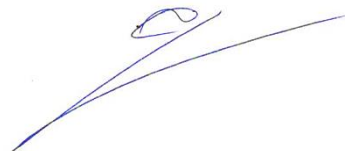


На правах рукописи



ЛЯПУШКИН СЕРГЕЙ ВИКТОРОВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ
ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА
ДОЗИРОВАНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ**

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические
комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель:	доктор технических наук, профессор Букреев Виктор Григорьевич
Официальные оппоненты:	Власьевский Станислав Васильевич, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ, профессор кафедры «Электротехника, электроника и электромеханика», ФГБОУ ВПО Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск Филипас Александр Александрович, кандидат технических наук, доцент, кафедры «Электроники и автоматики физических установок», Северского технологического института-филиала федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Ведущая организация:	ФГБОУ ВПО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», г. Кемерово

Защита состоится 16 декабря 2015 года в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.11 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Усова, д. 7, ауд.217

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте <http://portal.tpu/council/2801/worklist>.

Автореферат разослан «___» октября 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.269.11 к.т.н., доцент



Ю.Н. Дементьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Автоматические системы дозирования сыпучих материалов широко применяются в строительных, пищевых и фармацевтических областях промышленности для приготовления различных смесей. Главный критерий оптимизации подобных систем является точность дозирования каждого компонента смеси, которая непосредственно зависит от скорости движения дозируемого компонента и других технологических факторов. Технологические требования к качеству продукции на производстве, жестко регламентируют разработчикам автоматизированной системы величину ошибки дозирования сыпучих материалов, что связано также с высокой стоимостью отдельных компонентов смеси. Обеспечение максимально возможного соблюдения рецепта смеси требует дозирования каждого ее компонента с высокой точностью, что является непростой инженерно-технической задачей.

Из всего многообразия электротехнических комплексов дозирования сыпучих материалов, следует выделить автоматизированные системы, построенные на базе современного асинхронного электропривода с микроконтроллерным управлением весодозирующим устройством, использующим принцип многокомпонентного дозирования. В разработку и совершенствование систем дозирования внесли значительный вклад следующие выдающиеся ученые: Б.А. Федосенков, Г.А. Рогинский, А.В. Каталымов, В.А. Любартович, А.М. Григорьев, С.П. Орлов, А.В. Пугачев, Ю.Д. Видинеев и др.

Развитие систем управления электроприводами автоматизированных объектов управления общепромышленными механизмами определяется существенным вкладом отечественных и зарубежных ученых: М.М. Ботвинник, И.Я. Браславский, А.А. Булгаков, А.М. Вейнгер, Д.А. Завалишин, Н.Ф. Ильинский, В.И. Ключев, М.П. Костенко, В.В. Рудаков, Ю.А. Сарбатов, О.В. Слежановский, И.М. Чиженко, Р.Т. Шрейнер, В.А. Шубенко, И.И. Эпштейн, F. Blaschke, J. Holtz, W. Leonard, T.A. Lipo, D.W. Novotny и многие другие.

Точность дозирования в автоматизированных системах является функцией большого числа систематических и случайных факторов: величины, формы и взаимного расположения отдельных частиц материала; коэффициента сцепления их с друг другом и с конструктивными элементами дозатора; относительной влажности дозируемого материала и воздуха в помещении; высоты падения материала в приемную емкость; величины наклона дозатора к уровню горизонта; вибрационных и электромеханических помех и т.д.

Особую значимость приобретает проблема оптимизации управления автоматизированным электротехническим комплексом дозирования сыпучих материалов в части увеличения производительности оборудования и уменьшения ошибки дозирования особо ответственных, небольших по объему, но дорогостоящих компонентов. Необходимое в современных условиях качество комбикорма (ГОСТ Р 50257-92), определяет высокие требования к составу каждого компонента кормосмеси и неукоснительному выполнению рецепта конечного продукта с требуемой точностью. Таким образом, разработка и исследование

электротехнического комплекса автоматизированного весового дозирования сыпучих материалов с частотно-регулируемым электроприводом является актуальной задачей, решение которой позволит выполнить повышенные требования к технологическому процессу дозирования смесей компонентов комбикормов в сложных производственных условиях.

Цель работы. Обеспечение заданных точности и производительности автоматизированного электротехнического комплекса весового дозирования сыпучего материала путем применения эффективных алгоритмов управления частотно-регулируемым асинхронным электроприводом шнековых дозаторов.

Для достижения указанной цели решены следующие задачи:

- анализ исполнительных устройств дозирования сыпучих материалов и способов управления частотно-регулируемым электроприводом шнекового дозатора;
- построение обобщенной математической и имитационной моделей электропривода шнекового дозатора комплекса дозирования сыпучих материалов;
- разработка алгоритмов управления частотно-регулируемым асинхронным электроприводом шнекового дозатора в условиях неустойчивости параметров сыпучего материала;
- имитационное моделирование и экспериментальные исследования разработанных алгоритмов управления электроприводом шнековых дозаторов;
- создание экспериментальной установки системы дозирования сыпучих материалов для практической проверки алгоритмов управления электроприводом.

Объект исследования – частотно-регулируемый асинхронный электропривод автоматизированного комплекса дозирования сыпучих материалов.

Предмет исследования – эффективные алгоритмы управления электроприводом автоматизированного комплекса дозирования сыпучих материалов.

Методы исследования

Методы исследования, используемые при решении задач в диссертационной работе, основаны на положениях теории электромеханического преобразования энергии, теории автоматического регулирования, применении аппарата передаточных функций, имитационного моделирования электромеханических систем в среде *MatLab Simulink*.

Научная новизна

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработано алгоритмическое обеспечение частотно-регулируемого асинхронного электропривода автоматизированного комплекса производства комбикормов, отличающаяся от известных тем, что обеспечивается заданная точность дозирования малых компонентов смеси в общем бункере-дозаторе.

2. Разработана имитационная модель частотно-регулируемого электропривода шнекового дозатора, которая отличается от известных тем, что моделирование шнекового дозатора происходит с учетом массы «падающего столба», непрерывно меняющейся по мере накопления материала в бункере-дозаторе.
3. Разработан алгоритм сигнальной адаптации регулятора веса в реальном времени, обеспечивающий высокую точность дозирования шнекового дозатора с частотно-регулируемым электроприводом.

Практическая ценность

1. Создан автоматизированный аппаратно-программный комплекс для научно-лабораторных исследований систем весового дозирования, который используется в учебном процессе при подготовке специалистов кафедры «Электропривода и электрооборудования» Энергетического института НИ ТПУ.
2. Разработана методика расчета параметров программного регулятора веса, учитывающая изменение свойств дозируемого материала и массы «падающего столба».
3. Предложена инженерная методика проектирования систем многокомпонентного дозирования с учетом фракционного состава и свойств компонентов, а также при учете влияния «падающего столба» массы материала.

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных результатов работы определяется корректностью и обоснованностью принятых решений, адекватностью разработанных математических моделей, результатами экспериментов.

Реализация результатов работы

Основные научно-практические результаты диссертационной работы используются в цехе приготовления комбикормовых смесей ЗАО «Сибирская аграрная группа» г. Томск; в учебном процессе кафедры электропривода и электрооборудования Энергетического института ТПУ при подготовке специалистов направления «Электроэнергетика и электротехника». Работа выполнена в рамках Государственного задания «Наука», проект №3852.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. алгоритмы управления электротехническим комплексом с общим частотным преобразователем для асинхронных двигателей различных шнековых дозаторов;
2. математическое описание и имитационная модель частотно-регулируемого электропривода шнекового дозатора с различными свойствами дозируемого сыпучего материала;
3. алгоритм сигнальной адаптации регулятора веса частотно-регулируемого электропривода шнекового дозатора, учитывающий изменяемую массу «падающего столба» и дозирования сыпучих материалов с различными характеристиками в реальном масштабе времени;

4. результаты экспериментальных исследований на автоматизированном лабораторном стенде дозирования сыпучих материалов для проверки разработанных алгоритмов управления.

Апробация результатов работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: MATEC Web of Conferences, The 2nd International Youth Forum “Smart Grids” 15 December 2014; «Электромеханические преобразователи энергии» VI международная научно-техническая конференция Томск 2013; «Электромеханические преобразователи энергии» V Юбилейная международная научно-техническая конференция, Томск, 2011; «Электромеханические преобразователи энергии» IV Международная научно-техническая конференция Томск, 2009; «Современные техника и технологии» XV Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных Томск, 2009; «Инновационные технологии атомной энергетики и промышленности» г. Северск, 2009; XII международная научно-практическая конференция студентов и молодых ученых «Современная техника и технологии» Томск, 2007; Международная научно-техническая конференция «Электромеханические преобразователи энергии», Томск, 2007; XII международная научно-практическая конференция студентов и молодых ученых «Современная техника и технологии» Томск, 2006.

Публикации

Основные положения диссертационной работы и результаты выполненных исследований отражены в 17 печатных работах, в том числе 4 изданиях, рекомендованных ВАК, 1 статьи индексируемой в базе Scopus и 11 тезисах докладов, 1 патенте РФ на полезную модель, 1 свидетельстве о регистрации программного продукта для ЭВМ.

Структура и объем диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем работы составляет 130 страниц, содержит 73 рисунка, 11 таблиц, список литературы, включающий 76 наименований, и приложение на 16 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту, представлена структура диссертации.

В первой главе приведена классификация устройств дозирования, которые могут быть использованы для транспортировки и дозирования сыпучих материалов. Отмечено, что возможности существующих систем управления шнековыми дозаторами используются не в полной мере и показаны пути их совершенствования применительно к увеличению точности и производительности

технологического процесса дозирования сыпучих материалов. Дано краткое описание технологического процесса приготовления комбикорма, основной задачей которого является дозирование с максимально возможной точностью компонентов кормосмеси.

В результате анализа технической и патентной литературы, в данной предметной области, сделан вывод, что наиболее оптимальной системой для производства комбикормов является дозирование всех компонентов комбикорма в общем бункере дозатора, при перемещении каждого компонента отдельным шнековым дозатором. Функциональная схема автоматизированного комплекса дозирования сыпучих материалов с частотно-регулируемым электроприводом (полезная модель № 54179 от 10.06.2006) представлена на рис. 1.

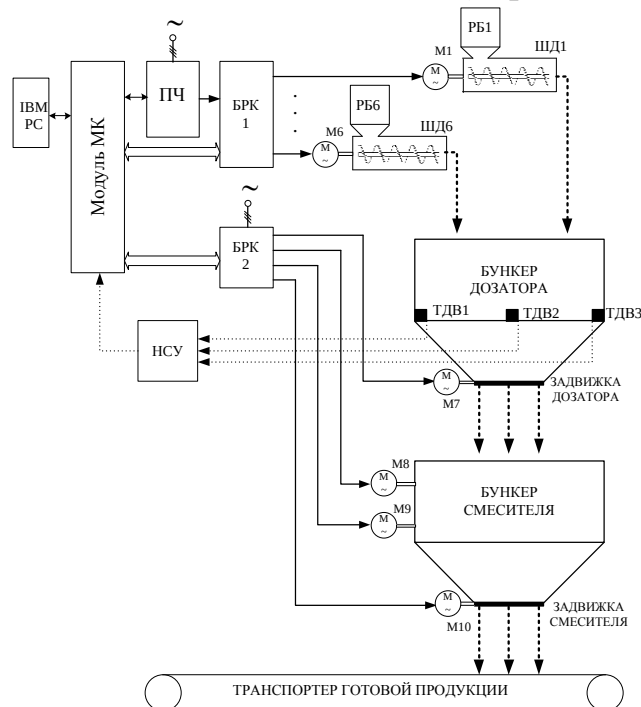


Рис.1. Функциональная схема автоматизированного комплекса многокомпонентного дозирования
ПЧ – преобразователь частоты; БРК – блок релейной коммутации; НСУ – нормирующий и суммирующий усилители; РБ – расходный бункер; ШД – шнековый дозатор; МК – микроконтроллер.

Данная структура многокомпонентного дозирования отличается от известных тем, что от одного преобразователя частоты могут управляться n шнековых дозаторов, где n – число компонентов кормосмеси. Коммутация силовых цепей происходит по сигналу микроконтроллера с помощью блока релейной коммутации. Скалярное управление преобразователем частоты позволяет осуществлять регулирование асинхронных двигателей шнековых дозаторов разной мощности. Благодаря этому организуется непрерывное смесеприготовление с максимальной производительностью. Использование одного преобразователя частоты на n каналов дозирования значительно удешевляет расходы на создание автоматизированной системы и уменьшает эксплуатационные затраты.

В канале измерения текущих значений веса автоматизированного комплекса многокомпонентного дозирования используется 3 тензодатчика. Сигна-

лы с тензодатчиков поступают в суммирующий блок, а затем в нормирующий усилитель, которые находятся в непосредственной близости от датчиков. Здесь сигнал усиливается, гальванически изолируется и нормализуется в стандартный токовый сигнал 4...20 мА. В этом виде информация о весе поступает в контроллер на вход программного регулятора веса.

В состав оборудования производства комбикормов входят: 6 расходных бункеров, содержащие дозируемые компоненты (ячмень, горох, отруби пшеничные, пшеница, шрот подсолнечный, концентрат); 6 шнековых дозаторов; бункер-дозатор грузоподъемностью до 1000 кг, установленный на трех тензодатчиках; бункер-смеситель, оснащенный асинхронным двигателем смесителя мощностью 15 кВт и двигателем рыхлителя; транспортная подсистема отгрузки готовой продукции. Объект автоматизации включает в себя десять асинхронных электродвигателей мощностью от 1,7 кВт до 15 кВт.

После загрузки расходных бункеров компоненты кормосмеси поочередно поступают в бункер-дозатор, где в соответствии с заданным рецептом осуществляется дозирование. По окончании процесса дозирования всех компонентов подготовленная смесь поступает в бункер-смеситель для ее перемешивания. Время перемешивания варьируется от одной до трех минут в зависимости от выбранного рецепта. Готовая смесь поступает на транспортер отгрузки готовой продукции.

Аналогичным функционалом обладает АСУ ТП дозирования и смешивания компонентов комбикормов и управления транспортно-технологическими маршрутами участка дозирования и смешивания разработки ЗАО «Текон-Трейд» г. Москва. Программно-технический комплекс АСУ ТП состоит из аппаратной части на базе промышленного контроллера МФК 1500, персонального компьютера с Windows XP и сети Ethernet; программной части в среде разработки ISaGRAF и SCADA-системы PcVue 10.0. Данная открытая система обладает рядом преимуществ: простым и понятным интерфейсом, своевременным предоставлением информации о ходе технологического процесса и алгоритмом диагностики оборудования. Однако существенными недостатками АСУ ТП на базе оборудования фирмы «Текон» и программной среды ISaGRAF для рассматриваемого класса задач являются: излишние информационные и технические возможности системы (до нескольких сотен точек контроля), что делает систему достаточно дорогостоящей; система требует доработки для конкретного потребителя; заданную точность при высокой производительности дозирования малых компонентов кормосмеси практически невозможно обеспечить при работе с одним бункером-дозатором.

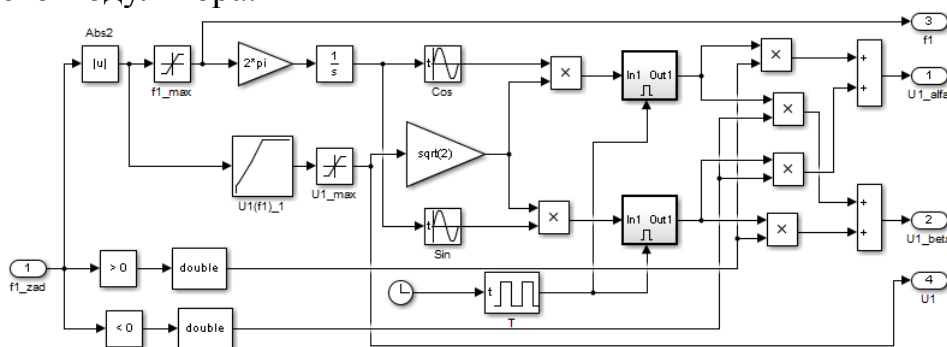
Таким образом, конкретные технологические требования к приготовлению кормосмеси (точность дозирования компонентов до 3% и производительность комплекса до 6 т/ч) актуализируют задачу повышения эффективности управления автоматизированного комплекса дозирования сыпучих материалов.

Во второй главе на основе принятых допущений производится разработка математической и имитационной моделей частотно-регулируемого асин-

хронного электропривода и шнекового дозатора с изменяемыми характеристиками сыпучей среды.

Асинхронный двигатель (АД) является основным элементом в системах дозирования со шнековым дозатором, с помощью которого производится управление движением шнека.

В системе многокомпонентного дозирования, для приготовления выбранного рецепта комбикорма, к одному преобразователю частоты поочередно подключаются несколько асинхронных электродвигателей. Двигатели шнековых дозаторов имеют различную мощность и соответственно значения параметров схемы замещения. Это обстоятельство служит основанием для использования преобразователя частоты со скалярным управлением АД.



Синтез системы управления электропривода ведется с учетом известной информации об объеме порции материала перемещаемого в бункер дозатора. Объемный вес насыпного груза зависит от гранулометрических свойств материала, его удельной влажности. На этапе проектирования учет коэффициентов, характеризующих свойства шнекового дозатора, необходимо проводить на математической модели.

длины заборной части винта. При определенном вращении вала и заборной части винта можно добиться равенства этого коэффициента максимальному значению (для различных видов материалов максимальное значение этого коэффициента будет разным). В модели механической части необходимо учитывать массу «падающего столба», обусловленную весом материала находящегося в воздухе внутри бункера дозатора. Имитационная модель шнекового дозатора автоматизированного комплекса дозирования сыпучих материалов изображена на рис. 3.

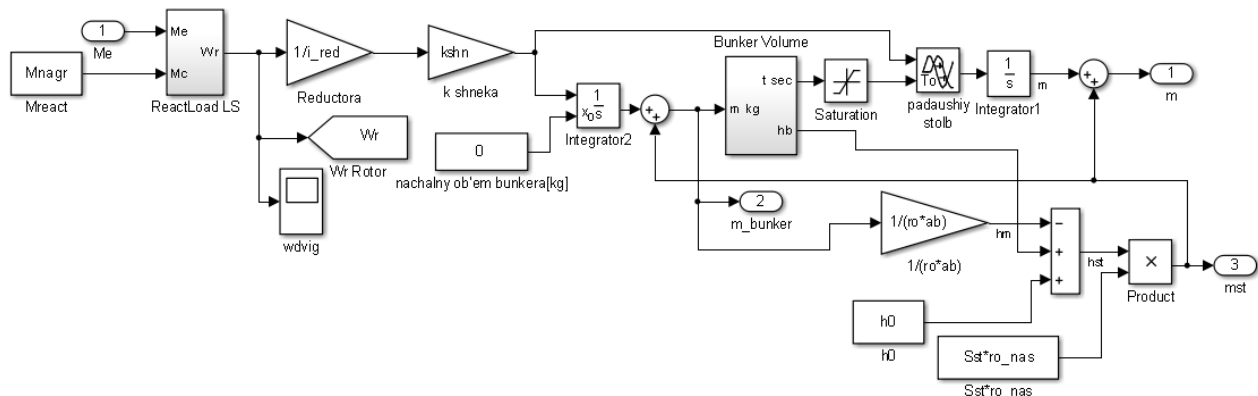


Рис. 3. Модель шнекового дозатора с учетом изменяющейся временной задержкой и вычислением массы «падающего столба»

Данная имитационная модель отличается от известных тем, что моделирование шнекового дозатора происходит с учетом массы «падающего столба» и временной задержки, которые непрерывно изменяются по мере накопления в бункере материала с различными характеристиками.

Исследования системы дозирования на имитационной модели с релейным регулятором веса (рис.4) показали, что имеет место существенная ошибка дозирования, примерно 18%, которая недопустима по технологическим требованиям. Для получения требуемой точности дозирования на уровне $\pm 3\%$, необходимо в системе управления частотно-регулируемым асинхронным электроприводом использовать специальные алгоритмы коррекции ошибки дозирования. Также можно сделать вывод, что математическая модель процесса дозирования сыпучих материалов, которая рассмотрена в главе 2 диссертации, имеет достаточную адекватность с его физическим процессом, т.к. она учитывает тип дозируемого материала, изменение его свойств и угол наклона шнекового дозатора к линии горизонта.

На рис. 5 изображены переходные процессы дозирования пшеницы при угле наклона шнекового дозатора к линии горизонта 0° , 15° и 30° .

Как следует из результатов моделирования, при дозировании с наклоном шнека к линии горизонта в 30° точность увеличивается на 2...4%, но производительность дозирования уменьшается на 20...26%.

Также результаты исследования показали что, при увеличении насыпного веса материала на 60%, производительность шнекового дозатора увеличивается на 185%, что обусловлено значительным увеличением коэффициента передачи шнекового дозатора в модели, но ошибка дозирования увеличивается почти в 3 раза.

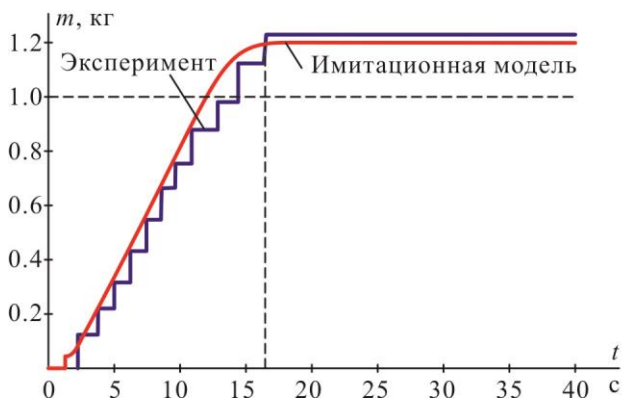


Рис.4 Результаты дозирования 1 кг на имитационной модели и на экспериментальной установке

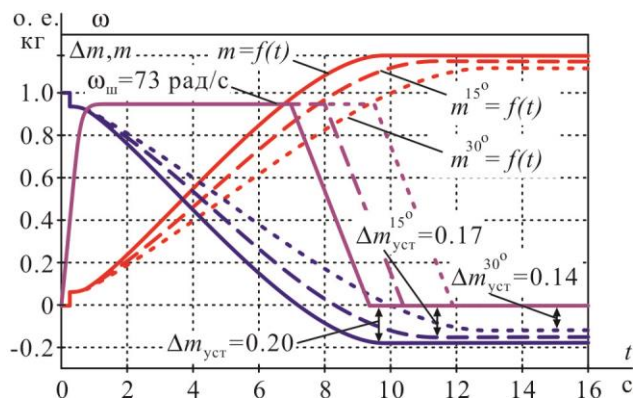


Рис.5 Дозирование пшеницы при различных углах наклона шнекового дозатора

Анализ результатов экспериментальных данных показал, что процесс дозирования «тяжелых» сыпучих компонентов сопровождается значительной ошибкой и необходимо применять специальные алгоритмы коррекции задания скорости электропривода шнекового дозатора.

Третья глава посвящена вопросам синтеза алгоритма управления асинхронным электроприводом в системах дозирования сыпучих материалов.

Блок-схема основного алгоритма управления автоматизированным частотно-регулируемым асинхронным электроприводом электротехнического комплекса производства комбикормов, разработанного коллективом сотрудников кафедры ЭПЭО Национального исследовательского Томского политехнического университета с участием автора диссертации, представлена на рис. 6.

Данное алгоритмическое обеспечение автоматизированного электротехнического комплекса дозирования сыпучих материалов в технологии производства комбикормов отличается от известных тем, что:

1. учитывается масса «падающего столба» находящегося в бункере материала, которая имеет случайный характер (алгоритм КОПС);
2. определяется последовательность дозирования компонентов рецепта от наибольшего к наименьшему значению (небольшому по объему, но очень важному с экономической точки зрения), так как по мере заполнения бункера-дозатора высота и масса падающего столба уменьшаются;
3. обеспечивается минимизация ошибки при изменении свойств перемещаемого материала (алгоритм КОСД).

Необходимую точность в системах дозирования можно получить за счет введения внешнего контура регулирования веса. Предельное быстродействие контура, следовательно, максимальная производительность системы дозирования, достигается за счет того, что регулятор веса большую часть времени дозирования находится в насыщении. Ввиду того, что свойства дозируемых компонентов обладают нестационарными свойствами, существенно влияющими на сыпучесть материала, то повторно получить дозирование материала с заданной точностью становится проблематично.

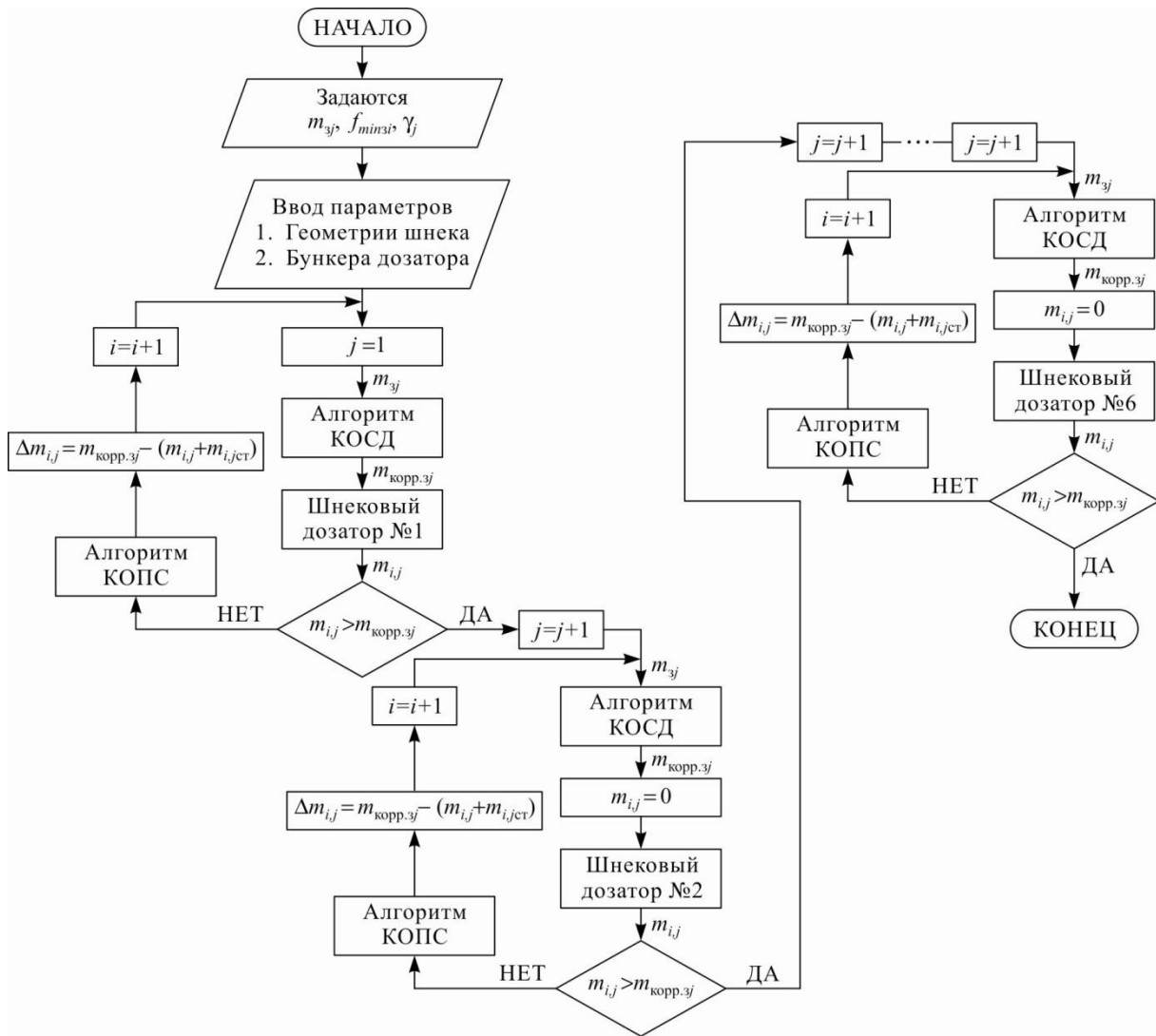


Рис.6 Блок-схема алгоритма управления частотно-регулируемым асинхронным электроприводом электротехнического комплекса

КОПС - алгоритм коррекции ошибки дозирования вызванной массой «падающего столба» материала; КОСД- алгоритм коррекции ошибки дозирования на основе статистических данных.

Для уменьшения ошибки дозирования, в контур регулирования веса включается алгоритм коррекции ошибки дозирования на основе статистических данных с учетом поддержания производительности шнекового питателя на оптимальном уровне.

Расчет задания частоты вращения шнека дозатора в реальном времени при коррекции регулятора веса происходит в процессе дозирования текущей порции материала. Алгоритм коррекции ошибки на основе статистических данных позволяет минимизировать влияние изменения физико-механических свойств материала и других факторов нестабильности электромеханической системы.

Текущая ошибка дозирования определяется как

$$\Delta m_{ij} = m_{zi} - m_{ij}, \quad (1)$$

где i – текущий цикл дозирования; j – цикл расчета в реальном времени с шагом расчета 333 мс; m_{zi} – задание на дозирование для текущего цикла; m_{ij} – текущая масса дозируемого материала.

Задание на частоту вращения АД электропривода определяется по формуле

$$f_{3j} = k_{pvi} \cdot \Delta m_{ij} \quad (2)$$

при ограничениях

$$f_{3j} = f_{3\max}, \text{ если } f_{3j} > f_{3\max}, \text{ и } f_{3j} = f_{3\min}, \text{ если } f_{3j} < f_{3\min j-1},$$

где k_{pvj} – коэффициент регулятора веса для каждого шага расчета; $f_{3\max}$ и $f_{3\min}$ – расчетные ограничения на частоту вращения шнекового дозатора.

Для повышения производительности и уменьшения времени работы на минимальной скорости включается таймер времени работы режима «плавного регулирования скорости».

При превышении времени дозирования увеличиваются минимальная скорость и коэффициент регулятора веса:

$$f_{3\min j} = f_{3\min j-1} + \Delta f_{3\min 1}; \quad (3)$$

$$k_{pvj} = k_{pvi-1} + \Delta k_{pv1}, \quad (4)$$

где параметры $\Delta f_{3\min 1}$ и Δk_{pv1} определяются экспериментально.

При длительной работе электропривода на минимальной скорости, включается таймер контроля минимальной скорости и существенно увеличивается минимальная скорость работы шнекового питателя:

$$f_{3\min j} = f_{3\min j-1} + \Delta f_{3\min 2}; \quad (5)$$

$$\Delta f_{3\min 2} > \Delta f_{3\min 1}.$$

Дозирование следующего цикла управляется алгоритмом коррекции задания на вес с учетом предыдущего дозирования.

Исходным параметром является ошибка дозирования по весу предыдущего цикла дозирования

$$\Delta m_{i-1} = m_{zi-1} - m_{i-1}, \quad (6)$$

где m_{zi-1} – значение заданной массы; m_{i-1} – значение отработанной массы.

Коррекция на задание определяется по формуле

$$m_{доп i} = m_{доп i-1} \pm \frac{\Delta m_{i-1}}{K_1}, \quad (7)$$

где коэффициент $K_1 \approx 2$ – подбирается экспериментально.

Расчет задания с коррекцией определяется следующим выражением:

$$m_{zi} = m_z - m_{доп i}. \quad (8)$$

Разработанный алгоритм был реализован на языке СИ с помощью *S-Function Builder* в *MATLAB Simulink*. Исследована имитационная модель системы дозирования сыпучих материалов с использованием алгоритма коррекции ошибки дозирования на основе статистических данных.

На рис. 7. изображен график переходного процесса дозирования одного килограмма материала без алгоритма коррекции задания на основе статистических данных.

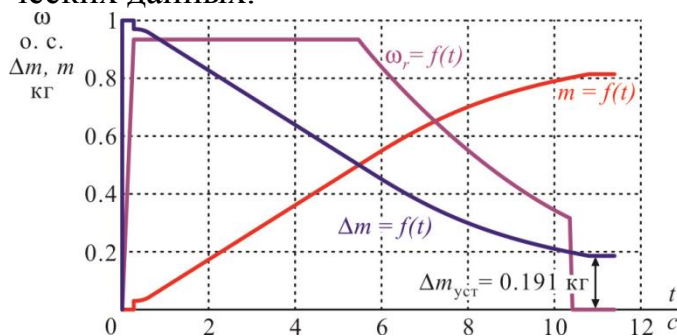


Рис. 7 Переходный процесс при первом цикле дозирования

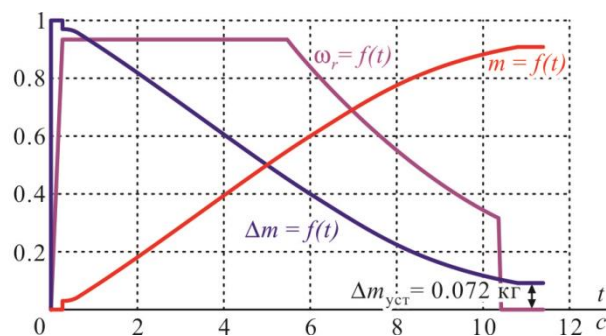


Рис. 8. Переходный процесс при использовании алгоритма коррекции задания на основе статистических данных

При пуске электропривода без использования алгоритма коррекции (рис.7) наблюдается ошибка по весу, равная 0,191 кг.

Переходный процесс с алгоритмом коррекции изображен на рис. 8. Видно, что произошла компенсация абсолютной ошибки дозирования в 2,65 раза при применении алгоритма коррекции задания на основе статистических данных. Полученная ошибка дозирования равна 0,072 кг или 7,2% от массы дозируемого материала, что в 2,4 раза больше, чем требуемая по регламенту приготовления кормосмеси. Для дальнейшего уменьшения ошибки дозирования до 3% необходимо применить алгоритм компенсации ошибки от массы падающего столба материала.

Во второй главе диссертации представлена математическая модель шнекового дозатора, которая позволяет определить массу $m_{ст}$ материала с учетом «падающего столба»:

$$m_{ст} = \left[\frac{\pi}{4} \cdot (D_0^2 - d_0^2) \right] \times \left[h_0 + \left(h_6 - \frac{m \cdot 3}{\gamma \cdot (d \cdot e + \sqrt{d \cdot e \cdot a \cdot b} + a \cdot b)} \right) \right] \cdot \gamma, \quad (9)$$

где D_0 и d_0 – внешний и внутренний диаметр шнека; a, b, d, e – геометрические параметры бункера дозатора трапециевидальной формы; h_0 – расстояние от шнека до верхней границы бункера; h_6 – высота бункера дозатора, γ – плотность материала.

Значение массы материала, находящегося в бункере, в реальном времени поступает в микроконтроллер управления для расчета изменяющейся массы «падающего столба» дозируемого материала в переходных режимах.

Компенсировать массу «падающего столба» необходимо при формировании задания в системе управления электроприводом.

Ошибка дозирования, вызванная массой падающего столба, будет равна:

$$\Delta m = m_{зад} - (m_{ос} + m_{ст}). \quad (10)$$

Блок-схема алгоритма управления с учетом массы падающего столба материала при дозировании приведена на рис. 9.

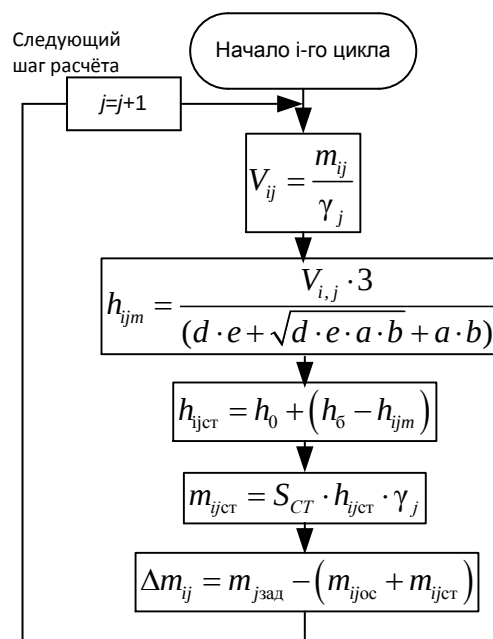


Рис. 9 Блок-схема алгоритма учёта массы «падающего столба»

Имитационная модель при совместном применении алгоритмов учета массы «падающего столба» в бункер дозатора и коррекции ошибки на основе статистических данных представлена на рис. 10.

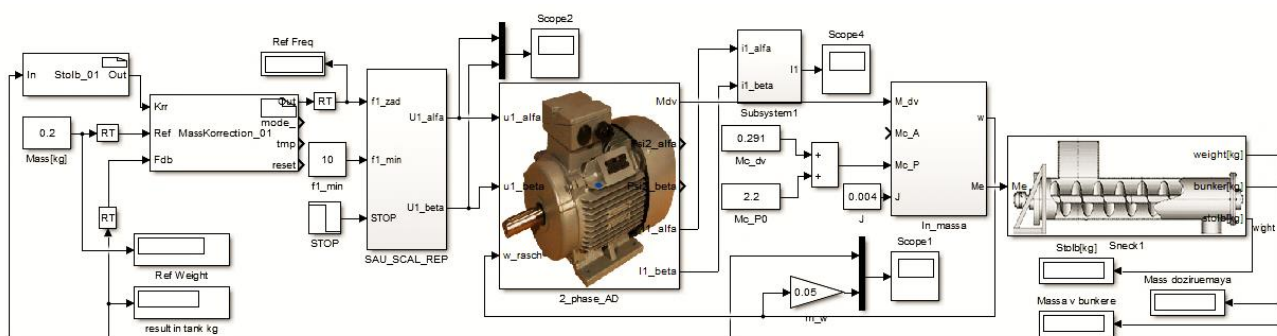


Рис. 10. Имитационная модель автоматизированного электропривода в системе дозирования сыпучих материалов при совместном использовании алгоритмов коррекции ошибки

Результаты имитационного моделирования дозирования одного килограмма сыпучего материала приведены на рис. 11. Совместное использование алгоритмов коррекции ошибки дозирования на основе статистических данных и вычисления и компенсации ошибки вызванной весом «падающего столба» приводит к уменьшению ошибки дозирования системы. В результате совместного применения алгоритмов удалось получить ошибку дозирования 2,7%, что соответствует заданным требованиям точности дозирования компонентов комбикормовой смеси.

На имитационной модели с одновременным использованием алгоритмов коррекции ошибки дозирования была проведена серия экспериментов для всех компонентов комбикорма. На рис.12 приведены гистограммы зависимости усредненной ошибки дозирования для каждого компонента комбикорма за несколько циклов дозирования.

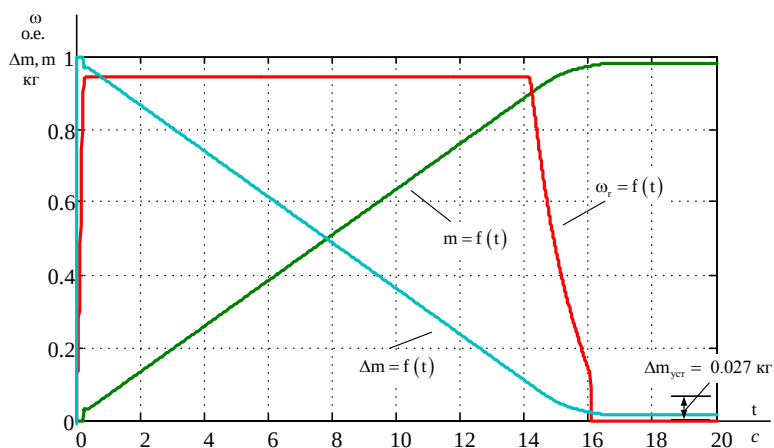


Рис. 11 Переходный процесс при совместном использовании алгоритмов коррекции ошибки

Анализ данных показывает, что наибольшее значение ошибки возникает при первом цикле дозирования, а далее алгоритм обеспечивает ошибку на минимальном уровне.

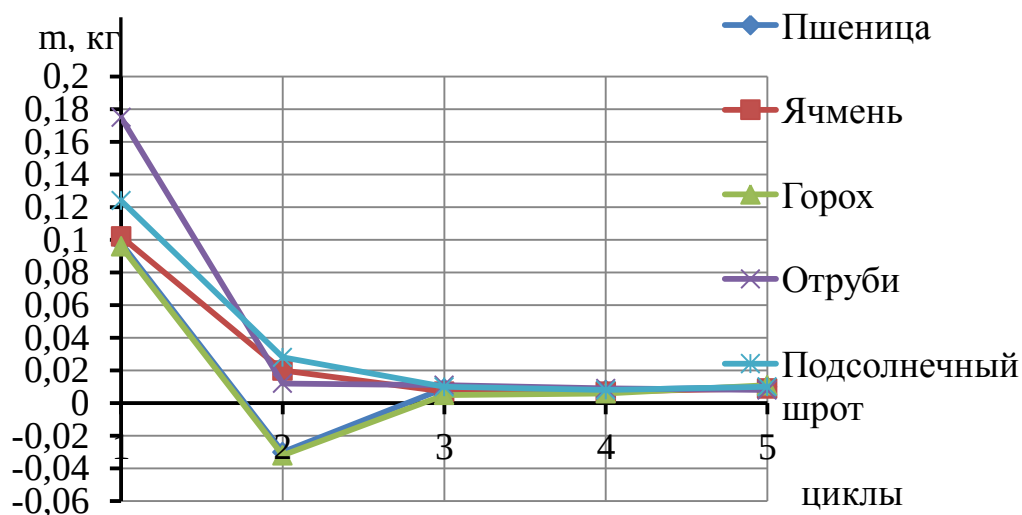


Рис. 12 Статистические данные дозирования компонентов комбикорма

В четвертой главе представлено описание экспериментальной установки, на которой проводились исследования с целью проверки и отладки алгоритмов коррекции ошибки дозирования, а также приведены результаты экспериментов (рис. 13).



Рис.13 Экспериментальный научно-исследовательский стенд «Автоматическая система дозирования сыпучих материалов на базе микроконтроллера Fastwel RTU 188 BS»

Эксперименты проводились для различных коэффициентов $K_{рв}$ регулятора веса. Результаты эксперимента при $K_{рв} = 225$ без применения алгоритмов компенсации ошибки дозирования и при их использовании представлены на рис. 14, 15.

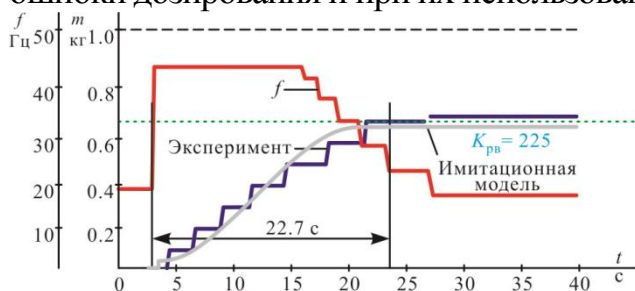


Рис. 14 Переходные процессы дозирования без учета алгоритмов компенсации ошибки

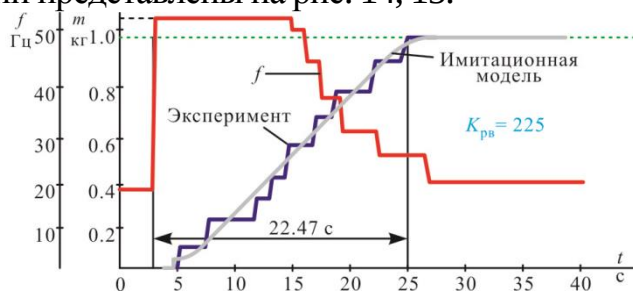


Рис. 15 Переходные процессы дозирования с учетом алгоритмов компенсации ошибки

На графиках обозначено: f , m – задание на частоту вращения асинхронного двигателя шнекового дозатора и массу дозируемого материала, полученные экспериментально; m' – масса дозируемого материала, полученная на имитационной модели при полностью идентичных эксперименту условиях.

Результаты экспериментов (рис. 14 и 15) показывают, что применение алгоритмов компенсации ошибки дозирования увеличивает точность процесса дозирования и позволяет получить ошибку дозирования материала до 3 %.

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что применение алгоритмов компенсации ошибки, увеличивает точность дозирования и производительность приготовления кормосмесей. Доказана полная адекватность разработанных математических моделей.

В заключении сформулированы основные научные результаты работы, рекомендации по их применению, описана их новизна и практическая значимость.

В приложении представлены имитационные модели, реализованные в математическом пакете *MatLab Simulink* и акты внедрения результатов работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

По результатам проведенных в диссертационной работе теоретических и экспериментальных исследований сформулированы следующие результаты:

1. Предложена структура и алгоритмическое обеспечение автоматизированного комплекса весового многокомпонентного дозирования сыпучих материалов с частотно-регулируемым электроприводом, обеспечивающих высокую производительность и требуемую точность дозирования.
2. Разработана математическая и имитационная модели частотно-регулируемого электропривода в составе автоматизированного комплекса дозирования сыпучих материалов с учётом изменения высоты «падающего столба» в бункер дозатора. Адекватность результатов имитационного моделирования доказана путем сравнения с реальным физическим процессом при полностью идентичных условиях.
3. Разработан алгоритм сигнальной адаптации на основе статистических данных для управления электроприводом автоматизированного комплекса дози-

рования сыпучих материалов, который позволяет уменьшить ошибку дозирования примерно в 2,5 раза.

4. Совместное использование алгоритмов коррекции ошибки дозирования на основе статистических данных и компенсации ошибки, вызванной весом падающего столба, обеспечивает максимальную точность системы. Применение разработанных алгоритмов позволяет увеличить точность дозирования в 7 раз, а итоговая ошибка дозирования равна 2,7%, что соответствует техническому регламенту приготовления кормосмесей.
5. Для уменьшения влияния массы «падающего столба» на точность дозирования определена последовательность использования компонентов рецепта, которая заключается в первоочередном подключении шнековых питателей, обеспечивающих поступление в бункер-дозатор материала с наибольшей массой.
6. Разработан аппаратно-программный автоматизированный комплекс дозирования сыпучих материалов для проведения научных исследований и выполнения лабораторных занятий в процессе подготовки специалистов.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Букреев В.Г. Система управления технологическим процессом дозирования и смешивания компонентов комбикормов / Букреев В.Г., Гусев Н.В., **Ляпушкин С.В.** // Известия вузов. Электромеханика, 2006. – № 3 – С. 72-74.

2. Ляпушкин С.В. Управление электроприводом шнекового питателя / **Ляпушкин С.В.**, Гусев Н.В. // Известия вузов. Электромеханика, 2009. – № 6 – С. 65-68.

3. Арсентьев О.В. Алгоритм адаптивной работы автоматической системы дозирования сыпучих материалов на основе статистических баз данных/ Арсентьев О.В., **Ляпушкин С.В.**, Гусев Н.В. // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2012 – № 11 – С. 181-186.

Публикация в базе Scopus

4. Bukreev V. G., **Lyapushkin S. V.**, Gusev N. V. Accuracy Enhancement of Electrotechnical System for Bulk Material Batching (Article number 01025) // MATEC Web of Conferences. – 2014 – Vol. 19, Article number 01017. – P. 1-4.

Публикации в других изданиях по теме диссертации

5. Гусев Н.В. Система управления многодвигательным электроприводом в системе дозирования сыпучих материалов / Гусев Н.В., Букреев В.Г., **Ляпушкин С.В.** // Электромеханические преобразователи энергии: международная научно-техническая конференция – Томск, 20-22 октября 2005. – Томск: Изд. ТПУ, 2005. – С. 260-261.

6. Ляпушкин С.В. Автоматизированная система дозирования сыпучих материалов / Ляпушкин С.В., Овчинников Д.Н. // Современная техника и технологии: Труды XII Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых – Томск, 27-31 марта 2006. – Томск: ТПУ, 2006. – С. 278-280.

7. Ляпушкин С.В. Асинхронный электропривод шнекового питателя / Ляпушкин С.В., Тургенев Д.В. //Современные техника и технологии: Труды XII Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых – Томск, 27-31 марта 2006. – Томск: ТПУ, 2006. – С. 293-295.

8. Гусев Н.В. Комплексная автоматизация технологического процесса дозирования сыпучих материалов / Гусев Н.В., **Ляпушкин С.В.** // XIII международная научно-практическая конференция студентов и молодых ученых «Современная техника и технологии» – Томск, 26-30 марта 2007. – Томск: ТПУ, 2007. – С. 441-442.

9. Ляпушкин С.В. Анализ факторов нестабильности в системе дозирования сыпучих материалов // Электромеханические преобразователи энергии: Материалы международной научно-технической конференции – Томск, 17-19 октября 2007. – Томск: ТПУ, 2007. – С. 164-166.

10. Ляпушкин С.В. Синтез регуляторов системы автоматического дозирования сыпучих материалов / Ляпушкин С.В., Гусев Н.В. // Современные техника и технологии: Сборник трудов XV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных – Томск, 4-8 мая 2009. – Томск: ТПУ, 2009. – С. 443-444.

11. Букреев В.Г. Управление электроприводом шнекового питателя / Букреев В.Г., Гусев Н.В., **Ляпушкин С.В.** //Электромеханические преобразователи энергии: Материалы IV Международной научно-технической конференции – Томск, 13-16 октября 2009. – Томск: ТПУ, 2009. – С. 300-304.

12. Букреев В.Г. Автоматизация процесса дозирования сыпучих материалов / Букреев В.Г., **Ляпушкин С.В.**, Гусев Н.В. // Инновационные технологии атомной энергетики и промышленности: Сборник статей, посвященный 50-летию Северской государственной технологической академии, 2009. – С. 86-89.

13. Гусев Н.В. Статистические методы управления технологическим процессом дозирования сыпучих грузов/ Гусев Н.В., Гнеушев В.В., **Ляпушкин С.В.** // Электромеханические преобразователи энергии: материалы V Юбилейной международной научно-технической конференции, посвященной памяти Г.А. Сипайлова, Томск, 12-14 Октября 2011. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011 – С. 216-219.

14. Гусев Н.В. Алгоритмы повышения точности в системе дозирования сыпучих материалов/ Гусев Н.В., Букреев В.Г., Нечаев М.А., **Ляпушкин С.В.** // Электромеханические преобразователи энергии: материалы VI международной научно-технической конференции. – Томск: Изд-во ТПУ, 2013 – С. 161-165.

15. Гусев Н. В. Повышение точности электротехнического комплекса дозирования сыпучих материалов / Гусев Н. В., Букреев В. Г., **Ляпушкин С. В.** // Интеллектуальные энергосистемы: материалы II Международного молодежного форума: в 2 т., Томск, 6-11 Октября 2014. – Томск: РауШ мбх, 2014 – Т. 2 – С. 48-52.

Патенты и свидетельства о регистрации программ на ЭВМ

16. Букреев В.Г. Автоматическая система дозирования и смешивания сыпучих материалов/ Букреев В.Г., Гусев Н.В., Нечаев М.А., **Ляпушкин С.В.** // Патент на полезную модель № 54179 от 10.06.2006

17. Встроенное программное обеспечение для систем управления электродвигателями: свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2010611104/ Ляпушкин С.В., Гусев Н.В., Каракулов А.С., Саидов В.С.; правообладатель Томский политехнический университет, зарегистр. 5.02.2010.

Личный вклад автора. Одна работа написана автором единолично. В работах, написанных в соавторстве, автору принадлежат: имитационная модель асинхронного электропривода [6,7,10], алгоритм учета влияния падающего столба материала на точность дозирования[1,14,15], структура автоматизированного комплекса дозирования сыпучих материалов[2,3,5,16], структура алгоритма коррекции ошибки дозирования на основе статистических данных [3,4,13], моделирование системы дозирования сыпучих материалов [8,11,12,16], разработка алгоритмов защит [17].