h_0}}. \quad (4.50)$$

Как видно из графической зависимости (рис. 4.14), степень расширения кипящего слоя определяется линейной зависимостью от числа псевдооживления. Обработка экспериментальных данных позволила установить, что рабочая скорость раная  $u_p = 4u_{кр2}$ , при относительном расширении  $h/h_0 = 3,6$ , соответствует вихревому кипению, характерными особенностями которого являются: интенсивное движение зерна в объеме слоя, относительное уменьшение каналов и улучшение контакта между воздухом и зерном, активное перемешивание всего объема слоя, частота образования каналов 10,9 Гц, которую можно назвать оптимальной. Дальнейшее увеличение скорости ведет к началу интенсивного образованию каналов, так при  $h_1 = 5h_0$ ,  $f_{x1} = 19,9$  Гц,  $h_2 = 6h_0$ ,  $f_{x2} = 59,5$  Гц, что согласуется с проведенными экспериментальными исследованиями.

Для поддержания однородного псевдооживления необходимо учитывать снижение перепада давления в слое при уменьшение веса пшеницы  $G_{\%} = 100(u_1 - u_2)/(100 - u_2)$ . Получена функциональная зависимость рабочей скорости в зависимости от времени сушки (м/с):

$$u_p = 7,975u_{кр2} \sqrt[3]{1,215 + 2,748 \cdot 10^{-8}\tau^3 - 3,036 \cdot 10^{-5}\tau^2 + 1,214 \cdot 10^{-3}\tau}. \quad (4.51)$$

Изменения рабочей скорости по выражению (4.51) позволяет поддерживать минимальную частоту образования каналов на уровне 11 Гц, и теоретически снизить интенсивного каналаобразования на 48,6 Гц.

Исходное зерно пшеницы: влажность 21,75%, температура 20 °С. В качестве псевдооживающего агента использовался наружный воздух температурой 22-24 °С, с влагосодержанием  $x_0 = 10$  г/кг. После ввода исходных данных в модель (рис. 4.7) были получены расчетные параметры сушки: температура агента сушки 50 °С, время сушки при данных параметрах атмосферного воздуха и расчетной влажности

высушенного зерна 13 % составляет 1,5 часа. Проведены испытания, после сушки произведен отбор образцов в соответствии с ГОСТ Р 58972-2020. Образцы герметично упаковывались в вакуумные пакеты, что исключало влагопоглощение (рис. 4.16).



Рисунок 4.16 – Внешний вид отобранных образцов пшеницы, подготовленных для проведения испытания: 1 – после сушки, 2 – исходное

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. (Приложение Ж) выданный испытательной лабораторией «Гранум» аттестат РОСС RU.31578.04ОЛН0.ИЛ31 подтверждает снижение влажности до 12,45 %. Расчет параметров сушки пшеницы на имитационной модели, дает вполне удовлетворительные результаты, не расходящиеся с опытными данными более чем на 3%.

#### **4.5 Сравнение энергетических показателей частотно-регулируемого асинхронного электропривода вентилятора**

Для того чтобы обеспечить уменьшение потребляемой энергии, возможно использование закона управления  $U/f^2 = const$  при работе асинхронного двигателя АИР100S4 с вентилятором 80-75-6,3. Этот закон более сложен в реализации, но позволяет дополнительно снизить напряжение. В то время как закон управления  $U/f = const$  является основным для таких механизмов, так как диапазон регулирования скорости вентиляторов невелик и не требуется высокой кратности

пускового и максимального моментов. Для сравнения расчетной вольт-частотной характеристики приводится пример работы асинхронного двигателя АИР100S4 с вентилятором 80-75-6,3, примем закон управления  $U/f^2 = const$ .

Из условия обеспечения номинальной рабочей скорости вентилятора  $\omega_n = 151.84$  рад/с частоту инвертора, соответствующую номинальному режиму работы вентилятора, определяем путем совместного решения уравнений для механических характеристик двигателя (2.45) и нагрузки (3.53) относительно частоты  $f$ . Точка 1 на рисунке 2.29:

$$a_i \cdot M_{пол i} + (1 + b_i) \cdot M_{пол i} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^x = \frac{mR_2 p U^2}{2\pi s f \cdot \left(\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (2\pi f L_2)^2\right)}. \quad (4.52)$$

Принимаем ближайшее целое значение частоты инвертора:

$$f_{ном} = 50 \text{ Гц.}$$

Минимальную рабочую частоту инвертора определяем, решая уравнение (4.52) при условии обеспечения минимальной рабочей скорости вентилятора  $\omega_{min} = 96,86 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ .

Принимаем целое значение минимальной рабочей частоты инвертора:

$$f_{min} = 33 \text{ Гц.}$$

Механические характеристики разомкнутой системы преобразователь частоты – асинхронный двигатель, при законе регулирования  $U/f^2 = const$  для ряда выбранных значений выходной частоты инвертора в интервале от 33 до 50 Гц рассчитываются по выражению:

$$M(s, f_1) = \frac{mR_2 p U_1^2(f_1)}{2\pi s f_1 \cdot \left(\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (2\pi f_1 L_2)^2\right)}, \quad (4.53)$$

где

$$U_1(f_1) = U_{1н} \left(\frac{f_1}{f_{1н}}\right)^2 = 220 \left(\frac{f_1}{50}\right)^2, \quad (4.54)$$

$$s = 1 - \frac{p\omega(s, f_1)}{2\pi f_1}. \quad (4.55)$$

Момент для закона регулирования  $U/f^2 = const$ , с учетом выражения (4.52) – (4.54) определяется по выражению:

$$M_d = \frac{121pmR_2f_1^3}{31250 \left(1 - \frac{p\omega}{2\pi f_1}\right) \left( \left( R_1 + \frac{R_2}{1 - \frac{p\omega}{2\pi f_1}} \right) + 4\pi^2 f_1^2 L_2^2 \right) \pi}. \quad (4.56)$$

Для двигателя АИР100S4 выражение (4.56) принимает вид:

$$M_d = \frac{14,88 \cdot 10^{-3} f_1^3}{\left(1 - \frac{318,47 \cdot 10^{-3} \omega}{f_1}\right) \left( \left( 2,652 + \frac{2,012}{1 - \frac{318,47 \cdot 10^{-3} \omega}{f_1}} \right) + 15,83 \cdot 10^{-3} f_1^2 \right)}. \quad (4.57)$$

Момент вентилятора, соответствующий режиму регулирования производительности с номинальным значением КПД  $\eta = 80\%$  (рис. 2.29 точки т. 1 – т. 2):

$$M_{с\text{ вент}}(\omega) = 2,03 + (1 + 0,125) \cdot 16,23 \cdot \left(\frac{\omega}{151,84}\right)^{2,35}. \quad (4.58)$$

Путем совместного решения уравнений для механических характеристик расчетного двигателя АИР100S4 (4.57) и нагрузки вентилятора ВР 80-75-6,3 (4.58) можно найти закон регулирования, соответствующий режиму работы вентилятора с номинальным КПД. Для интервала частоты 33-50 Гц ( $f_1$ , Гц) была получена аппроксимированная зависимость в виде решения системы уравнений (4.57) и (4.58):

$$f_1 = 0,3175\omega + 2,5822.$$

В установившихся режимах работы можно провести сравнительный анализ эффективности законов частотного управления, основываясь на критерии минимизации потребляемой мощности двигателя. На рисунке 4.18 представлены графики зависимостей активной мощности потерь цепи намагничивания фазы, индуктивной мощности цепи намагничивания фазы, индуктивной мощности рассеяния фазы, активной мощности потерь фазы, активной мощности преобразования из электрической в механическую, которые были рассчитаны в установившемся режиме работы с использованием выражений (2.38) - (2.42), при настройке вольт-частотной характеристики в соответствии с выражением (3.56) и при применении закона

регулирования  $U/f^2 = const$ .

Предпочтение следует отдать разработанному закону регулирования на основе сравнения статических характеристик вентилятора двигателя по потребляемой мощности от скорости (рис. 4.18). Графики на рисунке 4.18 показывают, что закон регулирования  $U/f^2 = const$  не оптимален для механизмов с вентиляторной нагрузкой в плане минимизации энергопотребления в установившихся режимах работы электрифицированного агрегата. При настройке вольт-частотной характеристики, в соответствии с выражением (3.68), снижается реактивная составляющая мощности двигателя при регулировании скорости вентилятора ниже номинальной, обеспечивая при этом более высокий энергетический коэффициент полезного действия.

Окончательное решение о выборе закона регулирования примем по сравнению удельной мощности для удаления 1 килограмма влаги при настройке вольт-частотной характеристики в соответствии с выражением  $U(f) = 0,1145f^2 - 1,5696f + 22,04$  и при законе регулирования  $U/f^2 = const$  (рис. 4.17).

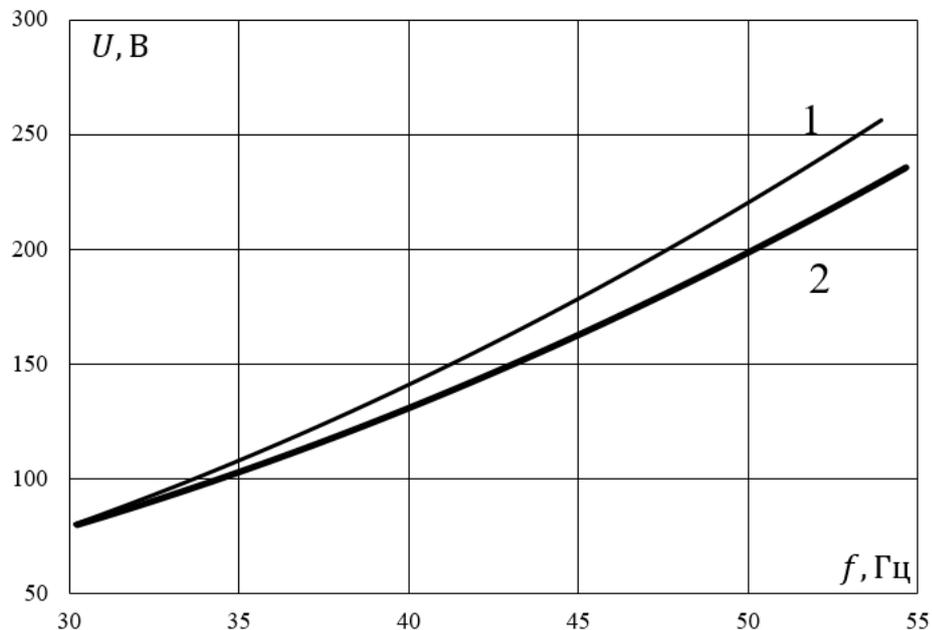


Рисунок 4.17 – Вольт-частотная характеристика преобразователя: 1 – при законе регулирования  $U/f^2 = const$ ; 2 – при законе регулирования в соответствии с

$$U(f) = 0,1145f^2 - 1,5696f + 22,0.$$

Энергетические зависимости удельного расхода составляющих потребляемой двигателем вентилятора мощности для удаления 1 кг воды, от скорости, в установившемся режиме работы, полученные путем имитационного моделирования, представлены на рисунке 4.18.

Расчет выполним для номинального режима работы вентилятора, что соответствует максимальному значению полного КПД и характеризуется следующими параметрами, точка 1 на рисунке 2.29, из условия номинальной рабочей скорости вентилятора  $\omega_n = 151.84$  рад/с.

Таблица 4.4 – Удельные затраты мощности для удаления 1 килограмма влаги при  $\omega_n = 151.84$  рад/с

При настройке вольт-частотной характеристики в соответствии с выражением	$P_{1a}$ , Вт	$Q_{1k}$ , ВАр	$P_{2k}$ , Вт	$Q_{2k}$ , ВАр	$P_{2s}$ , Вт
$U(f) = 0,1145f^2 - 1,5696f + 22,0$	1,52	17,38	4,53	6,83	32,55
$U/f^2 = const$	1,88	21,24	3,5	5,22	32,55

При аналитическом исследовании зависимостей на рисунке 4.18 и данных таблицы 4.4, выявлено, что процесс сушки зерна, по разработанному закону управления электроприводом вентилятора, выражение (2.104), позволило снизить удельную составляющую реактивной мощности в процессе сушки с 26,46 до 24,21 ВАр/кг или 9,1 %.

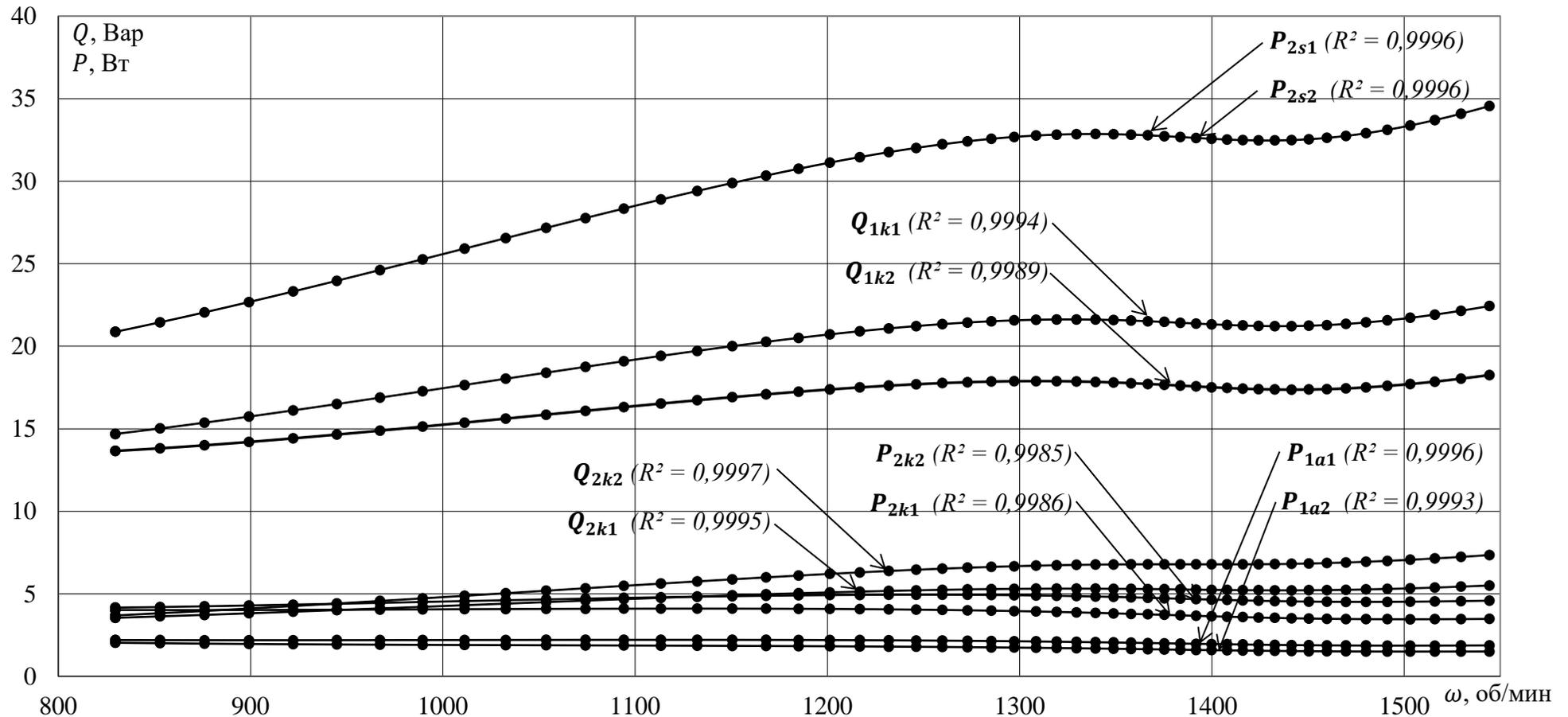


Рисунок 4.18 – Зависимость удельного расхода составляющих потребляемой двигателем вентилятора мощности для удаления 1 кг воды от скорости в установившемся режиме работы: 1 – при законе регулирования  $U/f^2 = const$  и 2 – настройке вольт-частотной характеристики в соответствии с  $U(f) = 0,1145f^2 - 1,5696f + 22,0$ : активная мощность преобразования из электрической в механическую ( $P_{2s}$ , Вт); активная мощность потерь цепи намагничивания фазы ( $P_{1a}$ , Вт); индуктивная мощность цепи намагничивания фазы ( $Q_{1k}$ , Вар); индуктивная мощность рассеяния фазы ( $Q_{2k}$ , Вар); активная мощность потерь фазы ( $P_{2k}$ , Вт)

#### 4.6 Технико-экономическое обоснование модернизации сушильной установки с кипящим слоем

Для оценки экономической эффективности внедрения послеуборочной обработки зернового материала наиболее близкий существующий вариант подобной сушильной установки ОТW-150, предназначенная для сушки зерновых хлопьев, гранул, семян, зерна в кипящем слое. Затраты на модернизацию включают стоимость нового оборудования, затраты на его транспортировку к месту использования, а также затраты на монтаж и настройку [43].

В таблице 4.5 представлен расчет стоимости оборудования при модернизации. Ориентировочная стоимость оборудования, его количество и состав на базовом и проектируемом комплексах послеуборочной обработки зернового материала также приведены в этой таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Расчет стоимости оборудования

№ п/п	Наименование	Модель	Количество, шт.	Цена*, руб.	Стоимость, руб.
1	Преобразователь частоты	Schneider Electric ATV310	1	19145	19145
2	Термопреобразователь сопротивления	ТСП.Pt100-Кл1-2-В3	2	1 206	2412
3	Температурный контроллер	Autonics TCA4S-14R	1	9090	9090
5	Распределительный щит	IEK YKM40-442-54	1	6766	6766
6	Выключатель автоматический трехполюсный	EZ9F34316	1	720	720
7	Колодка клеммная самозажимная	JXB-ST-1.5	7	72	504
8	Провод монтажный	H05V-K 0.5BU	15	36	540
9	Сушильная установка	ОТW-150	1	950000	950000
Итого	Затраты на оборудование			950000	989177

№ п/п	Наименование	Модель	Количество, шт.	Цена*, руб.	Стоимость, руб.
	Расходы на монтаж оборудования составляют половину от общей стоимости оборудования			475000	494589
	Общие строительные расходы составляют 40 % от общей стоимости оборудования			380000	395671
	Затраты на пусконаладочные работы составляют 7 % от общей стоимости оборудования			66500	69242
	Прочие расходы составляют 3 % от общей стоимости оборудования			28500	29675
Итого	Капитальные вложения			1900000	1978354

\* - сведения получены из общедоступных источников.

Средние расходы на установку специализированных машин, включая металлоконструкции, составляют половину стоимости. Общестроительные работы занимают 40 % от общей суммы, а расходы на пусконаладочные работы составляют от 5 % до 10 %. Другие расходы достигают 3 % от стоимости оборудования. Расчеты выполняются при условии, что условия эксплуатации базового и проектируемого оборудования идентичны.

Расходы на эксплуатацию будут превышать базовый вариант вследствие добавления нового оборудования на проектируемом комплексе.

Затраты на амортизацию,  $A_m$ , руб.:

$$A_m = \frac{K \cdot N_a}{100}, \quad (4.59)$$

Где  $K$  – капитальные вложения (табл. 4.5), руб.;

$N_a$  – годовая норма амортизации при сроке службы сушильной установки 20 лет  
 $N_a = 5,0\%$ .

Амортизационные отчисления в базовом и проектируемом варианте соответственно составят:

$$A_m^{\text{баз}} = \frac{K_{\text{баз}} \cdot N_a}{100} = \frac{1900000 \cdot 5}{100} = 95000 \text{ руб.},$$

$$A_m^{\text{пр}} = \frac{K_{\text{пр}} \cdot N_a}{100} = \frac{1978354 \cdot 5}{100} = 98918 \text{ руб.}$$

Дополнительные амортизационные отчисления, вызванные установкой оборудования при модернизации:

$$A_m^{\text{доп}} = A_m^{\text{пр}} - A_m^{\text{баз}} = 98918 - 95000 = 3918 \text{ руб.} \quad (4.60)$$

Затраты на ремонт и техническое обслуживание,  $P_m$ , руб.:

$$P_m = \frac{K \cdot N_p}{100}, \quad (4.61)$$

где  $N_p$  – норма ежегодных отчислений на ремонт и техническое обслуживание машин послеуборочной обработки зерна,  $N_p = 6\%$ .

Затраты на ремонт и техническое обслуживание в базовом и проектируемом варианте соответственно составят:

$$P_m^{\text{баз}} = \frac{K_{\text{баз}} \cdot N_p}{100} = \frac{1900000 \cdot 6}{100} = 114000 \text{ руб.},$$

$$P_m^{\text{пр}} = \frac{K_{\text{пр}} \cdot N_p}{100} = \frac{1978354 \cdot 6}{100} = 118701 \text{ руб.}$$

Дополнительные затраты на ремонт и техническое обслуживание:

$$P_m^{\text{доп}} = P_m^{\text{пр}} - P_m^{\text{баз}} = 114000 - 118701 = 4701 \text{ руб.} \quad (4.62)$$

Стоимость электроэнергии,  $C_{\text{эл}}$ , руб.:

$$C_{\text{эл}} = Q_{\text{эл}} \cdot \text{Ц}_{\text{эл}}, \quad (4.63)$$

где  $Q_{\text{эл}}$  – годовое потребление электроэнергии, кВт·ч;

$\text{Ц}_{\text{эл}}$  – цена 1 кВт·ч,  $\text{Ц}_{\text{эл}} = 5,7$  руб.

Вычислим снижение затрат за счет уменьшения выплат за реактивную мощность и снижение потерь в проводах вследствие снижения полного тока.

Снижение затрат на оплату реактивной мощности  $\text{Э}_{\text{гр}}$ :

$$\text{Э}_{\text{гр}} = (\text{ПР}_1 - \text{ПР}_2) \cdot T_p,$$

где  $\text{ПР}_1 = N \cdot P \cdot \text{tg} \varphi_1$  – объём реактивной мощности до модернизации, кВАр;

$PR_2 = N \cdot P \cdot tg\varphi_2$  – объём реактивной мощности после модернизации, кВАр;

$T_p$  – тариф на реактивную мощность составляет 8 % от тарифа на активную мощность, что равно 0,6 руб./кВАр·час;

Сокращение потерь мощности в проводах определим с помощью коэффициента потерь, принятого равным  $K_{\Pi} = 12\%$ .

Снижение потребления активной энергии за счет увеличения коэффициента мощности  $cos\varphi$  составит:

$$W_c = W_1 \cdot \left[ 1 - \frac{cos^2\varphi_1}{cos^2\varphi_2} \right] \cdot K_{\Pi},$$

где:  $cos\varphi_1$  – коэффициент мощности до модернизации;

$cos\varphi_2$  – коэффициент мощности после модернизации;

$W_1$  – годовое потребление электроэнергии до модернизации.

Экономия  $\mathcal{E}_{\text{гп}}$  в оплате энергии составит на удаление 1 килограмма влаги:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{\text{гп}} &= W_c \cdot T_a = W_1 \cdot T_a \cdot \left[ 1 - \frac{cos^2\varphi_1}{cos^2\varphi_2} \right] \cdot K_{\Pi} = \\ &= \mathcal{E}_л \cdot \left[ 1 - \frac{cos^2\varphi_1}{cos^2\varphi_2} \right] \cdot K_{\Pi} = 5,7 \cdot \left[ 1 - \frac{0,81^2}{0,87^2} \right] \cdot 0,12 = 0,091 \text{ руб/кг.} \end{aligned}$$

где  $T_a$  – тариф на активную энергию.

Экономия в расчете после внедрения расчетного закона управления составит за счет снижения потребления реактивной энергии и уменьшения потерь в линии:

$$\mathcal{E}_г = \mathcal{E}_{\text{гп}} + \mathcal{E}_{\text{гр}}.$$

Годовая экономия зависит от объема высушиваемого зерна в год. При этом за базовый валовой сбор зерна, подвергающегося обработке, принят объем в  $G_1 = 5000$  тонн. Экономия от проведения модернизации получится за счет сокращения себестоимости процесса сушки зерна.

Снижение затрат на электроэнергию  $C_{\text{эл}}^{\text{доп}}$ , вызванных установкой оборудования при модернизации, будет равно:

$$C_{\text{эл}}^{\text{доп}} = W_g \mathcal{E}_{\text{гп}}, \quad (4.64)$$

где  $W_g$  – годовой объем работы (масса влаги, удаленной при сушке), кг. В расчетах принят съём влаги с  $u_1 = 21,8\%$  до  $u_2 = 13\%$ .

$$W_r = G_1 - G_2 = G_1 \left( 1 - \frac{100 - u_1}{100 - u_2} \right) = 5 \cdot 10^6 \cdot \left( 1 - \frac{100 - 21,8}{100 - 13} \right) = 506 \cdot 10^3 \text{ кг.}$$

$$C_{\text{эл}}^{\text{доп}} = W_r \cdot \varepsilon_{\text{ГП}} = 506 \cdot 10^3 \cdot 0,091 = 45500 \text{ руб.}$$

Тогда годовой экономический эффект составит:

$$P_{rt} = C_{\text{эл}}^{\text{доп}} - (A_m^{\text{доп}} + P_m^{\text{доп}}) = 45500 - (3918 + 4701) = 36881 \text{ руб.} \quad (4.65)$$

Из анализа проведенных расчетов следует, что модернизация оборудования приводит к увеличению затрат на обслуживание и амортизацию на 8619 рублей в год по сравнению с исходным вариантом. Более высокая эффективность процесса сушки в кипящем слое достигается благодаря поддержанию оптимальной скорости сушильного агента, соответствующей вихревому кипению. В результате этого происходит более равномерное распределение воздушного потока в слое зерна, улучшается его однородность, увеличивается площадь активного теплообмена между каждым отдельным зерном и агентом сушки, что обеспечивает более равномерное прогревание зерна.

Экономический эффект учитывает как годовой доход, так и его увеличение со временем, по формуле сложного процента:

$$K_T = P_{rt} \frac{(1 + ND)^{T_3} - 1}{ND}, \quad (4.66)$$

где  $K_T$  – экономический эффект за срок эксплуатации, руб.;

$T_3$  – срок эксплуатации зерносушильного комплекса,  $T_3 = 20$  лет;

$ND$  – требуемая норма доходности,  $ND = 0,1211$ .

Расчет налоговых выплат не проводился, поскольку на данный момент, налог на доход от вклада начисляется только при условии, что процентная ставка по вкладу превышает ставку рефинансирования Центробанка РФ. Следовательно, этот аспект не учитывался:

$$K_T = 36881 \frac{(1 + 0,1211)^{20} - 1}{0,1211} = 2691476 \text{ руб.}$$

Определим цену спроса  $D_p$ , руб.:

$$D_p = \frac{K_T}{(1 + ND)^{T_3}} = \frac{2691476}{(1 + 0,1211)^{20}} = 273592 \text{ руб.}$$

Формула, в соответствии с которой определяется коэффициент эффективности капитальных вложений:

$$E_T = \sqrt[20]{\frac{K_T}{K_{\text{доп}}}} - 1 = \sqrt[20]{\frac{2691476}{78354}} - 1 = 0,1934,$$

где  $K_{\text{доп}}$  – дополнительные капитальные вложения,  $K_{\text{доп}} = 78\,354$  руб.

Предложенная модернизация является экономически оправданной, так как коэффициент эффективности капитальных вложений превышает требуемую норму доходности. Конкретные цифры подтверждают это утверждение:  $E_T = 0,1934$ , в то время как  $ND = 0,1211$ .

Срок окупаемости дополнительных капитальных вложений:

$$T_{\text{ок}} = \frac{-\ln\left(1 - K_{\text{доп}} \cdot \frac{ND}{P_{rt}}\right)}{\ln(1 + ND)} = \frac{-\ln\left(1 - 78354 \cdot \frac{0,1934}{36881}\right)}{\ln(1 + 0,1934)} = 3 \text{ года.}$$

В таблице 4.6 представлены данные, отражающие результаты расчетов экономической эффективности модернизации установки для сушки зерна.

Таблица 4.6 – Показатели экономической эффективности модернизации существующего комплекса послеуборочной обработки зернового материала

Наименование показателя	Значение показателя	
	Базовый вариант	Проектируемый вариант
Стоимость оборудования, руб.	950000	989177
Капитальные вложения, руб.	1900000	1978354
Дополнительные капитальные вложения, руб.		78354
Дополнительные эксплуатационные затраты, руб.		8619
Годовой экономический эффект, руб.		36881
Коэффициент эффективности дополнительных капитальных вложений		0,1934
Срок окупаемости дополнительных капитальных вложений, лет		3

## Выводы по четвертой главе

1. Разработан и создан лабораторный стенд для исследования асинхронного двигателя АИР100S4.

2. Определены механические характеристики, выполнен анализ рабочих характеристик АД, исследована зависимость частоты вращения ротора от момента сопротивления рабочей машины, подтверждена адекватность предложенной модели реальному двигателю в установившихся режимах работы.

3. Исследованы энергетические зависимости характеристик асинхронного электродвигателя (активной, реактивной и полной мощности) при изменении частоты и напряжения питающей сети. Выдвинутая ранее гипотеза получила экспериментальное подтверждение: в асинхронном двигателе имеется возможность изменять соотношение между активной и индуктивной составляющими мощности, путем одновременного воздействия частотой напряжением сети, подведенного к фазе, и скольжением ротора, и, как следствие, изменять энергетические характеристики асинхронного двигателя.

4. Получена функциональная зависимость для определения параметров агента сушки пшеницы в кипящем слое от параметров поступающего на сушку зерна и параметров воздуха.

5. Разработана имитационная модель процесса сушки пшеницы в псевдооживленном слое, которую можно рассматривать как перспективный вариант совершенствования управления процесса сушки, с возможностью идентифицировать основные технологические параметры.

6. Разработана имитационная модель электропривода, асинхронный двигатель АИР100S4 - вентилятор 80-75-6,3, для процесса сушки зерна в псевдооживленном слое, которая позволяет исследовать энергетические характеристики и параметры процесса сушки зерна.

7. Обработка экспериментальных данных позволила установить, что рабочая скорость  $u_p = 4u_{кр2}$  соответствует вихревому кипению, для которого

характерно интенсивное движение зерна в объеме слоя с относительным уменьшением влияния каналов и улучшением контакта между воздухом и зерном.

8. Применение предложенных технических и технологических решений в комплексе для послеуборочной обработки зерна приводит к улучшению финансовых показателей его работы. Экономическая эффективность модернизации оценивается более чем в 36 тысяч рублей в год, а срок окупаемости составляет 3 года.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результатом выполненной работы является повышение энергоэффективности сушки зерна за счет обоснования режимов работы электропривода.

Основные выводы и результаты проведенных исследований заключаются в следующем:

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 ожижающего 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.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Акмаров, П.Б. Агроклиматический потенциал эффективности земледелия (на примере зерновых культур Удмуртии) / П.Б. Акмаров, О.П. Князева, И.И. Рысин // Вестник Удмуртского университета. Серия «Биология. Науки о Земле». 2014. №2. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/agroklimaticheskiy-potentsial-effektivnosti-zemledeliya-na-primere-zernovyh-kultur-udmurtii> (дата обращения: 23.08.2023).
2. Алексеев, Г.В. Особенности сушки порошковых пищевых продуктов в псевдооживленном режиме / Г.В. Алексеев, О.А.Егорова, А.Г. Леу, А.А. Дерканосова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Пищевые и биотехнологии». - 2017. - Т. 5, № 4. - С. 34-40.
3. Антипенко, Н.Ф. Математические расчеты в МАТЛАВ: методические указания / Н.Ф. Антипенко, Т.А. Санькова. - Омск: СибАДИ, 2010. - 56 с.
4. Бакиров, Сергей Мударисович. Повышение энергоэффективности при эксплуатации дождевальных машин кругового действия обоснованием способов и средств энергосбережения: дисс. ... доктора тех. наук: 05.20.02 / Бакиров Сергей Мударисович; [Место защиты: ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова»]. - Саратов, 2021. - 449 с.
5. Баскаков А. П. Расчеты аппаратов кипящего слоя: справочник / А. П. Баскаков [и др.]; под ред. И. П. Мухленова [и др.]. - Л.: Химия : Ленингр. отд-ние, 1986. – 350 с.
6. Баскаков, Иван Васильевич. Совершенствование технологии послеуборочной обработки и хранения зернового материала: дисс. ... доктора с.-х. наук: 05.20.01 / Баскаков Иван Васильевич; [Место защиты: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I»]. - Воронеж, 2019. - 339 с.
7. Баум, А.Е. Сушка зерна / А.Е. Баум, В.А. Резчиков. – М.: Колос, 1983. – 223 с.

8. Башарин, А.В. Управление электроприводами: учебное пособие для вузов / А.В. Башарин, В.А. Новиков, Г.Г. Соколовский. - Л.: Энергоиздат. Ленингр. отделение, 1982. – 392 с.
9. Белов, М.П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: учебник для студ. высш. учеб. заведений / М.П. Белов, В.А. Новиков, Л.Н. Рассудов. – 3-е изд. испр. – М.: Академия, 2007. – 756 с.
10. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи / Л. А. Бессонов. - М.: Высшая школа, 1978. – 528 с.
11. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники: Электромагнитное поле / Л. А. Бессонов. - М.: Высшая школа, 1978. – 231 с.
12. Бойко, Е.П. Асинхронные двигатели общего назначения / Е.П. Бойко, Ю.М. Ковалев [и др.]; под ред. В.М. Петрова и А.Э. Кравчика. – М.: Энергия, 1980. – 488 с.
13. Браславский, И. Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод / И. Я. Браславский, З. Ш. Ишматов, В. Н. Поляков. - М.: Академия, 2004. – 256 с.
14. Булгаков, А.А. Частотное управление асинхронными двигателями. -3-е перераб. изд. / А.А. Булгаков. – М.: Энергоиздат, 1982. - 216 с.
15. Булгаков, А.А. Частотное управление асинхронными двигателями / А.А. Булгаков. – М.: Наука, 1966. – 297 с.
16. Варгафтик, Натан Борисович. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей [Текст]. - 2-е изд., доп. и перераб. - Москва: Наука, 1972. - 720 с.
17. Васильев, Д. А. Асинхронный электрический двигатель с внутренней компенсацией реактивной мощности / Д. А. Васильев, Л. А. Пантелеева // Аграрное образование и наука - в развитии животноводства : материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 70-летию заслуженного работника сельского хозяйства РФ, почетного работника ВПО РФ, лауреата Государственной премии УР, ректора ФГБОУ ВО Ижевская ГСХА, доктора сельскохозяйственных наук, профессора Любимова Александра Ивановича. В 2-х томах,

Ижевск, 20 июля 2020 года. – Ижевск: Ижевская государственная сельскохозяйственная академия, 2020. – С. 57-61.

18. Васильев, Д. А. Исследование асинхронного электропривода с частотным регулированием / Д. А. Васильев, Л. А. Пантелеева // АгроЭкоИнфо. – 2021. – № 3(45). – DOI 10.51419/20213303.

19. Васильев, Д. А. Математическая модель потерь мощности в асинхронном двигателе по М-образной схеме замещения в пакете / Д. А. Васильев, Л. А. Пантелеева, В. А. Носков // Инновации в сельском хозяйстве. – 2018. – № 3(28). – С. 33-38.

20. 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.

21. 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.

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

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

24. 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.

25. 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.

26. Васильев, Д.А. Влияние изменения частоты питающего напряжения двигателя на реактивное сопротивление контура намагничивания / Д.А. Васильев // Научные труды студентов Ижевской ГСХА: сборник статей. ФГБОУ ВО «Ижевская государственная сельскохозяйственная академия». Ижевск, 2016. - С. 103-105.

27. Васильев, Д.А. Диагностика состояния электродвигателей на основе спектрального анализа потребляемого тока / Л.А. Пантелеева, Д.А. Васильев // Научное обеспечение АПК. Итоги и перспективы: материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 70-летию ФГБОУ ВПО Ижевская ГСХА. – ФГБОУ ВПО Ижевская государственная сельскохозяйственная академия. - 2013. - С. 97-100.

28. 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.

29. 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. – ФГБОУ ВО «Ижевская ГСХА». - 2017. - С. 187-190.

30. 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.

31. Васильев, Д.А. Оптимальные режимы работы асинхронного электродвигателя / Д.А. Васильев, Л.А. Пантелеева, В.А. Носков // Роль молодых ученых-инноваторов в решении задач по ускоренному импортозамещению

сельскохозяйственной продукции: материалы Всероссийской научно-практической конференции. - 2015. - С. 146-149.

32. Васильев, Д.А. Оценка влияния несимметрии напряжения на гармонический состав входного тока системы преобразователь частоты - асинхронный двигатель в лабораторных условиях / Д.А. Васильев, Л.А. Пантелеева, В.А. Носков // Инновационные направления развития энергетики АПК: материалы Всероссийской научно-практической конференции, посвящённой 40-летию факультета энергетики и электрификации. - 2017. - С. 37-42.

33. 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.

34. 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 // Развитие энергосистем АПК: перспективные технологии: материалы Международной научно-практической конференции Института агроинженерии. Под редакцией М. Ф. Юдина. - 2018. - С. 39-47.

35. Васильев, Д.А. Повышение энергосбережения при применении частотных преобразователей / Д.А. Васильев, Л.А. Пантелеева, В.А. Носков // 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.

36. 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.

37. Васильев, Д.А. Регулируемый электропривод как средство энергосбережения в установках с центробежным насосом / Д.А. Васильев, Л.А. Пантелеева, В.А. Носков // Научное и кадровое обеспечение АПК для продовольственного импортозамещения. материалы Всероссийской научно-практической конференции. Министерство сельского хозяйства Российской Федерации, ФГБОУ ВПО «Ижевская государственная сельскохозяйственная академия». - 2016. - С. 171-174.
38. Васильев, Д.А. Энергетические показатели асинхронного двигателя на основе М-образной схемы замещения / Д.А. Васильев // 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.
39. Винокуров, В.А. Электрические машины железнодорожного транспорта. / В.А. Винокуров, Д.А. Попов. - М.: Транспорт, 1986. - 511 с.
40. Водяников, В. Т. Теоретические основы формирования эффективной системы энергосбережения в агропромышленном комплексе / В.Т. Водяников // Вестник ФГОУ ВО МГАУ. - 2012. - №3 (54). - С. 45-48.
41. Вольдек, А. И. Электрические машины / А.И. Вольдек. - М.: Энергия, 1974. – 340 с.
42. Вольдек, А.И. Электрические машины: Учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений / А.И. Вольдек. – Л.: Энергия, 1974. – 840 с.
43. Горланов, С.А. Экономическая оценка проектных разработок в АПК / С.А. Горланов, Е.В. Злобин. – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2002. – 66 с.
44. ГОСТ 11828 Машины электрические вращающиеся. Общие методы испытаний – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003.
45. ГОСТ 25941 Машины электрические вращающиеся. Методы определения потерь и коэффициента полезного действия – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003.
46. ГОСТ 7217 Электродвигатели трехфазные асинхронные. Методы испытаний. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003.

47. ГОСТ Р 53472-2009 Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/f55/4293811195.pdf> (Дата обращения: 15.02.18).
48. Государственная программа Российской Федерации «Энергоэффективность и развитие энергетики» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://portal-energo.ru/files/articles/portal-energo\\_ru\\_povisheniya\\_e\\_ef\\_v\\_energetike.pdf](http://portal-energo.ru/files/articles/portal-energo_ru_povisheniya_e_ef_v_energetike.pdf) (Дата обращения: 11.09.18).
49. Гридин, В.М. Расчет характеристик асинхронных двигателей по каталожным данным // Электричество. 2018. № 9/98. – С. 44-48.
50. Дианов, Л.В. Механизация сушки урожая зерновых и кормовых культур / Л.В. Данов, В.А. Смелик, С.А. Ширяев. - Ярославль.: ФГОУ ВПО Ярославская ГСХА, 2005. – 150 с.
51. Динамические ряды основных показателей по растениеводству (в хозяйствах всех категорий) [Электронный ресурс]: Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Удмуртской Республике – Режим доступа: <https://18.rosstat.gov.ru/> (дата обращения 05.08.2023).
52. Дубовец, В. Д. Построение графических моделей в среде MatLab: учеб.-метод. пособие / В. Д. Дубовец, В. А. Столер, В. Ф. Бондаренко. - Минск: БГУИР, 2015. – 70 с.
53. Жидко, В.И. Зерносушение и зерносушилки. / В.И. Жидко. – М.: Колос, 1982. – 239 с.
54. Иванов-Смоленский, А.В. Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах: учеб. пособие для вузов по спец. «Электромеханика» / А.В. Иванов-Смоленский - М.: Высш. шк., 1989. – 312 с.
55. Ильинский, Н.Ф. Энергосбережение в электроприводе / Н.Ф. Ильинский, Ю.В. Рожанковский, А.О. Горнов. - М.: Высшая школа, 1989. – 127 с.
56. Каргин, Виталий Александрович. Повышение эффективности технических средств для процессов и технологий АПК использованием машин с линейным электромагнитным приводом: дисс. ... доктора тех. наук: 05.20.02 / Каргин Виталий

Александрович [Место защиты: ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова»]. - Саратов, 2020. - 377 с.

57. Клюев, В.И. Определение динамических нагрузок электропривода / В.И. Клюев – М.: Энергия, 1971. – 320 с.

58. Ключев, В.И. Теория электропривода. Учебное пособие для вузов. Изд. 2 / В.И. Ключев. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 704 с.

59. Ковенский, Геннадий Исаакович. Управляемое псевдооживление : монография / Г.И. Ковенский ; Нац. АН Беларуси, АНК "Ин-т тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова". - Минск : [б. и.], 1999. - 144 с.

60. Ковчин, С.А. Теория электропривода / С.А. Ковчин, Ю.А. Сабинин. – СПб.: Энергоатомиздат, 1994. - 496 с.

61. Кононенко, Е.В. Электрические машины (спец. курс): Учебное пособие для вузов / Е.В. Кононенко. – М.: Высшая школа, 1975. - 279 с.

62. Копылов, И.П. Математическое моделирование электрических машин: Учеб. Для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. / И.П. Копылов. - М.: Высш. шк., 2001. – 327 с.

63. Коробков, И.Ф. Особенности эксплуатации электродвигателей в сельском хозяйстве / И.Ф. Коробков, Т.В. Шилова // Вестник НГИЭИ. - 2011. - №3 (4). - С. 122-132.

64. Котенев, В.И. Метод расчета сопротивлений асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором по паспортным данным и оценка его погрешности / В.И. Котенев, А.Д. Стулов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2021. - №. 3 (71). - С. 98-110.

65. Котенев, В.И. Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором по справочным данным / В.И. Котенев, А.В. Котенев, В.В. Кочетков // Известия высших учебных заведений. Электро-механика. - 2016.- №6. - с. 13–17.

66. Котриков, К.П. Потери при частотном регулировании асинхронных двигателей / К.П. Котриков. - Изв.вузов. Сер. Энергетика, 1969, №8. – 39 с.

67. Кошурников, А.В. Анализ технологических процессов, выполняемых сельскохозяйственными машинами с помощью ЭВМ Ч II / А.В. Кошурников, Д.А. Кошурников, А. А. Кыров. – Пермская с.х. академия. Пермь, 1998. –381 с.
68. Крицер, Отто. Научные основы техники сушки [Текст] / Перевод с нем. канд. техн. наук Д. М. Левина ; Под ред. д-ра техн. наук проф. А. С. Гинзбурга ; [Предисл. А. С. Гинзбурга и Д. М. Левина]. - Москва : Изд-во иностр. лит., 1961. - 539 с.
69. Кузнецов, М.Н. Анализ условий работы, причин и характеров отказов асинхронных электродвигателей / М.Н. Кузнецов, А.Н. Черных, Д.А. Васильев, Л.А. Пантелеева // Научные труды студентов Ижевской ГСХА. Электронный ресурс. Ижевская государственная сельскохозяйственная академия. Ижевск, - 2017. - С. 523-528.
70. Лева, М. Псевдооживление [Текст] / Пер. с англ. В. Г. Айнштейна ; Под ред. проф. Н. И. Гельперина. - Москва : Гостоптехиздат, 1961. - 400 с
71. Лезнов, Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздуходувных установках. Производственно-практическое издание / Б.С. Лезнов. - М.: Энергоатомиздат, 2006. - 360 с.
72. Лукутин, Б. В. Силовые преобразователи в электроснабжении: Учебное пособие. / Б.В. Лукутин, С.Г. Обухов – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. - 144 с.
73. Лыков, М. В. Сушка в химической промышленности [Текст]. - Москва : Химия, 1970. - 429 с.
74. Макаров, П.И. Механизация послеуборочной обработки зерна: Учебное пособие. / П.И. Макаров, Г.С. Юнусов, И.И. Казанков, С.И. Казанков, Г.В. Богданов, Х.С. Гайнанов, Н.Ф. Маслова – Йошкар Ола, 2007. – 284 с.
75. Макеев, М.С., Кувшинов А.А. Алгоритм расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя по каталожным данным / М.С. Макеев, А.А. Кувшинов // Вектор науки ТГУ. 2013. № 1 (23). С. 108-112.
76. Москаленко, В.В. Электрический привод: учебник для студ. Высш. Учеб. Заведений / В.В. Москаленко. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 368 с.

77. Мощинский, Ю.А. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным / Ю.А. Мощинский, В.Я. Беспалов, А.А. Кирякин // *Электричество*. 1998. № 4/98. С. 38-42.
78. Муштаев, В. И. Сушка дисперсных материалов / В. И. Муштаев, В. М. Ульянов. - М. : Химия, 1988. – 351 с.
79. Наличие сельскохозяйственной техники в Удмуртской Республике [Электронный ресурс]: Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Удмуртской Республике – Режим доступа: <https://18.rosstat.gov.ru/> (дата обращения 05.08.2023).
80. Нестеров, А. В. Промышленная сушка : монография / А. В. Нестеров. – Санкт-Петербург : Лань, 2021. – 304 с. – (Бакалавриат, Магистратура). – ISBN 978-5-8114-8013-5. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система : [сайт]. – URL: <https://e.lanbook.com/book/180781> (дата обращения: 08.09.2021). – Режим доступа: для авториз. пользователей.
81. Носков, В.А. М-образная схема замещения асинхронной машины / В.А. Носков // *ЭЛЕКТРИЧЕСТВО*, Национальный исследовательский университет "МЭИ" (Москва). - 2012. - С. 50-53.
82. Окнин, Б.С. Машины для послеуборочной обработки зерна / Б.С. Окнин, И.В. Горбачёв, А.А. Терехин и др. – М.: Агропромиздат, 1987. – 238 с.
83. Онищенко, Г.Б. Электрический привод. Учебник для вузов / Г.Б. Онищенко – М.: РАСХН, 2003. – 320 с.
84. Основные показатели развития сельского хозяйства в УР за 2022 год [Электронный ресурс]: Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Удмуртской Республике – Режим доступа: <https://18.rosstat.gov.ru/> (дата обращения 05.08.2023).
85. Павлушин Андрей Александрович. Механико-технологическое обоснование и разработка энергосберегающих средств механизации тепловой обработки зерна : дисс. ... доктора техн. наук : 05.20.01 / Павлушин Андрей Александрович [Место защиты: Федеральное государственное бюджетное образовательное

учреждение высшего образования «Башкирский государственный аграрный университет»]. - Уфа, 2015. - 554 с.

86. Пантелеева, Лариса Анатольевна. Повышение эффективности работы асинхронного генератора с короткозамкнутым ротором : диссертация ... кандидата технических наук : 05.20.02 / Пантелеева Лариса Анатольевна; [Место защиты: Ижев. гос. с.-х. акад.]. - Ижевск, 2012. - 133 с.

87. Перекопский А.Н. Карусельная сушилка высоковлажных семян / А.Н. Перекопский // Сельский механизатор. – 2015. – №5. – С. 6 – 7.

88. Перекопский, А.Н. Обоснование режимов сушки семян трав в карусельной сушилке / А.Н. Перекопский, С.В. Чугунов // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2018. № 4(97). С.131- 138.

89. Петрович, В.П. Силовые преобразователи электрической энергии: учебное пособие / В.П. Петрович, Н.А. Воронина, А.В. Глазачев. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. - 240 с.

90. Поляков, В.Н. Экстремальное управление электрическими двигателями / В.Н. Поляков, Р.Т. Шрейнер. - Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2006. - 420 с.

91. Посевные площади сельскохозяйственных культур под урожай 2023 года [Электронный ресурс]: Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Удмуртской Республике – Режим доступа: <https://18.rosstat.gov.ru/> (дата обращения 05.08.2023).

92. Проблемы устойчивого развития аграрного сектора, на примере зернового хозяйства Удмуртской Республики. [Электронный ресурс]: Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Саратовской области – Режим доступа: <https://64.rosstat.gov.ru/> (дата обращения 05.08.2023).

93. Птицын, С.Д. Зерносушилки технологические основы, тепловой расчёт и конструкции / С.Д. Птицын. – М.: Машиностроение, 1966. – 211 с.

94. Пугачев, А.А. Минимизация мощности потерь в электроприводе со скалярной системой управления асинхронным двигателем / А.А. Пугачев // Вестник Череповецкого государственного университета. - 2015. - №3 (64). - С. 32-37.

95. Радин, В.И. Электрические машины: Асинхронные машины: Учеб для электромех. спец. вузов / В.И. Радин, Д.Э.Брускин, А.Е. Зорохович; под ред. И.П. Копылова. – М.: Высш. шк., 1988. - 328 с.
96. Распоряжение Правительства РФ от 13.11.2009 N 1715-р «Об Энергетической стратегии России на период до 2030 года» [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://energoeducation.ru/wp-content/uploads/2015/11/LAW94054\\_0\\_20151002\\_142857\\_54007.pdf](http://energoeducation.ru/wp-content/uploads/2015/11/LAW94054_0_20151002_142857_54007.pdf) (Дата обращения: 15.06.17).
97. Романков, П. Г. Сушка: Методы расчета и проектирования сушильных установок / П. Г. Романков и Л. Н. Давиденкова; Под ред. проф. К. Ф. Павлова. - [2-е изд.]. - Москва : Хим. фак-т, 1937 (Загорск : тип. "6 Октябрь"). - Обл., 194 с.
98. Рысин, И. И. Моделирование влияния климатических факторов на урожайность зерновых культур (на материалах Удмуртии) / И. И. Рысин, П. Б. Акмаров, О. П. Князева // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле. - 2020. - Т. 30. - № 4. - С. 465-472.
99. Рябенский, В.М. Практическая электротехника: Основы электротехники с использованием MATLAB/Simulink: учебное пособие / В.М. Рябенский, Л.В. Солобуто, А.И. Черевко, Е.В. Лимонникова; под ред. проф. В.М. Рябенского - Архангельск: САФУ им. М.В. Ломоносова, 2014. - 413 с.
100. Сабинин, Ю.А. Частотно-регулируемые асинхронные электроприводы / Ю.А. Сабинин, В.Л. Грузов. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. - 126 с.
101. Сажин, Б. С. Научные основы техники сушки / Б. С. Сажин, В. Б. Сажин. - М. : Наука, 1997. - 447 с.
102. Сажин, Б. С. Основы техники сушки / Б. С. Сажин. - М. : Химия, 1984. - 319 с.
103. Сакун, В.А. Сушка и активное вентилирование зерна и зеленых кормов / В.А. Сакун. – М.: Колос, 1974. – 216 с.
104. Самочетов, В.Ф. Зерносушение / В.Ф. Самочетов, Г. А. Джогонян. – М.: Колос, 1970. – 287 с.

105. Сандлер, А.С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями / А.С. Сандлер, Р.С. Сарбатов. - М.: Энергия, 1974. - 328 с.
106. Сандлер, А.С. Частотное управление асинхронными двигателями / А. Сандлер, Р. С. Сарбатов. - М.: Энергия, 1966. - 144 с.
107. Сельскохозяйственная микроперепись 2021 года [Электронный ресурс]: Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики – Режим доступа: <https://rosstat.gov.ru/> (дата обращения 05.08.2023).
108. Сидельников, Б. В. Частотное регулирование асинхронного двигателя, ориентированное на получение максимального коэффициента полезного действия / Б.В. Сидельников, М.А. Беляев, И.Л. Суворов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. - 2012. - №2-1 (147). - С. 197-202.
109. Соловьев, В.А. Расчет характеристик трехфазного асинхронного двигателя: методические указания к самостоятельной работе студентов по дисциплинам «Электротехника и электроника», «Основы электропривода» / В.А. Соловьев. – М.: Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 2014. - 44 с.
110. Способ повышения коэффициента полезного действия при эксплуатации трехфазных асинхронных электродвигателей электроприводов с изменяющейся нагрузкой / Геращенко В.В., Левшуков Н.Н., Гайдо В.К., Левшуков Н.Н., Геращенко А.В., Башаримова В.Н. // Патент 2010151935/28. – 2010.
111. Способ управления асинхронным двигателем / Солтус К.П., Беляев А.В., Рутштейн А.М. // Патент 2005114089/09. – 2005.
112. Способ фазового управления асинхронным двигателем / Изосимов Д.Б. Макаров Л.Н. // Патент 2009133127/09. – 2009.
113. Стефанова, И. А. Моделирование устройств телекоммуникаций в системе MATLAB+Simulink: учебное пособие / И.А. Стефанова. – Самара: ПГУТИ, 2016. - 148 с.
114. Субсидии на газификацию зерносушильных комплексов [Электронный ресурс]. – [https://udmark.ru/novosti/7415/?sphrase\\_id=368282](https://udmark.ru/novosti/7415/?sphrase_id=368282) (Дата обращения: 11.12.23).

115. Терёхин, В.Б. Моделирование систем электропривода в Simulink (Matlab 7.0.1): учебное пособие / В.Б. Терёхин. - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. - 320 с.
116. Терехов В.М. Элементы автоматизированного электропривода / В.М. Терехов - М.: Энергоатомиздат, 1987. – 224 с.
117. Тиц, З.Л. Машины для послеуборочной поточной обработки семян: Теория и расчет машин, технология и автоматизация процессов / З. Л. Тиц, В. И. Анискин, Г. А. Баснакьян [и др.]; под ред. канд. техн. наук З. Л. Тица. - Москва : Машиностроение, 1967. - 447 с.
118. Тодес, О. М. Аппараты с кипящим зернистым слоем : (Гидравл. и тепловые основы работы) / О. М. Тодес, О. Б. Цитович. - Л. : Химия : Ленингр. отделение, 1981. - 296 с.
119. Туктарова, Н. Г. Озимые зерновые культуры в условиях Удмуртской Республики: монография / Туктарова Н. Г. [и др.]. – Федеральное агентство научных организаций, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Удмуртский научно-исследовательский институт сельского хозяйства". - Ижевск : Буква, 2018. - 124 с.
120. Усольцев, А. А. Векторное управление асинхронными двигателями/ А.А. Усольцев. - С.-Пб.: СПбЕИТМО(ТУ), 2002. - 43 с.
121. Усольцев, А.А. Определение параметров модели асинхронного двигателя по справочным данным / Усольцев, А.А., Д.В. Лукичѳв // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. - 2008 - №10. - С. 35-41.
122. Усольцев, А.А. Частотное управление асинхронными двигателями. Учебное пособие / А.А. Усольцев – СПб: СПбГУ ИТМО, 2006, - 94 с.
123. Федотов А.В. Основы теории автоматического управления: учебное пособие / А.В. Федотов - Саратов: Ай Пи Эр Медиа, 2019. - 278 с.
124. Федотов, А.В. Моделирование привода погружного насоса интеллектуальной скважины: монография /А.В. Федотов [и др.]. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2012. - 175 с.

125. Чиликин, М.Г. Общий курс электропривода: Учебник для вузов. 6-е изд., доп. и перераб. / М.Г. Чиликин, А.С. Сандлер. - М.: Энергоиздат, 1981. - 576 с.
126. Чиликин, М.Г. Основы автоматизированного электропривода / М.Г. Чиликин, М.М. Соколов, В.М. Терехов, А.В. Шинянский - М.: Энергия, 1974. - 568 с.
127. Чунихин, А.А. Электрические аппараты / А.А. Чунихин. - М.: Энергоатомиздат, 1988. - 720 с.
128. Шрейнер, Р. Т. Оптимальное частотное управление асинхронными электроприводами / Р. Т. Шрейнер, Ю. А. Дмитренко. - Кишинев: Штиинца, 1982. - 234 с.
129. Шрейнер, Р. Т. Системы подчиненного регулирования электроприводов : учеб. пособие для вузов [Гриф УМО]. Ч. 1 : Электроприводы постоянного тока с подчиненным регулированием координат / Р. Т. Шрейнер ; Урал. гос. проф.-пед. ун-т. - Екатеринбург : Издательство УГППУ, 1997. - 277 с.
130. Шрейнер, Р. Т. Электромеханические и тепловые режимы асинхронных двигателей в системах частотного управления: учебное пособие для вузов [Гриф УМО] / Р. Т. Шрейнер [и др.] ; Рос. гос. проф.-пед. ун-т. - Екатеринбург : Издательство РГППУ, 2008. - 360 с.
131. Шрейнер, Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты / Р.Т. Шрейнер. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. - 654 с.
132. Энергетическая стратегия российской федерации на период до 2035 года [Электронный ресурс]. – <https://minenergo.gov.ru/node/1026> (Дата обращения: 11.12.19).
133. Aguilera, F. / Induction machine models for efficiency studies in EV design applications // F. Aguilera, P.M. Barrera, , C.H. Angelo // 10th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications – 2012. – P. 1-7.

134. Ansari, M.N. Analysis of stray loss and its determination with equivalent circuit for double cage rotor induction motor / M.N. Ansari, A. Dalal, P. Kumar // Annual IEEE India Conference - 2013. – P. 1-6.
135. Antipov, S. System modelling of non-stationary drying processes / S. Antipov, A. Klyuchnikov, V. Panfilov // Foods and Raw Materials. – 2019. – Vol. 7. – No 1. – P. 93-106. – DOI 10.21603/2308-4057-2019-1-93-106.
136. Boglietti, A. Computational Algorithms for Induction-Motor Equivalent Circuit Parameter Determination—Part I: Resistances and Leakage Reactances / A. Boglietti, A. Cavagnino, M. Lazzari // IEEE Transactions on Industrial Electronics. - 2011 - №58. - P. 3723-3733.
137. Boglietti, A. Fast method for the iron losses prediction in inverter fed induction motors / A. Boglietti, A. Cavagnino, M. Lazzari // IEEE International Electric Machines and Drives Conference - 2009. - P. 43-48.
138. Boglietti, A. Impact of the supply voltage on the stray load losses in induction motors / Boglietti, A., Cavagnino, A., Ferraris, L., Lazzari, M. // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. - 2009. – P. 1267-1272.
139. Boglietti, A. Influence of the sinusoidal supply frequency on the induction motor stray load losses / A. Boglietti, I.R. Bojoi, A. Cavagnino, S. Vaschetto // IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society – 2012. – P. 1847-1851.
140. Burgschweiger, J. Experimental investigation and modelling of continuous fluidized bed drying under steady-state and dynamic conditions / J. Burgschweiger, E. Tsotsas // Chemical Engineering Science. – 2002. – Vol. 57. – No 24. – P. 5021-5038. – DOI 10.1016/S0009-2509(02)00424-4.
141. Heertjes P.M., Verloop J. // Chem. Ind. Techn. 1973. Vol. 45, N. 6. P. 379-381. A 319 – A 341.
142. Hiby J.W. // Proc. Intern. Symp. Fluidization. Amsterdam. Neth. Univ. Press., 1967. P 4.1/1 – 4.1/11.
143. Jahan, E. Fuzzy logic based speed control of an induction motor with considering core loss, stray load loss, and variations of motor parameters / E. Jahan, M.R.

Hazari, M.A. Mannan, J.Tamura // 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). – 2016. – P. 1-4.

144. Kumar, R. Stray Loss Model for Induction Motors With Using Equivalent Circuit Parameters / R. Kumar, P. Kumar, T. Kanekawa, K. Oishi // IEEE Transactions on Energy Conversion - 2020. - №35 - P. 1036-1045.

145. Ling, Z. Equivalent Circuit Parameters Calculation of Induction Motor by Finite Element Analysis / Z. Ling, L. Zhou, S. Guo, Y. Zhang // IEEE Transactions on Magnetics. – 2014. - №50. - P. 833-836.

146. Lv, W. Recent development of microwave fluidization technology for drying of fresh fruits and vegetables / W. Lv, D. Li, H. Lv [et al.] // Trends in Food Science & Technology. – 2019. – Vol. 86. – P. 59-67. – DOI 10.1016/j.tifs.2019.02.047.

147. Pacheco, J. Interior point method based efficiency optimization for an induction motor drive / J. Pacheco, J.A. Farías, J.J. Rodríguez, M. Badaoui, O. Carranza, R. Ortega // IEEE 37th Central America and Panama Convention (CONCAPAN XXXVII) – 2017. – P. 1-7.

148. Pronin, M. A model of semiconductor converter-fed asynchronous machines taking into account energy losses and thermal processes / M. Pronin, O. Shonin, Y. Kos'kin, A. Vorontsov, P. Kalatchikov // 13th International Power Electronics and Motion Control Conference. - 2008. - P. 837-844.

149. Ranta, M. Inclusion of hysteresis and eddy current losses in dynamic induction machine models / M. Ranta, M. Hinkkanen, E. Dlala, A. Repo, J. Luomi // IEEE International Electric Machines and Drives Conference – 2009. - P. - 1387-1392.

150. Srinivasakannan, C. Continuous fluidized bed drying with and without internals: Kinetic model / C. Srinivasakannan, A. Al Shoaibi, N. Balasubramanian // Chemical and Biochemical Engineering Quarterly. – 2012. – Vol. 26. – No 2. – P. 97-104.

151. Strenzke, G. Influence of operating parameters on process behavior and product quality in continuous spray fluidized bed agglomeration / G. Strenzke, E. Tsotsas, R. Dürr, A. Bück // Powder Technology. – 2020. – Vol. 375. – P. 210-220. – DOI 10.1016/j.powtec.2020.07.083.

152. Vasiliev, D. A. Improving the efficiency of a variable frequency asynchronous electric drive / D. A. Vasiliev, L. A. Panteleeva, P. L. Lekomcev [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : The proceedings of the conference AgroCON-2019, Kurgan, 18–19 апреля 2019 года. – Kurgan: IOP Publishing Ltd, 2019. – P. 012120. – DOI 10.1088/1755-1315/341/1/012120.

153. 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.

## **Приложения**

Приложение А. Внедрение научных исследований в СПК «Свобода»  
Увинского района Удмуртской Республики

СОГЛАСОВАНО

Проректор по научной работе  
и стратегическому развитию  
Удмуртского ГАУ

С.И. Коконов

2023 г.



УТВЕРЖДАЮ

Председатель СПК «Свобода»

А.Н. Помосов

2023 г.



**АКТ ВНЕДРЕНИЯ**

результатов научно-исследовательских, опытно-конструкторских  
и технологических работ в высших учебных заведениях

Заказчик СПК «Свобода» Увинского района Удмуртской Республики

Настоящим актом подтверждается, что результаты работы «Повышение энергоэффективности сушки зерна за счет обоснования режимов работы электропривода»,

выполненной в Удмуртский ГАУ

выполняемой с 2018 по 2023 гг.

внедрены в СПК «Свобода» Увинского района.

1. Вид внедренных результатов: обоснование выбора системы электропривода на базе асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, предназначенные для использования в зерносушильном комплексе.
2. Характеристика масштаба внедрения: единичное.
3. Форма внедрения: опытно-производственная.
4. Методика: разработана модель электропривода, асинхронный двигатель АИР100S4 – вентилятор 80-75-6,3, процесса сушки зерна в кипящем слое, которая позволяет исследовать энергетические характеристики и параметры

процесса сушки зерна, которую можно рассматривать, как вариант совершенствования управления процесса сушки.

5. Новизна результатов научно-исследовательских работ: качественно новые.

6. Опытно-промышленная проверка: Акт от 21.08.2023 г.

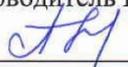
7. Внедрены: для модернизации зерносушильных комплексов.

8. Годовой экономический эффект от предложенной системы управления асинхронным электроприводом при тепловой обработке зерна составит свыше 36 тыс. рублей.

9. Социальный и научно-технический эффект: снижение себестоимости электроэнергии, совершенствование процесса сушки зерна.

**От вуза**

Руководитель НИР

 Л.А. Пантелеева

Исполнитель НИР

 Д.А. Васильев

**От предприятия**

Главный энергетик

СПК «Свобода»

 В.И. Пасынков

Приложение Б. Свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ  
 Приложение Б.1 – Программа расчета системы управления, обеспечивающей  
 энергоэффективный режим работы асинхронного двигателя

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



RU2023664305

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
 ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ  
 ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства): 2023664305 Дата регистрации: 03.07.2023 Номер и дата поступления заявки: 2023662148 09.06.2023 Дата публикации и номер бюллетеня: 03.07.2023 Бюл. № 7 Контактные реквизиты: nir@udsau.ru	Автор(ы): Пантелеева Лариса Анатольевна (RU), Васильев Даниил Александрович (RU) Правообладатель(и): Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Удмуртский государственный аграрный университет» (RU)
---	---

Название программы для ЭВМ:  
 Программа расчета системы управления, обеспечивающей энергоэффективный режим работы  
 асинхронного двигателя

**Реферат:**  
 Программа реализует математическую модель системы управления асинхронным  
 электродвигателем, которая позволяет на основе заданных характеристик электродвигателя,  
 момента силы на валу и необходимой частоты вращения асинхронного электродвигателя,  
 рассчитывать частоту и амплитуду напряжения питания обеспечивающей энергоэффективный  
 режим работы асинхронного двигателя. Тип ЭВМ: IBM PC-совмест. ПК на базе процессора с  
 тактовой частотой 1300 МГц.

**Язык программирования:** графического программирования Simulink, среда  
 разработки Matlab версия 9.9.0

**Объем программы для ЭВМ:** 1,25 КБ

# Приложение Б.2 – Программа для моделирования режимов работы трехфазного асинхронного двигателя

30.10.2023, 09:13

ПрЭВМ №2023681025

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



RU

**2023681025**

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ  
(12) ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства):  
**2023681025**

Дата регистрации: **09.10.2023**

Номер и дата поступления заявки:  
**2023680290 05.10.2023**

Дата публикации: **09.10.2023**

Контактные реквизиты:  
**nir210@mail.ru**

Авторы:

**Пантелеева Лариса Анатольевна (RU),  
Васильев Даниил Александрович (RU)**

Правообладатель:

**Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Удмуртский государственный аграрный  
университет» (RU)**

Название программы для ЭВМ:

**ПРОГРАММА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТРЕХФАЗНОГО  
АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

**Реферат:**

Программа предназначена для моделирования режимов работы трехфазного асинхронного двигателя (АД), путем расчета установившегося режима АД по схеме замещения, выраженной через проводимости статора и ротора. Программа позволяет на основе заданных характеристик электродвигателя, момента на валу и частоты вращения АД, рассчитывать токи фазы, их активные и индуктивные составляющие, посредством которых определяются активная и реактивная мощности, коэффициент мощности и другие составляющие рабочих характеристик АД. Тип ЭВМ: IBM PC-совмест. ПК на базе процессора с тактовой частотой 1300 МГц. ОС: Windows NT.

**Язык программирования:** Simulink

**Объем программы для ЭВМ:** 33,8 КБ

Приложение В. Расчетные данные проводимостей фазы, коэффициента полезного действия, коэффициента мощности, энергетического КПД асинхронного двигателя АИР100S4

Таблица В.1 – Расчетные данные проводимостей фазы, коэффициента полезного действия, коэффициента мощности, энергетического КПД асинхронного двигателя АИР100S4 в зависимости от скольжения ротора при частоте сети 40 Гц

$s$	$q_1, 1/\text{Ом}$	$b_1, 1/\text{Ом}$	$b_{2s}, 1/\text{Ом}$	$q_{2k}, 1/\text{Ом}$	$q_{2s}, 1/\text{Ом}$	$q, 1/\text{Ом}$	$b, 1/\text{Ом}$	КПД, %	$\cos\varphi, \%$	$\xi, \%$
0,00	0,00204	0,01669	0,00000	0,00000	0,00000	0,00204	0,01669	0,0	0,12	0,00
0,05	0,00204	0,01669	0,00269	0,00250	0,02050	0,02504	0,01939	81,9	79,1	64,73
0,10	0,00204	0,01669	0,00924	0,00858	0,03330	0,04392	0,02593	75,8	86,1	65,29
0,15	0,00204	0,01669	0,01773	0,01646	0,04024	0,05874	0,03443	68,5	86,3	59,10
0,20	0,00204	0,01669	0,02689	0,02496	0,04308	0,07008	0,04358	61,5	84,9	52,20
0,25	0,00204	0,01669	0,03595	0,03338	0,04320	0,07862	0,05265	54,9	83,1	45,65
0,30	0,00204	0,01669	0,04453	0,04134	0,04161	0,08499	0,06122	49,0	81,1	39,73
0,35	0,00204	0,01669	0,05244	0,04868	0,03900	0,08972	0,06913	43,5	79,2	34,43
0,40	0,00204	0,01669	0,05963	0,05536	0,03582	0,09322	0,07632	38,4	77,4	29,73
0,45	0,00204	0,01669	0,06612	0,06139	0,03237	0,09579	0,08282	33,8	75,6	25,56
0,50	0,00204	0,01669	0,07197	0,06681	0,02882	0,09767	0,08866	29,5	74,0	21,85
0,55	0,00204	0,01669	0,07722	0,07169	0,02530	0,09903	0,09392	25,6	72,6	18,54
0,60	0,00204	0,01669	0,08195	0,07608	0,02188	0,10000	0,09865	21,9	71,2	15,58
0,65	0,00204	0,01669	0,08621	0,08004	0,01859	0,10067	0,10291	18,5	69,9	12,91
0,70	0,00204	0,01669	0,09007	0,08361	0,01546	0,10111	0,10676	15,3	68,8	10,51
0,75	0,00204	0,01669	0,09356	0,08685	0,01249	0,10138	0,11025	12,3	67,7	8,34
0,80	0,00204	0,01669	0,09673	0,08980	0,00968	0,10152	0,11342	9,5	66,7	6,36
0,85	0,00204	0,01669	0,09962	0,09248	0,00704	0,10156	0,11631	6,9	65,8	4,56
0,90	0,00204	0,01669	0,10226	0,09493	0,00455	0,10153	0,11896	4,5	64,9	2,91
0,95	0,00204	0,01669	0,10468	0,09718	0,00221	0,10143	0,12138	2,2	64,1	1,39
1,00	0,00204	0,01669	0,10691	0,09925	0,00000	0,10129	0,12360	0,0	63,4	0,00

Таблица В.2 – Расчетные данные проводимостей фазы, коэффициента полезного действия, коэффициента мощности, энергетического КПД асинхронного двигателя АИР100S4 в зависимости от скольжения ротора при частоте сети 50 Гц

$s$	$q_1, 1/\text{Ом}$	$b_1, 1/\text{Ом}$	$b_{2s}, 1/\text{Ом}$	$q_{2k}, 1/\text{Ом}$	$q_{2s}, 1/\text{Ом}$	$q, 1/\text{Ом}$	$b, 1/\text{Ом}$	КПД, %	$\cos\varphi, \%$	$\xi, \%$
0,00	0,00131	0,01336	0,00000	0,00000	0,00000	0,00131	0,01336	0,0	0,10	0,00
0,05	0,00131	0,01336	0,00334	0,00248	0,02034	0,02413	0,01671	84,3	0,82	69,31
0,10	0,00131	0,01336	0,01125	0,00836	0,03245	0,04212	0,02462	77,1	0,86	66,52
0,15	0,00131	0,01336	0,02111	0,01568	0,03832	0,05530	0,03447	69,3	0,85	58,80
0,20	0,00131	0,01336	0,03124	0,02320	0,04003	0,06454	0,04460	62,0	0,82	51,03
0,25	0,00131	0,01336	0,04080	0,03030	0,03921	0,07082	0,05416	55,4	0,79	43,98
0,30	0,00131	0,01336	0,04944	0,03672	0,03696	0,07498	0,06280	49,3	0,77	37,79
0,35	0,00131	0,01336	0,05709	0,04240	0,03397	0,07767	0,07045	43,7	0,74	32,39
0,40	0,00131	0,01336	0,06379	0,04737	0,03065	0,07934	0,07715	38,6	0,72	27,70
0,45	0,00131	0,01336	0,06964	0,05172	0,02727	0,08030	0,08301	34,0	0,70	23,61
0,50	0,00131	0,01336	0,07476	0,05552	0,02395	0,08078	0,08812	29,7	0,68	20,04
0,55	0,00131	0,01336	0,07924	0,05885	0,02077	0,08092	0,09260	25,7	0,66	16,89
0,60	0,00131	0,01336	0,08318	0,06177	0,01777	0,08085	0,09654	22,0	0,64	14,11
0,65	0,00131	0,01336	0,08666	0,06436	0,01495	0,08061	0,10002	18,5	0,63	11,64
0,70	0,00131	0,01336	0,08974	0,06665	0,01232	0,08028	0,10311	15,3	0,61	9,43
0,75	0,00131	0,01336	0,09249	0,06869	0,00988	0,07988	0,10586	12,4	0,60	7,45
0,80	0,00131	0,01336	0,09496	0,07052	0,00761	0,07943	0,10832	9,6	0,59	5,66
0,85	0,00131	0,01336	0,09717	0,07217	0,00549	0,07897	0,11053	7,0	0,58	4,04
0,90	0,00131	0,01336	0,09917	0,07365	0,00353	0,07849	0,11253	4,5	0,57	2,57
0,95	0,00131	0,01336	0,10098	0,07500	0,00170	0,07801	0,11434	2,2	0,56	1,23
1,00	0,00131	0,01336	0,10263	0,07622	0,00000	0,07753	0,11599	0,0	0,56	0,00

Таблица В.3 – Расчетные данные проводимостей фазы, коэффициента полезного действия, коэффициента мощности, энергетического КПД асинхронного двигателя АИР100S4 в зависимости от скольжения ротора при частоте сети 60 Гц

$s$	$q_1, 1/\text{Ом}$	$b_1, 1/\text{Ом}$	$b_{2s}, 1/\text{Ом}$	$q_{2k}, 1/\text{Ом}$	$q_{2s}, 1/\text{Ом}$	$q, 1/\text{Ом}$	$b, 1/\text{Ом}$	КПД, %	$\cos\varphi, \%$	$\xi, \%$
0,00	0,00091	0,01114	0,00000	0,00000	0,00000	0,00091	0,01114	0,0	0,08	0,00
0,05	0,00091	0,01114	0,00397	0,00246	0,02016	0,02352	0,01511	85,7	0,84	72,09
0,10	0,00091	0,01114	0,01310	0,00811	0,03147	0,04049	0,02424	77,7	0,86	66,70
0,15	0,00091	0,01114	0,02393	0,01481	0,03621	0,05193	0,03507	69,7	0,83	57,78
0,20	0,00091	0,01114	0,03451	0,02136	0,03685	0,05912	0,04565	62,3	0,79	49,34
0,25	0,00091	0,01114	0,04400	0,02723	0,03524	0,06338	0,05514	55,6	0,75	41,95
0,30	0,00091	0,01114	0,05220	0,03230	0,03252	0,06573	0,06334	49,5	0,72	35,62
0,35	0,00091	0,01114	0,05917	0,03662	0,02934	0,06687	0,07031	43,9	0,69	30,24
0,40	0,00091	0,01114	0,06508	0,04027	0,02606	0,06724	0,07622	38,8	0,66	25,64
0,45	0,00091	0,01114	0,07008	0,04337	0,02287	0,06715	0,08122	34,1	0,64	21,70
0,50	0,00091	0,01114	0,07435	0,04601	0,01985	0,06677	0,08549	29,7	0,62	18,30
0,55	0,00091	0,01114	0,07800	0,04828	0,01704	0,06622	0,08915	25,7	0,60	15,34
0,60	0,00091	0,01114	0,08116	0,05023	0,01445	0,06558	0,09230	22,0	0,58	12,76
0,65	0,00091	0,01114	0,08390	0,05192	0,01206	0,06489	0,09504	18,6	0,56	10,48
0,70	0,00091	0,01114	0,08629	0,05341	0,00987	0,06419	0,09743	15,4	0,55	8,46
0,75	0,00091	0,01114	0,08840	0,05471	0,00787	0,06348	0,09954	12,4	0,54	6,66
0,80	0,00091	0,01114	0,09026	0,05586	0,00602	0,06280	0,10140	9,6	0,53	5,05
0,85	0,00091	0,01114	0,09192	0,05689	0,00433	0,06213	0,10306	7,0	0,52	3,60
0,90	0,00091	0,01114	0,09341	0,05781	0,00277	0,06149	0,10455	4,5	0,51	2,28
0,95	0,00091	0,01114	0,09474	0,05863	0,00133	0,06087	0,10588	2,2	0,50	1,09
1,00	0,00091	0,01114	0,09595	0,05938	0,00000	0,06029	0,10709	0,0	0,49	0,00

## Приложение Г. Расчетные значения проводимостей фазы двигателей серии АИР

Таблица Г.1 – Расчетные значения проводимостей фазы двигателя АИР80А4

$q_1, 1/0\text{M}$	$q_{2k}, 1/0\text{M}$	$q_{2s}, 1/0\text{M}$	$b_1, 1/0\text{M}$	$b_{2s}, 1/0\text{M}$	$q, 1/0\text{M}$	$b, 1/0\text{M}$	$P/P_2$	$q_1^*, 1/0\text{M}$	$q_{2k}^*, 1/0\text{M}$	$q_{2s}^*, 1/0\text{M}$	$b_1^*, 1/0\text{M}$	$b_{2s}^*, 1/0\text{M}$	$q^*, 1/0\text{M}$	$b^*, 1/0\text{M}$	$y^*, 1/0\text{M}$	$q^*/y^*$	$b^*/y^*$	$y, 1/0\text{M}$
0,00124832	1,87E-05	0,000982	0,001248	2,82E-05	0,002249	0,001276	0,132622	0,001135	1,69989E-05	0,000893	0,001135	2,55969E-05	0,002045	0,00116	0,002351	1,149829	0,49359	0,002586113
0,00124832	7,27E-05	0,001898	0,001248	0,000109	0,003219	0,001358	0,256309	0,001135	6,60637E-05	0,001725	0,001135	9,94786E-05	0,002926	0,001234	0,003176	1,085313	0,388632	0,003493666
0,00124832	0,000159	0,002748	0,001248	0,000239	0,004155	0,001487	0,371122	0,001135	0,000144273	0,002498	0,001135	0,000217246	0,003778	0,001352	0,004012	1,062126	0,336992	0,004413446
0,00124832	0,000274	0,003534	0,001248	0,000412	0,005056	0,00166	0,477209	0,001135	0,000248717	0,003213	0,001135	0,000374518	0,004596	0,001509	0,004838	1,052541	0,312002	0,005321428
0,00124832	0,000414	0,004257	0,001248	0,000624	0,005919	0,001872	0,574793	0,001135	0,000376549	0,00387	0,001135	0,000567008	0,005381	0,001702	0,005644	1,048822	0,30155	0,006208024
0,00124832	0,000578	0,004918	0,001248	0,00087	0,006744	0,002118	0,664153	0,001135	0,000525202	0,004471	0,001135	0,000790575	0,006131	0,001925	0,006426	1,048153	0,299619	0,007068844
0,00124832	0,000761	0,005522	0,001248	0,001145	0,00753	0,002394	0,745616	0,001135	0,000691513	0,00502	0,001135	0,00104128	0,006846	0,002176	0,007183	1,049306	0,302935	0,007901794
0,00124832	0,000961	0,006069	0,001248	0,001447	0,008278	0,002695	0,819542	0,001135	0,000873561	0,005517	0,001135	0,001315407	0,007526	0,00245	0,007914	1,051669	0,309591	0,008705917
0,00124832	0,001176	0,006563	0,001248	0,00177	0,008987	0,003019	0,886314	0,001135	0,001068858	0,005967	0,001135	0,001609485	0,00817	0,002744	0,008619	1,054902	0,318403	0,009480922
0,00124832	0,001403	0,007008	0,001248	0,002112	0,009659	0,003361	0,946333	0,001135	0,00127528	0,006371	0,001135	0,001920316	0,008781	0,003055	0,009297	1,058799	0,328609	0,010226953
0,00124832	0,00164	0,007405	0,001248	0,002469	0,010294	0,003718	1	0,001135	0,001490873	0,006732	0,001135	0,002244955	0,009358	0,00338	0,009949	1,063225	0,339697	0,010944389
0,00124832	0,001885	0,007759	0,001248	0,002839	0,010892	0,004087	1,047721	0,001135	0,001713858	0,007053	0,001135	0,002580727	0,009902	0,003716	0,010576	1,068082	0,351314	0,011633819
0,00124832	0,002137	0,008071	0,001248	0,003218	0,011456	0,004466	1,089894	0,001135	0,001942633	0,007337	0,001135	0,002925215	0,010415	0,00406	0,011178	1,0733	0,363214	0,012295949
0,00124832	0,002393	0,008345	0,001248	0,003604	0,011987	0,004852	1,126908	0,001135	0,002175751	0,007586	0,001135	0,003276245	0,010897	0,004411	0,011756	1,078824	0,375221	0,012931574
0,00124832	0,002653	0,008584	0,001248	0,003995	0,012485	0,005243	1,15914	0,001135	0,002411928	0,007803	0,001135	0,003631879	0,01135	0,004767	0,012311	1,084607	0,387207	0,013541562
0,00124832	0,002915	0,00879	0,001248	0,004389	0,012953	0,005638	1,186953	0,001135	0,002650026	0,007991	0,001135	0,003990407	0,011776	0,005125	0,012843	1,090614	0,399083	0,014126819
0,00124832	0,003178	0,008966	0,001248	0,004785	0,013392	0,006034	1,210688	0,001135	0,002889033	0,00815	0,001135	0,004350304	0,012174	0,005485	0,013353	1,096811	0,410781	0,014688242
0,00124832	0,003441	0,009114	0,001248	0,005181	0,013803	0,00643	1,230677	0,001135	0,003128079	0,008285	0,001135	0,004710259	0,012548	0,005845	0,013843	1,103172	0,422256	0,015226799
0,00124832	0,003703	0,009236	0,001248	0,005576	0,014187	0,006824	1,247223	0,001135	0,003366391	0,008396	0,001135	0,005069109	0,012898	0,006204	0,014312	1,109673	0,433474	0,015743387
0,00124832	0,003964	0,009335	0,001248	0,005968	0,014547	0,007217	1,260618	0,001135	0,003603307	0,008487	0,001135	0,005425858	0,013225	0,006561	0,014763	1,116292	0,444411	0,016238936

\* приведенные к номинальной мощности двигателя

Таблица Г.2 – Расчетные значения проводимостей фазы двигателя АИР80В4

$q_1, 1/Ом$	$q_{2k}, 1/Ом$	$q_{2s}, 1/Ом$	$b_1, 1/Ом$	$b_{2s}, 1/Ом$	$q, 1/Ом$	$b, 1/Ом$	$P/P_2$	$q_1^*, 1/Ом$	$q_{2k}^*, 1/Ом$	$q_{2s}^*, 1/Ом$	$b_1^*, 1/Ом$	$b_{2s}^*, 1/Ом$	$q^*, 1/Ом$	$b^*, 1/Ом$	$y^*, 1/Ом$	$q^*/y^*$	$b^*/y^*$	$y, 1/Ом$
0,001555479	2,45757E-05	0,001316638	0,001555479	3,78544E-05	0,002896693	0,001593333	0,131595239	0,001036986	1,63838E-05	0,000877759	0,001036986	2,52363E-05	0,001931128	0,001062222	0,00220399	1,141296578	0,481954144	0,003305985
0,001555479	9,56513E-05	0,002547303	0,001555479	0,000147333	0,004198433	0,001702812	0,254597655	0,001036986	6,37675E-05	0,001698202	0,001036986	9,82223E-05	0,002798956	0,001135208	0,003020406	1,079118817	0,375846301	0,004530608
0,001555479	0,000209185	0,003692094	0,001555479	0,000322211	0,005456758	0,00187769	0,369017142	0,001036986	0,000139457	0,002461396	0,001036986	0,000214808	0,003637839	0,001251794	0,003847188	1,057547786	0,325378817	0,005770782
0,001555479	0,000361114	0,004751997	0,001555479	0,00055623	0,00666859	0,002111709	0,47495225	0,001036986	0,000240742	0,003167998	0,001036986	0,00037082	0,004445726	0,001407806	0,004663304	1,048940759	0,301890253	0,006994956
0,001555479	0,000547425	0,00572876	0,001555479	0,000843209	0,007831664	0,002398688	0,572577687	0,001036986	0,00036495	0,003819173	0,001036986	0,000562139	0,00522111	0,001599125	0,005460512	1,045852719	0,292852678	0,008190768
0,001555479	0,000764218	0,006624755	0,001555479	0,001177139	0,008944452	0,002732618	0,66213053	0,001036986	0,000509479	0,004416503	0,001036986	0,000784759	0,005962968	0,001821745	0,006235042	1,045627205	0,292178532	0,009352563
0,001555479	0,001007748	0,007442866	0,001555479	0,001552253	0,010006093	0,003107732	0,743899029	0,001036986	0,000671832	0,004961911	0,001036986	0,001034835	0,006670729	0,002071821	0,00698506	1,047121004	0,296607517	0,01047759
0,001555479	0,00127446	0,008186326	0,001555479	0,001963074	0,011016265	0,003518553	0,818206315	0,001036986	0,00084964	0,005457551	0,001036986	0,001308716	0,007344177	0,002345702	0,007709685	1,049768509	0,30425392	0,011564528
0,001555479	0,001561024	0,008858709	0,001555479	0,002404473	0,011975212	0,003959952	0,885409602	0,001036986	0,001040683	0,005905806	0,001036986	0,001602982	0,007983475	0,002639968	0,008408644	1,053256212	0,313958815	0,012612966
0,001555479	0,001864336	0,009463721	0,001555479	0,002871671	0,012883536	0,00442715	0,945879297	0,001036986	0,001242891	0,006309147	0,001036986	0,001914447	0,008589024	0,002951433	0,009081976	1,057393275	0,324976994	0,013622964
0,001555479	0,002181542	0,01000521	0,001555479	0,003360268	0,013742231	0,004915747	1	0,001036986	0,001454361	0,00667014	0,001036986	0,002240179	0,009161487	0,003277165	0,009729988	1,062053271	0,336810776	0,014594981
0,001555479	0,002510019	0,01048702	0,001555479	0,003866227	0,014552518	0,005421706	1,048155911	0,001036986	0,001673346	0,006991347	0,001036986	0,002577485	0,009701679	0,003614471	0,010353114	1,06714665	0,349119183	0,015529671
0,001555479	0,002847394	0,01091302	0,001555479	0,004385891	0,015315893	0,00594137	1,090733728	0,001036986	0,001898263	0,007275347	0,001036986	0,002923927	0,010210595	0,003960913	0,010951945	1,072605885	0,361663016	0,016427917
0,001555479	0,003191528	0,01128699	0,001555479	0,004915967	0,016033997	0,006471446	1,128111254	0,001036986	0,002127685	0,00752466	0,001036986	0,003277311	0,010689331	0,004314297	0,01152714	1,078378061	0,374272993	0,017290711
0,001555479	0,003540506	0,01161264	0,001555479	0,005453504	0,016708625	0,007008983	1,160659297	0,001036986	0,002360337	0,00774176	0,001036986	0,003635669	0,011139083	0,004672655	0,012079441	1,084419628	0,386827129	0,018119161
0,001555479	0,003892603	0,01189351	0,001555479	0,005995846	0,017341592	0,007551325	1,188731671	0,001036986	0,002595069	0,007929007	0,001036986	0,003997231	0,011561061	0,005034217	0,012609579	1,090693873	0,399237497	0,018914368
0,001555479	0,004246326	0,01213301	0,001555479	0,006540692	0,017934815	0,008096171	1,212669199	0,001036986	0,002830884	0,008088673	0,001036986	0,004360461	0,011956543	0,005397447	0,01311836	1,097169936	0,411442237	0,01967754
0,001555479	0,004600339	0,01233439	0,001555479	0,007085985	0,018490208	0,008641464	1,232796713	0,001036986	0,003066893	0,008222927	0,001036986	0,00472399	0,012326805	0,005760976	0,013606578	1,103820331	0,423396379	0,020409868
0,001555479	0,004953475	0,01250074	0,001555479	0,007629927	0,019009694	0,009185406	1,249423051	0,001036986	0,003302317	0,008333827	0,001036986	0,005086618	0,012673129	0,006123604	0,014075039	1,110620668	0,435068339	0,021112559
0,001555479	0,005304742	0,01263494	0,001555479	0,008170989	0,019495161	0,009726468	1,262836062	0,001036986	0,003536495	0,008423293	0,001036986	0,005447326	0,012996774	0,006484312	0,014524546	1,117550094	0,446438188	0,021786819

\* приведенные к номинальной мощности двигателя

Таблица Г.3 – Расчетные значения проводимостей фазы двигателя АИР90L4

$q_1, 1/Ом$	$q_{2k}, 1/Ом$	$q_{2s}, 1/Ом$	$b_1, 1/Ом$	$b_{2s}, 1/Ом$	$q, 1/Ом$	$b, 1/Ом$	$P/P_2$	$q_1^*, 1/Ом$	$q_{2k}^*, 1/Ом$	$q_{2s}^*, 1/Ом$	$b_1^*, 1/Ом$	$b_{2s}^*, 1/Ом$	$q^*, 1/Ом$	$b^*, 1/Ом$	$y^*, 1/Ом$	$q^*/y^*$	$b^*/y^*$	$y, 1/Ом$
0,00140419	2,34E-05	0,001726	0,001404	5,21E-05	0,003153	0,001456	0,122569	0,000638	1,06223E-05	0,000784	0,000638	2,36817E-05	0,001433	0,000662	0,001579	1,101488	0,419268	0,003473416
0,00140419	9,17E-05	0,003369	0,001404	0,000204	0,004865	0,001609	0,23926	0,000638	4,16839E-05	0,001531	0,000638	9,29319E-05	0,002211	0,000731	0,002329	1,053254	0,313952	0,00512384
0,00140419	0,000202	0,004925	0,001404	0,000451	0,006531	0,001855	0,349756	0,000638	9,18754E-05	0,002239	0,000638	0,000204831	0,002969	0,000843	0,003086	1,039546	0,273197	0,006789307
0,00140419	0,000352	0,00639	0,001404	0,000784	0,008146	0,002188	0,453835	0,000638	0,000159781	0,002905	0,000638	0,000356223	0,003703	0,000994	0,003834	1,035441	0,259394	0,008434594
0,00140419	0,000537	0,007763	0,001404	0,001196	0,009704	0,002601	0,551356	0,000638	0,000243914	0,003529	0,000638	0,000543791	0,004411	0,001182	0,004567	1,035285	0,258849	0,010046521
0,00140419	0,000754	0,009043	0,001404	0,001681	0,011202	0,003085	0,642261	0,000638	0,000342749	0,004111	0,000638	0,000764138	0,005092	0,001402	0,005281	1,037239	0,265547	0,011618661
0,00140419	0,001	0,01023	0,001404	0,00223	0,012635	0,003635	0,726561	0,000638	0,000454751	0,00465	0,000638	0,00101384	0,005743	0,001652	0,005976	1,040554	0,276455	0,013147307
0,00140419	0,001272	0,011325	0,001404	0,002837	0,014002	0,004241	0,804333	0,000638	0,000578406	0,005148	0,000638	0,001289521	0,006365	0,001928	0,00665	1,044866	0,289889	0,014630232
0,00140419	0,001567	0,01233	0,001404	0,003493	0,015301	0,004898	0,875707	0,000638	0,000712235	0,005605	0,000638	0,001587885	0,006955	0,002226	0,007303	1,049974	0,304837	0,016066082
0,00140419	0,001881	0,013248	0,001404	0,004193	0,016532	0,005597	0,940859	0,000638	0,00085482	0,006022	0,000638	0,00190577	0,007515	0,002544	0,007934	1,05575	0,320662	0,017454155
0,00140419	0,002211	0,01408	0,001404	0,004928	0,017695	0,006333	1	0,000638	0,001004808	0,0064	0,000638	0,002240159	0,008043	0,002878	0,008543	1,062106	0,336942	0,01879415
0,00140419	0,002554	0,014832	0,001404	0,005694	0,01879	0,007098	1,053374	0,000638	0,001160932	0,006742	0,000638	0,00258823	0,008541	0,003226	0,00913	1,068975	0,353391	0,020086225
0,00140419	0,002908	0,015506	0,001404	0,006484	0,019819	0,007888	1,101244	0,000638	0,001322013	0,007048	0,000638	0,002947347	0,009008	0,003586	0,009696	1,076302	0,369811	0,021330782
0,00140419	0,003271	0,016106	0,001404	0,007293	0,020782	0,008697	1,143892	0,000638	0,001486964	0,007321	0,000638	0,003315094	0,009446	0,003953	0,01024	1,084043	0,386061	0,02252853
0,00140419	0,003641	0,016637	0,001404	0,008116	0,021682	0,009521	1,181605	0,000638	0,001654789	0,007562	0,000638	0,003689252	0,009856	0,004328	0,010764	1,092156	0,402044	0,02368034
0,00140419	0,004014	0,017103	0,001404	0,008949	0,022521	0,010353	1,214679	0,000638	0,00182459	0,007774	0,000638	0,004067811	0,010237	0,004706	0,011267	1,100607	0,417689	0,024787257
0,00140419	0,00439	0,017508	0,001404	0,009788	0,023302	0,011192	1,243404	0,000638	0,001995555	0,007958	0,000638	0,004448971	0,010592	0,005087	0,011175	1,109363	0,43295	0,025850416
0,00140419	0,004767	0,017855	0,001404	0,010628	0,024026	0,012033	1,268071	0,000638	0,002166961	0,008116	0,000638	0,004831109	0,010921	0,005469	0,012214	1,118395	0,447791	0,026871078
0,00140419	0,005144	0,018149	0,001404	0,011468	0,024697	0,012872	1,288968	0,000638	0,002338169	0,00825	0,000638	0,005212809	0,011226	0,005851	0,012659	1,127676	0,462193	0,027850624
0,00140419	0,005519	0,018394	0,001404	0,012304	0,025317	0,013708	1,306366	0,000638	0,002508619	0,008361	0,000638	0,005592814	0,011508	0,006231	0,013087	1,137182	0,476145	0,028790373

\* приведенные к номинальной мощности двигателя

Таблица Г.4 – Расчетные значения проводимостей фазы двигателя АИР100S4

$q_1, 1/Ом$	$q_{2k}, 1/Ом$	$q_{2s}, 1/Ом$	$b_1, 1/Ом$	$b_{2s}, 1/Ом$	$q, 1/Ом$	$b, 1/Ом$	$P/P_2$	$q_1^*, 1/Ом$	$q_{2k}^*, 1/Ом$	$q_{2s}^*, 1/Ом$	$b_1^*, 1/Ом$	$b_{2s}^*, 1/Ом$	$q^*, 1/Ом$	$b^*, 1/Ом$	$y^*, 1/Ом$	$q^*/y^*$	$b^*/y^*$	$y, 1/Ом$
0,001896738	3,01284E-05	0,002354913	0,001896738	7,19437E-05	0,004281779	0,001968682	0,121852632	0,000632246	1,00428E-05	0,000784971	0,000632246	2,39812E-05	0,00142726	0,000656227	0,001570893	1,100635614	0,417741528	0,004712679
0,001896738	0,00011823	0,004600147	0,001896738	0,000282321	0,006615115	0,002179059	0,238030033	0,000632246	3,94099E-05	0,001533382	0,000632246	0,000094107	0,002205038	0,000726353	0,00232159	1,052857237	0,3128687	0,006964771
0,001896738	0,000260579	0,006729156	0,001896738	0,000622236	0,008886473	0,002518974	0,348193487	0,000632246	8,68596E-05	0,002243052	0,000632246	0,000207412	0,002962158	0,000839658	0,003078864	1,039399102	0,272716828	0,009236592
0,001896738	0,000453136	0,008737175	0,001896738	0,001082045	0,011087049	0,002978783	0,452096434	0,000632246	0,000151045	0,002912392	0,000632246	0,000360682	0,003695683	0,000992928	0,003826745	1,035463569	0,259470543	0,011480236
0,001896738	0,000691653	0,01062113	0,001896738	0,001651599	0,013209521	0,003548337	0,549579813	0,000632246	0,000230551	0,003540377	0,000632246	0,000550533	0,004403174	0,001182779	0,004559266	1,035449911	0,259423128	0,013677797
0,001896738	0,000971766	0,01237954	0,001896738	0,00232048	0,015248044	0,004217218	0,64056699	0,000632246	0,000323922	0,004126513	0,000632246	0,000773493	0,005082681	0,001405739	0,005273495	1,03754199	0,266566914	0,015820485
0,001896738	0,001289081	0,0140123	0,001896738	0,003078198	0,017198119	0,004974936	0,725052533	0,000632246	0,000429694	0,004670767	0,000632246	0,001026066	0,005732706	0,001658312	0,00596774	1,040998726	0,277879399	0,01790322
0,001896738	0,001639259	0,0155206	0,001896738	0,003914386	0,019056597	0,005811124	0,818098017	0,000632246	0,00054642	0,005173533	0,000632246	0,001304795	0,006352199	0,001937041	0,006640976	1,045460938	0,291680222	0,019922928
0,001896738	0,00201807	0,01690672	0,001896738	0,00481895	0,020821528	0,006715688	0,874821418	0,000632246	0,00067269	0,005635573	0,000632246	0,001606317	0,006940509	0,002238563	0,007292588	1,050728003	0,306964114	0,021877763
0,001896738	0,002421447	0,01817383	0,001896738	0,005782174	0,022492015	0,007678912	0,940386766	0,000632246	0,000807149	0,006057943	0,000632246	0,001927391	0,007497338	0,002559637	0,007922236	1,056673153	0,323095309	0,023766708
0,001896738	0,00284554	0,01932591	0,001896738	0,006794866	0,024068188	0,008691604	1	0,000632246	0,000948513	0,00644197	0,000632246	0,002264955	0,008022729	0,002897201	0,008529828	1,063207719	0,339655315	0,025589483
0,001896738	0,003286719	0,02036745	0,001896738	0,007848359	0,025550907	0,009745097	1,053893452	0,000632246	0,001095573	0,00678915	0,000632246	0,00261612	0,008516969	0,003248366	0,009115407	1,070264171	0,356359925	0,02734622
0,001896738	0,003741623	0,02130344	0,001896738	0,008934624	0,026941801	0,010831362	1,102325324	0,000632246	0,001247208	0,007101147	0,000632246	0,002978208	0,0089806	0,003610454	0,009679182	1,077787837	0,373012314	0,029037545
0,001896738	0,004207151	0,02213919	0,001896738	0,01004626	0,028243079	0,011942998	1,145570377	0,000632246	0,001402384	0,00737973	0,000632246	0,003348753	0,00941436	0,003980999	0,010221474	1,085732223	0,389474108	0,030664421
0,001896738	0,004680486	0,02288022	0,001896738	0,01117654	0,029457444	0,013073278	1,183914237	0,000632246	0,001560162	0,00762674	0,000632246	0,003725513	0,009819148	0,004357759	0,010742706	1,094056845	0,405648195	0,032228118
0,001896738	0,005159059	0,02353207	0,001896738	0,01231932	0,030587867	0,014216058	1,217643568	0,000632246	0,001719686	0,007844023	0,000632246	0,00410644	0,010195956	0,004738686	0,011243338	1,102725306	0,421466104	0,033730015
0,001896738	0,005640581	0,02410039	0,001896738	0,01346915	0,031637709	0,015365888	1,247050721	0,000632246	0,001880194	0,008033463	0,000632246	0,004489717	0,010545903	0,005121963	0,011723932	1,111704856	0,436880976	0,035171795
0,001896738	0,006123012	0,02459074	0,001896738	0,01462114	0,03261049	0,016517878	1,272423394	0,000632246	0,002041004	0,008196913	0,000632246	0,004873713	0,010870163	0,005505959	0,012185074	1,120965165	0,451860952	0,036555223
0,001896738	0,006604551	0,02500853	0,001896738	0,01571701	0,033509819	0,017667748	1,294041522	0,000632246	0,002201517	0,008336177	0,000632246	0,005257003	0,01116994	0,005889249	0,012627383	1,130479099	0,466387151	0,03788215
0,001896738	0,00708361	0,02535907	0,001896738	0,01691496	0,034339418	0,018811698	1,312179866	0,000632246	0,002361203	0,008453023	0,000632246	0,00563832	0,011446473	0,006270566	0,013051503	1,140220532	0,480447802	0,039154509

\* приведенные к номинальной мощности двигателя

Таблица Г.4 – Расчетные значения проводимостей фазы двигателя АИР100L4

$q_1, 1/\text{Ом}$	$q_{2k}, 1/\text{Ом}$	$q_{2s}, 1/\text{Ом}$	$b_1, 1/\text{Ом}$	$b_{2s}, 1/\text{Ом}$	$q, 1/\text{Ом}$	$b, 1/\text{Ом}$	$P/P_2$	$q_1^*, 1/\text{Ом}$	$q_{2k}^*, 1/\text{Ом}$	$q_{2s}^*, 1/\text{Ом}$	$b_1^*, 1/\text{Ом}$	$b_{2s}^*, 1/\text{Ом}$	$q^*, 1/\text{Ом}$	$b^*, 1/\text{Ом}$	$y^*, 1/\text{Ом}$	$q^*/y^*$	$b^*/y^*$	$y, 1/\text{Ом}$
0,001222052	4,87873E-05	0,003340574	0,001222052	0,000103095	0,004611413	0,001325147	0,125547541	0,000305513	1,21968E-05	0,000835144	0,000305513	2,57738E-05	0,001152853	0,000331287	0,001199509	1,04046969	0,276185313	0,004798036
0,001222052	0,000190849	0,006503729	0,001222052	0,000403293	0,00791663	0,001625345	0,244427211	0,000305513	4,77122E-05	0,001625932	0,000305513	0,000100823	0,001979157	0,000406336	0,002020439	1,020858094	0,201112862	0,008081756
0,001222052	0,000419333	0,009482435	0,001222052	0,000886115	0,01112382	0,002108167	0,356374803	0,000305513	0,000104833	0,002370609	0,000305513	0,000221529	0,002780955	0,000527042	0,002830456	1,017800169	0,186203835	0,011321826
0,001222052	0,000727003	0,01227235	0,001222052	0,001536269	0,014221405	0,002758321	0,461227133	0,000305513	0,000181751	0,003068088	0,000305513	0,000384067	0,003555351	0,00068958	0,003621608	1,018635741	0,190407215	0,014486431
0,001222052	0,001106412	0,01487163	0,001222052	0,00233802	0,017200094	0,003560072	0,558914899	0,000305513	0,000276603	0,003717908	0,000305513	0,000584505	0,004300024	0,000890018	0,004391165	1,02119569	0,202683777	0,017564662
0,001222052	0,001550067	0,0172807	0,001222052	0,003275531	0,020052819	0,004497583	0,649454075	0,000305513	0,000387517	0,004320175	0,000305513	0,000818883	0,005013205	0,001124396	0,005137751	1,024843684	0,218849785	0,020551005
0,001222052	0,00205056	0,01950192	0,001222052	0,004333151	0,022774532	0,005555203	0,732933354	0,000305513	0,00051264	0,00487548	0,000305513	0,001083288	0,005693633	0,001388801	0,005860565	1,029319098	0,236973859	0,023442261
0,001222052	0,00260069	0,02153933	0,001222052	0,00549566	0,025362072	0,006717712	0,809504571	0,000305513	0,000650173	0,005384833	0,000305513	0,001373915	0,006340518	0,001679428	0,006559165	1,034484108	0,256042952	0,02623666
0,001222052	0,003193541	0,02339831	0,001222052	0,006748446	0,027813903	0,007970498	0,87936992	0,000305513	0,000798385	0,005849578	0,000305513	0,001687112	0,006953476	0,001992625	0,007233352	1,040249797	0,27547734	0,028933407
0,001222052	0,003822574	0,02508543	0,001222052	0,00807769	0,030130056	0,009299742	0,942776319	0,000305513	0,000955644	0,006271358	0,000305513	0,002019423	0,007532514	0,002324936	0,007883152	1,046549987	0,29492459	0,03153261
0,001222052	0,004481662	0,02660804	0,001222052	0,009470445	0,032311754	0,010692497	1	0,000305513	0,001120416	0,00665201	0,000305513	0,002367611	0,008077939	0,002673124	0,008508742	1,053330822	0,314162114	0,034034966
0,001222052	0,005165121	0,02797411	0,001222052	0,0109147	0,034361283	0,012136752	1,051340497	0,000305513	0,00129128	0,006993528	0,000305513	0,002728675	0,008590321	0,003034188	0,009110428	1,060545789	0,333045586	0,036441714
0,001222052	0,005867735	0,02919206	0,001222052	0,01239943	0,036281847	0,013621482	1,097114256	0,000305513	0,001466934	0,007298015	0,000305513	0,003099858	0,009070462	0,003405371	0,009688644	1,06815335	0,351480606	0,038754576
0,001222052	0,006584763	0,03027049	0,001222052	0,01391462	0,038077305	0,015136672	1,137644486	0,000305513	0,001646191	0,007567623	0,000305513	0,003478655	0,009519326	0,003784168	0,010243901	1,076116139	0,369406942	0,040975602
0,001222052	0,007311925	0,03121815	0,001222052	0,01545123	0,039752127	0,016673282	1,173260037	0,000305513	0,001827981	0,007804538	0,000305513	0,003862808	0,009938032	0,004168321	0,010776798	1,084399615	0,386786555	0,043107191
0,001222052	0,008045383	0,03204369	0,001222052	0,01700114	0,041311125	0,018223192	1,204285998	0,000305513	0,002011346	0,008010923	0,000305513	0,004250285	0,010327781	0,004555798	0,011287974	1,09297185	0,403597486	0,045151897
0,001222052	0,008781749	0,03275562	0,001222052	0,01855719	0,042759421	0,019779242	1,231042196	0,000305513	0,002195437	0,008188905	0,000305513	0,004639298	0,010689855	0,004944811	0,011778122	1,101803687	0,419830133	0,047112488
0,001222052	0,00951802	0,03336225	0,001222052	0,02011305	0,044102322	0,021335102	1,253840944	0,000305513	0,002379505	0,008340563	0,000305513	0,005028263	0,011025581	0,005333776	0,012247963	1,110867817	0,435482676	0,04899185
0,001222052	0,01025156	0,03387148	0,001222052	0,02166314	0,045345092	0,022885192	1,272979145	0,000305513	0,00256289	0,00846787	0,000305513	0,005415785	0,011336273	0,005721298	0,012698202	1,120139052	0,45055969	0,050792808
0,001222052	0,01098014	0,03429105	0,001222052	0,02320273	0,046493242	0,024424782	1,288747687	0,000305513	0,002745035	0,008572763	0,000305513	0,005800683	0,011623311	0,006106196	0,013129622	1,129594006	0,465070172	0,052518487

\* приведенные к номинальной мощности двигателя

Таблица Г.5 – Расчетные значения проводимостей фазы двигателя АИР112М4

$q_1, 1/Ом$	$q_{2k}, 1/Ом$	$q_{2s}, 1/Ом$	$b_1, 1/Ом$	$b_{2s}, 1/Ом$	$a, 1/Ом$	$b, 1/Ом$	$P/P_2$	$q_1^*, 1/Ом$	$q_{2k}^*, 1/Ом$	$q_{2s}^*, 1/Ом$	$b_1^*, 1/Ом$	$b_{2s}^*, 1/Ом$	$q^*, 1/Ом$	$b^*, 1/Ом$	$y^*, 1/Ом$	$q^*/y^*$	$b^*/y^*$	$y, 1/Ом$
0,001663138	5,68345E-05	0,00447948	0,001663138	0,000140863	0,006199453	0,001804001	0,122863659	0,000302389	1,03335E-05	0,000814451	0,000302389	2,56115E-05	0,001127173	0,000328	0,001173927	1,041478417	0,27940438	0,006456596
0,001663138	0,00022269	0,008744061	0,001663138	0,000551932	0,010629889	0,00221507	0,239833045	0,000302389	0,000040489	0,001589829	0,000302389	0,000100351	0,001932707	0,00040274	0,001974223	1,021480666	0,203999225	0,010858226
0,001663138	0,000490029	0,01278104	0,001663138	0,001214527	0,014934207	0,002877665	0,350559739	0,000302389	8,90962E-05	0,002323825	0,000302389	0,000220823	0,00271531	0,000523212	0,00276526	1,018395428	0,18920893	0,015208928
0,001663138	0,000850747	0,01658146	0,001663138	0,002108559	0,019095345	0,003771697	0,454798067	0,000302389	0,000154681	0,003014811	0,000302389	0,000383374	0,003471881	0,000685763	0,003538959	1,019320278	0,193775394	0,019464272
0,001663138	0,00129638	0,02013982	0,001663138	0,003213052	0,023099338	0,00487619	0,552397148	0,000302389	0,000235705	0,003661785	0,000302389	0,000584191	0,00419988	0,00088658	0,004292437	1,022038034	0,206544687	0,023608402
0,001663138	0,001818306	0,02345383	0,001663138	0,004506635	0,026935274	0,006169773	0,643294171	0,000302389	0,000330601	0,004264333	0,000302389	0,000819388	0,004897323	0,001121777	0,005024157	1,025898693	0,223276652	0,027632862
0,001663138	0,002407916	0,02652408	0,001663138	0,005967972	0,030595134	0,00763111	0,727505318	0,000302389	0,000437803	0,00482256	0,000302389	0,001085086	0,005562752	0,001387475	0,005733175	1,030636456	0,242008073	0,03153246
0,001663138	0,003056764	0,02935365	0,001663138	0,00757613	0,034073552	0,009239268	0,805115068	0,000302389	0,000555775	0,005337027	0,000302389	0,001377478	0,006195191	0,001679867	0,006418905	1,036110947	0,261706129	0,03530398
0,001663138	0,003756691	0,03194777	0,001663138	0,009310883	0,037367599	0,010974021	0,87626687	0,000302389	0,000683035	0,005808685	0,000302389	0,001692888	0,006794109	0,001995277	0,007081034	1,042231472	0,281777564	0,038945688
0,001663138	0,004499921	0,0343134	0,001663138	0,01115297	0,040476459	0,012816108	0,941151624	0,000302389	0,000818167	0,0062388	0,000302389	0,002027813	0,007359356	0,002330201	0,007719453	1,048930545	0,301860936	0,042456994
0,001663138	0,005279139	0,03645895	0,001663138	0,01308424	0,043401227	0,014747378	1	0,000302389	0,000959843	0,0066289	0,000302389	0,002378953	0,007891132	0,002681341	0,00833424	1,05615265	0,321725964	0,045838321
0,001663138	0,006087531	0,03839394	0,001663138	0,01508782	0,046144609	0,016750958	1,053073114	0,000302389	0,001106824	0,006980716	0,000302389	0,00274324	0,008389929	0,003045629	0,008925624	1,063849761	0,341223064	0,049090931
0,001663138	0,006918816	0,0401286	0,001663138	0,01714815	0,048710554	0,018811288	1,100651555	0,000302389	0,001257967	0,007296109	0,000302389	0,003117845	0,008856464	0,003420234	0,009493943	1,071978963	0,360254323	0,052216689
0,001663138	0,007767268	0,04167376	0,001663138	0,01925102	0,051104166	0,020914158	1,143032369	0,000302389	0,001412231	0,007577047	0,000302389	0,003500185	0,009291667	0,003802574	0,010039653	1,080500813	0,378755529	0,055218093
0,001663138	0,008627702	0,04304045	0,001663138	0,02138359	0,05333129	0,023046728	1,18051809	0,000302389	0,001568673	0,007825536	0,000302389	0,003887925	0,009696598	0,004190314	0,010563274	1,089379327	0,396687082	0,058098005
0,001663138	0,009495487	0,0442399	0,001663138	0,02353438	0,055398525	0,025197518	1,213416733	0,000302389	0,001726452	0,008043618	0,000302389	0,004278978	0,010072459	0,004581367	0,011065413	1,098581037	0,414025857	0,060859769
0,001663138	0,01036647	0,04528317	0,001663138	0,02569311	0,057312778	0,027356248	1,242031655	0,000302389	0,001884813	0,008233304	0,000302389	0,004671475	0,010420505	0,004973863	0,011546698	1,108074726	0,43076065	0,063506841
0,001663138	0,01123706	0,04618132	0,001663138	0,02785083	0,059081518	0,029513968	1,26666621	0,000302389	0,002043102	0,008396604	0,000302389	0,005063787	0,010742094	0,005366176	0,012007849	1,11783127	0,446889039	0,066043168
0,001663138	0,01210404	0,04694484	0,001663138	0,02999964	0,060712018	0,031662778	1,287608118	0,000302389	0,002200735	0,008535425	0,000302389	0,00545448	0,011038549	0,005756869	0,012449542	1,127824163	0,462416106	0,068472481
0,001663138	0,01296468	0,04758407	0,001663138	0,03213271	0,062211888	0,033795848	1,305140987	0,000302389	0,002357215	0,008651649	0,000302389	0,005842311	0,011311252	0,0061447	0,01287252	1,138027806	0,477350183	0,070798858

\* приведенные к номинальной мощности двигателя

Таблица Г.6 – Расчетные значения проводимостей фазы двигателя АИР132S4

$q_1, 1/\text{Ом}$	$q_{2k}, 1/\text{Ом}$	$q_{2s}, 1/\text{Ом}$	$b_1, 1/\text{Ом}$	$b_{2s}, 1/\text{Ом}$	$q, 1/\text{Ом}$	$b, 1/\text{Ом}$	$P/2$	$q_1^*, 1/\text{Ом}$	$q_{2k}^*, 1/\text{Ом}$	$q_{2s}^*, 1/\text{Ом}$	$b_1^*, 1/\text{Ом}$	$b_{2s}^*, 1/\text{Ом}$	$q^*, 1/\text{Ом}$	$b^*, 1/\text{Ом}$	$y^*, 1/\text{Ом}$	$q^*/y^*$	$b^*/y^*$	$y, 1/\text{Ом}$
0,001824183	6,86662E-05	0,006044211	0,001824183	0,000177759	0,00793706	0,002001942	0,119416071	0,000243224	9,1555E-06	0,000805895	0,000243224	2,37012E-05	0,001058275	0,000266926	0,001091419	1,031318837	0,244567592	0,00818564
0,001824183	0,000269463	0,01182498	0,001824183	0,00069757	0,013918626	0,002521753	0,233627293	0,000243224	3,59284E-05	0,001576664	0,000243224	9,30093E-05	0,001855817	0,000336234	0,00188603	1,016280266	0,178275928	0,014145225
0,001824183	0,000593976	0,01732649	0,001824183	0,001537651	0,019744649	0,003361834	0,342321167	0,000243224	7,91968E-05	0,002310199	0,000243224	0,00020502	0,00263262	0,000448245	0,002670508	1,014391623	0,167849939	0,020028807
0,001824183	0,001033154	0,02253696	0,001824183	0,002674569	0,025394297	0,004498752	0,445264935	0,000243224	0,000137754	0,003004928	0,000243224	0,000356609	0,003385906	0,000599834	0,003438628	1,015570897	0,174439812	0,025789709
0,001824183	0,001577524	0,0274486	0,001824183	0,004083803	0,030850307	0,005907986	0,542304689	0,000243224	0,000210337	0,003659813	0,000243224	0,000544507	0,004113374	0,000787731	0,004188122	1,01817196	0,188087024	0,031410918
0,001824183	0,002217387	0,03205714	0,001824183	0,005740243	0,03609871	0,007564426	0,633356067	0,000243224	0,000295652	0,004274285	0,000243224	0,000765366	0,004813161	0,00100859	0,0049177	1,021719395	0,20509386	0,036882752
0,001824183	0,002943001	0,03636161	0,001824183	0,00761867	0,041128794	0,009442853	0,718399904	0,000243224	0,0003924	0,004848215	0,000243224	0,001015823	0,005483839	0,001259047	0,005626517	1,02601784	0,223770247	0,042198876
0,001824183	0,003744735	0,04036402	0,001824183	0,009694152	0,045932938	0,011518335	0,797475912	0,000243224	0,000499298	0,005381869	0,000243224	0,001292554	0,006124392	0,001535778	0,006314015	1,030962011	0,24323318	0,047355114
0,001824183	0,004613204	0,0440689	0,001824183	0,0119424	0,050506287	0,013766583	0,870673591	0,000243224	0,000615094	0,005875853	0,000243224	0,00159232	0,006734172	0,001835544	0,006979849	1,036482183	0,262977671	0,052348867
0,001824183	0,005539377	0,04748294	0,001824183	0,01434002	0,0548465	0,016164203	0,938125115	0,000243224	0,000738584	0,006331059	0,000243224	0,001912003	0,007312867	0,002155227	0,007623846	1,042524909	0,282695527	0,057178842
0,001824183	0,006514662	0,05061472	0,001824183	0,01686478	0,058953565	0,018688963	1	0,000243224	0,000868622	0,006748629	0,000243224	0,002248637	0,007860475	0,002491862	0,008245996	1,049045444	0,302190516	0,061844969
0,001824183	0,007530973	0,05347424	0,001824183	0,01949574	0,062829396	0,021319923	1,056495818	0,000243224	0,00100413	0,007129899	0,000243224	0,002599432	0,008377253	0,002842656	0,008846415	1,056004313	0,321334277	0,066348113
0,001824183	0,008580749	0,05607251	0,001824183	0,02221334	0,066477442	0,024037523	1,107830094	0,000243224	0,0011441	0,007476335	0,000243224	0,002961779	0,008863659	0,003205003	0,009425311	1,063365754	0,340042142	0,070689835
0,001824183	0,009657038	0,05842155	0,001824183	0,02499958	0,069902771	0,026823763	1,154240308	0,000243224	0,001287605	0,00778954	0,000243224	0,003333277	0,009320369	0,003576502	0,009983018	1,071096827	0,358258562	0,074872636
0,001824183	0,01075342	0,06053382	0,001824183	0,02783783	0,073111423	0,029662013	1,195972634	0,000243224	0,001433789	0,008071176	0,000243224	0,003711711	0,00974819	0,003954935	0,01051992	1,079166509	0,375947261	0,078899399
0,001824183	0,01186412	0,06242223	0,001824183	0,03071314	0,076110533	0,032537323	1,233282136	0,000243224	0,001581883	0,008322964	0,000243224	0,004095085	0,010148071	0,00433831	0,011036498	1,087546338	0,393087546	0,082773731
0,001824183	0,01298382	0,06409946	0,001824183	0,03361175	0,078907463	0,035435933	1,266419334	0,000243224	0,001731176	0,008546595	0,000243224	0,004481567	0,010520995	0,004724791	0,011533212	1,096209276	0,409668262	0,086499093
0,001824183	0,01410791	0,06557897	0,001824183	0,03652174	0,081511063	0,038345923	1,295650159	0,000243224	0,001881055	0,008743863	0,000243224	0,004869565	0,010868142	0,00511279	0,012010709	1,105129929	0,425685932	0,090080315
0,001824183	0,01523213	0,06687294	0,001824183	0,03943206	0,083929253	0,041256243	1,321215251	0,000243224	0,002030951	0,008916392	0,000243224	0,005257608	0,011190567	0,005500832	0,012469481	1,114284969	0,441143664	0,093521105
0,001824183	0,01635283	0,06799415	0,001824183	0,04233327	0,086171163	0,044157453	1,343367107	0,000243224	0,002180377	0,0090665887	0,000243224	0,005644436	0,011489488	0,005888766	0,012910185	1,123651899	0,456047701	0,096826391

\* приведенные к номинальной мощности двигателя

Таблица Г.7 – Расчетные значения проводимостей фазы двигателя АИР132М4

$q_1, 1/\text{Ом}$	$q_{2k}, 1/\text{Ом}$	$q_{2s}, 1/\text{Ом}$	$b_1, 1/\text{Ом}$	$b_{2s}, 1/\text{Ом}$	$q, 1/\text{Ом}$	$b, 1/\text{Ом}$	$P/P_2$	$q_1^*, 1/\text{Ом}$	$b_{2k}^*, 1/\text{Ом}$	$q_{2s}^*, 1/\text{Ом}$	$b_1^*, 1/\text{Ом}$	$b_{2s}^*, 1/\text{Ом}$	$q^*, 1/\text{Ом}$	$b^*, 1/\text{Ом}$	$y^*, 1/\text{Ом}$	$q^*/y^*$	$b^*/y^*$	$y, 1/\text{Ом}$
0,001973714	8,07287E-05	0,008559695	0,001973714	0,000254368	0,010614138	0,002228082	0,115921192	0,000179429	7,33897E-06	0,000778154	0,000179429	2,31243E-05	0,000964922	0,000202553	0,000985952	1,021794942	0,205438892	0,010845472
0,001973714	0,000317907	0,01680656	0,001973714	0,001001691	0,019098181	0,002975405	0,227605828	0,000179429	2,89006E-05	0,001527869	0,000179429	9,10628E-05	0,001736198	0,000270491	0,001757143	1,012063311	0,153938201	0,019328568
0,001973714	0,000703127	0,02471139	0,001973714	0,002215481	0,027388231	0,004189195	0,334658394	0,000179429	6,39207E-05	0,00224649	0,000179429	0,000201407	0,002489839	0,000380836	0,002518796	1,011630143	0,151197575	0,02770676
0,001973714	0,001226983	0,0322504	0,001973714	0,003866097	0,035451097	0,005839811	0,436756778	0,000179429	0,000111544	0,002931855	0,000179429	0,000351463	0,003222827	0,000530892	0,003266261	1,013476948	0,162538122	0,03592887
0,001973714	0,001879306	0,03940509	0,001973714	0,005921497	0,04325811	0,007895211	0,53365044	0,000179429	0,000170846	0,003582281	0,000179429	0,000538318	0,003932555	0,000717746	0,003997518	1,016519239	0,179548011	0,043972701
0,001973714	0,002649398	0,04616211	0,001973714	0,008347977	0,050785222	0,010321691	0,625158585	0,000179429	0,000240854	0,004196555	0,000179429	0,000758907	0,004616838	0,000938336	0,004711228	1,020444667	0,199170053	0,051823509
0,001973714	0,003526265	0,05251318	0,001973714	0,01111089	0,058013159	0,013084604	0,71116908	0,000179429	0,00032057	0,004773925	0,000179429	0,001010081	0,005273924	0,001189509	0,005406404	1,025119871	0,22001861	0,059470442
0,001973714	0,004498822	0,05845447	0,001973714	0,01417532	0,064927006	0,016149034	0,791630056	0,000179429	0,000408984	0,005314043	0,000179429	0,001288665	0,005902455	0,001468094	0,006082292	1,030468155	0,241371838	0,066905212
0,001973714	0,00555605	0,06398631	0,001973714	0,01750654	0,071516074	0,019480254	0,866545983	0,000179429	0,000505095	0,005816937	0,000179429	0,001591504	0,006501461	0,001770932	0,006738338	1,036434388	0,262814387	0,074121718
0,001973714	0,006687183	0,06911265	0,001973714	0,02107062	0,077773547	0,023044334	0,935970355	0,000179429	0,000607926	0,006282968	0,000179429	0,001915511	0,007070322	0,002094939	0,00737416	1,042973602	0,284091957	0,081115756
0,001973714	0,007881824	0,07384064	0,001973714	0,02483481	0,083696178	0,026808524	1	0,000179429	0,000716529	0,006712785	0,000179429	0,00225771	0,007608743	0,002437139	0,007989532	1,050046177	0,305041466	0,087884852
0,001973714	0,009130046	0,07818017	0,001973714	0,02876783	0,08928393	0,030741544	1,058768857	0,000179429	0,000830004	0,007107288	0,000179429	0,002615257	0,008116721	0,002794686	0,008584371	1,057615655	0,325555103	0,094428082
0,001973714	0,01042251	0,08214354	0,001973714	0,03284024	0,094539764	0,034813954	1,1124435	0,000179429	0,000947501	0,007467595	0,000179429	0,002985476	0,008594524	0,003164905	0,009158737	1,065647979	0,345561278	0,100746108
0,001973714	0,01175041	0,0857444	0,001973714	0,03702431	0,099468524	0,038998024	1,161208787	0,000179429	0,001068219	0,007794945	0,000179429	0,003365846	0,009042593	0,003545275	0,009712747	1,074110866	0,365012568	0,106840222
0,001973714	0,01310567	0,08899825	0,001973714	0,04129461	0,104077634	0,043268324	1,205274629	0,000179429	0,001191425	0,00809075	0,000179429	0,003754055	0,009461603	0,003933484	0,010246669	1,082973899	0,383879281	0,112713361
0,001973714	0,01448084	0,09192131	0,001973714	0,04562763	0,108375864	0,047601344	1,244860689	0,000179429	0,00131644	0,008356483	0,000179429	0,004147966	0,009852351	0,004327395	0,010760817	1,092207964	0,402143731	0,118368982
0,001973714	0,01586917	0,0945306	0,001973714	0,05000209	0,112373484	0,051975804	1,280197463	0,000179429	0,001442652	0,008593691	0,000179429	0,004545645	0,010215771	0,004725073	0,01125559	1,101785597	0,419797917	0,123811486
0,001973714	0,01726448	0,09684334	0,001973714	0,05439859	0,116081534	0,056372304	1,311518156	0,000179429	0,001569498	0,00880394	0,000179429	0,004945326	0,010552867	0,005124755	0,011731415	1,111680435	0,436840288	0,12904557
0,001973714	0,01866136	0,0988771	0,001973714	0,05879999	0,119512174	0,060773704	1,339060712	0,000179429	0,001696487	0,008988827	0,000179429	0,005345454	0,010864743	0,005524882	0,012188805	1,121867754	0,453275134	0,134076854
0,001973714	0,0200549	0,1006492	0,001973714	0,06319092	0,122677814	0,065164634	1,363059692	0,000179429	0,001823173	0,009149927	0,000179429	0,005744629	0,011152529	0,005924058	0,012628276	1,132324014	0,469110565	0,138911035

\* приведенные к номинальной мощности двигателя

Приложение Д. Программа расчета частоты и амплитуды питающего напряжения  
на примере двигателя АИР100S4

```

% АИР100S4
function d=loop(f1,f2,aq)
p=2;
R0=7.31;
L0=0.238;
L2=0.0200376;
R1=2.652;
R2=2.012;
np=1600;
M=7;
w=3.14*np/30;
i=0;
d(1,1:3)=0;
for f=f1:aq:f2
    n=60*f/p;
    s2=(n-np)/n;
    X2k=2*3.14*L2*f;
    X0=2*3.14*L0*f;
    q1=R0/(R1^2+X0^2);
    q2k=(R1+R2)/((R1+R2/s2)^2+X2k^2);
    q2s=(R2*(1-s2)/s2)/((R1+R2/s2)^2+X2k^2);
    U=(M*w/q2s)^0.5;
    b1=X0/(R1^2+X0^2);
    b2s=X2k/((R1+R2/s2)^2+X2k^2);
    b=b1+b2s;
    q=q1+q2s+q2k;
    y=sqrt(b^2+q^2);

```

```

k=q*q2s/y;
i=i+1;
d(i,1)=k;
d(i,2)=f;
d(i,3)=U;
end
clear all;
clc;
% Ввод отрезка 'f'
f=[30 70];
% Точность расчета 'eps'
eps=10^(-6);
% Решение задачи
n=-log10(eps);
e=1;
data=loop(f(1),f(2),e);
[~, j]=max(data(:,1));
for i=1:n
    f(1)=(j-3)*e+f(1);
    f(2)=(j+1)*e+f(1);
    e=e/10;
    clear data
    data=loop(f(1),f(2),e);
    [~, j]=max(data(:,1));
end
clear f
f=data(j,2);
U=data(j,3);
% Вывод решения в командное окно
writesolve(f,U)

```

% Очистка "ненужных" переменных

clear data e eps i j n

function writesolve(a,b)

disp(strcat('f: ', num2str(a)));

disp(strcat('U: ', num2str(b)));

disp(' ');

Приложение Е. Данные по испытанию асинхронного двигателя АИР100S4, работающего от преобразователя частоты  
 Таблица Е.1 – Данные по испытанию асинхронного двигателя АИР100S4, работающего от преобразователя частоты при частоте  $f=40$  Гц

Опытные данные													
Место измерения	Измеряемая величина		Номер измерения										
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
На Входе преобразователя частоты	Ток по фазам, А	$I_A$	1,13	1,44	1,92	2,71	3,48	4,28	4,75	5,37	6,10	6,60	7,33
		$I_B$	0,61	1,10	1,59	2,25	3,02	3,80	4,42	5,00	5,73	6,32	7,07
		$I_C$	1,10	1,23	1,70	2,40	3,02	3,78	4,47	5,10	5,83	6,38	7,23
	Напряжение по фазам, В	$U_A$	228,00	230,00	230,33	230,00	229,67	230,33	230,00	229,33	230,33	230,00	230,33
		$U_B$	227,33	230,00	229,33	230,00	229,67	230,33	229,33	229,33	230,00	229,33	229,33
		$U_C$	228,00	229,33	229,67	229,33	229,67	230,33	229,67	230,00	230,33	230,00	229,67
	Мощность фаз, Вт	$P_A$	85,00	140,00	203,33	288,33	355,00	461,67	523,33	606,67	696,67	773,33	890,00
		$P_B$	38,33	90,00	158,33	223,33	295,00	393,33	478,33	560,00	663,33	753,33	863,33
		$P_C$	83,33	102,50	164,17	231,67	298,33	386,67	481,67	546,67	650,00	750,00	860,00
На входе асинхронного двигателя	Ток по фазам, А	$I_A$	3,33	3,37	3,40	3,40	3,57	3,83	4,13	4,45	4,93	5,30	5,88
		$I_B$	3,30	3,37	3,40	3,40	3,57	3,83	4,13	4,45	4,93	5,30	5,88
		$I_C$	3,33	3,37	3,40	3,40	3,57	3,83	4,13	4,45	4,93	5,30	5,88
	Напряжение по фазам, В	$U_A$	185,33	186,58	185,65	184,76	183,91	183,10	182,33	181,60	180,90	180,24	179,62
		$U_B$	185,33	186,58	185,65	184,76	183,91	183,10	182,33	181,60	180,90	180,24	179,62
		$U_C$	185,33	186,58	185,65	184,76	183,91	183,10	182,33	181,60	180,90	180,24	179,62
	Мощность фаз, Вт	$P_A$	80,00	123,33	196,67	270,00	340,00	433,33	516,67	590,00	693,33	766,67	880,00
		$P_B$	80,00	123,33	196,67	270,00	340,00	433,33	516,67	590,00	693,33	766,67	880,00
		$P_C$	83,33	123,33	196,67	270,00	340,00	433,33	516,67	590,00	693,33	766,67	880,00
На валу АД	Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	$n$	1217,00	1203,33	1200,00	1198,00	1193,33	1185,67	1172,67	1167,00	1160,33	1143,33	
Нагрузочная машина	Напряжение, В	$U_T$	110,00	107,77	105,53	103,30	101,06	98,83	96,60	94,36	92,13	89,89	
	Ток, А	$I_T$	0,00	2,00	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	16,00	18,00	
	Мощность отдаваемая в сеть, Вт	$P$	0,00	215,53	422,13	619,79	808,51	988,30	1159,15	1321,07	1474,05	1618,09	

## Продолжение таблицы Е.1

Расчетные значения												
Место измерения	Измеряемая величина		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
На входе преобразователя частоты	Среднее значение тока сети, А	0,95	1,26	1,74	2,45	3,17	3,96	4,54	5,16	5,89	6,43	7,21
	Активная мощность, Вт	206,67	332,50	525,83	743,33	948,33	1241,67	1483,33	1713,33	2010,00	2276,67	2613,33
	Полная мощность, ВА	647,53	867,04	1196,54	1690,43	2185,66	2733,29	3131,23	3550,42	4067,31	4434,79	4970,99
	Коэффициент мощности	0,32	0,38	0,44	0,44	0,43	0,45	0,47	0,48	0,49	0,51	0,53
	Реактивная мощность, Вар	613,62	800,76	1074,81	1518,23	1969,21	2434,98	2757,60	3109,66	3535,95	3805,80	4228,62
На выходе преобразователя частоты	Среднее значение тока сети, А	3,32	3,37	3,40	3,40	3,57	3,83	4,13	4,45	4,93	5,30	5,88
	Активная мощность, Вт	243,33	370,00	590,00	810,00	1020,00	1300,00	1550,00	1770,00	2080,00	2300,00	2640,00
	Полная мощность, ВА	1847,20	1884,46	1893,66	1884,60	1967,89	2105,69	2260,90	2424,30	2677,31	2865,84	3170,33
	Коэффициент мощности	0,13	0,20	0,31	0,43	0,52	0,62	0,69	0,73	0,78	0,80	0,83
	Реактивная мощность, Вар	1831,10	1847,78	1799,41	1701,65	1682,91	1656,48	1645,95	1656,60	1685,70	1709,69	1755,39
	Потеря активной мощности, Вт	-36,67	-37,50	-64,17	-66,67	-71,67	-58,33	-66,67	-56,67	-70,00	-23,33	-26,67

Расчетные значения после аппроксимации												
Место измерения	Измеряемая величина		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	1328	1217,10	1209,75	1202,40	1195,05	1187,70	1180,35	1173,00	1165,65	1158,30	1150,96
На входе преобразователя частоты	Среднее значение тока сети, А	0,95	1,18	1,84	2,51	3,18	3,85	4,51	5,18	5,85	6,52	7,19
	Активная мощность, Вт	206,67	252,83	505,27	757,71	1010,15	1262,59	1515,03	1767,47	2019,91	2272,35	2524,79
	Полная мощность, ВА	647,53	810,59	1271,07	1731,55	2192,03	2652,51	3112,99	3573,47	4033,95	4494,43	4954,91
	Коэффициент мощности	0,32	0,31	0,40	0,44	0,46	0,48	0,49	0,49	0,50	0,51	0,51
	Реактивная мощность, Вар	613,62	770,15	1166,33	1556,97	1945,40	2332,74	2719,45	3105,76	3491,81	3877,67	4263,40
На выходе преобразователя частоты	Среднее значение тока сети, А	3,32	3,35	3,40	3,51	3,68	3,93	4,23	4,61	5,05	5,55	6,12
	Активная мощность, Вт	243,33	318,00	568,00	818,00	1068,00	1318,00	1568,00	1818,00	2068,00	2318,00	2568,00
	Полная мощность, ВА	1847,20	1873,60	1877,55	1916,67	1990,97	2100,44	2245,08	2424,89	2639,88	2890,05	3175,39
	Коэффициент мощности	0,13	0,17	0,30	0,43	0,54	0,63	0,70	0,75	0,78	0,80	0,81
	Реактивная мощность, Вар	1831,10	1846,42	1789,57	1733,35	1680,27	1635,45	1606,78	1604,68	1640,84	1726,05	1867,74
	Потеря активной мощности, Вт	-36,67	-65,17	-62,73	-60,29	-57,85	-55,41	-52,97	-50,53	-48,09	-45,65	-43,21
Расчеты	R <sub>мех</sub> , Вт	28,36	104,14	104,14	104,14	104,14	104,14	104,14	104,14	104,14	104,14	104,14
	R <sub>мг</sub> , Вт	50,07	63,79	63,16	62,56	61,98	61,44	60,92	60,43	59,97	59,53	59,12
	R <sub>маг</sub> +R <sub>мех</sub> , Вт	78,44	167,94	167,30	166,70	166,13	165,58	165,06	164,57	164,11	163,68	163,27
	R <sub>эл</sub> , Вт	164,90	167,64	172,22	183,66	202,63	230,16	267,67	316,98	380,28	460,16	559,57
	R <sub>доб</sub> , Вт	0,00	1,59	2,84	4,09	5,34	6,59	7,84	9,09	10,34	11,59	12,84
	P, Вт	0,00	56,61	301,42	539,32	769,68	991,45	1203,20	1403,13	1589,04	1758,36	1908,10
	M, Н*м	0,00	0,44	2,38	4,28	6,15	7,97	9,73	11,42	13,02	14,50	15,83
	КПД	0,00	0,03	0,16	0,28	0,39	0,47	0,54	0,58	0,60	0,61	0,60

Таблица Е.2 – Данные по испытанию асинхронного двигателя АИР100S4, работающего от преобразователя частоты при частоте  $f=45$  Гц

Опытные данные													
Место измерения	Измеряемая величина		Номер измерения										
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
На Входе преобразователя частоты	Ток по фазам, А	$I_A$	1,19	1,44	1,87	2,25	3,33	4,05	4,55	5,27	5,90	6,45	7,10
		$I_B$	0,69	1,08	1,68	2,13	3,18	3,78	4,31	4,93	5,60	6,17	6,83
		$I_C$	1,10	1,17	1,67	2,20	3,08	3,80	4,40	5,00	5,70	6,17	6,93
	Напряжение по фазам, В	$U_A$	228,33	230,00	229,67	230,00	230,00	230,33	229,67	230,00	230,00	229,67	230,00
		$U_B$	226,67	229,67	229,33	229,67	229,33	230,00	229,67	229,67	230,00	229,33	230,00
		$U_C$	228,00	229,67	229,67	230,00	230,33	230,00	229,67	230,00	230,00	230,00	230,33
	Мощность фаз, Вт	$P_A$	96,67	125,83	196,67	263,33	351,67	451,67	533,33	593,33	696,67	773,33	886,67
		$P_B$	46,67	92,50	163,33	245,83	326,67	420,00	486,67	566,67	656,67	733,33	846,67
		$P_C$	85,00	104,17	171,67	254,17	321,67	415,00	486,67	556,67	653,33	730,00	830,00
На входе асинхронного двигателя	Ток по фазам, А	$I_A$	3,37	3,38	3,37	3,42	3,55	3,72	3,95	4,20	4,57	4,93	5,33
		$I_B$	3,30	3,38	3,37	3,42	3,55	3,72	3,95	4,20	4,57	4,93	5,33
		$I_C$	3,34	3,38	3,37	3,42	3,55	3,72	3,95	4,20	4,57	4,93	5,33
	Напряжение по фазам, В	$U_A$	211,33	210,99	209,89	208,84	207,84	206,89	205,98	205,13	204,32	203,56	202,85
		$U_B$	211,33	210,99	209,89	208,84	207,84	206,89	205,98	205,13	204,32	203,56	202,85
		$U_C$	211,33	210,99	209,89	208,84	207,84	206,89	205,98	205,13	204,32	203,56	202,85
	Мощность фаз, Вт	$P_A$	85,00	121,67	200,00	276,67	343,33	436,67	520,00	593,33	680,00	766,67	860,00
		$P_B$	88,33	121,67	200,00	276,67	343,33	436,67	520,00	593,33	680,00	766,67	860,00
		$P_C$	90,00	121,67	200,00	276,67	343,33	436,67	520,00	593,33	680,00	766,67	860,00
На валу АД	Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	$n$		1366,67	1357,67	1348,33	1348,33	1346,67	1338,67	1333,33	1329,00	1319,00	1308,67
Нагрузочная машина	Напряжение, В	$U_r$		110,00	107,64	105,27	102,91	100,54	98,18	95,81	93,45	91,08	88,72
	Ток, А	$I_r$		0,00	2,00	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	16,00	18,00
	Мощность отдаваемая в сеть, Вт	$P$		0,00	215,27	421,08	617,43	804,32	981,75	1149,72	1308,23	1457,28	1596,87

## Продолжение таблицы Е.2

Расчетные значения												
Место измерения	Измеряемая величина		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
На входе преобразователя частоты	Среднее значение тока сети, А	0,99	1,23	1,74	2,19	3,20	3,88	4,42	5,07	5,73	6,26	6,96
	Активная мощность, Вт	228,33	322,50	531,67	763,33	1000,00	1286,67	1506,67	1716,67	2006,67	2236,66	2563,33
	Полная мощность, ВА	679,62	847,95	1195,24	1512,69	2204,99	2677,02	3044,23	3494,36	3956,00	4314,67	4801,64
	Коэффициент мощности	0,34	0,38	0,44	0,50	0,45	0,48	0,49	0,49	0,51	0,52	0,53
	Реактивная мощность, Вар	640,09	784,23	1070,48	1305,97	1965,20	2347,53	2645,24	3043,61	3409,29	3689,68	4060,19
На выходе преобразователя частоты	Среднее значение тока сети, А	3,34	3,38	3,37	3,42	3,55	3,72	3,95	4,20	4,57	4,93	5,33
	Активная мощность, Вт	263,33	365,00	600,00	830,00	1030,00	1310,00	1560,00	1780,00	2040,00	2300,00	2580,00
	Полная мощность, ВА	2115,10	2141,55	2119,91	2140,64	2213,51	2306,80	2440,90	2584,59	2799,16	3012,66	3245,54
	Коэффициент мощности	0,12	0,17	0,28	0,39	0,47	0,57	0,64	0,69	0,73	0,76	0,79
	Реактивная мощность, Вар	2098,64	2110,21	2033,23	1973,18	1959,26	1898,74	1877,34	1873,96	1916,68	1945,79	1969,04
	Потеря активной мощности, Вт	-35,00	-42,50	-68,33	-66,67	-30,00	-23,33	-53,33	-63,33	-63,33	-33,33	-63,34

Расчетные значения после аппроксимации												
Место измерения	Измеряемая величина		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	1459,5	1365,30	1359,59	1353,88	1348,17	1342,46	1336,74	1331,03	1325,32	1319,61	1313,90
На входе преобразователя частоты	Среднее значение тока сети, А	0,99	1,15	1,80	2,44	3,09	3,74	4,39	5,04	5,69	6,34	6,99
	Активная мощность, Вт	228,33	283,71	530,31	776,91	1023,51	1270,11	1516,71	1763,31	2009,91	2256,51	2503,11
	Полная мощность, ВА	679,62	790,21	1237,91	1685,61	2133,31	2581,01	3028,71	3476,41	3924,11	4371,81	4819,51
	Коэффициент мощности	0,34	0,36	0,43	0,46	0,48	0,49	0,50	0,51	0,51	0,52	0,52
	Реактивная мощность, Вар	640,09	737,52	1118,57	1495,89	1871,75	2246,87	2621,58	2996,02	3370,30	3744,45	4118,51
На выходе преобразователя частоты	Среднее значение тока сети, А	3,34	3,37	3,37	3,44	3,55	3,72	3,94	4,21	4,53	4,91	5,34
	Активная мощность, Вт	263,33	338,09	582,85	827,61	1072,37	1317,13	1561,89	1806,65	2051,41	2296,17	2540,93
	Полная мощность, ВА	2115,10	2129,10	2125,53	2154,26	2215,28	2308,59	2434,20	2592,10	2782,29	3004,78	3259,56
	Коэффициент мощности	0,12	0,16	0,27	0,38	0,48	0,57	0,64	0,70	0,74	0,76	0,78
	Реактивная мощность, Вар	2098,64	2102,09	2044,06	1988,94	1938,42	1895,99	1867,04	1858,76	1879,59	1938,12	2041,67
	Потеря активной мощности, Вт	-35,00	-54,38	-52,54	-50,70	-48,86	-47,02	-45,18	-43,34	-41,50	-39,66	-37,82
Расчеты	Р <sub>мех</sub> , Вт	40,27	117,16	117,16	117,16	117,16	117,16	117,16	117,16	117,16	117,16	117,16
	Р <sub>мг</sub> , Вт	56,78	81,57	80,73	79,92	79,16	78,43	77,75	77,10	76,50	75,93	75,40
	Р <sub>маг+Р<sub>мех</sub></sub> , Вт	97,06	198,74	197,89	197,08	196,32	195,60	194,91	194,27	193,66	193,09	192,56
	Р <sub>эл</sub> , Вт	166,28	169,25	170,12	176,36	188,28	206,41	231,55	264,72	307,23	360,62	426,66
	Р <sub>доб</sub> , Вт	0,00	1,69	2,91	4,14	5,36	6,59	7,81	9,03	10,26	11,48	12,70
	Р, Вт	0,00	45,30	288,82	526,91	759,30	985,43	1204,51	1415,52	1617,15	1807,87	1985,89
	М, Н*м	0,00	0,32	2,03	3,72	5,38	7,01	8,61	10,16	11,65	13,08	14,43
	КПД	0,00	0,02	0,14	0,24	0,34	0,43	0,49	0,55	0,58	0,60	0,61

Таблица Е.3 – Данные по испытанию асинхронного двигателя АИР100S4, работающего от преобразователя частоты при частоте  $f=50$  Гц

Опытные данные													
Место измерения	Измеряемая величина		Номер измерения										
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
На Входе преобразователя частоты	Ток по фазам, А	$I_A$	1,29	1,70	2,18	3,15	3,55	4,55	4,90	5,40	6,10	6,50	7,20
		$I_B$	0,85	1,20	1,78	2,70	3,10	3,80	4,30	4,95	5,50	6,10	6,80
		$I_C$	1,23	1,40	1,78	2,60	3,25	4,05	4,60	5,05	5,70	6,40	7,00
	Напряжение по фазам, В	$U_A$	228,00	232,00	232,00	234,00	234,00	232,00	234,00	234,00	232,00	233,00	232,00
		$U_B$	226,67	232,00	232,00	233,00	232,00	232,00	233,00	233,00	232,00	233,00	232,00
		$U_C$	228,00	232,00	232,00	234,00	232,00	233,00	234,00	233,00	233,00	232,00	232,00
	Мощность фаз, Вт	$P_A$	106,67	175,00	235,00	340,00	400,00	500,00	580,00	630,00	740,00	800,00	900,00
		$P_B$	65,00	95,00	165,00	275,00	340,00	420,00	480,00	580,00	660,00	760,00	860,00
		$P_C$	98,33	125,00	185,00	270,00	350,00	420,00	490,00	570,00	660,00	770,00	860,00
На входе асинхронного двигателя	Ток по фазам, А	$I_A$	3,57	3,80	3,70	3,70	3,95	4,10	4,10	4,30	4,50	4,80	5,10
		$I_B$	3,53	3,80	3,70	3,70	3,95	4,10	4,10	4,30	4,50	4,80	5,10
		$I_C$	3,57	3,80	3,70	3,70	3,95	4,10	4,10	4,30	4,50	4,80	5,10
	Напряжение по фазам, В	$U_A$	240,00	244,07	243,38	242,72	242,10	241,50	240,94	240,41	239,90	239,43	238,99
		$U_B$	240,00	244,07	243,38	242,72	242,10	241,50	240,94	240,41	239,90	239,43	238,99
		$U_C$	240,33	244,07	243,38	242,72	242,10	241,50	240,94	240,41	239,90	239,43	238,99
	Мощность фаз, Вт	$P_A$	96,67	160,00	210,00	290,00	360,00	460,00	540,00	600,00	720,00	780,00	860,00
		$P_B$	100,00	160,00	210,00	290,00	360,00	460,00	540,00	600,00	720,00	780,00	860,00
		$P_C$	106,67	160,00	210,00	290,00	360,00	460,00	540,00	600,00	720,00	780,00	860,00
На валу АД	Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	$n$	1510,00	1508,00	1505,00	1500,00	1494,00	1490,00	1485,00	1480,00	1475,00	1470,00	
Нагрузочная машина	Напряжение, В	$U_{г}$	110,00	107,57	105,14	102,72	100,29	97,86	95,43	93,00	90,58	88,15	
	Ток, А	$I_{г}$	0,00	2,00	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	16,00	18,00	
	Мощность отдаваемая в сеть, Вт	$P$	0,00	215,14	420,58	616,30	802,30	978,60	1145,18	1302,06	1449,22	1586,66	

## Продолжение таблицы Е.3

Расчетные значения												
Место измерения	Измеряемая величина		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
На входе преобразователя частоты	Среднее значение тока сети, А	1,13	1,43	1,91	2,82	3,30	4,13	4,60	5,13	5,77	6,33	7,00
	Активная мощность, Вт	270,00	395,00	585,00	885,00	1090,00	1340,00	1550,00	1780,00	2060,00	2330,00	2620,00
	Полная мощность, ВА	768,33	997,60	1328,20	1974,60	2303,90	2880,85	3224,90	3593,60	4019,30	4420,60	4872,00
	Коэффициент мощности	0,35	0,40	0,44	0,45	0,47	0,47	0,48	0,50	0,51	0,53	0,54
	Реактивная мощность, Вар	719,30	916,07	1192,43	1765,17	2029,74	2550,23	2827,98	3121,79	3451,26	3756,70	4107,55
На выходе преобразователя частоты	Среднее значение тока сети, А	3,56	3,80	3,70	3,70	3,95	4,10	4,10	4,30	4,50	4,80	5,10
	Активная мощность, Вт	303,33	480,00	630,00	870,00	1080,00	1380,00	1620,00	1800,00	2160,00	2340,00	2580,00
	Полная мощность, ВА	2561,31	2782,40	2701,54	2694,24	2868,86	2970,48	2963,54	3101,23	3238,70	3447,83	3656,59
	Коэффициент мощности	0,12	0,17	0,23	0,32	0,38	0,46	0,55	0,58	0,67	0,68	0,71
	Реактивная мощность, Вар	2543,28	2740,68	2627,05	2549,91	2657,81	2630,47	2481,57	2525,40	2413,20	2532,18	2591,18
	Потеря активной мощности, Вт	-33,33	-85,00	-45,00	15,00	10,00	-40,00	-70,00	-20,00	-100,00	-10,00	40,00

Расчетные значения после аппроксимации												
Место измерения	Измеряемая величина		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	1591	1512,60	1507,96	1503,33	1498,69	1494,05	1489,42	1484,78	1480,15	1475,51	1470,87
На входе преобразователя частоты	Среднее значение тока сети, А	1,13	1,47	2,08	2,70	3,32	3,93	4,55	5,17	5,79	6,40	7,02
	Активная мощность, Вт	270,00	361,82	606,64	851,46	1096,28	1341,10	1585,92	1830,74	2075,56	2320,38	2565,20
	Полная мощность, ВА	768,33	1026,50	1456,52	1886,54	2316,56	2746,58	3176,60	3606,62	4036,64	4466,66	4896,68
	Коэффициент мощности	0,35	0,35	0,42	0,45	0,47	0,49	0,50	0,51	0,51	0,52	0,52
	Реактивная мощность, Вар	719,30	960,62	1324,17	1683,46	2040,74	2396,90	2752,39	3107,43	3462,15	3816,66	4171,00
На выходе преобразователя частоты	Среднее значение тока сети, А	3,56	3,75	3,76	3,80	3,88	3,99	4,14	4,32	4,54	4,79	5,08
	Активная мощность, Вт	303,33	410,73	651,45	892,17	1132,89	1373,61	1614,33	1855,05	2095,77	2336,49	2577,21
	Полная мощность, ВА	2561,31	2744,00	2742,41	2766,22	2815,44	2890,06	2990,09	3115,52	3266,35	3442,59	3644,23
	Коэффициент мощности	0,12	0,15	0,24	0,32	0,40	0,48	0,54	0,60	0,64	0,68	0,71
	Реактивная мощность, Вар	2543,28	2713,09	2663,91	2618,40	2577,45	2542,76	2516,85	2503,04	2505,35	2528,28	2576,50
	Потеря активной мощности, Вт	-33,33	-48,91	-44,81	-40,71	-36,61	-32,51	-28,41	-24,31	-20,21	-16,11	-12,01
Расчеты	R <sub>мех</sub> , Вт	52,18	130,48	130,48	130,48	130,48	130,48	130,48	130,48	130,48	130,48	130,48
	R <sub>мг</sub> , Вт	62,28	109,17	108,55	107,97	107,41	106,88	106,38	105,91	105,47	105,06	104,67
	R <sub>маг+R<sub>мех</sub></sub> , Вт	114,46	239,64	239,03	238,44	237,89	237,36	236,86	236,39	235,95	235,53	235,15
	R <sub>эл</sub> , Вт	188,87	210,04	210,85	215,63	224,53	237,79	255,76	278,91	307,82	343,17	385,78
	R <sub>доб</sub> , Вт	0,00	2,05	3,26	4,46	5,66	6,87	8,07	9,28	10,48	11,68	12,89
	P, Вт	0,00	37,30	276,62	511,94	743,11	969,90	1191,94	1408,78	1619,83	1824,40	2021,70
	M, Н*м	0,00	0,24	1,75	3,25	4,74	6,20	7,64	9,06	10,45	11,81	13,13
	КПД	0,00	0,01	0,10	0,19	0,26	0,34	0,40	0,45	0,50	0,53	0,55

Таблица Е.4 – Данные по испытанию асинхронного двигателя АИР100S4, работающего от преобразователя частоты при частоте  $f=55$  Гц

Опытные данные													
Место измерения	Измеряемая величина		Номер измерения										
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
На Входе преобразователя частоты	Ток по фазам, А	$I_A$	1,13	1,7	2,7	3,3	3,9	4,75	5,2	5,6	6,3	6,9	7,6
		$I_B$	0,61	1,05	1,95	2,55	3,00	3,90	4,50	5,10	5,90	6,20	6,90
		$I_C$	1,11	1,25	2,05	2,65	3,25	4,10	4,80	5,30	5,90	6,50	7,10
	Напряжение по фазам, В	$U_A$	228,00	228,00	230,00	230,00	230,00	229,00	228,00	232,00	231,00	232,00	232,00
		$U_B$	226,33	228,00	231,00	230,00	228,00	228,00	228,00	230,00	230,00	230,00	232,00
		$U_C$	228,33	230,00	231,00	232,00	230,00	230,00	229,00	232,00	231,00	231,00	232,00
	Мощность фаз, Вт	$P_A$	85,00	145,00	240,00	310,00	420,00	480,00	540,00	640,00	740,00	800,00	940,00
		$P_B$	45,00	75,00	170,00	230,00	300,00	380,00	460,00	560,00	660,00	720,00	820,00
		$P_C$	83,33	110,00	160,00	250,00	310,00	400,00	490,00	580,00	650,00	740,00	860,00
На входе асинхронного двигателя	Ток по фазам, А	$I_A$	2,75	2,80	2,90	2,95	3,10	3,25	3,50	3,75	4,10	4,40	4,70
		$I_B$	2,73	2,80	2,90	2,95	3,10	3,25	3,50	3,75	4,10	4,40	4,70
		$I_C$	2,77	2,80	2,90	2,95	3,10	3,25	3,50	3,75	4,10	4,40	4,70
	Напряжение по фазам, В	$U_A$	241,67	242,00	240,00	241,00	240,00	238,00	239,00	240,00	238,00	238,00	239,00
		$U_B$	242,00	242,00	240,00	241,00	240,00	238,00	239,00	240,00	238,00	238,00	239,00
		$U_C$	242,00	242,00	240,00	241,00	240,00	238,00	239,00	240,00	238,00	238,00	239,00
	Мощность фаз, Вт	$P_A$	80,00	130,00	200,00	280,00	355,00	445,00	520,00	600,00	700,00	780,00	860,00
		$P_B$	80,00	130,00	200,00	280,00	355,00	445,00	520,00	600,00	700,00	780,00	860,00
		$P_C$	85,00	130,00	200,00	280,00	355,00	445,00	520,00	600,00	700,00	780,00	860,00
На валу АД	Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	$n$	1665,00	1655,00	1654,00	1650,00	1642,00	1640,00	1635,00	1630,00	1621,00	1616,00	
Нагрузочная машина	Напряжение, В	$U_{г}$	110,00	107,67	105,35	103,02	100,69	98,37	96,04	93,72	91,39	89,06	
	Ток, А	$I_{г}$	0,00	2,00	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	16,00	18,00	
	Мощность отдаваемая в сеть, Вт	$P$	0,00	215,35	421,39	618,12	805,56	983,68	1152,50	1312,01	1462,22	1603,12	

## Продолжение таблицы Е.4

Расчетные значения												
Место измерения	Измеряемая величина		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
На входе преобразователя частоты	Среднее значение тока сети, А	0,95	1,33	2,23	2,83	3,38	4,25	4,83	5,33	6,03	6,53	7,20
	Активная мощность, Вт	213,33	330,00	570,00	790,00	1030,00	1260,00	1490,00	1780,00	2050,00	2260,00	2620,00
	Полная мощность, ВА	647,26	914,50	1545,00	1960,30	2328,50	2919,95	3310,80	3701,80	4175,20	4528,30	5011,20
	Коэффициент мощности	0,33	0,36	0,37	0,40	0,44	0,43	0,45	0,48	0,49	0,50	0,52
	Реактивная мощность, Вар	611,08	852,88	1436,01	1794,07	2088,30	2634,10	2956,57	3245,75	3637,28	3924,02	4271,74
На выходе преобразователя частоты	Среднее значение тока сети, А	2,75	2,80	2,90	2,95	3,10	3,25	3,50	3,75	4,10	4,40	4,70
	Активная мощность, Вт	245,00	390,00	600,00	840,00	1065,00	1335,00	1560,00	1800,00	2100,00	2340,00	2580,00
	Полная мощность, ВА	1995,58	2032,80	2088,00	2132,85	2232,00	2320,50	2509,50	2700,00	2927,40	3141,60	3369,90
	Коэффициент мощности	0,12	0,19	0,29	0,39	0,48	0,58	0,62	0,67	0,72	0,74	0,77
	Реактивная мощность, Вар	1980,49	1995,04	1999,94	1960,47	1961,53	1898,02	1965,70	2012,46	2039,53	2096,20	2167,91
	Потеря активной мощности, Вт	-31,67	-60,00	-30,00	-50,00	-35,00	-75,00	-70,00	-20,00	-50,00	-80,00	40,00

Расчетные значения после аппроксимации												
Место измерения	Измеряемая величина		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	1722,5	1663,90	1658,77	1653,65	1648,52	1643,39	1638,26	1633,14	1628,01	1622,88	1617,76
На входе преобразователя частоты	Среднее значение тока сети, А	0,95	1,52	2,16	2,80	3,44	4,08	4,72	5,35	5,99	6,63	7,27
	Активная мощность, Вт	213,33	293,82	543,64	793,46	1043,28	1293,10	1542,92	1792,74	2042,56	2292,38	2542,20
	Полная мощность, ВА	647,26	1039,40	1483,88	1928,36	2372,84	2817,32	3261,80	3706,28	4150,76	4595,24	5039,72
	Коэффициент мощности	0,33	0,28	0,37	0,41	0,44	0,46	0,47	0,48	0,49	0,50	0,50
	Реактивная мощность, Вар	611,08	997,01	1380,71	1757,55	2131,18	2503,04	2873,80	3243,85	3613,41	3982,62	4351,55
На выходе преобразователя частоты	Среднее значение тока сети, А	2,75	2,80	2,87	2,97	3,11	3,28	3,50	3,75	4,04	4,37	4,73
	Активная мощность, Вт	245,00	353,18	599,36	845,54	1091,72	1337,90	1584,08	1830,26	2076,44	2322,62	2568,80
	Полная мощность, ВА	1995,58	2032,50	2071,77	2139,06	2234,38	2357,72	2509,08	2688,47	2895,88	3131,32	3394,78
	Коэффициент мощности	0,12	0,17	0,29	0,40	0,49	0,57	0,63	0,68	0,72	0,74	0,76
	Реактивная мощность, Вар	1980,49	2001,58	1983,18	1964,85	1949,51	1941,35	1945,81	1969,27	2018,54	2100,14	2219,41
	Потеря активной мощности, Вт	-31,67	-59,36	-55,72	-52,08	-48,44	-44,80	-41,16	-37,52	-33,88	-30,24	-26,60
Расчеты	R <sub>мех</sub> , Вт	64,09	143,20	143,20	143,20	143,20	143,20	143,20	143,20	143,20	143,20	143,20
	R <sub>мг</sub> , Вт	67,93	107,32	105,55	106,44	105,55	103,80	104,68	105,55	103,80	103,80	104,68
	R <sub>маг</sub> -R <sub>мех</sub> , Вт	132,02	250,52	248,75	249,63	248,75	247,00	247,87	248,75	247,00	247,00	247,87
	R <sub>эл</sub> , Вт	112,98	117,36	122,76	131,60	144,21	161,07	182,77	210,04	243,71	284,77	334,32
	R <sub>доб</sub> , Вт	0,00	1,77	3,00	4,23	5,46	6,69	7,92	9,15	10,38	11,61	12,84
	P, Вт	0,00	62,65	303,96	539,19	772,41	1002,25	1224,62	1441,43	1654,46	1858,34	2052,87
	M, Н*м	0,00	0,36	1,75	3,11	4,47	5,82	7,14	8,43	9,71	10,94	12,12
КПД	0,00	0,03	0,15	0,25	0,35	0,43	0,49	0,54	0,57	0,59	0,60	

Таблица Е.5 – Данные по испытанию асинхронного двигателя АИР100S4, работающего от преобразователя частоты при частоте  $f=60$  Гц

Опытные данные													
Место измерения	Измеряемая величина		Номер измерения										
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
На Входе преобразователя частоты	Ток по фазам, А	$I_A$	1,06	1,46	1,97	2,53	3,45	4,32	5,00	5,43	6,00	6,60	7,40
		$I_B$	0,53	0,78	1,53	2,03	2,92	3,68	4,30	4,93	5,60	6,10	6,77
		$I_C$	1,05	1,35	1,83	2,43	3,32	4,00	4,70	5,33	5,90	6,40	7,17
	Напряжение по фазам, В	$U_A$	228,00	228,67	228,67	228,33	228,67	227,67	228,67	228,00	228,67	227,33	228,67
		$U_B$	226,67	227,67	227,67	228,00	228,33	227,33	228,00	228,00	228,00	227,33	228,67
		$U_C$	228,33	228,67	227,67	228,67	228,67	228,00	228,33	228,67	228,00	227,67	228,67
	Мощность фаз, Вт	$P_A$	78,33	130,83	220,00	285,00	356,67	453,33	540,00	613,33	703,33	786,67	903,33
		$P_B$	31,67	64,67	147,50	213,33	300,00	376,67	456,67	550,00	640,00	730,00	836,67
		$P_C$	75,00	115,83	188,33	258,33	338,33	406,67	493,33	573,33	663,33	750,00	853,33
На входе асинхронного двигателя	Ток по фазам, А	$I_A$	2,30	2,33	2,38	2,51	2,65	2,93	3,20	3,48	3,83	4,17	4,57
		$I_B$	2,28	2,33	2,38	2,50	2,65	2,93	3,20	3,48	3,83	4,17	4,57
		$I_C$	2,30	2,33	2,38	2,50	2,65	2,93	3,20	3,48	3,83	4,17	4,57
	Напряжение по фазам, В	$U_A$	241,33	239,10	238,22	237,37	236,57	235,80	235,08	234,39	233,74	233,13	232,56
		$U_B$	241,33	239,10	238,22	237,37	236,57	235,80	235,08	234,39	233,74	233,13	232,56
		$U_C$	241,00	239,10	238,22	237,37	236,57	235,80	235,08	234,39	233,74	233,13	232,56
	Мощность фаз, Вт	$P_A$	70,00	121,67	198,33	273,33	343,33	436,67	523,33	603,33	696,67	773,33	866,67
		$P_B$	75,00	121,67	200,00	273,33	343,33	436,67	523,33	603,33	696,67	773,33	866,67
		$P_C$	77,33	121,67	200,00	273,33	343,33	436,67	523,33	603,33	696,67	773,33	866,67
На валу АД	Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	$n$	1808,33	1802,33	1799,33	1791,67	1783,33	1778,33	1776,67	1765,33	1760,00	1751,67	
Нагрузочная машина	Напряжение, В	$U_T$	110,00	107,63	105,26	102,89	100,53	98,16	95,79	93,42	91,05	88,68	
	Ток, А	$I_T$	0,00	2,00	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	16,00	18,00	
	Мощность отдаваемая в сеть, Вт	$P$	0,00	215,26	421,05	617,37	804,21	981,58	1149,48	1307,90	1456,84	1596,32	

## Продолжение таблицы Е.5

Расчетные значения												
Место измерения	Измеряемая величина		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
На входе преобразователя частоты	Среднее значение тока сети, А	0,88	1,20	1,77	2,33	3,23	4,00	4,67	5,23	5,83	6,37	7,11
	Активная мощность, Вт	185,00	311,33	555,83	756,67	995,00	1236,67	1490,00	1736,67	2006,67	2266,67	2593,33
	Полная мощность, ВА	601,93	820,51	1212,39	1596,56	2213,28	2732,11	3196,90	3583,16	3994,00	4344,20	4878,22
	Коэффициент мощности	0,31	0,38	0,46	0,47	0,45	0,45	0,47	0,48	0,50	0,52	0,53
	Реактивная мощность, Вар	572,79	759,15	1077,47	1405,87	1977,02	2436,20	2828,44	3134,17	3453,31	3705,98	4131,79
На выходе преобразователя частоты	Среднее значение тока сети, А	2,29	2,33	2,38	2,50	2,65	2,93	3,20	3,48	3,83	4,17	4,57
	Активная мощность, Вт	222,33	365,00	598,33	820,00	1030,00	1310,00	1570,00	1810,00	2090,00	2320,00	2600,00
	Полная мощность, ВА	1658,40	1673,70	1703,25	1782,28	1880,72	2075,06	2256,73	2449,35	2687,98	2914,09	3186,00
	Коэффициент мощности	0,13	0,22	0,35	0,46	0,55	0,63	0,70	0,74	0,78	0,80	0,82
	Реактивная мощность, Вар	1643,43	1633,42	1594,70	1582,44	1573,60	1609,28	1621,08	1650,21	1690,31	1763,38	1841,37
	Потеря активной мощности, Вт	-37,33	-53,67	-42,50	-63,33	-35,00	-73,33	-80,00	-73,33	-83,33	-53,33	-6,67

Расчетные значения после аппроксимации												
Место измерения	Измеряемая величина		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	1854	1809,70	1803,48	1797,26	1791,04	1784,82	1778,60	1772,38	1766,16	1759,94	1753,72
На входе преобразователя частоты	Среднее значение тока сети, А	0,88	1,19	1,85	2,51	3,18	3,84	4,51	5,17	5,83	6,50	7,16
	Активная мощность, Вт	185,00	270,10	520,06	770,02	1019,98	1269,94	1519,90	1769,86	2019,82	2269,78	2519,74
	Полная мощность, ВА	601,93	811,58	1266,14	1720,70	2175,26	2629,82	3084,38	3538,94	3993,50	4448,06	4902,62
	Коэффициент мощности	0,31	0,33	0,41	0,45	0,47	0,48	0,49	0,50	0,51	0,51	0,51
	Реактивная мощность, Вар	572,79	765,32	1154,40	1538,79	1921,30	2302,87	2683,90	3064,59	3445,05	3825,35	4205,54
На выходе преобразователя частоты	Среднее значение тока сети, А	2,29	2,30	2,39	2,53	2,71	2,92	3,18	3,47	3,81	4,19	4,60
	Активная мощность, Вт	222,33	329,97	579,17	828,37	1077,57	1326,77	1575,97	1825,17	2074,37	2323,57	2572,77
	Полная мощность, ВА	1658,40	1647,40	1710,89	1801,70	1919,82	2065,25	2237,99	2438,05	2665,42	2920,10	3202,09
	Коэффициент мощности	0,13	0,20	0,34	0,46	0,56	0,64	0,70	0,75	0,78	0,80	0,80
	Реактивная мощность, Вар	1643,43	1614,02	1609,88	1599,97	1588,88	1582,70	1589,00	1616,42	1673,75	1768,61	1906,37
	Потеря активной мощности, Вт	-37,33	-59,87	-59,11	-58,35	-57,59	-56,83	-56,07	-55,31	-54,55	-53,79	-53,03
Расчеты	Р <sub>мех</sub> , Вт	76,00	156,22	156,22	156,22	156,22	156,22	156,22	156,22	156,22	156,22	156,22
	Р <sub>мг</sub> , Вт	67,87	104,77	103,99	103,26	102,56	101,90	101,27	100,68	100,12	99,60	99,11
	Р <sub>маг+Р<sub>мех</sub></sub> , Вт	143,87	260,98	260,21	259,47	258,78	258,11	257,48	256,89	256,34	255,81	255,33
	Р <sub>эл</sub> , Вт	78,46	78,86	85,60	95,62	109,41	127,59	150,94	180,38	216,97	261,93	316,58
	Р <sub>доб</sub> , Вт	0,00	1,65	2,90	4,14	5,39	6,63	7,88	9,13	10,37	11,62	12,86
	Р, Вт	0,00	68,70	310,68	549,35	784,22	1014,66	1239,89	1458,99	1670,91	1874,43	2068,22
	М, Н*м	0,00	0,36	1,65	2,92	4,18	5,43	6,66	7,86	9,03	10,17	11,26
	КПД	0,00	0,04	0,18	0,30	0,41	0,49	0,55	0,60	0,63	0,64	0,65

## Приложение Ж. Протоколы испытаний по теме исследования

## Испытательная лаборатория «Гранум»

Аттестат РОСС RU.31578.04ОЛНО.ИЛЗ1

Срок действия с 18.04.2023 года по 17.04.2026 года

Адрес: 141802, Россия, Московская область, город Дмитров, улица Бирлово Поле, 21

Утверждаю:  
Начальник лабораторииИ.П. Смирнов  
12.07.2023 года**ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ**

№ 001/J-12/07/23 от 12.07.2023 года

Заказчик испытаний, адрес заказчика <sup>1</sup>	Удмуртский ГАУ. Адрес: 426069, Россия, г. Ижевск, ул. Студенческая, 11
Наименование объекта испытаний <sup>1</sup>	Пшеница
Изготовитель <sup>1</sup>	Удмуртский ГАУ. Адрес: 426069, Россия, г. Ижевск, ул. Студенческая, 11
План (метод) отбора образцов <sup>1</sup>	Отбор образцов произведен в соответствии с ГОСТ Р 58972-2020, акт отбора образцов № 001/J-12/07/23
Идентификационный номер образца	№ 001/J-12/07/23
Испытания проведены на соответствие требованиям	ГОСТ 9353-2016 «Пшеница. Технические условия»

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ**

Инженер-испытатель: Н.И. Назаров

Показатель (характеристика)	Методика испытаний	Нормируемое значение	Результат испытаний
1	2	3	4
Влажность, %, не более	ГОСТ 9353-2016	14,0	12,45

## Примечания:

1. Протокол испытаний распространяется только на образцы, прошедшие испытания. Результаты испытаний относятся к предоставленным Заказчиком образцам.
2. Протокол испытаний не может быть частично воспроизведен без письменного разрешения испытательной лаборатории.
3. Методики проведения испытаний включены в Перечень стандартов, содержащих правила и методы исследований (испытаний) и измерений, в том числе правила отбора образцов, необходимые для применения и исполнения требований технических регламентов.

ОКОНЧАНИЕ ПРОТОКОЛА ИСПЫТАНИЙ

<sup>1</sup> Информация представлена заказчиком

Испытательная лаборатория «Гранум»  
 Аттестат РОСС RU.31578.04ОЛНО.ИЛЗ1  
 Срок действия с 18.04.2023 года по 17.04.2026 года  
 Адрес: 141802, Россия, Московская область, город Дмитров, улица Бирлово Поле, 21



**ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ**  
 № 002/А-12/07/23 от 12.07.2023 года

Заказчик испытаний, адрес заказчика <sup>1</sup>	Удмуртский ГАУ. Адрес: 426069, Россия г. Ижевск, ул. Студенческая, 11
Наименование объекта испытаний <sup>1</sup>	Пшеница
Изготовитель <sup>1</sup>	Удмуртский ГАУ. Адрес: 426069, Россия г. Ижевск, ул. Студенческая, 11
План (метод) отбора образцов <sup>1</sup>	Отбор образцов произведен в соответствии с ГОСТ Р 58972-2020, акт отбора образцов № 002/А-12/07/23
Идентификационный номер образца	№ 002/А-12/07/23
Испытания проведены на соответствие требованиям	ГОСТ 9353-2016 «Пшеница. Технические условия»

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ**

Инженер-испытатель: Н.И. Назаров

Показатель (характеристика)	Методика испытаний	Нормируемое значение	Результат испытаний
1	2	3	4
Влажность, %, не более	ГОСТ 9353-2016	14,0	21,75

Примечания:

1. Протокол испытаний распространяется только на образцы, прошедшие испытания. Результаты испытаний относятся к предоставленным Заказчиком образцам.
2. Протокол испытаний не может быть частично воспроизведен без письменного разрешения испытательной лаборатории.
3. Методики проведения испытаний включены в Перечень стандартов, содержащих правила и методы исследований (испытаний) и измерений, в том числе правила отбора образцов, необходимые для применения и исполнения требований технических регламентов.

ОКОНЧАНИЕ ПРОТОКОЛА ИСПЫТАНИЙ

<sup>1</sup> Информация представлена заказчиком