

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

На правах рукописи

Ляпушкин Сергей Викторович

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

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук,
профессор В.Г. Букреев

Томск 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ОБЗОР СИСТЕМ И СПОСОБОВ ДОЗИРОВАНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ.....	11
1.1. Классификация устройств дозирования сыпучих материалов и способов дозирования.....	11
1.1.1. Дозаторы без движущегося рабочего органа.....	15
1.1.2. Дозатор с поступательным движением рабочего органа.....	16
1.1.3. Дозатор с вращательным движением рабочего органа. Барабанные дозаторы	18
1.1.4. Дозаторы с вибрационным движением рабочего органа.....	19
1.2 Структуры автоматизированных комплексов многокомпонентного дозирования сыпучих материалов.....	22
1.3. Автоматизированный комплекс дозирования и смешивания.....	26
компонентов комбикормов	26
Выводы:	34
ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ И ИМИТАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ ЭЛЕМЕНТОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА ДОЗИРОВАНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ	35
2.1. Математическое описание асинхронного двигателя с частотным преобразователем.....	36
2.2. Определение коэффициента передачи шнекового дозатора.....	46
2.3. Математическая модель шнекового дозатора с изменяемыми характеристиками сыпучей среды.....	48
2.4. Модель падающего столба сыпучих материалов.....	58
2.5. Имитационная модель электромеханической системы дозирования сыпучих материалов	62
2.6. Выводы	66
ГЛАВА 3. СИНТЕЗ УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ В СИСТЕМЕ ДОЗИРОВАНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ.....	67
3.1. Способы управления частотно-регулируемым электроприводом дозирования сыпучих материалов.....	67
3.2. Методика синтеза цифрового регулятора веса в.....	70
электромеханической системе.....	70
3.3. Синтез регулятора веса на основе модульного оптимума	73
3.4. Алгоритм частотно-регулируемого асинхронного электропривода в технологии производства комбикормов.....	74
3.5. Алгоритм формирования задания электропривода в системе	78

дозирования сыпучих материалов	78
3.6. Алгоритм коррекции ошибки, вызванной массой «падающего столба» материала	82
3.7. Методика проектирования систем многокомпонентного дозирования .	90
3.8. Выводы	94
ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ ДОЗИРОВАНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ	95
4.1. Структура испытательного стенда дозирования сыпучих материалов	95
4.3 Дозатор с конвейером бесстержневого типа СТ-55.....	102
4.4.1 Преобразователь частоты Danfoss VLT Micro Drive FC 51	103
4.4.2 Модуль микроконтроллера RTU188-BS фирмы Fastwel	105
4.4.3 Модуль релейной коммутации TBR8	108
4.4.3.1 Назначение модуля релейной коммутации TBR8	108
4.4.3.2 Технические данные модуля релейной коммутации TBR8 ..	108
4.4.3.3 Устройство и работа платы	109
4.4.4. Тензодатчик серии С	113
4.5. Результаты экспериментальных и теоретических исследований.....	115
4.6. Выводы	121
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	122
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	123

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Автоматические системы дозирования сыпучих материалов широко применяются в строительных, пищевых и фармацевтических областях промышленности для приготовления различных смесей. Главным 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.

В развитие систем управления электроприводов автоматизированных объектов управления общепромышленными механизмами внесли существенный вклад отечественные и зарубежные ученые: 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 задача повышения эффективности управления автоматизированным электротехническим комплексом дозирования сыпучих материалов, так как ее решение позволит существенно увеличить его производительность и снизить неправильную дозировку особо ответственных, небольших по объему, но дорогостоящих компонентов. Необходимое в современных условиях качество комбикорма (ГОСТ Р 50257-92), предъявляет высокие требования к составу каждого компонента кормосмеси и к выполнению рецепта конечного продукта с требуемой точностью. Таким образом, разработка и исследование электротехнического комплекса автоматизированного весового дозирования сыпучих материалов с частотно-регулируемым электроприводом, обеспечивающим повышенную точность дозирования при максимальной производительности, является актуальной задачей и позволит обеспечить выполнение повышенных требований 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 нестабильности 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 *Simulink MatLab*.

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 массы «падающего столба» 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:

- алгоритмы управления электротехническим комплексом с общим частотным преобразователем для асинхронных двигателей различных шнековых дозаторов;
- математическое описание и имитационная модель частотно-регулируемого электропривода шнекового дозатора с различными свойствами дозируемого сыпучего материала;
- 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;
- 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 Меж-

дународная 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 индексированной 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.

Автор выражает искреннюю признательность за неоценимую помощь, оказанную при подготовке и выполнении исследований, коллективу кафедры электропривода и электрооборудования Национального исследовательского Томского политехнического университета, особенно зав. кафедрой ЭПЭО к.т.н. Ю.Н. Дементьеву, к.т.н. С.Н. Кладиеву, к.т.н. Л.С. Удугу, Г.В. Родионову.

Автор выражает благодарность сотрудникам кафедры ЭПЭО, под руководством проф. В.Г. Букреева, к.т.н. Н.В. Гусеву, к.т.н. Нечаеву, к.т.н.

Краснову, принимавшим участие в разработке «Автоматизированного комплекса дозирования и смешивания компонентов комбикормов» для ЗАО «Сибирская аграрная группа», где были внедрены результаты диссертационной работы.

Автор выражает благодарность своему научному руководителю д.т.н. профессору В.Г. Букрееву за определение направления исследований и методическую помощь в работе.

ГЛАВА 1. ОБЗОР СИСТЕМ И СПОСОБОВ ДОЗИРОВАНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

1.1. Классификация устройств дозирования сыпучих материалов и способов дозирования

Современное развитие оборудования в сфере приготовления комбикормов ставит задачу организовать процесс производства с меньшим количеством единиц оборудования, меньшей протяженностью транспортных линий и, соответственно, снижение энергопотребления. Также обязательным условием является высокое качество выпускаемой продукции, эксплуатационная надежность оборудования при возрастающем уровне его автоматизации и обеспечение безопасности производства и комфортных условий труда для персонала.

Качество конечного продукта в первую очередь зависит от точности дозирования компонентов кормовых смесей. Сыпучие материалы очень трудно точно дозировать вручную, поэтому на производствах применяются различные типы дозаторов.

К настоящему времени разработано множество конструкций дозирующих устройств. Это связано с тем, что материалопоток обладает широким диапазоном физико-механических и технологических характеристик; кроме того, к оборудованию часто предъявляются специфические требования в зависимости от особенностей процесса.

Классификацию типов дозаторов можно провести по трем признакам (рис. 1.1):

- по структуре работы цикла;
- конструктивным признакам;
- принципу работы.

По структуре рабочего цикла можно выделить дозаторы непрерывного действия и дозаторы дискретного действия.

Дозаторы весовые непрерывного действия (ВНД) предназначены для автоматического воспроизведения заданных значений массы сыпучих материалов в единицу времени (производительности), транспортируемых конвейером, поступающих из приемной формирующей воронки в технических потоках различных отраслей промышленности, сельского хозяйства и торговли.



Рис. 1.1. Классификация устройств дозирования

Принцип действия дозатора основан на преобразовании деформации упругих элементов весоизмерительных тензорезисторных датчиков, возникающей под действием силы тяжести транспортируемого груза, в аналоговый электрический сигнал, изменяющийся пропорционально массе груза, а также на преобразовании линейной скорости транспортной ленты в пропорциональный ей частотный сигнал. Далее аналоговый электрический сигнал с весоизмерительных датчиков и датчика скорости поступает в весоизмерительный прибор. Значения производительности дозатора, скорости ленты и сум-

марной массы продукта индицируются на весоизмерительном приборе, на передней панели которого размещена клавиатура управления.

Дискретные дозаторы подают материал равными порциями через заданные промежутки времени. В данном случае контролировать количество дозируемого материала можно путем регулирования количества порций в единицу времени или объема самой порции. Этот тип дозаторов является менее точным, но обладает такими преимуществами, как простота обслуживания и надежность при работе в тяжелых условиях.

В основном различаются три вида дозирования:

- объемное;
- весовое;
- массовое.

Объемные дозаторы. Устройства этого типа предназначены для работы с жидкими (иногда – газообразными) веществами. Данный тип дозаторов удобен в эксплуатации, долговечен и надежен, однако обладает недостаточной точностью измерений при работе с некоторыми видами продукции [9].

Весовые дозаторы. Оптимальное решение для дозирования сыпучих материалов с фракциями любых размеров, а также жидкостей. Популярность этих устройств объясняется их универсальностью, оптимальной точностью и большой производительностью. Тензометрические весоизмерительные устройства, оснащенные дозаторами этого типа, необычайно удобны в эксплуатации – процессы взвешивания и дозирования полностью автоматизированы, управление весами сводится к манипулированию устройством загрузки. Единственным недостатком весовых дозаторов является сравнительно низкая скорость их работы [9].

Массовые дозаторы. Эти дозаторы могут одинаково успешно применяться для работы с твердыми, сыпучими и вязкими веществами. Они находят себе применение в самых разных отраслях промышленности. Массовые дозаторы сочетают в себе надежность, точность измерений и относительно высокую скорость работы [9].

Классификация дозирующих устройств по конструктивным признакам является самой обширной. Наиболее существенной в этом случае является классификация по виду движения и типу рабочих органов дозирочных устройств.

На классификацию дозирующего оборудования по конструктивным признакам большое влияние оказывают физико-механические свойства материала. В первую очередь это: размер частиц, насыпная плотность, текучесть, адгезия.

Средний размер частиц сыпучих материалов классифицируется следующим образом:

- кусковые ($d > 10$ мм);
- крупнозернистые ($d = 2 \dots 10$ мм);
- мелкозернистые ($d = 0,5 \dots 2,0$ мм);
- порошкообразные ($d = 0,05 \dots 0,50$ мм);
- пылевидные ($d < 0,05$ мм).

Для питателей, применяемых в процессе приготовления комбикормов, характерна работа с кусковыми, крупнозернистыми, мелкозернистыми материалами. Также немаловажным фактором при выборе питателя является текучесть материала. Она зависит от гранулометрического состава, формы и размера частиц, коэффициента внутреннего трения, влажности. Текучесть сыпучих материалов определяет многие конструктивные особенности дозирующих устройств, Она влияет на продолжительность операции заполнения и опорожнения смесителей.

Следующий критерий, оказывающий влияние на классификацию дозаторов по конструктивному принципу, – это насыпная плотность. Данный параметр зависит от размера составляющего материалотока частиц, их средней плотности, влажности, плотности укладки частиц в слое. Плотность не остается постоянной даже при покое сыпучего материала. Под влиянием вибраций стенок сосуда сыпучий материал со временем уплотняется, и его насыпная плотность достигает некоторого предельного значения. В процессе

движения, перемещения, смешения, наоборот, происходит разрыхление материала. Насыпная плотность при этом уменьшается, приближаясь к предельному значению. По величине насыпной плотности различают сыпучие материалы: легкие (до 600 кг/м^3), средние ($600 \dots 1100 \text{ кг/м}^3$), тяжелые ($1100 \dots 2000 \text{ кг/м}^3$), весьма тяжелые (более 2000 кг/м^3). При дозировании кормовых смесей насыпная плотность соответствует значению для средних и легких сыпучих материалов [4].

1.1.1. Дозаторы без движущегося рабочего органа

К дозаторам данного типа относят гравитационные и пневматические питатели, служащие для фасовки легкосыпучего несводообразующего продукта: крупнозернистых, мелкозернистых материалов, семян, зерна, бакалеи, песка, сахара, пеллет, гранул, щебня, гальки, сухих смесей в мешки весом любого диапазона.

В частном случае пневматический дозатор (рис. 1.2) содержит резервуар *1* с верхней камерой *2*, в нижней или донной части которой установлено псевдоожижающее устройство в форме псевдоожижающей стенки *3* из «парусины», и с нижней камерой, которая соединяется через трубу *5* с источником воздуха [5]. Резервуар снабжен впускным отверстием *6* для подачи порошкообразного материала из питающего танка или загрузочной воронки *8* в верхнюю камеру *2* и выпускным отверстием *7* для разгрузки камеры *2*. Между питающим танком *8* и резервуаром *1* образован, по меньшей мере один псевдоожижающий канал *9*, снабженный псевдоожижающей стенкой или псевдоожижающей «парусиной» *11*, которая соединяется с источником подачи воздуха через трубу *12*. Заполнение и опорожнение камеры *2* осуществляется с помощью соленоидных клапанов *13*, *14*, которые располагаются в трубе *3* для резервуара *1* и в трубе *12* для канала *9* соответственно. Режим работы клапанов регулируется с помощью регулятора PLS или процессора таким образом, чтобы воздух подавался в канал *9* и резервуар *1* в соответствии с предпочтительной программой относительно длительности и частоты.

В общем случае данное оборудование представляет собой бесконечную транспортную ленту (цепь – в случае пластинчатого питателя), натянутую между двумя вращающимися барабанами (рис. 1.3). Подобные питатели позволяют организовать непрерывную подачу материала для нужд технологического процесса.

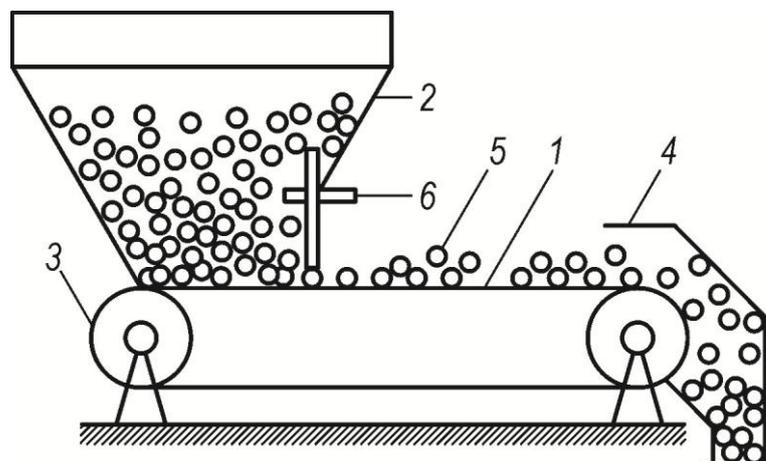


Рис. 1.3. Дозатор с поступательным движением рабочего органа

Питатель работает следующим образом: транспортирующая лента *1* располагается под воронкой приемного бункера *2* так, чтобы между конвейером и бункером оставался необходимый для прохода нужного количества материала зазор. Транспортная лента приводится в движение барабаном *3* и ссыпает материал по лотку *4*.

Производительность данного типа дозаторов регулируется путем изменения скорости вращения ведущего барабана или величины слоя, находящегося на транспортирующей ленте. Для формирования нужной высоты слоя дозируемого материала используется шиберная заслонка [6].

1.1.3. Дозатор с вращательным движением рабочего органа. Барабанные дозаторы

Барабанный дозатор с лопастной насадкой (рис. 1.4) используется для порционной и непрерывной подачи порошкообразных материалов [6]. При вращении барабана-накопителя материал захватывается лопастями, поднимается вверх и сыпается в приемный лоток. За один оборот барабана с каждой лопасти сыпается определенный объем материала.

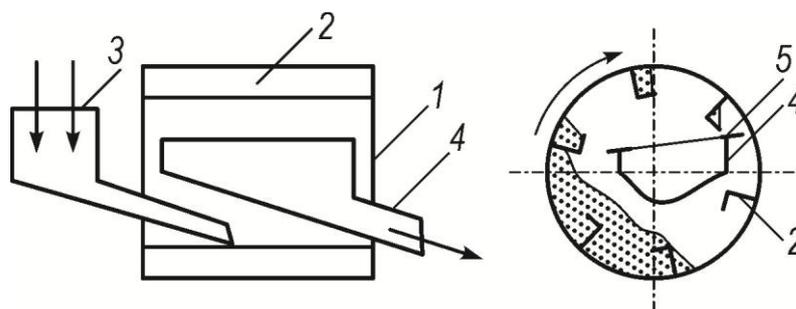


Рис. 1.4. Барабанный дозатор с лопастной насадкой

Число лопастей, конструкция крышки приемного лотка и его положение могут быть подобраны так, чтобы в лоток одновременно сыпался материал только с одной лопасти (порционная подача) либо с двух (непрерывная подача).

Шнековые дозаторы

В общем случае подобные дозаторы представляют собой шнек, заключенный в кожух, и используются для подачи таких материалов, как порошки, зернистые материалы, которые не подвергаются измельчению (См. рис. 1.5). Рабочий орган этого типа может располагаться вертикально, горизонтально или наклонно. На практике также встречаются дозаторы с несколькими шнеками. В целях поддержания однородности потока используются шнеки с переменным шагом, который уменьшается в сторону разгрузки. В тех случаях, когда существует вероятность опрессовывания материала во внутреннем пространстве дозатора, применяются шнеки с увеличением шага по направлению движения.

Принцип действия шнекового весового дозатора (рис. 1.5). Четырехшнековый питатель 1 забирает сыпучий материал из бункера и направляет его в расходомер 2. Скорость вращения шнеков можно плавно изменять с помощью управляемого привода, который состоит из асинхронного мотор-редуктора 3 и преобразователя частоты 4. Поток материала попадает в расходомер и скользит вниз по лотку 5, прикрепленному к тензодатчику 6. Электрический сигнал с тензодатчика, пропорциональный весу материала на лотке, поступает в микроконтроллер 7, вычисляющий производительность потока.

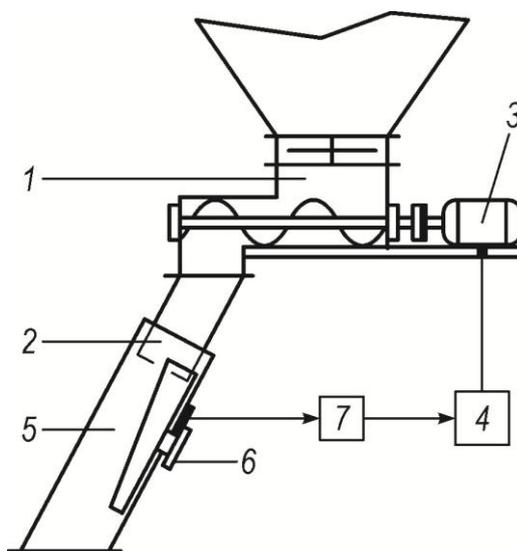


Рис. 1.5. Принципиальная схема шнекового весового дозатора

Измеренная производительность дозатора непрерывно сравнивается с заданной по рецепту, и при обнаружении различий через преобразователь частоты производится постоянная коррекция скорости вращения шнеков. Обычно погрешность дозирования не превосходит 0,5 % от прошедшей через дозатор массы материала [7].

1.1.4. Дозаторы с вибрационным движением рабочего органа

К подобным дозаторам можно отнести лотковые, или, как их еще называют, качающиеся питатели, используемые в основном для дозирования кусковых материалов. В конструктивном отношении качающиеся питатели можно разделить на подвесные и кареточные.

Подвесные качающиеся дозаторы используются для подачи материала с насыпной плотностью до 1 т/м^3 .

Кареточные качающиеся питатели служат для равномерной подачи различных материалов, включая крупнокусковые. Питатели работают по принципу поступательно-возвратных симметричных колебаний с прямолинейной траекторией.

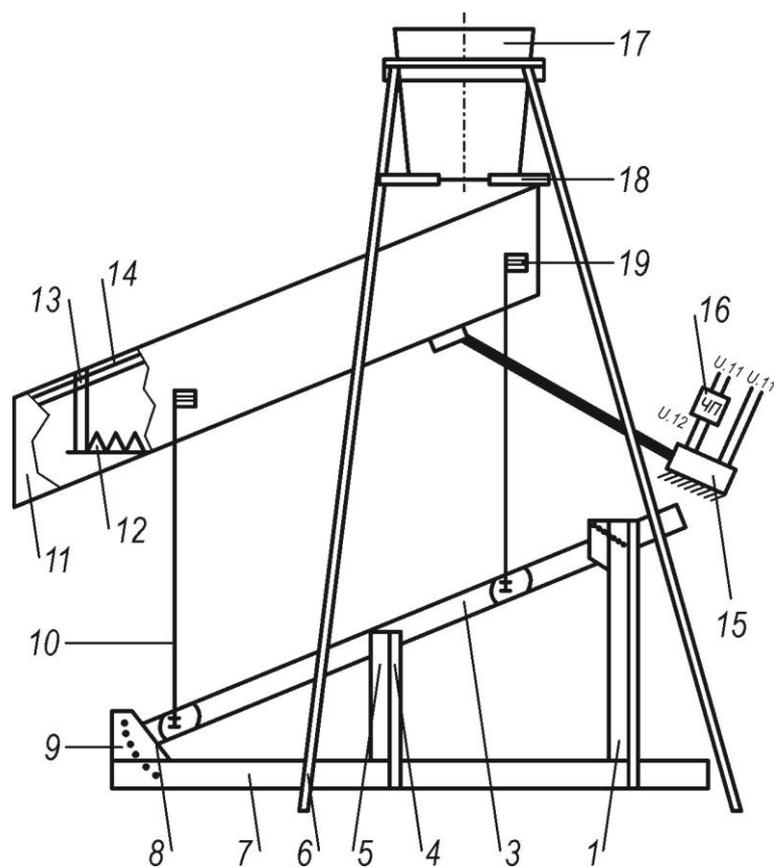


Рис. 1.6. Вибрационный дозатор сыпучих материалов

Рассмотрим вибрационный дозатор [8] (рис. 1.6), содержащий продольные балки 7, жестко соединенные между собой поперечинами, на которых установлены косынки 9, передние стойки 4 и задние стойки 1, продольные уголки 3, перемычки 8, при помощи кронштейнов 19 закрепленные на них рессоры 10, соединяющие поворотную раму 5 с виброжелобом 11. В состав виброжелоба входят перемешивающие элементы 12, стержни 13 и регулировочные пластины 14. На раму 6 установлены бункеры-дозаторы 17, снабженные регулировочными механизмами подачи кормов 18. Составными

частями дозатора являются также однофазный частотный преобразователь 16, вход которого соединен с сетью переменного тока, трехфазный линейный асинхронный двигатель 15. Вторичным элементом трехфазного линейного асинхронного двигателя является тяга 2, жестко связанная с виброжелобом 11 и расположенная со стороны привода. Одна обмотка трехфазного линейного асинхронного двигателя 15 соединена с сетью переменного тока, а две другие включены последовательно и соединены с выходом однофазного частотного преобразователя 16.

Вибрационный дозатор сыпучих кормов работает следующим образом.

Исходные сыпучие корма подаются через бункеры-дозаторы 17 в виброжелоб 11. Виброжелоб 11 снабжен перемешивающими элементами 12, стержнями 13 и регулировочными пластинами 14. Виброжелоб 11 приводится в движение трехфазным линейным асинхронным двигателем 15 и тягой 2, жестко связанной с корпусом виброжелоба и являющейся вторичным элементом трехфазного линейного асинхронного двигателя 15. Под действием вибрации сыпучие корма перемещаются в виброжелобе 11 к первому перемешивающему элементу, на котором благодаря коническим поверхностям происходит разрыхление и первичное смешивание. Далее частицы сыпучей массы, поступающие на конические поверхности на разных расстояниях от осей их оснований, которые параллельны продольным осям желоба, в результате соприкосновения с конусами отражаются с различными скоростями и в различных направлениях, что способствует интенсификации смешивания. После этого корм падает с зубчатой составляющей перемешивающего элемента на днище виброжелоба и перемещается по коническим поверхностям, но уже второго и последующего перемешивающих элементов. Перемешанная масса сходит с разгрузочного желоба [8].

1.2 Структуры автоматизированных комплексов многокомпонентного дозирования сыпучих материалов

В настоящее время разработано большое количество автоматизированных комплексов по приготовлению многокомпонентных смесей. Требования к таким комплексам, определяется такими критериями, как автономность системы, точность дозирования, энергетическая эффективность. Исходя из этих требований, можно провести анализ имеющихся разработок в данной области.

Предложен комплекс для приготовления комбикормов [10], позволяющий получить точное и полное дозирование согласно установленному рецепту компонентов комбикорма и микродобавок с включением компонентов вермикультуры, что приводит к получению высокобелкового сбалансированного корма. Управление комплексом осуществляется системой программируемого управления с ЭВМ, которая обеспечивает автоматизированное управление дозированием компонентов комбикорма.

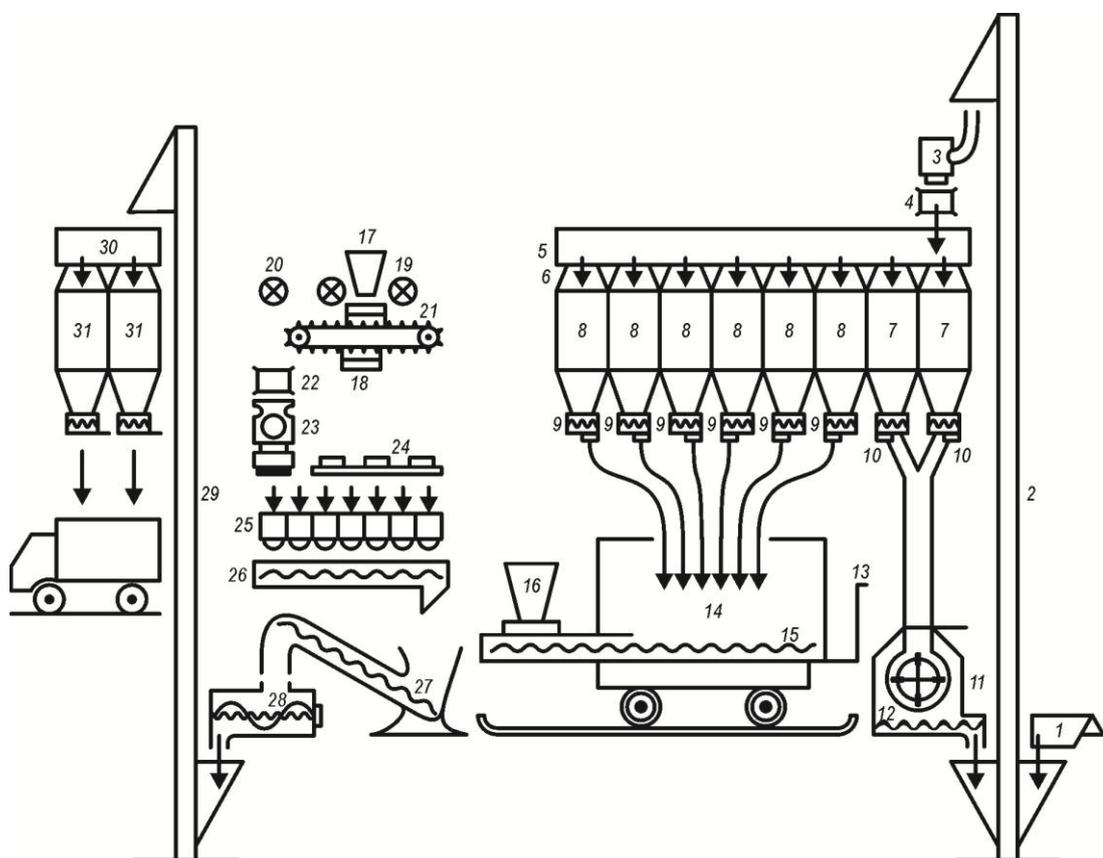


Рис. 1.7. Цех для приготовления комбикорма

Комплекс (рис. 1.7) включает следующие технологические линии:

- приема входного сырья;
- измельчения зернового корма;
- дозирования компонентов корма со шнековыми питателями;
- приготовления и внесения белково-витаминного корма
- внесения микродобавок;
- смешивания компонентов комбикорма;
- разгрузки готового комбикорма;
- программируемого управления с ЭВМ для автоматизированного управления дозированием компонентов комбикорма.

Комплекс для приготовления комбикормов работает в порционном циклическом режиме следующим образом.

Число доз каждого компонента комбикорма задают в соответствии с рецептом приготавливаемого комбикорма и общей массой одной порции комбикорма.

Данная система порционного дозирования имеет существенный недостаток – согласование скорости и положения тележки с частотой вращения шнековых питателей и текущим весом в соответствии с рецептом.

Очередность дозирования материала из бункеров в данной системе имеет приоритетное значение. Технологические задачи производства комбикормов могут приводить к изменению очередности подачи материала в весовую тележку. Это, несомненно, приведет к уменьшению производительности и рентабельности продукции.

Также предлагается реализовывать технологию дозирования и формирования комбикормов с применением промежуточных весовых устройств. Данное устройство [11] для приготовления многокомпонентных смесей содержит (рис. 1.8) постоянно пополняемые бункера запаса 1, 2, 3, 4 компонентов смеси кормов (концентрированных, грубых, сочных, минеральных) с питателями 5, 6, 7, 8 (например, шнековыми), управляемыми выходами 9 ком-

пьютера и работающими на сборный бункер 10 через весовые устройства 11 с открывающимися днищами 12 на датчиках-платформах 13 (например, типа Т70 фирмы «Тензо-М»).

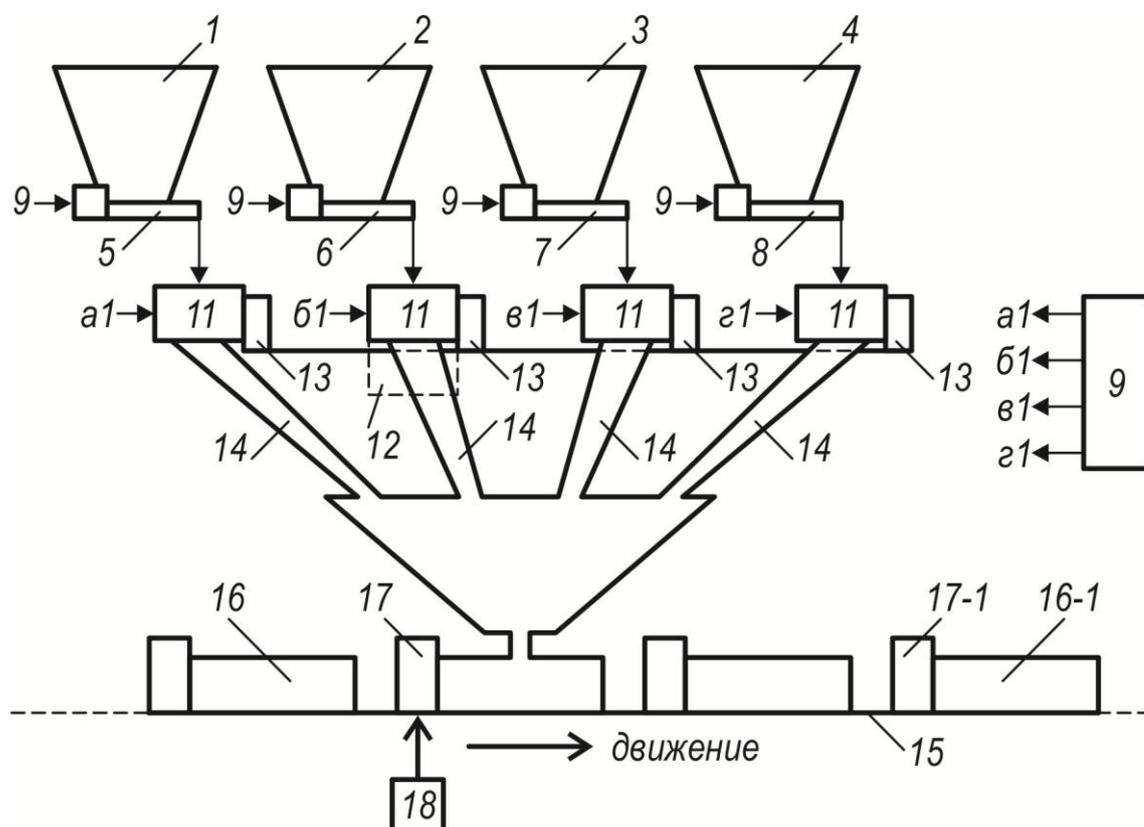


Рис. 1.8. Устройство для приготовления многокомпонентных смесей

Фрагмент весового устройства 11 (рис. 1.9), представляет собой короба 19 (по количеству бункеров 1, 2, 3, 4) с шарнирно открывающимися днищами 12 с противовесами 20 и защелками с противоположной стороны (на рис. 1.9 защелки не показаны). На боковой стороне коробов 19 закреплены электронные платы 21, платы контроллеров ТВ-003/05Д фирмы «Тензо-М». Платформа 22 предназначена для крепления датчиков-платформ 13, а бортик 23 обеспечивает надежное попадание компонент в короба 19.

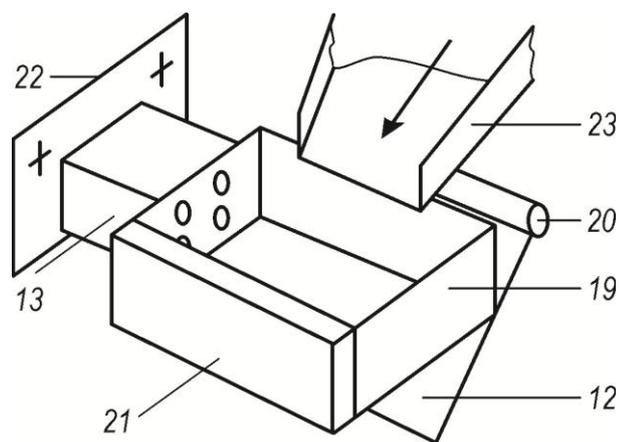


Рис. 1.9. Фрагмент весового устройства

Устройство для приготовления многокомпонентных смесей содержит бункера компонентов с питателями, связанными с управляющими выходами компьютера, сборный бункер, весовые устройства и транспортер и отличается тем, что весовые устройства представляют собой установленные на платформе короба с открывающимися днищами, связанные с компьютером и соединенные через лотки со сборным бункером; транспортер снабжен расположенными на нем кормушками со стикерами штрихкодов, а на месте выгрузки компонентов из бункеров установлен конвейерный сканер, передающий на компьютер информацию со штрихкодов кормушек.

Данная система порционного дозирования имеет усложненную конструкцию (увеличено количество весовых устройств), а также, согласно описанию, формирует одновременную работу всех шнековых питателей. Поскольку в данном случае использовать поочередное дозирование не рационально ввиду наличия индивидуальных весовых устройств, необходимо реализовывать непрерывное формирование смесей с параллельной работой n -м количеством шнеков. В этом случае для каждого дозатора требуется свой собственный модуль управления, а именно преобразователь частоты – асинхронный двигатель, что многократно увеличивает стоимость устройства, его настройку и эксплуатацию.

1.3. Автоматизированный комплекс дозирования и смешивания компонентов комбикормов

Наиболее целесообразной структурой комплекса для производства комбикормов является дозирование всех компонентов комбикорма в общем бункере дозатора при перемещении каждого компонента отдельным шнековым питателем. Управление асинхронными двигателями шнековых питателей производится от одного преобразователя частоты со скалярным управлением.

В зависимости от технологических требований автоматические дозаторы могут применяться для решения следующих задач: поддержание требуемого мгновенного значения расхода; поддержание заданного среднего расхода за определенный промежуток времени; обеспечение суммарного количества материала за определенный цикл [75].

К процессу дозирования сыпучих материалов вообще и компонентов комбикорма в частности предъявляются следующие требования [37], несоблюдение которых приводит к снижению точности дозирования и качества выпускаемой продукции:

- 1) обеспечение требуемого расхода по параметру – регулирование производительности;
- 2) обеспечение величины расхода по параметру в пределах допускаемых отклонений при определенном или произвольном изменении значения параметров материала – точность дозирования;
- 3) обеспечение постоянства расхода по параметру или заданного изменения расхода во времени – устойчивость дозирования.

Функциональная схема асинхронного электропривода шнекового дозатора для автоматического дозирования сыпучих материалов представлена на рис. 1.10. Следует отметить, что конечная смесь может состоять из нескольких различных компонентов. Автоматизация технологического процесса позволяет управление от одного преобразователя частоты (ПЧ) несколькими шнековыми питателями (ШП), число которых не будет превышать количе-

ство каналов блока релейной коммутации (БРК). Дозирование смеси происходит в общем бункере дозатора.

Двигатели задвижек бункера-дозатора и бункера-смесителя, двигатели смесителя и рыхлителя включаются в сеть непосредственно через силовые контакторы фирмы Moeller. Для шнековых питателей требуется плавное регулирование скорости, поэтому их двигатели управляются посредством преобразователя частоты EI-7011 фирмы «Веспер». Поскольку технологический процесс не требует одновременной работы двух и более шнековых питателей, все двигатели подключаются к одному и тому же преобразователю частоты по очереди через коммутатор из силовых контакторов фирмы Moeller. Все автоматические выключатели, смонтированные в шкаф, также выбраны производства фирмы Moeller.

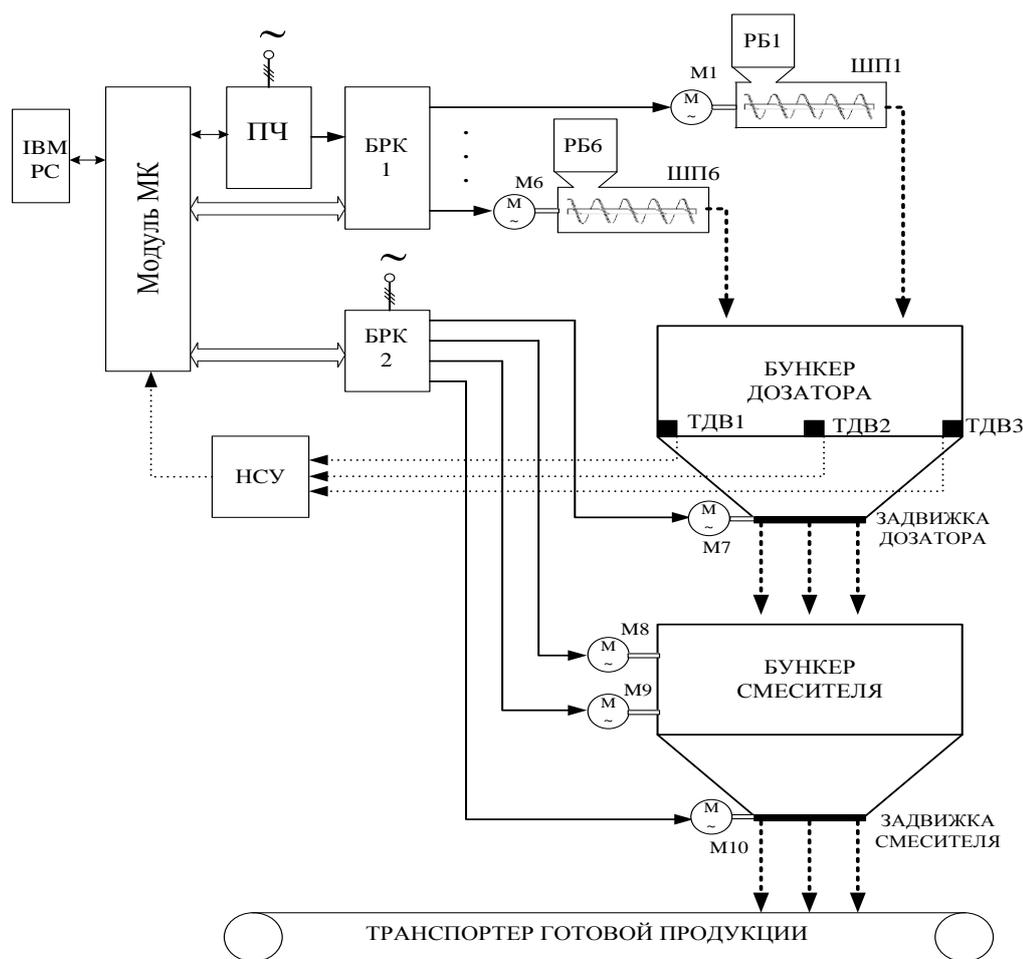


Рис. 1.10. Функциональная схема асинхронного электропривода шнекового питателя для автоматического дозирования сыпучих материалов

Входными дискретными сигналами от технологического оборудования являются сигналы типа «сухой контакт» от концевых выключателей задвижек, датчика блокировки открытия смотрового окна бункера-смесителя, датчика уровня бункера отгрузки готовой продукции, а также датчика движения нории. Кроме того, на контроллер заводятся дискретные сигналы подтверждения включения контакторов. Напряжение питания большинства «сухих контактов» в схеме 24 В.

Данная структура многокомпонентного дозирования отличается от известных тем, что от общего 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 преобразователя частоты позволяет управление асинхронными двигателями шнековых дозаторов разной мощности. Благодаря этому организуется непрерывное смесеприготовление с максимальной производительностью. Также использование одного преобразователя частоты на n каналов дозирования значительно удешевляет расходы на создание проекта и уменьшает расходы на монтаж и обслуживание.

Измерение текущего веса бункера-дозатора осуществляется тремя тензодатчиками типа МК2-1-С3 фирмы «Тензо-М» (г. Москва). Сигналы с тензодатчиков поступают в суммирующий блок, а затем в нормирующий усилитель НУ-420DC, 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.

Применение автоматизированного процесса дозирования позволяет минимизировать ошибку дозирования при оптимальном значении производительности. Также алгоритмы управления шнековыми дозаторами позволяют компенсировать ошибку, вызванную падающим столбом материала.

В состав оборудования по производству комбикормов [12...15] входят:

- шесть расходных бункеров, содержащих дозируемые компоненты (ячмень, горох, отруби пшеничные, пшеница, шрот подсолнечный, концентрат);
- шесть шнековых питателей;
- бункер-дозатор грузоподъемностью до 1000 кг, подвешенный на трех тензодатчиках (рис. 1.11);



Рис. 1.11. Бункер дозатора

- бункер-смеситель, оснащенный асинхронным двигателем смесителя мощностью 15 кВт (рис. 1.12) и двигателем рыхлителя;
- бункер отгрузки готовой продукции с емкостным датчиком уровня;
- транспортная подсистема отгрузки готовой продукции.



Рис. 1.12. Бункер смесителя

В целом объект автоматизации включает в себя 10 асинхронных электродвигателей мощностью от 1,7 до 15 кВт.

Зерновое сырье поступает в расходные бункера посредством автомобильного терминала. Загрузка одного бункера емкостью 50 тонн занимает не менее 3 часов. После загрузки расходных бункеров компоненты поочередно поступают в бункер-дозатор, где в соответствии с заданным рецептом осуществляется дозирование. По окончании процесса дозирования всех компонентов масса поступает в бункер-смеситель. Время смешивания варьируется от 1 до 3 минут в зависимости от выбранного рецепта. Готовая смесь поступает в бункер отгрузки готовой продукции. Отгрузка готовой продукции происходит через автомобильный терминал с производительностью 15 тонн в час.

Разработанная система управления функционирует в трех режимах:

1. Автоматический режим. В этом режиме оператор задает требуемый рецепт из базы рецептов и количество порций (суммарный вес одной порции – до 1000 кг).

2. Ручной режим с автодозированием. Управление осуществляется с использованием виртуального пульта. Оператор обеспечивает запуск дозиро-

вания, открытие и закрытие задвижек дозатора и смесителя, запуск и останов смесителя. Остановка шнековых питателей происходит автоматически при достижении массы дозируемых компонент заданных значений.

3. Ручной режим без автодозирования. Управление процессом дозирования и смешивания осуществляется так же, как и в ручном режиме с автодозированием, но в отличие от него остановка шнековых питателей осуществляется оператором. Данный режим используется для отладки и поиска неисправностей.

Кроме того, система управления ДСКК выполняет следующие функции:

1. анализ текущего состояния исполнительных устройств нижнего уровня управления (преобразователь частоты, силовые контакторы);
2. проверка на перегрузку бункера-дозатора и бункера-смесителя;
3. параллельная работа подсистем дозирования, смешивания и отгрузки;
4. косвенный анализ технологических неисправностей путем проверки загрузки и отгрузки компонентов из бункера-дозатора по датчику веса;
5. автоматический учет и ведение баз данных расхода в производство дозируемых компонент, выхода готовой продукции, расчет остатка компонент на конец дня;
6. учет используемых рецептов за смену;
7. ведение базы рецептов;
8. установка требуемого времени смешивания компонент;
9. отображение состояния расходных бункеров в реальном времени;
10. звуковая сигнализация и блокировка работы исполнительных механизмов при возникновении аварийной ситуации;
11. ведение журнала событий за последние два месяца эксплуатации.

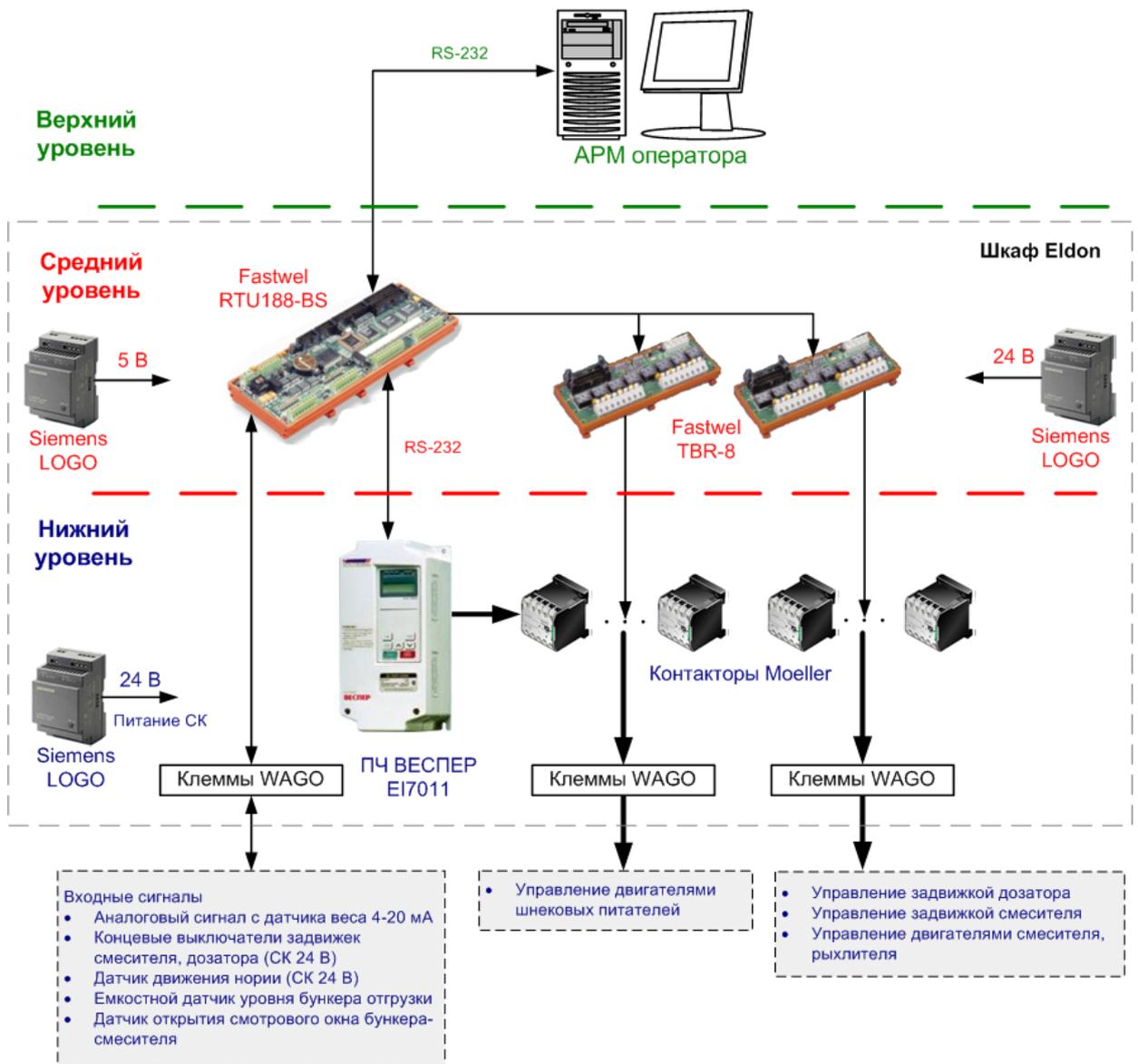


Рис. 1.13. Программно-аппаратный комплекс АСУ ТП

Программно-аппаратный комплекс автоматической системы имеет трехуровневую структуру (рис. 1.13). Нижний уровень содержит датчики и исполнительные механизмы. Средний уровень включает в себя управляющий контроллер и модули релейной коммутации. Верхний уровень представляет собой автоматизированное рабочее место (АРМ) оператора на базе персонального компьютера. Взаимодействие между верхним и средним уровнями осуществляется посредством интерфейса RS-232 на физическом уровне и протоколом обмена, специально разработанным для проекта. Скорость обмена информацией между контроллером и АРМ оператора составляет 9600 бод.

Аналогичным функционалом обладает АСУ ТП дозирования и смешивания компонентов комбикормов и управления транспортно-технологическими маршрутами участка дозирования и смешивания разработки ЗАО «ТеконТрейд» 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 улучшенной диагностике оборудования.

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 трудно обеспечить при работе с одним бункером-дозатором.

Таким образом, 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.

Выводы:

1. Анализ известных технических решений дозирования показывает, что наиболее целесообразным для приготовления кормосмесей является использование шнековых дозаторов, так как они обладают высокой производительностью и последовательным порционным перемещением материала в бункер-дозатор. Эти свойства позволяют спрогнозировать массу падающего столба материала и достичь, таким образом, высокой точности дозирования.
2. Установлено, что для обеспечения полной автоматизации технологического процесса дозирования сыпучих материалов предложено использовать автоматизированный комплекс дозирования с общим преобразователем частоты и бункером-дозатором на тензодатчиках веса.
3. Необходимо разработать эффективные алгоритмы управления электро-техническим комплексом производства комбикормов, который обеспечивает заданную точность по каждому компоненту (3%) смеси в общем бункере-дозаторе при максимальной производительности шнековых дозаторов.

ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ И ИМИТАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ ЭЛЕМЕНТОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА ДОЗИРОВАНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Построение математической модели шнекового дозатора требуется для проверки работоспособности синтезированной системы управления дозировочным комплексом с целью апробации разработанных алгоритмов компенсации ошибки дозирования с учетом особенностей дозируемых материалов, а именно изменений свойств смеси во времени случайным образом и влияния падающего столба материала на ошибку дозирования.

Для построения математической модели электротехнического комплекса дозирования сыпучих материалов повышенной точности используем блочный принцип, суть которого состоит в том, что модель строится из отдельных логически законченных блоков, отражающих суть рассматриваемого процесса [76].

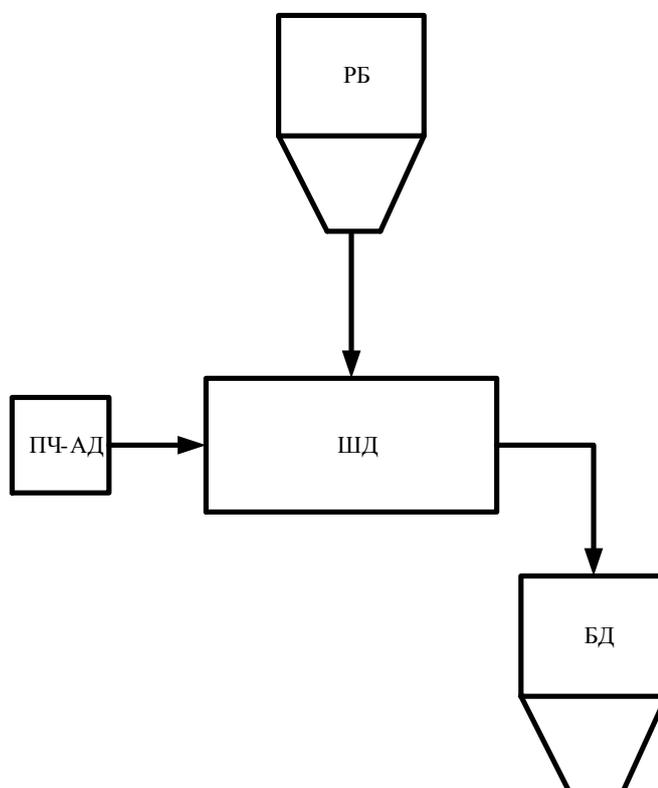


Рис. 2.1. Электротехнический комплекс дозирования сыпучих материалов

На рис.2.1 представлена обобщенная функциональная схема электро-технического комплекса дозирования сыпучих материалов, который состоит из расходного бункера (РБ), шнекового дозатора (ШД), перемещающего материал в бункер дозатора (БД). Микропроцессорное управление ШД осуществляется от системы преобразователь частоты – асинхронный двигатель (ПЧ-АД) со скалярным управлением. Далее приведем математическое описание каждого элемента комплекса.

2.1. Математическое описание асинхронного двигателя с частотным преобразователем

Асинхронный двигатель является основным элементом в системах дозирования со шнековым дозатором, с помощью которого производится управление движением шнека. Для имитационного моделирования системы дозирования сыпучих материалов необходимо выбрать детализацию рассмотрения математической модели асинхронного двигателя.

Математическое описание процессов во всех электромеханических преобразователях основано на составлении и решении дифференциальных уравнений Кирхгофа. Наиболее полно описывает протекающие процессы в асинхронном двигателе трехфазная математическая модель асинхронного двигателя в заторможенной системе координат [25, 26]. Такое представление позволяет исключить из дифференциальной системы уравнений взаимную индукцию от смежных фаз и составляющие ЭДС вращения.

Рассмотрим математическую модель АД в заторможенной системе координат [25].

При моделировании асинхронного двигателя примем ряд допущений:

- величины активных сопротивлений и индуктивностей постоянны;
- магнитная система не насыщена, потери на гистерезис и в стали от вихревых токов отсутствуют;
- распределение индукции в воздушном зазоре – равномерное.

Перечисленные допущения позволяют сформулировать два основных положения:

- распределение потока, созданного обмотками статора и ротора, в воздушном зазоре синусоидальное;
- магнитное поле плоскопараллельное, рабочее поле и поля рассеяния взаимно независимы.

Для общности описания процессов в статорной и роторной цепи используют коэффициенты приведения. Приведение параметров обмоток к одинаковому числу витков позволяет [27, 28, 29]:

- составлять уравнения асинхронного двигателя, в которые не входит число витков в фазе обмотки;
- применять для параметров статора и ротора одну систему базовых величин при приведении к относительным единицам;
- составлять эквивалентные электротехнические схемы замещения.

Уравнения для напряжений фаз статора АД можно представить в виде

$$\begin{aligned} U_{s\alpha} &= r_{s\alpha} \cdot i_{s\alpha} + \frac{d\psi_{s\alpha}}{dt}; \\ U_{s\beta} &= r_{s\beta} \cdot i_{s\beta} + \frac{d\psi_{s\beta}}{dt}; \\ U_{s\gamma} &= r_{s\gamma} \cdot i_{s\gamma} + \frac{d\psi_{s\gamma}}{dt}. \end{aligned} \quad (2.1)$$

Уравнения для напряжений фаз ротора можно представить в виде

$$\begin{aligned} -U_{r\alpha} &= r_{r\alpha} \cdot i_{r\alpha} + \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} + (\psi_{r\beta} - \psi_{r\gamma})\omega_r / \sqrt{3}; \\ -U_{r\beta} &= r_{r\beta} \cdot i_{r\beta} + \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} + (\psi_{r\gamma} - \psi_{r\alpha})\omega_r / \sqrt{3}; \\ -U_{r\gamma} &= r_{r\gamma} \cdot i_{r\gamma} + \frac{d\psi_{r\gamma}}{dt} + (\psi_{r\alpha} - \psi_{r\beta})\omega_r / \sqrt{3}. \end{aligned} \quad (2.2)$$

Потокосцепления статора определяются следующим образом:

$$\begin{aligned}
 \psi_{s\alpha} &= L_{s\alpha} \cdot i_{s\alpha} - \frac{1}{2} \cdot L_m \cdot (i_{s\beta} + i_{s\gamma}) + L_m \cdot (i_{r\alpha} - \frac{1}{2} \cdot i_{r\beta} - \frac{1}{2} \cdot i_{r\gamma}); \\
 \psi_{s\beta} &= L_{s\beta} \cdot i_{s\beta} - \frac{1}{2} \cdot L_m \cdot (i_{s\gamma} + i_{s\alpha}) + L_m \cdot (i_{r\beta} - \frac{1}{2} \cdot i_{r\alpha} - \frac{1}{2} \cdot i_{r\gamma}); \\
 \psi_{s\gamma} &= L_{s\gamma} \cdot i_{s\gamma} - \frac{1}{2} \cdot L_m \cdot (i_{s\beta} + i_{s\alpha}) + L_m \cdot (i_{r\gamma} - \frac{1}{2} \cdot i_{r\alpha} - \frac{1}{2} \cdot i_{r\beta}).
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

Потокосцепления ротора определяются следующим образом:

$$\begin{aligned}
 \psi_{r\alpha} &= L_{r\alpha} \cdot i_{r\alpha} - \frac{1}{2} \cdot L_m \cdot (i_{r\beta} + i_{r\gamma}) + L_m \cdot (i_{s\alpha} - \frac{1}{2} \cdot i_{s\beta} - \frac{1}{2} \cdot i_{s\gamma}); \\
 \psi_{r\beta} &= L_{r\beta} \cdot i_{r\beta} - \frac{1}{2} \cdot L_m \cdot (i_{r\gamma} + i_{r\alpha}) + L_m \cdot (i_{s\beta} - \frac{1}{2} \cdot i_{s\alpha} - \frac{1}{2} \cdot i_{s\gamma}); \\
 \psi_{r\gamma} &= L_{r\gamma} \cdot i_{r\gamma} - \frac{1}{2} \cdot L_m \cdot (i_{r\beta} + i_{r\alpha}) + L_m \cdot (i_{s\gamma} - \frac{1}{2} \cdot i_{s\alpha} - \frac{1}{2} \cdot i_{s\beta}),
 \end{aligned} \tag{2.4}$$

где $U_{s\alpha}, U_{s\beta}, U_{s\gamma}, U_{r\alpha}, U_{r\beta}, U_{r\gamma}, i_{s\alpha}, i_{s\beta}, i_{s\gamma}$ – напряжения и токи по трем осям; $r_{s\alpha}, r_{s\beta}, r_{s\gamma}, r_{r\alpha}, r_{r\beta}, r_{r\gamma}$ – активные сопротивления статора и ротора; $L_{s\alpha}, L_{s\beta}, L_{s\gamma}, L_{r\alpha}, L_{r\beta}, L_{r\gamma}$ – полные индуктивности обмоток статора и ротора; L_m – взаимная индуктивность статора и ротора; $\psi_{s\alpha}, \psi_{s\beta}, \psi_{s\gamma}, \psi_{r\alpha}, \psi_{r\beta}, \psi_{r\gamma}$ – результирующие потокосцепления статора и ротора по осям; ω_r – частота вращения ротора.

Электромагнитный момент, развиваемый машиной, можно представить следующим образом:

$$M_s = p \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot L_m \cdot [(i_{s\alpha} \cdot i_{r\gamma} + i_{s\beta} \cdot i_{r\alpha} + i_{r\beta} \cdot i_{s\gamma}) - (i_{s\alpha} \cdot i_{r\beta} + i_{s\beta} \cdot i_{r\gamma} + i_{r\alpha} \cdot i_{s\gamma})] \tag{2.5}$$

Механические процессы асинхронного двигателя можно описать основным уравнением движения электропривода:

$$M_s - M_c = J_r \cdot \frac{d\omega_r}{dt}. \tag{2.6}$$

Представленное математическое описание асинхронного двигателя наиболее полно характеризует процессы, протекающие в АД, однако использование трехфазной модели асинхронного двигателя возможно при наличии

несимметрии в цепях статора и ротора, аварийных режимах работы АД и подробном исследовании процессов, происходящих в АД [33, 34, 36].

Каждый шнек системы дозирования работает при номинальном режиме работы своего электродвигателя, поэтому возможно вместо трехфазной модели АД использовать упрощенную двухфазную математическую модель. Для построения имитационной модели АД воспользуемся общепринятыми допущениями [32, 33]:

- не учитываются потери в стали;
- рассматриваем трехфазный симметричный режим работы;
- насыщение магнитной цепи АД не учитывается;
- принимаем напряжения на выходе ПЧ строго синусоидальной формы;
- пренебрегаем влиянием силового канала между АД и ПЧ.

Внешний вид двухфазной идеализированной модели АД представлен на рис. 2.1.

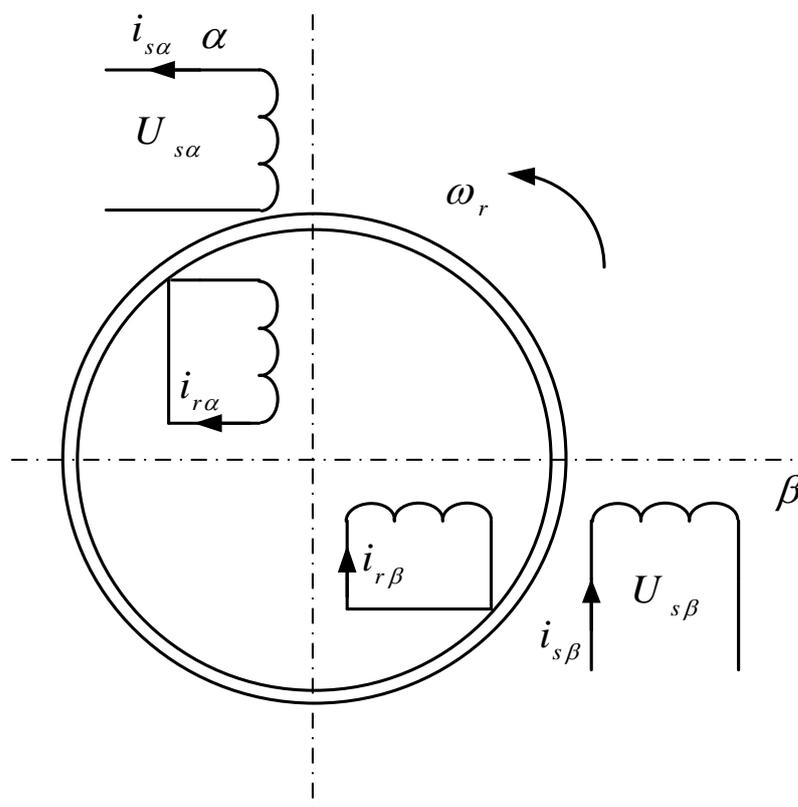


Рис. 2.1. Идеализированная модель двухфазного АД

Согласно этой схеме рассмотрим процессы, которые описывают эту модель АД, при этом будем использовать систему следующих векторных дифференциальных уравнений [27]:

$$\begin{aligned}
 U_s &= R_s I_s + \frac{d\psi_s}{dt}; \\
 U_r &= R_r I_r + \frac{d\psi_r}{dt}; \\
 \psi_s &= L_s I_s + L_m I_r; \\
 \psi_r &= L_r I_r + L_m I_s; \\
 M &= \frac{3}{2} z_p (\vec{\psi}_s \times \vec{I}_s); \\
 \frac{d\omega_r}{dt} &= \frac{1}{J} (M - M_c).
 \end{aligned} \tag{2.7}$$

где $U_s, U_r, I_s, I_r, \psi_s, \psi_r$ – двухэлементные векторы напряжений, токов и потокоцеплений, представленные в ортогональной (двухфазной) системе координат в виде составляющих по координатным осям.

Механические параметры системы представлены следующими переменными: J – момент инерции, ω_r – частота вращения ротора; z_p – число пар полюсов АД; M и M_c – электромагнитный момент и момент сопротивления нагрузки соответственно. Вспомогательная матричная константа j служит для «переворота» компонентов векторных переменных и позволяет упростить форму записи системы уравнений.

В двухфазной системе координат векторы состояния АД имеют вид:

$$\begin{aligned}
 U_s &= \begin{bmatrix} u_{s\alpha} \\ u_{s\beta} \end{bmatrix}, & U_r &= \begin{bmatrix} u_{r\alpha} \\ u_{r\beta} \end{bmatrix}, & I_s &= \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix}, & I_r &= \begin{bmatrix} i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix}, \\
 \psi_s &= \begin{bmatrix} \psi_{s\alpha} \\ \psi_{s\beta} \end{bmatrix}, & \psi_r &= \begin{bmatrix} \psi_{r\alpha} \\ \psi_{r\beta} \end{bmatrix}, & j &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}.
 \end{aligned} \tag{2.8}$$

В нашем случае индексы α и β будут соответствовать компонентам вектора в неподвижной системе координат.

Реальная трехфазная асинхронная машина представляется в виде двухфазной модели, и поэтому для осуществления перехода между составляющими векторов в двухфазных координатах и трехфазной координатной си-

стемы, используются формулы преобразования Кларка (*Clarke Transformation*).

На примере преобразования вектора тока статора I_s рассмотрим связь между составляющими в двухфазных координатах и трехфазной системой (рис. 2.2). Для остальных переменных преобразования будут идентичными.

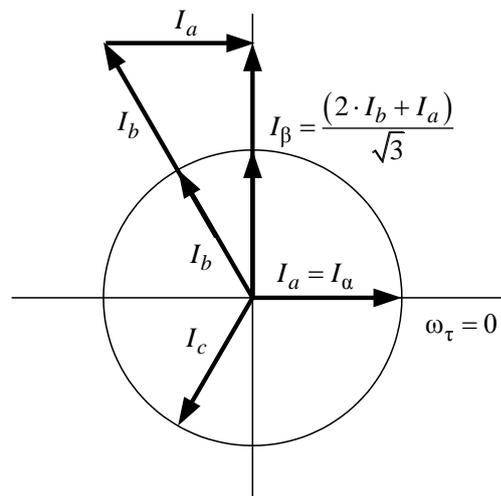


Рис. 2.2. Преобразование Кларка (*Clarke Transformation*)

$$i_{sa} = i_{sa}, \quad i_{s\beta} = \frac{(2i_{sb} + i_{sa})}{\sqrt{3}}, \quad (2.9)$$

где i_{sa} , $i_{s\beta}$ – составляющие вектора тока статора I_s , представленные в двухфазной неподвижной системе координат; i_{sa} , i_{sb} , i_{sc} – фазные токи статора АД, представленные в симметричной трехфазной системе.

Формула для обратного преобразования образуется из (2.9) после выполнения соответствующих математических преобразований.

Система уравнений (2.7) дает большое количество неизвестных, и для уменьшения их числа выполним следующую подстановку, с целью исключить из системы уравнений переменные ψ_s и I_r , оставив ψ_r и I_s . Для этого из третьего и четвертого уравнений системы (2.7) выразим I_r :

$$I_r = \frac{\psi_s - L_s I_s}{L_m}, \quad I_r = \frac{\psi_r - L_m I_s}{L_r}. \quad (2.10)$$

Приравнявая обе части выражений, получаем

$$\psi_s - L_s I_s = \frac{L_m}{L_r} (\psi_r - L_m I_s),$$

из которого теперь выделяем ψ_s :

$$\psi_s = \frac{L_m}{L_r} \psi_r + \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) I_s. \quad (2.11)$$

После этого в первое уравнение системы (2.7) подставляем выражение для ψ_s (2.11):

$$U_s = R_s I_s + \frac{d\psi_s}{dt} = R_s I_s + \frac{L_m}{L_r} \frac{d\psi_r}{dt} + \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) \frac{dI_s}{dt}. \quad (2.12)$$

Во второе уравнение системы (2.7) подставляем I_r :

$$\begin{aligned} U_r &= R_r I_r + \frac{d\psi_r}{dt} - j\omega_r z_p \psi_r = \\ &= R_r \left(\frac{\psi_r - L_m I_s}{L_r} \right) + \frac{d\psi_r}{dt} - j\omega_r z_p \psi_r = \\ &= \frac{d\psi_r}{dt} - j\omega_r z_p \psi_r + R_r \frac{\psi_r}{L_r} - R_r \frac{L_m}{L_r} I_s = \\ &= \frac{d\psi_r}{dt} - \left(j\omega_r z_p + \frac{R_r}{L_r} \right) \psi_r - R_r \frac{L_m}{L_r} I_s. \end{aligned} \quad (2.13)$$

Из (2.7) получаем выражение для $\frac{d\psi_r}{dt}$ и подставляем в (2.12):

$$\begin{aligned} U_s &= R_s I_s + \frac{L_m}{L_r} \frac{d\psi_r}{dt} + \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) \frac{dI_s}{dt} = \\ &= R_s I_s + \frac{L_m}{L_r} U_r + \frac{L_m}{L_r} \left(j\omega_r z_p - \frac{R_r}{L_r} \right) \psi_r + R_r \left(\frac{L_m}{L_r} \right)^2 I_s + \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) \frac{dI_s}{dt}. \end{aligned} \quad (2.14)$$

Окончательно приводим уравнение (2.14) к следующему виду:

$$U_s - \frac{L_m}{L_r} U_r = \left[R_s + R_r \left(\frac{L_m}{L_r} \right)^2 \right] I_s + \frac{L_m}{L_r} \left(j\omega_r z_p - \frac{R_r}{L_r} \right) \psi_r + \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) \frac{dI_s}{dt}. \quad (2.15)$$

Теперь комбинируем вместе (2.13) и (2.15), после чего получаем систему, эквивалентную (2.7), но состоящую только из двух уравнений с двумя неизвестными – ψ_r и I_s . Для АД с короткозамкнутым ротором справедливо $U_r = 0$. Выражение для электромагнитного момента перепишем с использованием (2.11):

$$\begin{cases} U_s = \left[R_s + R_r \left(\frac{L_m}{L_r} \right)^2 \right] I_s + \frac{L_m}{L_r} \left(j\omega_r z_p - \frac{R_r}{L_r} \right) \psi_r + \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) \frac{dI_s}{dt}, \\ 0 = \frac{d\psi_r}{dt} - \left(j\omega_r z_p - \frac{R_r}{L_r} \right) \psi_r - R_r \frac{L_m}{L_r} I_s, \\ M = \frac{3}{2} z_p \frac{L_m}{L_r} (\psi_r \times I_s), \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (M - M_c). \end{cases} \quad (2.16)$$

Для упрощения записи системы уравнений введем дополнительные коэффициенты и перейдем к операторной форме [27].

$$\begin{cases} U_s = R_e I_s + K_r j\omega_r z_p \psi_r - K_r A_r \psi_r + L_e p I_s, \\ 0 = p \psi_r - j\omega_r z_p \psi_r + A_r \psi_r - R_r K_r I_s, \\ M = \frac{3}{2} z_p K_r (\psi_r \times I_s), \\ p \omega_r = \frac{1}{J} (M - M_c), \end{cases} \quad (2.17)$$

где $K_r = \frac{L_m}{L_r}$; $R_e = R_s + R_r \cdot K_r^2$; $L_e = L_s - \frac{L_m^2}{L_r}$; $A_r = \frac{R_r}{L_r}$.

Систему (2.15) перепишем, выразив производные вектора тока и потокосцепления:

$$\begin{cases} p I_s = \frac{1}{L_e} (U_s - R_e I_s - K_r \omega_r z_p j \psi_r + K_r A_r \psi_r), \\ p \psi_r = R_r K_r I_s - A_r \psi_r + \omega_r z_p j \psi_r, \\ M = \frac{3}{2} z_p K_r (\psi_r \times I_s), \\ p \omega_r = \frac{1}{J} (M - M_c). \end{cases} \quad (2.18)$$

Затем систему векторных уравнений (2.18) необходимо представить в скалярном виде, подставив вместо векторов ψ_r и I_s их составляющие по координатам. Векторное произведение в выражении для электромагнитного момента раскроем в соответствии с правилами векторной алгебры. С учетом (2.8) получаем новую систему скалярных уравнений, имеющую следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} p i_{s\alpha} = \frac{1}{L_e} (u_{s\alpha} - R_e i_{s\alpha} - K_r \omega_r z_p j \psi_{r\beta} + K_r A_r \psi_{r\alpha}), \\ p i_{s\beta} = \frac{1}{L_e} (u_{s\beta} - R_e i_{s\beta} - K_r \omega_r z_p j \psi_{r\alpha} + K_r A_r \psi_{r\beta}), \\ p \psi_{r\alpha} = R_r K_r i_{s\alpha} - A_r \psi_{r\alpha} + \omega_r z_p j \psi_{r\beta}, \\ p \psi_{r\beta} = R_r K_r i_{s\beta} - A_r \psi_{r\beta} + \omega_r z_p j \psi_{r\alpha}, \\ M = \frac{3}{2} z_p K_r (\psi_{r\alpha} \cdot i_{s\beta} - \psi_{r\beta} \cdot i_{s\alpha}), \\ p \omega_r = \frac{1}{J} (M - M_c). \end{array} \right. \quad (2.19)$$

Данную систему дифференциальных уравнений в операторном виде (2.19) представим в виде структурной модели [28]. Полученная структурная схема представлена на рис. 2.3, на основе которого была создана имитационная модель в программе *MATLAB Simulink* [36].

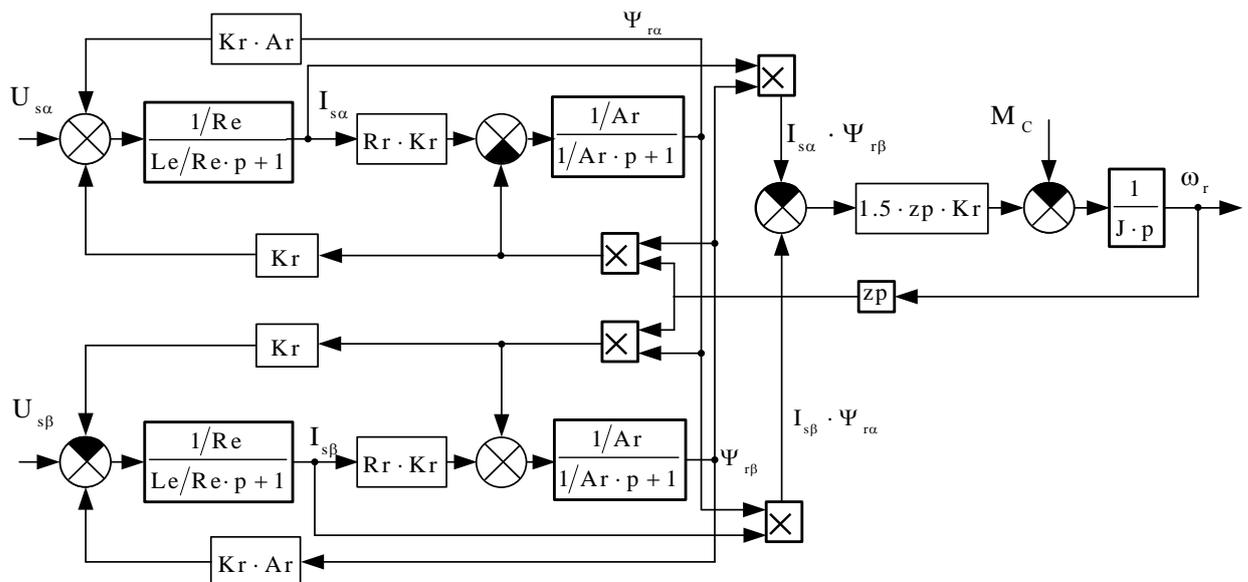


Рис. 2.3. Структурная схема имитационной модели АД при использовании неподвижной системы координат

Полученная имитационная модель построенная на основе структурной схемы (рис.2.3) представлена в приложении П1.

Асинхронные двигатели в системе дозирования сыпучих материалов, а именно в системе приготовления комбикорма, управляются от преобразователя частоты со звеном постоянного тока. Принимая во внимание тот факт, что с точки зрения экономической эффективности и полной автоматизации

технологического процесса дозирования компонентов комбикорма, управление асинхронными двигателями шнековых дозаторов целесообразно осуществлять от общего преобразователя частоты. Общий ПЧ имеет настройки на шесть исполнительных АД шнековых дозаторов с различной производительностью и мощностью. Все двигатели шнеков поочередно подключаются к ПЧ с помощью блока релейной коммутации в соответствии с алгоритмом работы системы дозирования.

Двигатели шнековых дозаторов имеют разную мощность и параметры схемы замещения. Это обстоятельство не позволяет использовать частотный преобразователь с векторным управлением, и управление дозированием осуществляется от преобразователя частоты со скалярным управлением.

Имитационная модель частотного управления асинхронного двигателя шнековых дозаторов разработанная в программе *Simulink Matlab* и изображена на рисунке 2.4.

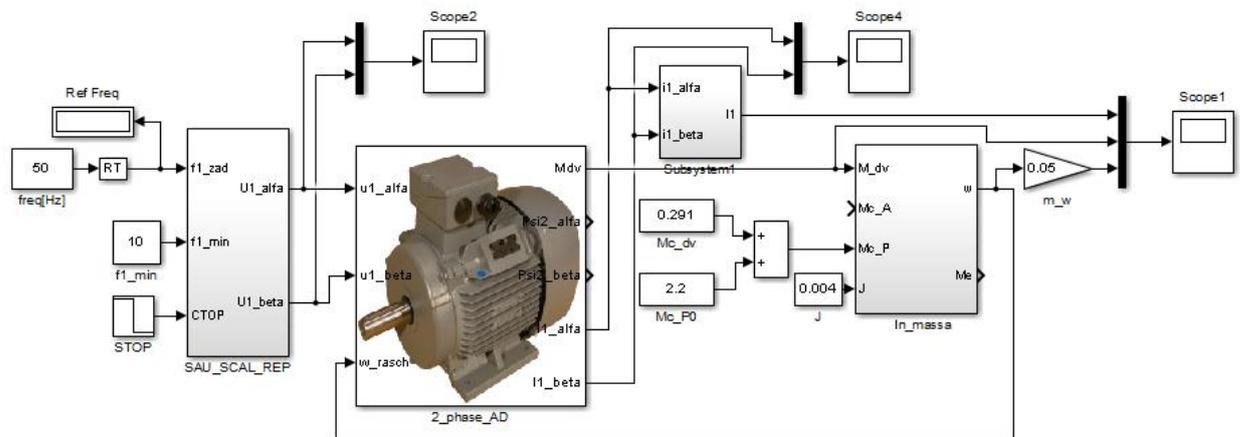


Рис.2.4 Имитационная модель системы ПЧ-АД

На вход подсистемы преобразователя частоты со скалярным управлением поступает сигнал задания с регулятора веса и также постоянное значение минимальной частоты, при котором ПЧ отключается.

На выходе схемы скалярного управления ПЧ (Рис.2.5) формируются два напряжения переменного тока (синусоидальной и косинусоидальной формы):

$$u_{1\alpha} = \sqrt{2} \cdot U_1 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot t) \text{ и } u_{1\beta} = \sqrt{2} \cdot U_1 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot t)$$

Амплитуда U_1 формируется согласно закону $\frac{U_1}{f_1} = const$ при изменении частоты задания преобразователя.

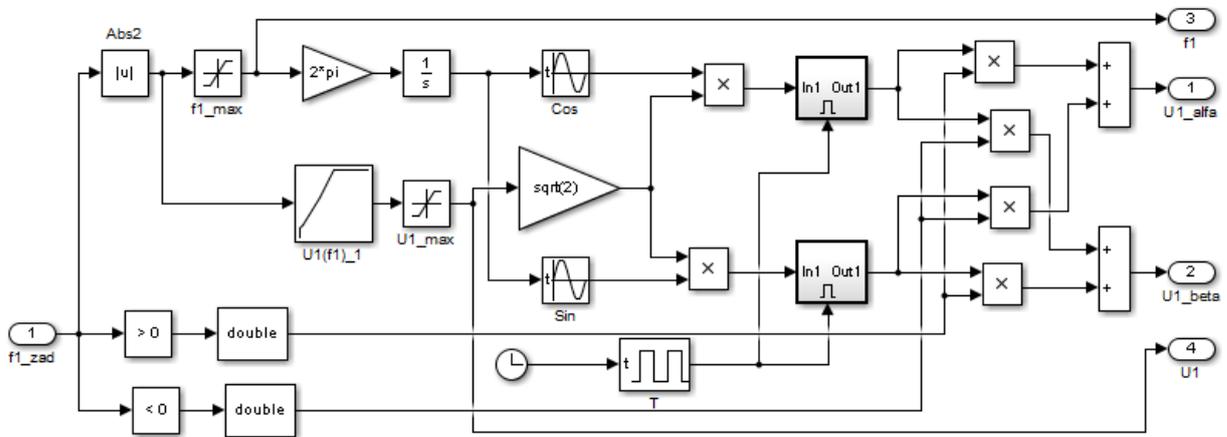


Рис.2.5 Имитационная модель преобразователя частоты со скалярным управлением

Сигналы напряжения в неподвижной системе координат, поступающие на вход электродвигателя, предварительно квантуются по времени с постоянным шагом. Постоянный период квантования $T_e = \frac{1}{f_{\phi \dot{\alpha}}} = \frac{1}{5000} = 0.2 \text{ мс}$ соответствует частоте квантования ШИМ.

2.2. Определение коэффициента передачи шнекового дозатора

Для имитационного моделирования работы шнекового дозатора необходимо определить коэффициент передачи шнека [1, 2, 37].

Так как экспериментальное исследование разработанных алгоритмов проводится на опытной установке для дозирования гранул полипропилена, то коэффициент шнекового дозатора и имитационные модели разработаны для дозирования этого сыпучего материала.

Параметры шнекового питателя экспериментальной установки:

$S = 32 \text{ мм}$ – шаг винта;

$d = 22 \text{ мм}$ – диаметр вала;

$D = 38 \text{ мм}$ – внешний диаметр шнека;

$n = 149 \text{ об/мин}$ – скорость вращения;

направление шнека – горизонтальное.

Величина пассивной поверхности на шнеке [1] (Рис. 2.6)

$$f = \left(\frac{S}{4 \cdot \pi \cdot \cos \lambda_0} \right)^2 \cdot (\sin (2 \cdot \lambda_0) - 2 \cdot \lambda_0 \cdot \cos (2 \cdot \lambda_0)), \quad (2.20)$$

где λ_0 – угол трения материала о поверхность шнека (табл. 2.1); S – шаг винта шнека, м.

Таблица 2.1

Материал	Насыпная объемная масса, кг/м ³	Угол трения материала о поверхность, град.
Полипропилен	450	40

$$\text{Площадь витка винта} \quad F = \pi \cdot R^2, \quad (2.21)$$

где R – радиус винта.

Для горизонтального шнека пассивная область целиком размещается на шнеке при условии $S/D \leq 1$. В нашем случае это условие удовлетворяется, так как $S/D = 0,462$. Следовательно, применима формула для коэффициента производительности [1]:

$$\varphi_n = 0,87 \cdot [1 - 0,237 \left(\frac{S}{D} \right)^2] = 0,87 \cdot [1 - 0,237 \left(\frac{3,2 \cdot 10^{-2}}{3,8 \cdot 10^{-2}} \right)^2] = 0,724. \quad (2.22)$$

Секундная производительность

$$Q^c = \frac{S}{D} \cdot R^3 \cdot \omega \cdot \varphi_n \quad (\text{м}^3/\text{с}), \quad (2.23)$$

где ω – скорость вращения шнекового питателя (рад/с).

Производительность шнекового питателя прямо пропорциональна скорости вращения шнека, а коэффициент шнекового питателя – это коэффициент пропорциональности между скоростью и накоплением массы в бункере, который может быть рассчитан по формуле

$$K_{\text{ш}} = \frac{S}{D} \cdot R^3 \cdot \varphi_n \cdot \gamma_0 = \frac{3,2 \cdot 10^{-2} \cdot (1,9 \cdot 10^{-2})^3 \cdot 0,724 \cdot 450}{3,8 \cdot 10^{-2}} = 0,0019, \quad (2.24)$$

где γ_0 – насыпная объемная масса материала.

2.3. Математическая модель шнекового дозатора с изменяемыми характеристиками сыпучей среды

В технике к сыпучим материалам относятся материалы, которые допускают транспортирование и хранение навалом. Термин «сыпучие» используют для большинства материалов, состоящих из частиц определенных размеров: пылевидных, порошкообразных, зернистых и кусковых. Объем сыпучего материала складывается из различных по форме и размерам объемов соприкасающихся твердых частиц и пустот между ними, заполненных воздухом или водой. Частицы, образующие структуру (скелет) сыпучего материала, имеют друг с другом различную связь, зависящую от размера частиц, их формы, влажности и т. д. Как правило, большинство сыпучих материалов имеют сложный фракционный состав и представляют собой совокупность частиц со случайным неупорядоченным расположением.

В системах дозирования, когда основным критерием является точность дозирования, шнековые дозаторы имеют неоспоримое преимущество перед другими видами транспортировки сыпучих материалов [37...39]. Необходимая точность дозирования достигается за счет регулирования скорости в момент останова шнека. Синтез системы управления ведется с учетом известной информации об объеме порции материала, перемещаемого в бункер дозатора. Однако приоритет точности дозирования сказывается на производительности шнекового питателя, которая прямо пропорциональна скорости вращения шнека. Поэтому при настройке системы регулирования необходимо добиться оптимального соотношения точности дозирования и производительности шнекового питателя. На этапе проектирования, учет коэффициентов характеризующих точность дозирования и производительность необходимо проводить на математической модели.

Производительность шнекового дозатора находится по формуле [1]

$$Q = \frac{60 \cdot \pi \cdot D^2}{4} \cdot S \cdot n \cdot c \cdot \gamma \cdot \Psi \quad (2.25)$$

где D – наружный диаметр винта шнека, м; S – шаг винта шнека, м; n – угловая скорость вращения вала, об/мин; c – коэффициент, учитывающий влияние угла наклона оси шнека к горизонту на его производительность; γ – насыпного веса материала, кг/м³; Ψ – коэффициент наполнения корпуса шнека.

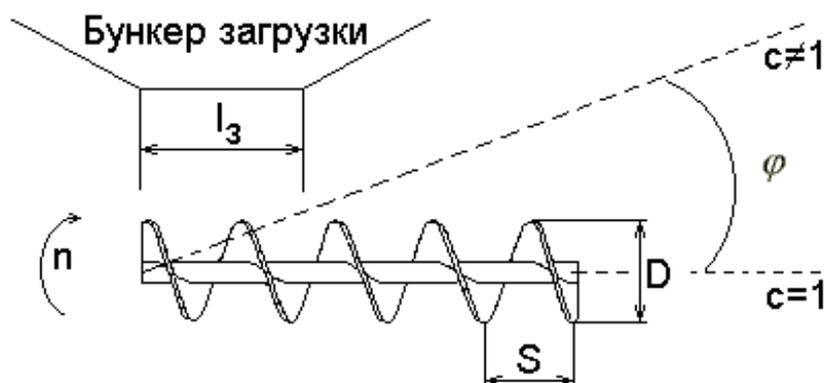


Рис. 2.6 Параметры шнека

Производительность ШД пропорциональна: диаметру винта D , шагу винта S , угловой скорости вращения шнека n , а также зависит от параметров транспортируемого материала, коэффициента заполнения шнека Ψ и насыпного веса γ . На производительность шнекового дозатора влияет и пространственное положение шнека, т. е. коэффициент, учитывающий влияние угла наклона оси шнека к горизонту c .

Наклон шнекового дозатора значительно снижает производительность работы. Например, при наклоне 45 % производительность снижается на 30% [1]. На стадии проектирования шнека можно скорректировать производительность путем подбора соотношений S/D при заведомом наклоне или в зависимости от материала.

Коэффициент наполнения желоба для различных материалов лежит в диапазоне от 0,45 до 0,2 и прямо пропорционален размеру гранул.

Изменение влажности окружающей среды тоже является фактором нестабильности системы дозирования сыпучих материалов, т. к. изменяются коэффициент заполнения желоба и объемный вес перемещаемого материала.

Объемный вес для конкретного сыпучего материала не имеет постоянного значения. Колебания объемного веса и коэффициента заполнения желоба зависят от гранулометрического состава материала: размеров частицы, наличия частиц разной величины в общем количестве материала, его влажности и т. д. На коэффициент заполнения желоба влияет скорость вращения вала и длина заборной части винта. При определенной скорости вращения вала и заборной части винта (l_3) можно добиться максимального значения коэффициента (для различных видов материалов максимальное значение будет разным).

Коэффициент заполнения Ψ можно выбрать в зависимости от вида перемещаемого материала по табл. 2.2. [1]

Таблица 2.2

Коэффициент заполнения Ψ в зависимости от вида перемещаемого материала

Груз	Ψ
Легкий, мелкий, сыпучий, неабразивный; насыпная плотность $\rho_n = 480 \dots 640 \text{ кг/м}^3$ (кальцинированная сода, порошковая известь)	0,4
Среднего веса, неабразивный, мелкозернистый; $\rho_n = 640 \dots 800 \text{ кг/м}^3$	0,4
Малоабразивный, зернистый или мелкокусовой; $\rho_n = 640 \dots 1200 \text{ кг/м}^3$ (соль)	0,3
Абразивный, мелкокусовой, перемешанный с пылью; $\rho_n = 800 \dots 1600 \text{ кг/м}^3$ (кусовая известь, гипс, сланец)	0,25
Высокоабразивный, кусковой или вязкий (флотационный колчедан, огарок и т. д.)	0,125

Производительность шнекового дозатора зависит от скорости вращения вала приводного двигателя, влажности воздуха, гранулометрических свойств материала, а также от угла наклона шнека (см. рис. 2.6). При незначительном увеличении содержания влаги в веществе производительность

увеличивается. Производительность при наклонном перемещении материала уменьшается, что связано со значительным уменьшением коэффициента заполнения. В формулу расчета производительности введен поправочный коэффициент c . Зависимость коэффициента c от наклона шнека приведена в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Зависимость коэффициента производительности c от наклона конвейера

	α , град						
	0	5	10	15	20	30	45
c	1	0,9	0,8	0,7	0,65	0,5	0,35

Так как при $\alpha = 0^\circ$ достигается наибольшая производительность, оптимальным можно считать горизонтальное расположение шнека.

Не следует увеличивать скорость вращения винта, особенно при транспортировании абразивных, твердых и кусковых материалов. Увеличение скорости вращения винта вызывает повышенный износ винта и желоба, крошение частиц материала, рост энергозатрат и неравномерное перемещение материала. Максимально допустимые скорости для транспортировки различных материалов приведены в табл. 2.4. [1]

Таблица 2.4

Максимально допускаемая скорость транспортирования

Наименование материала	n_{\max} , об/мин
Продукты помола (угольная пыль, мука, зола, цемент, гипс)	120
Землистые или зернистые (зерно, опилки, песок, гранулированные шлаки)	120
Мелкокусковые неабразивные (известковая порода)	100
Мелкокусковые абразивные (сера, руда, сухая глина)	80
Липкие и тестообразные (влажный сахар, цементный раствор, мучное тесто)	60
Слежавшиеся и хлопьеобразные (сырая глина, химикалии)	60

Мощность привода винтового конвейера расходуется на преодоление сопротивлений перемещению материала:

- 1) трения материала о желоб;
- 2) трения материала о винт;
- 3) трения в упорных и подвесных подшипниках;
- 4) сопротивления, возникающие вследствие скопления материала у промежуточных подшипников, а также в результате перемешивания и измельчения материала при его перемещении;
- 5) потерь на трения в двигателе.

Некоторые значения коэффициента сопротивления при использовании различных материалов представлены в табл. 2.5 [1].

Таблица 2.5

Зависимость коэффициента сопротивления транспортированию от материала

Материал	k_c
Зернистые грузы	1,5...1,6
Мучнистые и хлопьевидные пищевые грузы	1,2...1,3
Кусковые, мелкоабразивные грузы	1,4...1,6
Тяжелые, кусковые и абразивные грузы	1,8...2,0
Мелкозернистая соль	4,0

Объем бункера дозатора определяется по формуле

$$V = \frac{m}{\gamma} \text{ (м}^3\text{)}, \quad (2.20)$$

где γ – насыпная объемная плотность материала (кг/м³).

В случае, когда бункеры дозатора выполняются в виде куба, высота бункера определяется по формуле

$$h_6 = \sqrt[3]{V} \text{ (м)}. \quad (2.21)$$

Высоту падающего столба при перемещении материала из шнека в бункер можно определить по формуле

$$h_a = \frac{g \cdot t^2}{2} \text{ (м)}, \quad (2.22)$$

где t – время падения материала в бункер дозатора.

Для экспериментальной установки расстояние от края шнека до дна бункера дозатора равно 0,535 м:

$$t = \sqrt{\frac{2 \cdot h_6}{g}} = 0,33 \text{ (с)}. \quad (2.23)$$

Как видно из выражения (2.29), значение времени зависит от высоты падения материала. Данную высоту можно разбить на два участка (рис. 2.7):

$$h = h_0 + h_6, \quad (2.30)$$

где $h_0 = \text{const}$ – расстояние от шнека до верхней границы бункера;
 h_6 – расстояние от уровня материала в бункере до его верхней границы.

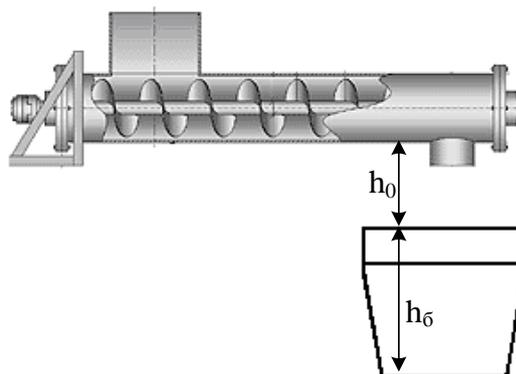


Рис. 2.7. Высота падения дозируемого материала в бункер

Возможны два пути нахождения зависимости между массой и высотой. Первый – это экспериментальный. При различных заданиях массы дозирования измеряем высоту h_6 и по нескольким точкам строим зависимость. Данный способ обладает большой точностью, но редко применяется из-за технологических факторов.

Второй способ – аналитический. Для бункеров различных форм зависимость высоты $h_6(m)$ различна. Рассмотрим зависимости для различных форм бункеров.

1. Бункер имеет форму параллелепипеда (рис. 2.8).

Объем данного бункера находится как

$$V = a \cdot b \cdot c. \quad (2.31)$$

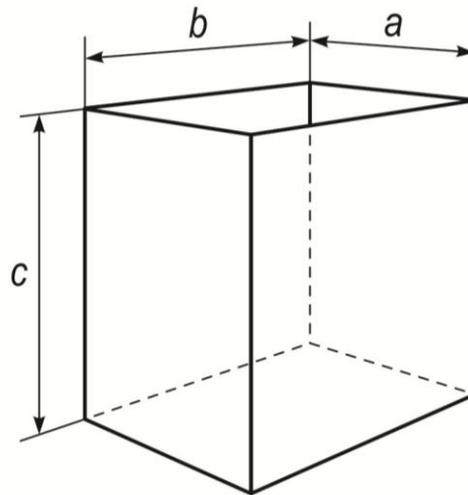


Рис. 2.8. Прямоугольная форма бункера

Объем материала в бункере

$$V_{\text{пар}} = \frac{m}{\gamma}. \quad (2.32)$$

Отсюда высота находится по выражению

$$h_6 = c = \frac{V_{\text{пар}}}{a \cdot b}. \quad (2.33)$$

2. Бункер имеет форму усеченной четырехугольной пирамиды, имеющей в основании квадрат (рис. 2.9).

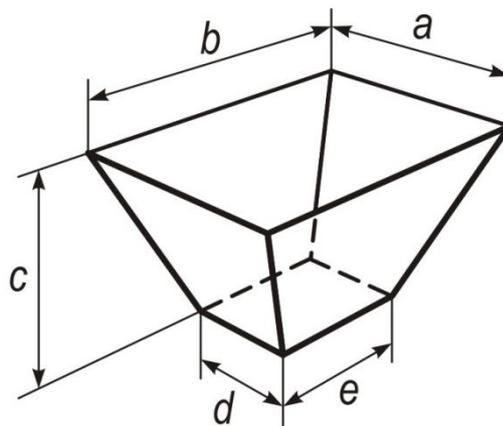


Рис. 2.9. Трапецеидальная форма бункера

Объем данного бункера находится как

$$V_{\text{пир}} = \frac{1}{3} \cdot c \cdot (d \cdot e + \sqrt{d \cdot e \cdot a \cdot b} + a \cdot b). \quad (2.34)$$

Отсюда высота равна

$$h_6 = c = \frac{V_{\text{нпр}} \cdot 3}{(d \cdot e + \sqrt{d \cdot e \cdot a \cdot b} + a \cdot b)} \cdot \quad (2.35)$$

Бункеры, имеющие сложную форму (рис. 2.10), следует разбивать на простейшие составные формы, описанные выше, и составлять зависимость $h_6(m)$ из отдельных участков.

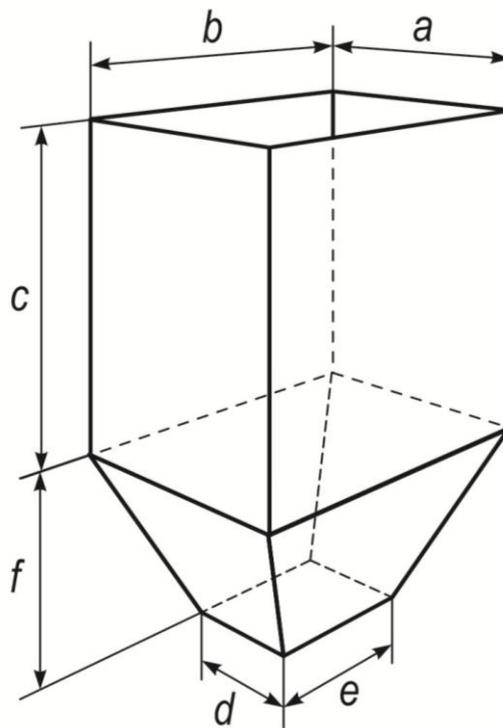


Рис. 2.10 Бункер сложносоставной формы

Высота падения материала в бункер сложносоставной формы находится как:

$$h_6 = c + f$$

Отсюда:

$$h_6 = \frac{V_{\text{нар}}}{a \cdot b} + \frac{V_{\text{нпр}} \cdot 3}{(d \cdot e + \sqrt{d \cdot e \cdot a \cdot b} + a \cdot b)} \quad (2.36)$$

С учетом всех произведенных выше расчетов составим модель механической системы электропривода (рис. 2.11).

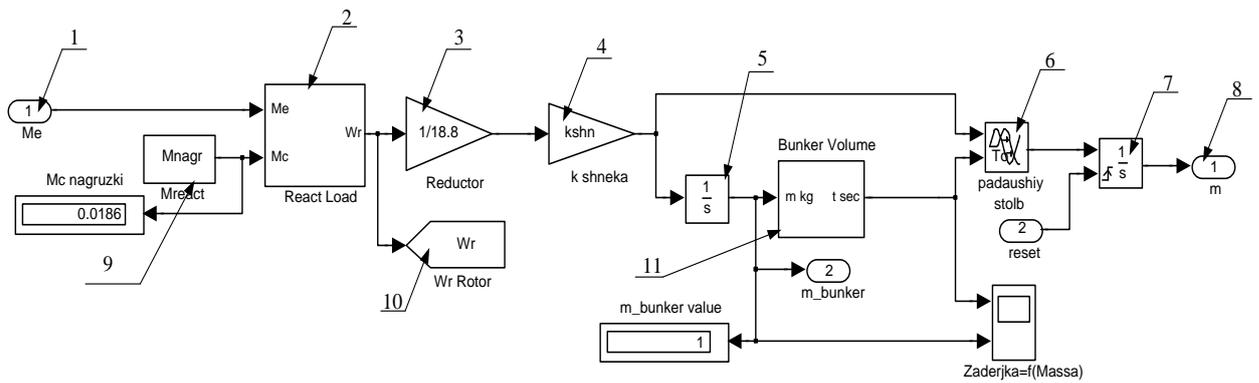


Рис. 2.11. Имитационная модель механической системы

Основными элементами имитационной модели механической системы в среде MATLAB Simulink являются:

- 1 – входной сигнал в механическую подсистему, представляющий собой электромагнитный момент двигателя;
- 2 – блок, учитывающий реактивный момент сопротивления в механической системе;
- 3 – блок, учитывающий передаточное число редуктора;
- 4 – блок, учитывающий коэффициент передачи шнекового питателя;
- 5 – блок интегратора, характеризующий накапливающуюся массу материала в бункере без временной задержки;
- 6 – блок, учитывающий задержку при падении материала;
- 7 – блок интегратора, характеризующий накапливающуюся массу материала в бункере: вход *Reset* необходим для сброса величины массы материала, чтобы произвести следующий цикл дозирования;
- 8 – выход механической подсистемы в виде массы, накопленной в бункере-дозаторе при текущем процессе дозирования;
- 9 – приведенный момент сопротивления на валу;
- 10 – выход механической подсистемы в виде скорости двигателя;
- 11 – блок, учитывающий зависимость задержки времени падения материала от массы, накопленной в бункере.

Функциональное назначение блока 11 реализуется исходя из геометрических размеров бункера (рис. 2.12).

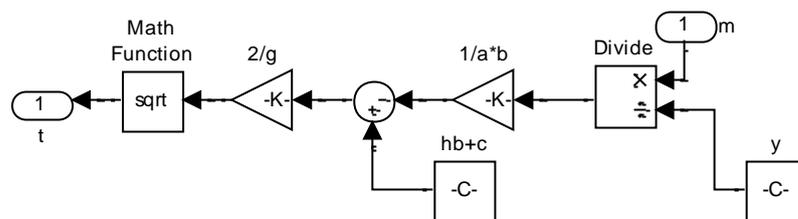


Рис. 2.12. Подсистема блока 11 механической системы

Блок механической системы, учитывающий реактивный момент сопротивления, показан на рис. 2.13 [34].

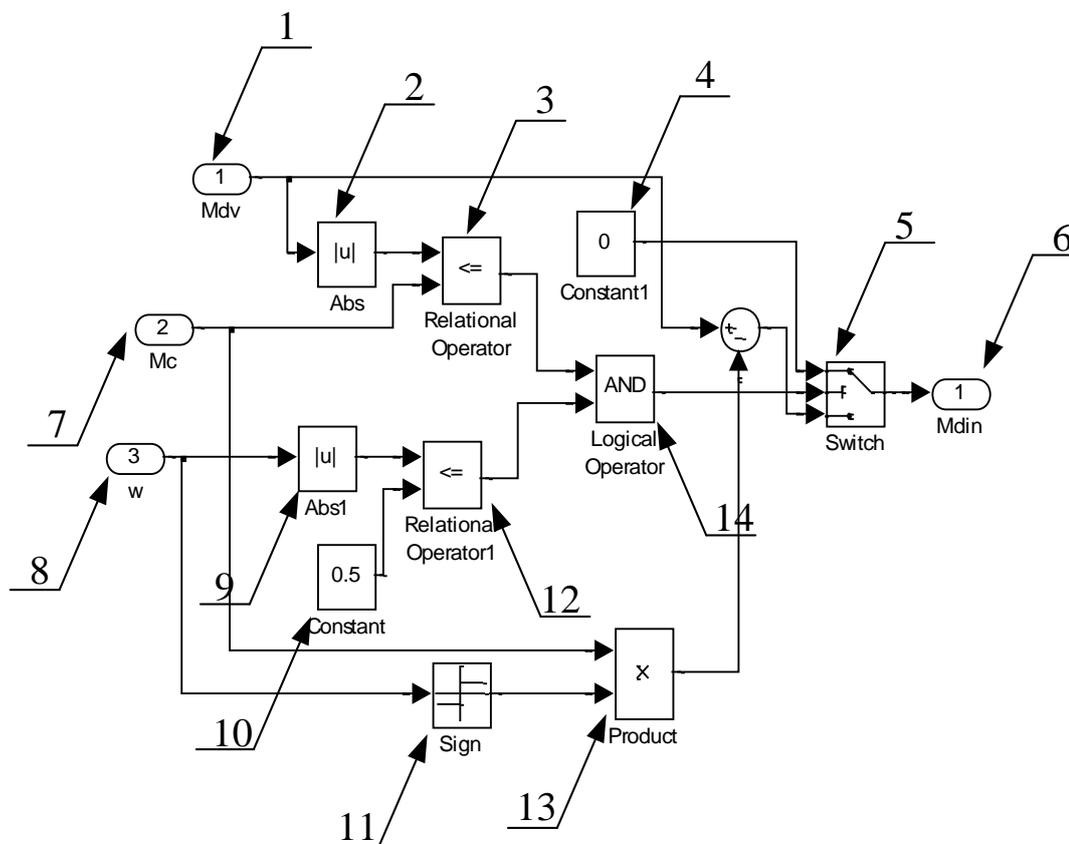


Рис. 2.13. Модель механической нагрузки типа сухого трения в подсистеме среды *Simulink*

Функциональное назначение основных блоков подсистемы (рис. 2.13) следующее: блоки 1, 7, 8 представляют собой входы подсистемы: 1 – электромагнитный момент двигателя; 7 – величина момента сопротивления типа сухого трения на валу первой массы; 8 – скорость двигателя. Блок 6 является выходом рассматриваемой подсистемы. Блоки 11, 13 учитывают величину и знак момента сопротивления в зависимости от направления вращения вала двигателя. Группа блоков 2, 3, 4, 5, 9, 10, 12, 14 реализует три зоны при изме-

нении момента сопротивления по его релейной характеристике. В первой зоне момент сопротивления равен $-M_c$, во второй $M_c = 0$, в третьей зоне момент сопротивления равен M_c .

2.4. Модель падающего столба сыпучих материалов

Падающий столб содержит определенную массу дозируемого материала, которая увеличивает итоговую величину ошибки дозирования. Для уменьшения влияния массы падающего столба на точность дозирования необходимо определить массу падающего столба и произвести коррекцию величины задания.

Чтобы определить массу падающего столба, необходимо знать насыпную плотность дозируемого материала, диаметр и высоту падающего столба.

Насыпная плотность – это отношение массы продукта к его объему в насыпном состоянии. Известные табличные значения насыпной плотности для различных материалов представлены в табл. 2.6 [16,50].

Таблица 2.6

Физико-механические свойства сыпучих материалов

Наименование материала	Размеры			Плотность, кг/м ³	Насыпная плотность, кг/м ³	Коэффициент внутреннего трения	Коэффициент внешнего трения			Скорость витания, м/с
	Длина, мм	Ширина, мм	Толщина, мм				по стали	по дереву	по бетону	
Пшеница	4,8...8,0	1,6...4,0	1,5...3,0	1200...1500	700...750	0,47	0,37	0,4	0,4	9,8
Просо	1,8...3,8	1,5...2,0	1,5...1,7	1100...1200	730	0,52	0,34	0,4	0,34	8,3
Кукуруза	5,5...13,5	5,5...11,5	2,5...8,0	1350	730	0,53	0,37	0,35	0,42	11,5
Ячмень	7,0...14,6	2,0...5,0	1,5...3,0	1200...1400	650	0,51	0,37	0,4	0,43	9,0
Мука: в/с, 1-й сорт, 2-й сорт	не более 0,16 0,16...0,20 0,18...0,80			1400	550...680	1,2...1,8	0,6...1,0	0,9...1,1	–	2...4
Отруби	–	–	–	–	170...500	1,2...1,6	0,6...2,2	1,0...2,2	–	2,5...3,5
Лузга подсолнечника	–	–	–	–	210...300	1,2...1,5	0,4...0,9	0,6...1,0	–	4...5
Комбикорм	–	–	–	1100...1600	350...570	0,5...0,8	0,5...0,8	0,5...0,6	–	7,0...8,7

Зная геометрические размеры бункера, расстояние от шнека до бункера и плотность материала, можно определить высоту падающего столба, используя выражения (2.33) для бункера в виде куба.

Масса материала в бункере определяется по формуле

$$m = \gamma \cdot V, \quad (2.37)$$

где γ – насыпной вес материала; V – заполненный объем бункера.

Заполненный объем бункера определяется как

$$V = a \cdot b \cdot h_m, \quad (2.38)$$

где h_m – высота в бункере, заполненная материалом.

Масса дозируемого материала – технологический параметр, который измеряется с помощью трех тензодатчиков и суммируется в стандартный токовый нормированный сигнал, поступающий в систему управления на вход программно выполненного регулятора веса.

Подставив (2.38) в (2.37), путем несложных математических преобразований получим высоту в бункере, заполненную материалом:

$$h_m = \frac{m}{\gamma \cdot a \cdot b}. \quad (2.39)$$

Для бункера в виде усеченной пирамиды (рис. 2.9), имеющей в основании квадрат,

$$h_{m1} = \frac{m \cdot 3}{\gamma \cdot c \cdot (d \cdot e + \sqrt{d \cdot e \cdot a \cdot b} + a \cdot b)}. \quad (2.40)$$

Для бункеров сложной формы (рис. 2.10) высота сыпучего материала в бункере находится как

$$h_{m2} = h_m + h_{m1}. \quad (2.41)$$

Тогда высота падающего столба будет определяться как

$$h_{ст} = h_0 + (h_0 - h_m). \quad (2.42)$$

Пренебрегаем образованием конусной насыпи при процессе дозирования, считая, что материал равномерно распределен по площади бункера приемника.

Площадь поперечного сечения падающего столба найдем исходя из геометрических размеров лопасти шнека. Примем площадь поперечного сечения равной площади рабочей поверхности конечного витка шнека [38...40].

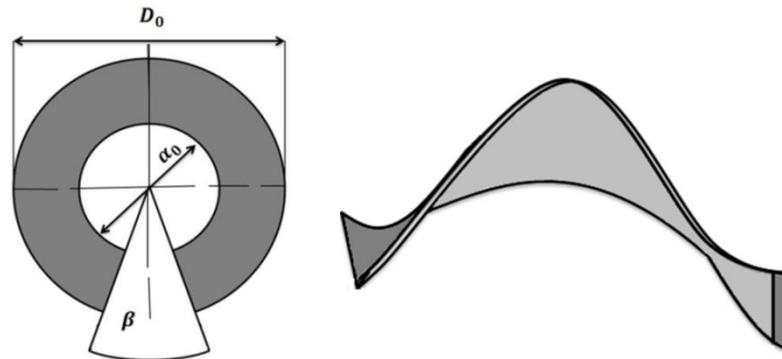


Рис. 2.14. Вид лопасти и витка шнека

Как показано на рис. 2.14, виток имеет внешний и внутренний диаметр, площадь определяем по формуле

$$S_{\text{ст}} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_0^2 - d_0^2). \quad (2.43)$$

С помощью табл. 2.5 определяем насыпной вес конкретного дозируемого материала и находим массу падающего столба:

$$m_{\text{ст}} = S_{\text{ст}} \cdot h_{\text{ст}} \cdot \gamma. \quad (2.44)$$

Полученное выражение массы падающего столба позволяет в режиме реального времени отслеживать изменение массы материала, находящегося в воздухе.

Динамически изменяющаяся временная задержки падения материала в бункер дозатора при накоплении материала в бункере рассчитывается с учетом формулы 2.29 следующим образом:

$$t_{\text{тз}} = \sqrt{\frac{2 \cdot h_{\text{ст}}}{g}} \quad (2.45)$$

Имитационная модель шнекового дозатора с учетом изменяющейся временной задержки и вычислением массы падающего столба изображена на рисунке 2.15

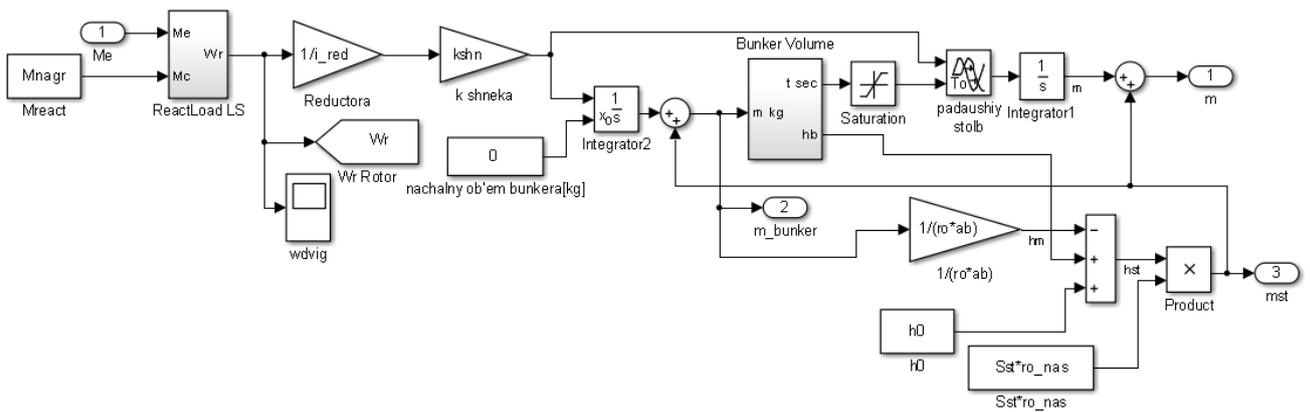


Рис. 2.15. Модель шнекового дозатора с учетом изменяющейся временной задержки и вычислением массы падающего столба

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 материала различных свойств в бункере.

2.5. Имитационная модель электромеханической системы дозирования сыпучих материалов

На данном этапе разработки, пока не создана система управления с алгоритмами коррекции ошибки, будет использоваться релейный регулятор веса. Регулятор формирует задание, если вес в бункере меньше заданного, и отключается при превышении веса. В модели (рис. 2.16) используются субблоки асинхронного двигателя и механической системы, рассмотренные выше, а также блок, имитирующий управление преобразователем частоты $U/f = \text{const}$.

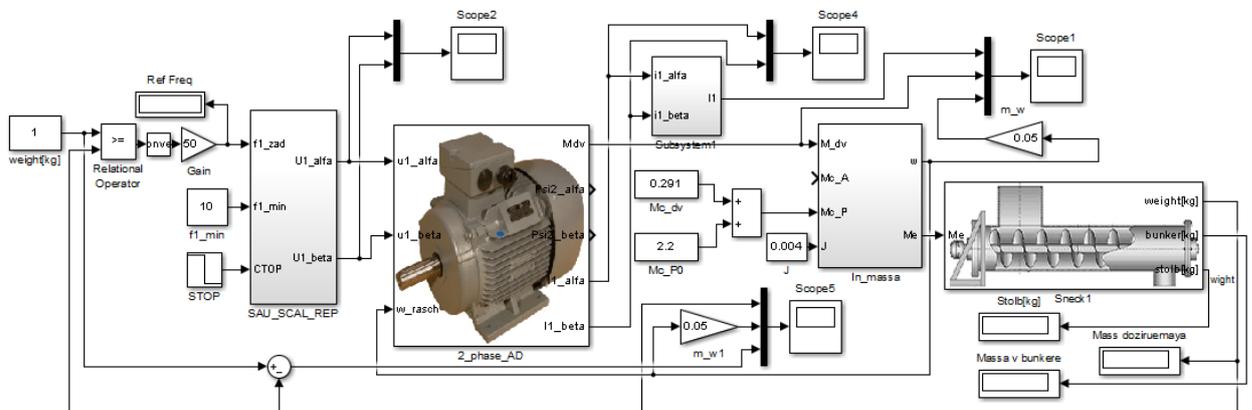


Рис. 2.16. Модель системы дозирования сыпучих материалов с релейным регулятором веса

На рисунке 2.17 представлены результаты дозирования 1 кг материала на имитационной модели и на экспериментальной установке при полностью идентичных условиях. Можно сделать вывод, что составленная математическая модель дозирования сыпучих материалов, которая рассматривается во 2 главе настоящей диссертации, имеет достаточную адекватность, что подтверждает сравнение с физическим процессом.

Как видно из графика (рис. 2.17), имеет место существенная абсолютная ошибка дозирования 18,67%, которая категорически не допустима согласно технологическим требованиям (ошибка дозирования $\pm 3\%$) для приготовления комбикорма. Чтобы получить требуемую точность, необходимо в системе управления частотным асинхронным электроприводом использовать специальные алгоритмы коррекции ошибки дозирования.

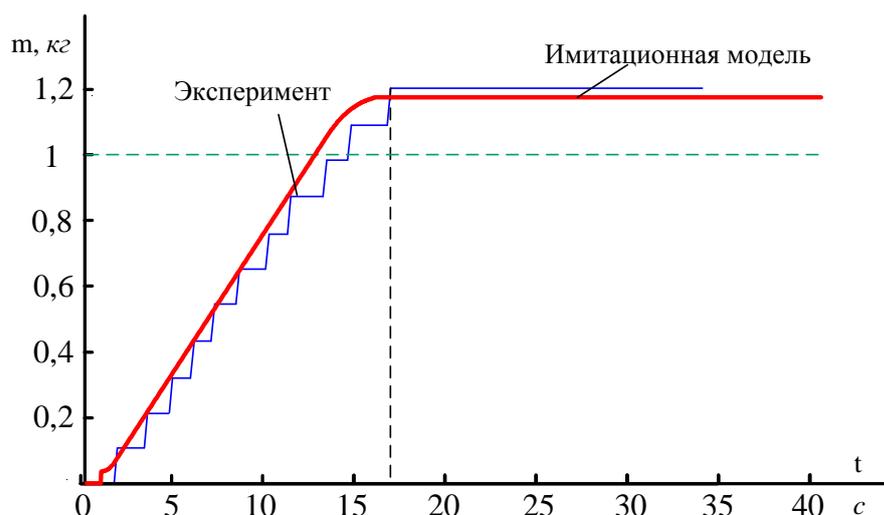


Рис. 2.17. Результаты дозирования 1 кг на имитационной модели на экспериментальной установке

На точность технологического процесса дозирования сыпучих материалов оказывает существенное влияние следующие факторы: угол наклона шнекового дозатора к линии горизонта, физико-механические свойства материала, коэффициент заполнения корпуса шнека и т.д.

С помощью разработанной модели электротехнического комплекса дозирования сыпучих материалов проведем исследование влияния различных факторов на точность и производительность системы дозирования.

На рисунке 2.18 изображены переходные процессы дозирования гранул полипропилена при угле расположения шнекового дозатора к линии горизонта равной 0° , 15° и 30° .

На графике сплошная линия это дозирование полипропилена при идеальном расположении шнекового дозатора к линии горизонта, а штрихованная линия – дозирование с наклоном к горизонту в 15 градусов и точечная – при угле наклона шнекового дозатора в 30 градусов.

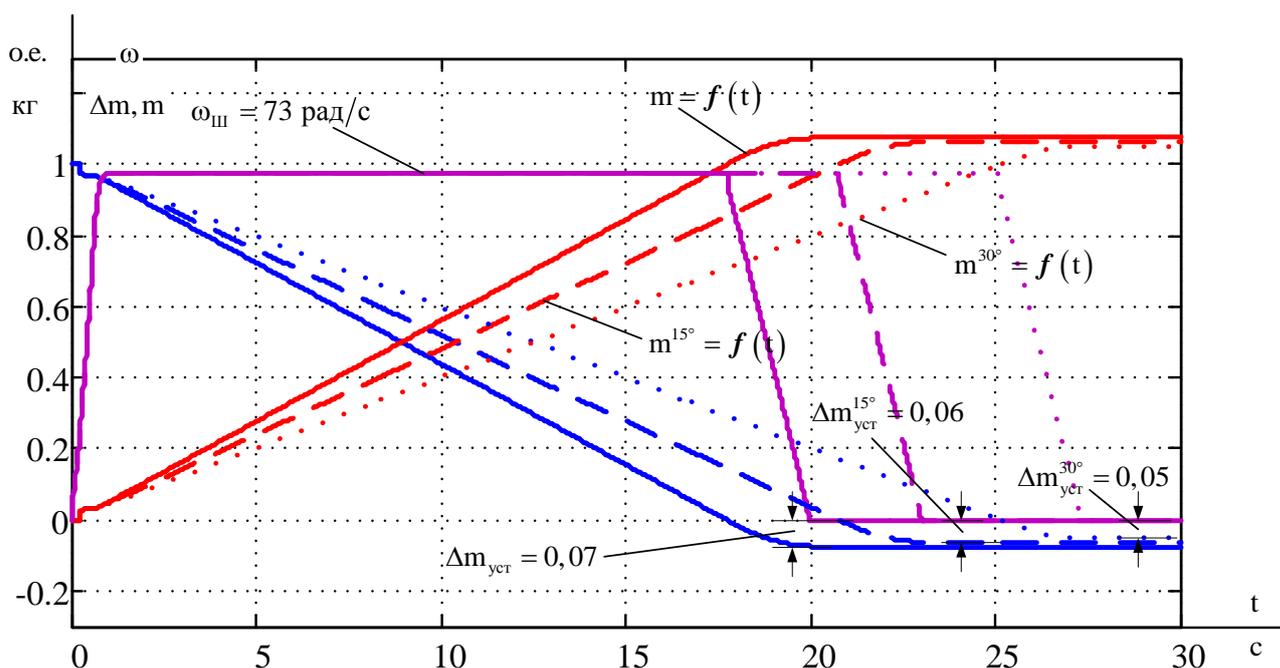


Рис. 2.18. Результаты дозирования полипропилена при различных углах наклона шнекового дозатора к линии горизонта с учетом переходных процессов

Как видно из результатов моделирования, если дозирование будет осуществляться с наклоном шнека к линии горизонта в 30° , то ошибка дозирования практически не изменится, но производительность дозирования при этом уменьшится на 26%. Одной из задач данной диссертационной работы является получение максимального качества смеси при наибольшей производительности ее приготовления. Из формулы (2.25) максимальную производительность дозирования можно получить при угле наклона шнека $\alpha=0^\circ$. Синтез управления с помощью специальных сигнальных алгоритмов коррекции ошибки дозирования проводим при горизонтальном положении шнекового дозатора. Рассмотрим влияние на качество дозирования изменение физико-

механических свойств материала. На рисунке 2.19 представлен переходный процесс дозирования пшеницы при различных углах наклона шнека.

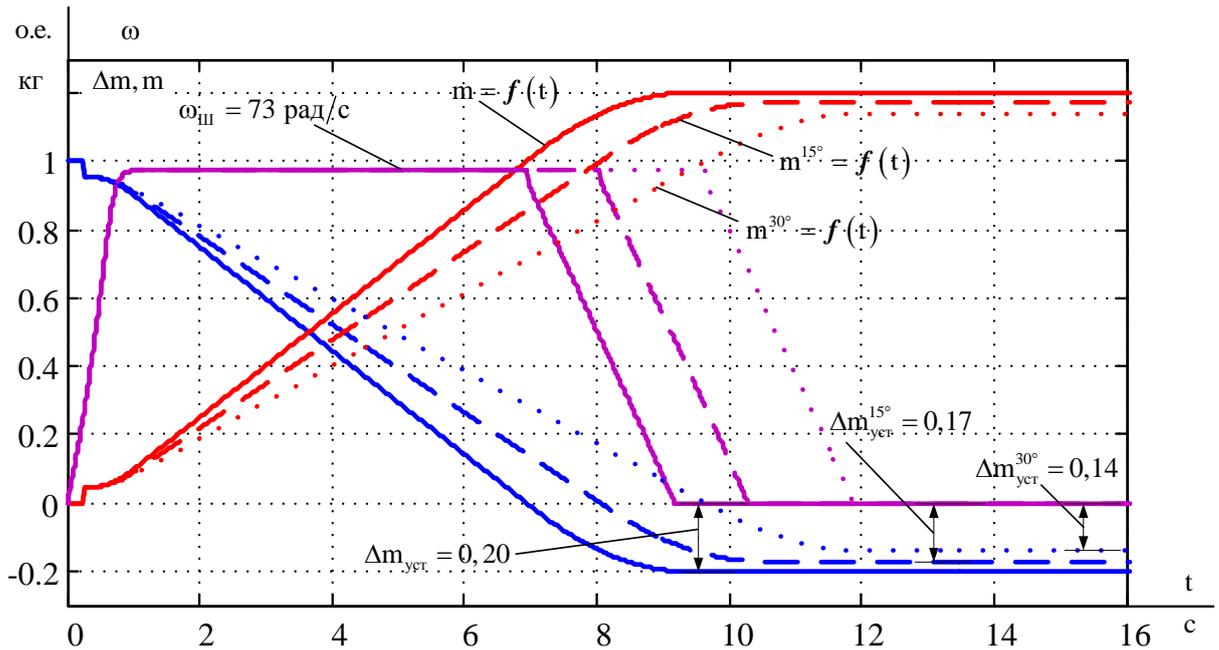


Рис. 2.19. Результаты дозирования пшеницы при различных углах наклона шнекового дозатора к линии горизонта переходных процессов с учетом переходных процессов

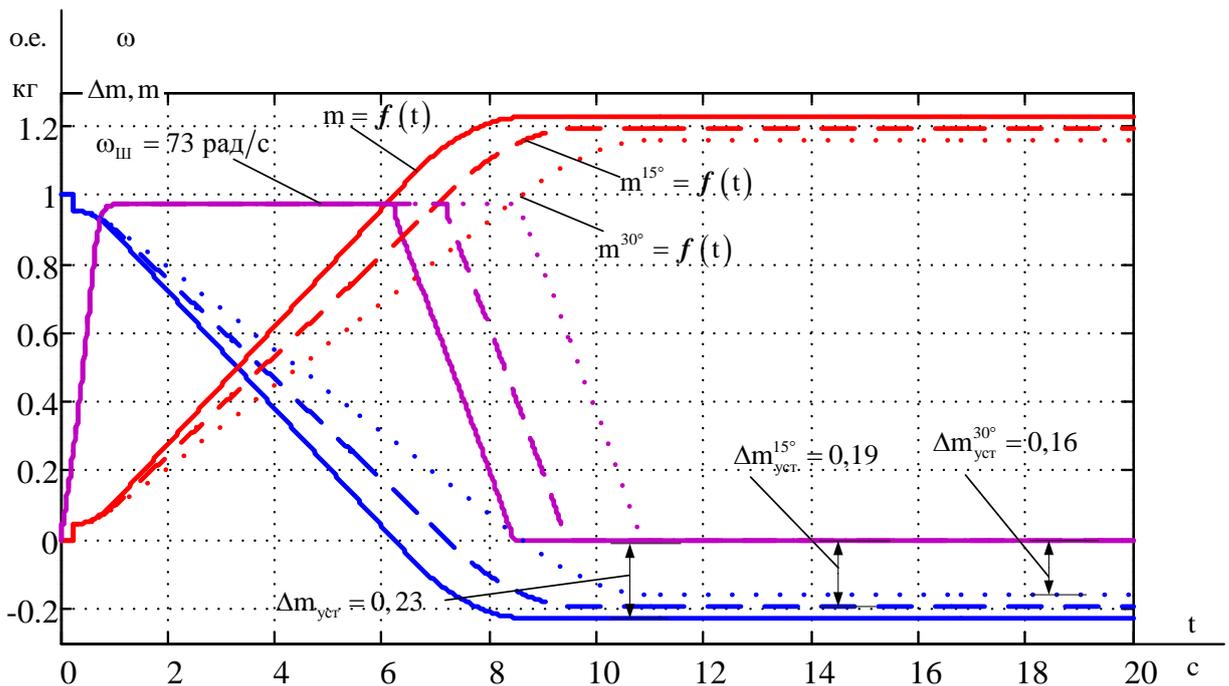


Рис. 2.20. Результаты дозирования кукурузы при различных углах наклона шнекового дозатора к линии горизонта с учетом переходных процессов

При увеличении насыпной объемной массы материала на 60% , производительность шнекового дозатора увеличивается на 185%, что обусловлено значительным увеличением коэффициента передачи шнекового дозатора в

модели, но относительная ошибка дозирования увеличивается почти в 3 раза. Из результатов экспериментов можно сделать вывод, что процесс дозирования «тяжелых» грузов сопровождается значительной ошибкой и применение специальных алгоритмов коррекции ошибки наиболее актуально.

2.6. Выводы

1. Разработана математическая и имитационная модель автоматизированного комплекса дозирования с частотно-регулируемым электроприводом шнека с учетом изменяющихся свойств материала и динамически изменяющейся высоты «падающего столба» в бункер дозатора. Предложена методика расчета коэффициента передачи шнекового дозатора.
2. Анализ процесса дозирования на имитационной модели показал, что горизонтальное расположение шнекового дозатора, с точки зрения производительности, является наиболее оптимальным. При дозировании материалов с большей насыпной объемной массой наблюдается увеличение ошибки дозирования.
3. Результаты дозирования, полученные на имитационной модели автоматизированного комплекса дозирования с частотно-регулируемым электроприводом с релейным регулятором веса, соответствуют реальному физическому процессу. Установлено, что ошибка дозирования материала составляет 18,67% при допустимой ошибке регламента приготовления кормосмесей в 3%. Для повышения точности дозирования автоматизированного комплекса дозирования с частотно-регулируемым электроприводом необходимо разработать и использовать специальные алгоритмы коррекции ошибки дозирования.

ГЛАВА 3. СИНТЕЗ УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ В СИСТЕМЕ ДОЗИРОВАНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Решение задачи оптимального дозирования сыпучих по критерию точности и максимально возможной производительности многокомпонентных смесей связано, прежде всего, с формированием алгоритма управления электропривода шнекового дозатора. Алгоритм позволит добиться требуемой точности и оптимизировать время дозирования.

Для синтеза алгоритма дозирования используем теорию цифровых регуляторов [21, 41]. Выбор данного способа синтеза регуляторов обусловлен лидирующими позициями цифровых систем управления в области АСУ ТП. Кроме того, такой подход позволит создать систему управления, оптимально использующую возможности применяемого процессора.

3.1. Способы управления частотно-регулируемым электроприводом дозирования сыпучих материалов

Большинство мобильных сельскохозяйственных электрифицированных машин эксплуатируются в продолжительном (S1) и кратковременном (S2) режиме работы, значительно меньшее число – в повторно-кратковременном режиме (S3). Другие режимы работы встречаются крайне редко. Продолжительный режим S1 характерен для дробилок, измельчителей, основной массе насосов, вентиляторов, центрифуг и компрессоров. В кратковременном режиме S2 работают раздатчики кормов на фермах, навозоуборочные транспортеры, порционные смесители кормов, некоторые насосные и компрессорные установки. Очевидно, что продолжительность работы механизма, работающего в кратковременном режиме, определяется технологическими характеристиками (стандартные $t_p = 10, 30, 60, 90$ мин). В повторно-кратковременном режиме S3 работают крановые механизмы, вентиляторы в системах микроклимата, насосы систем водоснабжения, компрессоры с ресиверами и др.

Специфика электроприводов в сельскохозяйственном производстве определяется разнообразием нагрузочных характеристик, режимами и условиями работы (окружающая среда, качество электроэнергии). Следовательно, особое внимание должно уделяться выбору систем электропривода, с целью обеспечения требуемых режимов работы, а именно обоснованию необходимости регулирования угловой скорости электродвигателя и ее диапазона.

Наибольшее распространение получили асинхронные двигатели общего назначения мощностью от 0,75 до 7,5 кВт, составляющие более половины всего парка сельскохозяйственных комплексов.

Учитывая требования по точности дозирования материалопотоков, составу смесей, в последнее время стали активно внедряться системы «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» (ПЧ-АД) с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Они обеспечивают необходимую точность дозирования и надежность системы.

В свою очередь, регулирование скорости электроприводов с асинхронными двигателями производится изменением частоты и величины питающего напряжения. Изменение частоты напряжения на статоре включает в себя такие способы управления, как скалярное управление скоростью с помощью закона U/f , векторное управление, прямое управление моментом, бездатчиковое управление скоростью [17, 18]. При регулировании необходимо управлять двумя координатами электродвигателя: током и скоростью.

Для оптимального управления асинхронным электродвигателем необходимо управлять вектором тока, вектором потокосцепления и скоростью. Тогда характеристики электропривода приближаются к характеристикам двигателя постоянного тока.

Однако управление вектором потокосцепления связано со сложностью получения сигнала обратной связи по потокосцеплению, так как в серийных двигателях отсутствуют датчики потокосцепления. По этой причине потокосцепление вычисляется «наблюдателями», которые используют уравнения математической модели двигателя.

Для управления координатами электропривода, как правило, используют методы подчиненного регулирования, которые позволяют управлять координатой и производить ее ограничение.

Современные разработки в области новых алгоритмов управления асинхронным электроприводом переменного тока представляют собой дальнейшее развитие и совершенствование классического алгоритма и реализуются на основе общей теории автоматического управления [19...21]. Например, применение нейронных сетей и нечеткой логики позволило создавать эффективные регуляторы [22, 23], которые дают возможность эффективно управлять объектом регулирования.

Системы с нечеткими регуляторами и нейронными сетями рекомендуется использовать в следующих случаях:

- для управления сложными технологическими процессами, когда существуют проблемы их идентифицировать;
- когда должна производиться обработка лингвистически сформулированных экспертных знаний [23].

Если управление может быть осуществлено с помощью методов классической теории автоматического управления и/или существует формализованная и адекватная математическая модель рассматриваемой системы, применение нечетких регуляторов и нейронных сетей не рекомендуется.

Алгоритм векторного управления не применим для управления шнековыми дозаторами так как, в автоматизированном комплексе дозирования сыпучих материалов общий преобразователь частоты управляет несколькими шнековыми дозаторами.

Для управления приводного двигателя шнекового питателя применимо скалярное управление, которое позволит использовать общий преобразователь частоты для нескольких шнеков-дозаторов и не требует сложных настроек.

С учетом особенностей технологического процесса и выбранных принципов управления можно сформулировать требования к электроприводу шнекового дозатора:

- режим работы: повторно-кратковременный;
- максимальная угловая скорость: $\omega = 15,60$ Рад/с;
- сигнал управления на входе электропривода: цифро-аналоговый;
- электропривод и все его элементы располагаются в помещении со следующими условиями: температура окружающей среды от 5 до 30 °С; относительная влажность не более 80 % (при температуре +25 °С); преобразователь устанавливается в шкафу. Требуемая степень защиты электродвигателя от внешних воздействий – IP44.

3.2. Методика синтеза цифрового регулятора веса в электромеханической системе

Современные цифровые системы управления реализованы на основе микроконтроллеров, сигналы в которых представляются дискретным по уровню и времени набором данных. Одним из наиболее значимых преимуществ цифровой системы управления – это возможность ее перенастройки программным способом (редактированием программы микроконтроллера). Для обработки дискретных данных необходимо использовать цифровые регуляторы, которые имеют более высокое качество управления по сравнению с аналоговыми регуляторами [41].

Синтез регулятора необходимо начать с определения структуры объекта управления. Рассмотрим задачу в общем виде.

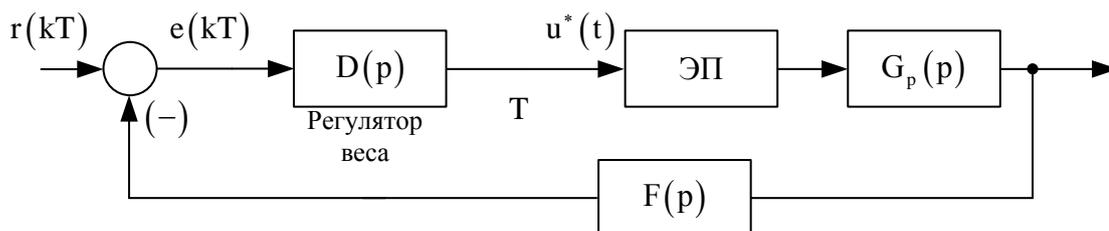


Рис. 3.1. Структурная схема следящего электропривода с регулятором веса

$D(\delta)$ – передаточная функция регулятора веса; ЭП – передаточная функция электропривода; $G_p(\delta)$ – передаточная функция объекта управления; $F(\delta)$ – передаточная функция измерительной системы.

Для синтеза алгоритма управления необходимо перевести все непрерывные передаточные функции в дискретную область с помощью z -преобразования. Схема на рис. 3.1 преобразуется (рис. 3.2)

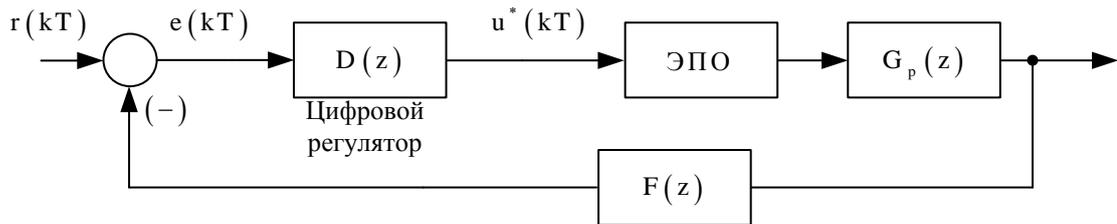


Рис. 3.2. Структурная схема цифровой системы управления в дискретном представлении

Для синтеза регулятора представим модель АД в виде апериодического звена первого порядка [32]. Эквивалентная постоянная времени находится как

$$T_{\text{Э}} = \frac{x_{1H} + x'_{2H}}{\omega_{0\text{ЭЛ.НОМ}} \cdot R_2} + J_{\text{Э}} \quad (3.1)$$

Переходный процесс АД и эквивалентного апериодического звена имеет вид, представленный на рис. 3.3.

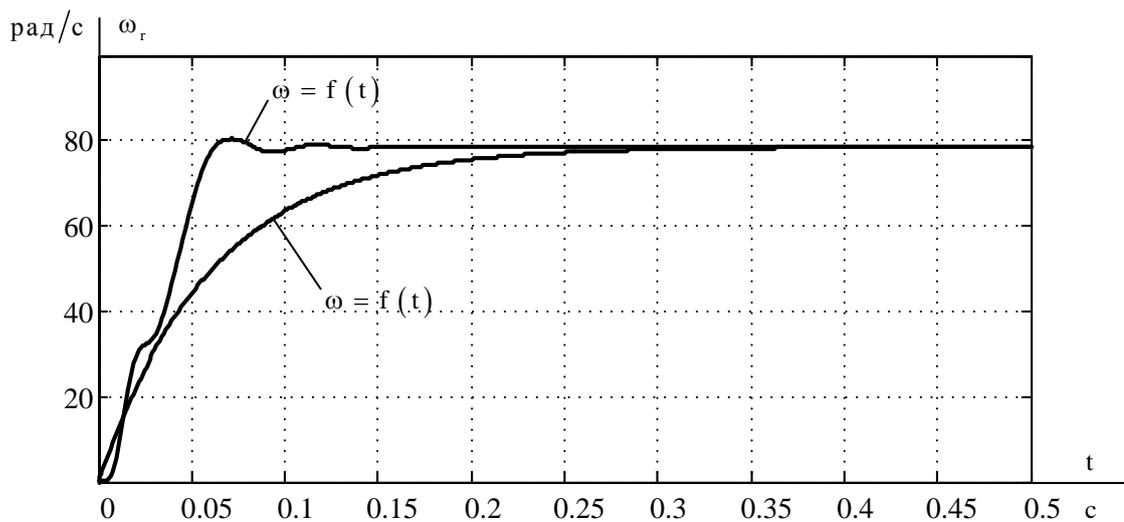


Рис. 3.3. Переходный процесс АД и эквивалентного апериодического звена

Передаточную функцию шнекового дозатора представим интегрирующим звеном с коэффициентом передачи шнека. Структурная схема системы показана на рис. 3.4.

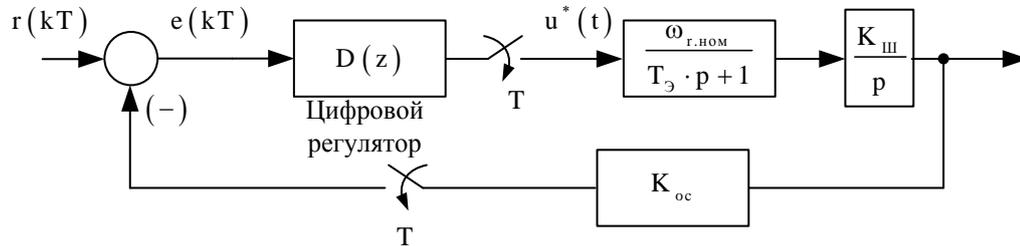


Рис. 3.4. Структурная схема системы управления и объекта регулирования

Отображение постоянного числа в дискретной области равно оригиналу в непрерывной области. Полученный контур содержит апериодическое звено первого порядка и интегрирующее звено, поэтому настройку можно произвести с помощью П-регулятора [19]:

$$D(z) = k_{\text{рег}} = \frac{1}{a \cdot T_d \cdot K_{\text{III}} \cdot K_{\text{oc}}}, \quad (3.2)$$

где a – коэффициент настройки регулятора. Для осуществления переходного процесса без перерегулирования (настройка на линейный оптимум) $a = 4$.

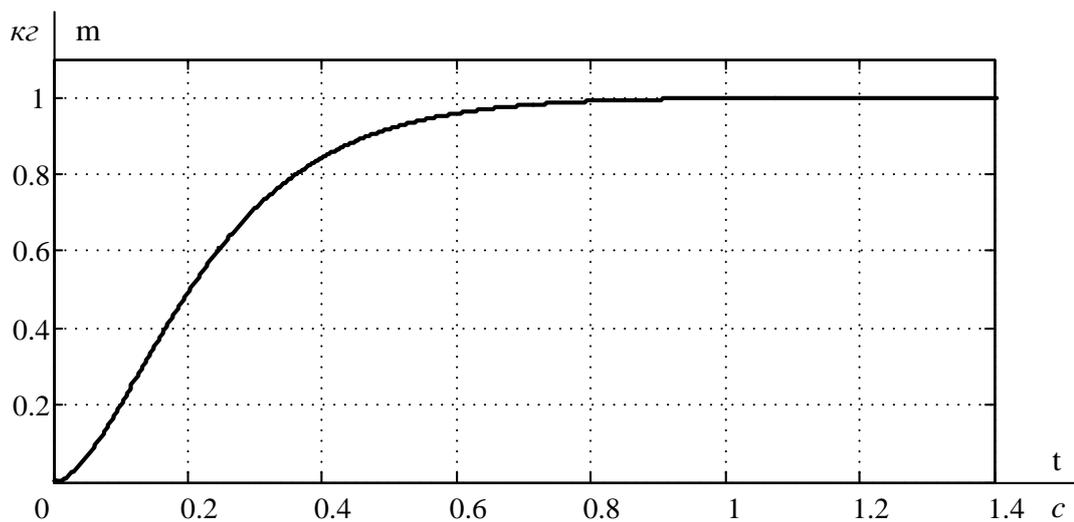


Рис. 3.5. Переходный процесс оптимизированной системы

Из рис. 3.5 видно, что переходный процесс дозирования происходит без перерегулирования за время, равное $3 \dots 4 T_d$.

При настройке регулятора не было учтена задержка времени «падающего столба» материала в бункер. Задержка изменяется в зависимости от заполнения бункера. Для компенсации ошибки, возникающей при дозировании, необходим дополнительный алгоритм адаптации.

3.3. Синтез регулятора веса на основе модульного оптимума

В системах дозирования любое перерегулирование переходного процесса является перевесом, что сказывается на точности дозирования, поэтому его необходимо исключить, применяя настройки с перерегулированием, равным нулю.

Разомкнутый контур веса, настроенный на модульный оптимум, должен иметь следующую передаточную функцию [19]:

$$W_{\text{мо}}(p) = \frac{1}{4 \cdot T_{\mu\text{в}} \cdot p(T_{\mu\text{в}} \cdot p + 1)}, \quad (3.3)$$

где $T_{\mu\text{в}}$ – малая постоянная времени контура веса.

Принимаем малую некомпенсируемую постоянную контура веса равной величине транспортной задержки шнекового питателя, рассчитанная по формуле (2.45) для незаполненного бункера-дозатора экспериментальной установки $T_{\mu\text{в}} = T_{\text{тз}} = 0,33$ с.

Постоянная времени транспортной задержки на $T_{\text{тз}}$ в контуре регулирования веса на порядок больше, чем в регулируемом электроприводе. Поэтому в рассматриваемой САР, регулируемый привод можно представить пропорциональным звеном.

$$k_{\text{рзп}} = \frac{\omega_{\text{макс}}}{U_{\text{рв макс}}} = \frac{149}{10 \cdot 9,55} = 1,56.$$

Передаточная функция разомкнутого контура веса (рис. 3.6) рассматриваемой системы определяется следующим образом [19]:

$$W_{\text{разкв}}(p) = W_{\text{рв}}(p) \cdot k_{\text{рзп}} \cdot \frac{k_{\text{ш}}}{p} \cdot \frac{1}{1 + T_{\text{тз}} \cdot p}. \quad (3.4)$$

Структурная схема контура веса представлена на рис. 3.6.

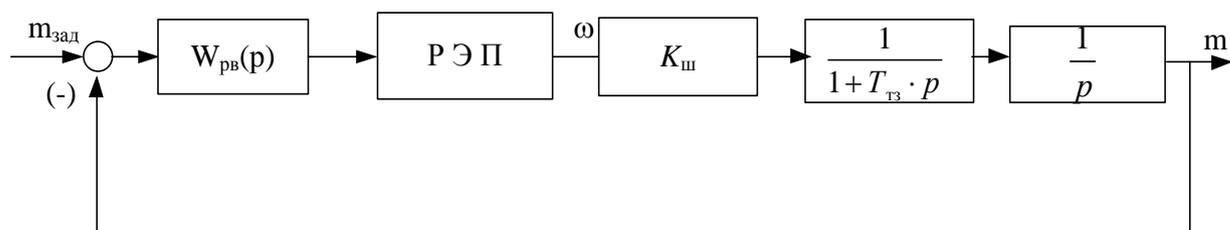


Рис. 3.6. Структурная схема линейризованного контура веса

На рис. 3.6 приняты следующие обозначения:

$W_{рв}(p)$ – передаточная функция регулятора веса;

$K_{ш}$ – коэффициент передачи шнека;

$T_{тз}$ – постоянная времени транспортной задержки.

Передаточную функцию разомкнутого контура веса приравниваем к желаемой передаточной функции и находим передаточную функцию регулятора веса.

$$W_{рв}(p) = \frac{(T_{тз} \cdot p + 1)}{k_{ш} \cdot k_{рэп} \cdot 2 \cdot T_{\muв} \cdot (T_{\muв} \cdot p + 1)} = \frac{1}{k_{ш} \cdot k_{рэп} \cdot 4 \cdot T_{\muв}}, \quad (3.5)$$

где $k_{рв} = \frac{1}{k_{ш} \cdot k_{рэп} \cdot 4 \cdot T_{\muв}} = \frac{1}{0,0019 \cdot 1,56 \cdot 4 \cdot 0,33} = 255,6$ – коэффициент усиления регулятора веса.

Таким образом, при настройке контура веса на модульный оптимум получаем регулятор веса пропорционального типа с коэффициентом передачи $k_{рв}$.

3.4. Алгоритм частотно-регулируемого асинхронного электропривода в технологии производства комбикормов

Качественный состав каждой порции комбикорма для животных определяется технологами свиноводческого предприятия, и размещаются в базу данных программного обеспечения верхнего уровня.

Программное обеспечение управления автоматизированной системой дозирования сыпучих материалов разработано на языке СИ согласно алгоритму, представленному на рисунке 3.7.

Исходные данные поступают в алгоритм управления из специально созданной базы данных проекта. База данных несет в себе функции: контроля расходуемых компонентов; хранения информации о технологических рецептах кормосмесей; параметров каждого шнекового дозатора с исполнительным асинхронным двигателем; геометрических параметров бункера дозатора; насыпного веса дозируемого материала.

Начало работы автоматизированной системы начинается с выбора соответствующего рецепта в SCADA системе на автоматизированном рабочем месте оператора (АРМ). Также определяется порядок дозирования компонентов внутри рецепта. Вместе с заданием на дозирование компонента конкретного рецепта комбикорма в алгоритм управления автоматически поступает заданное значение минимальной частоты переменного тока преобразователя обеспечивающая наименьшую возможную частоту вращения шнекового дозатора. Также для работы алгоритма необходима информация из базы данных о насыпном весе дозируемого материала и геометрических параметров шнекового дозатора и приемного бункера дозатора.

Алгоритмическое обеспечение микроконтроллера управления с помощью блока релейной коммутации, обеспечивает аппаратную поочередно согласованную работу всех шнековых дозаторов, задвижек, смесителей и рыхлителей.

Свойства дозируемого материала являются нестационарными, и потому получить дозирование каждой порции компонента смеси с одинаковой точностью является проблематичным. Для обеспечения требуемой точности дозирования задание каждой порции материала нужно корректировать согласно алгоритму коррекции ошибки дозирования на основе статистических данных (АКОСД). Данный алгоритм использует для коррекции задания текущего цикла данные предыдущего цикла дозирования. Для обеспечения эффективной работы алгоритма АКОСД, в базе данных сохраняется статистика работы всех шнековых дозаторов системы.

Сигнал пропорциональный текущему весу материала поступает на вход программного регулятора веса, который большую часть находится в насыщении для получения максимальной производительности. При приближении веса к заданному значению регулятор веса выходит из насыщения, и конечная фаза дозирования проходит на пониженной скорости.

Непрерывно в процессе работы автоматической системы вычисляется величина массы материала находящегося в воздухе при падении в бункер дозатора с помощью алгоритма коррекции ошибки дозирования вызванной массой падающего столба (АКОПД). С учетом вычисленной величины массы падающего столба конечная ошибка корректируется по формуле:

$\Delta m_{i,j} = m_{\text{коррзj}} - (m_{i,j} + m_{i,\text{ст}})$, где i – переменная цикла реального времени, j – номер текущего цикла.

При $m_{i,j} > m_{zj}$ отключается шнековый дозатор первого цикла дозирования и программа микроконтроллера управления, с помощью блока релейной коммутации подключает следующий шнековый дозатор к общему преобразователю частоты.

Каждый цикл дозирования добавляет автоматически рассчитанный объем компонента смеси в общий бункер дозатора, подвешенного на трех тензодатчиках, рассчитанных на одну тонну смеси, но текущий вес каждого последующего цикла отсчитывается в реальном времени с нулевого значения.

Порция комбикорма состоит из 6 различных компонентов различного веса. Общая масса порции кормосмеси в бункере дозатора составляет 1000 кг и при $j=6$ происходит дозирование последнего компонента рецепта комбикорма, после чего работа системы прекращается.

Цикл приготовления комбикорма заканчивается автоматическим открытием задвижки дозатора и перемешиванием технологически обусловленное время электроприводами смесителя и рыхлителя.

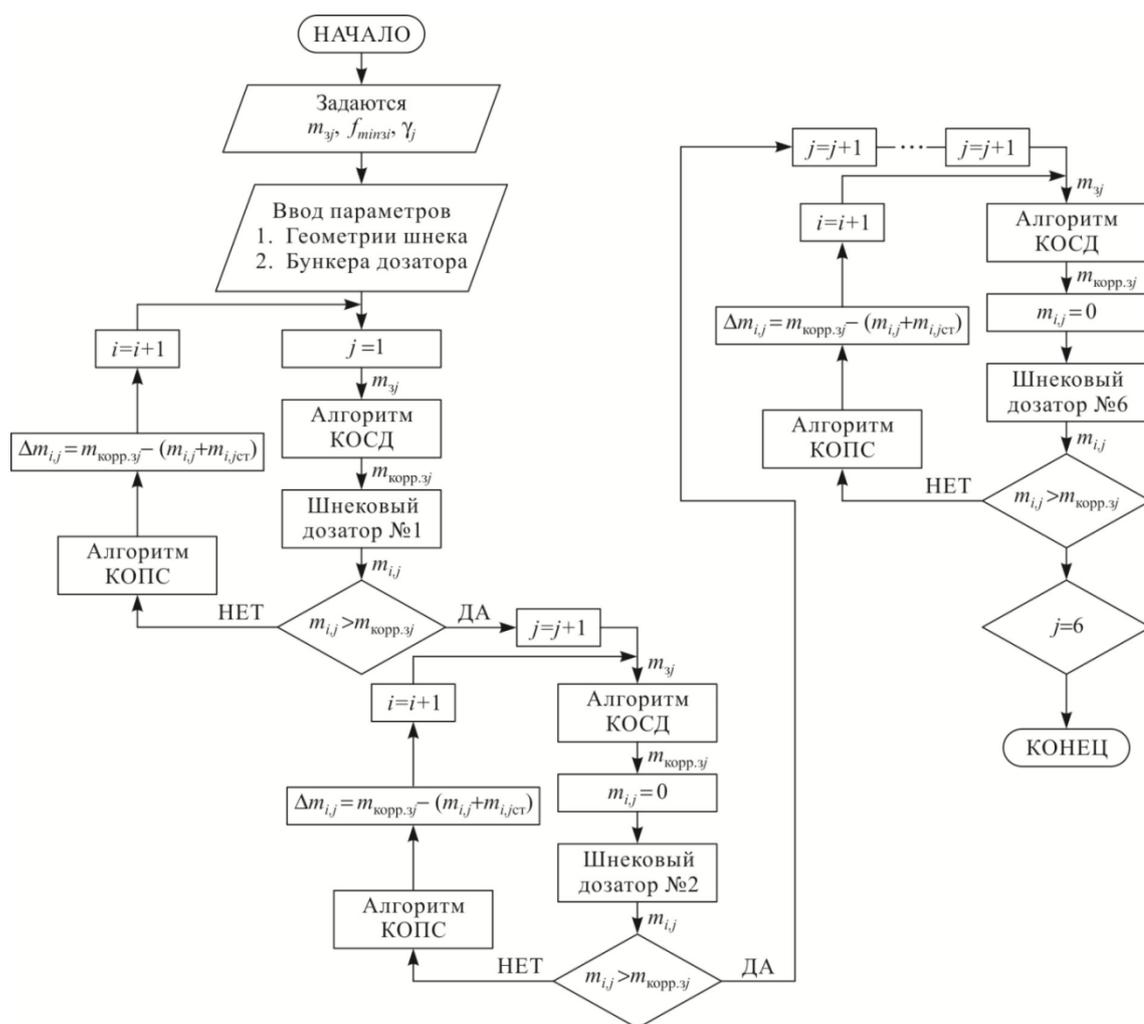


Рис.3.7 Алгоритм управления частотно-регулируемого асинхронного электропривода производства комбикормов

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

Данное алгоритмическое обеспечение автоматизированного электро-технического 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).

3.5. Алгоритм формирования задания электропривода в системе дозирования сыпучих материалов

Необходимую точность в системах дозирования получают за счет организации замкнутого контура регулирования по весу. Максимальное быстродействие здесь достигается за счет того, что регулятор веса большую часть времени дозирования находится в насыщении. Ввиду того, что дозируемые компоненты обладают нестационарными свойствами, существенно влияющими на сыпучесть материала, повторно получить дозирование материала с заданной точностью становится проблематично. Классический подход подчиненного регулирования на практике в таких системах дает всплеск ошибок (перевес или недовес), что в итоге при массовом производстве выливается в значительные финансовые потери. Для уменьшения ошибки управления в контур регулирования веса включается алгоритм коррекции ошибки дозирования на основе статистических данных с учетом поддержания производительности шнекового питателя на оптимальном уровне [43, 64].

Расчет задания на скорость шнекового питателя в реальном времени при коррекции регулятора веса и минимальной скорости задания работает в процессе дозирования текущей порции материала и минимизирует влияние изменения свойств материала.

Текущая ошибка дозирования определяется как

$$\Delta m_{ij} = m_{zi} - m_{ij}, \quad (3.6)$$

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 скорость двигателя определяется по формуле

$$f_{3j} = k_{pvi} \cdot \Delta m_{ij}. \quad (3.7)$$

При ограничениях на частоту

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

где k_{pvj} – коэффициент регулятора веса для каждого шага расчета; f_{zmax} и f_{zmin} – расчетные ограничения на частоту шнекового питателя.

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

При превышении времени работы увеличиваются минимальная скорость и коэффициент регулятора веса.

$$f_{zminj} = f_{zminj-1} + \Delta f_{zmin1} ; \quad (3.8)$$

$$k_{pvj} = k_{pvi-1} + \Delta k_{pv1} . \quad (3.9)$$

Параметры Δf_{zmin1} и Δk_{pv1} определяются экспериментально.

Если идет длительная работа на минимальной скорости, включается таймер контроля минимальной скорости и существенно увеличивается минимальная скорость работы шнекового питателя:

$$f_{zminj} = f_{zminj-1} + \Delta f_{zmin2} ; \quad (3.10)$$

$$\Delta f_{zmin2} > \Delta f_{zmin1} .$$

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

Структурная схема алгоритма коррекции задания частоты представлена на рис. 3.8.

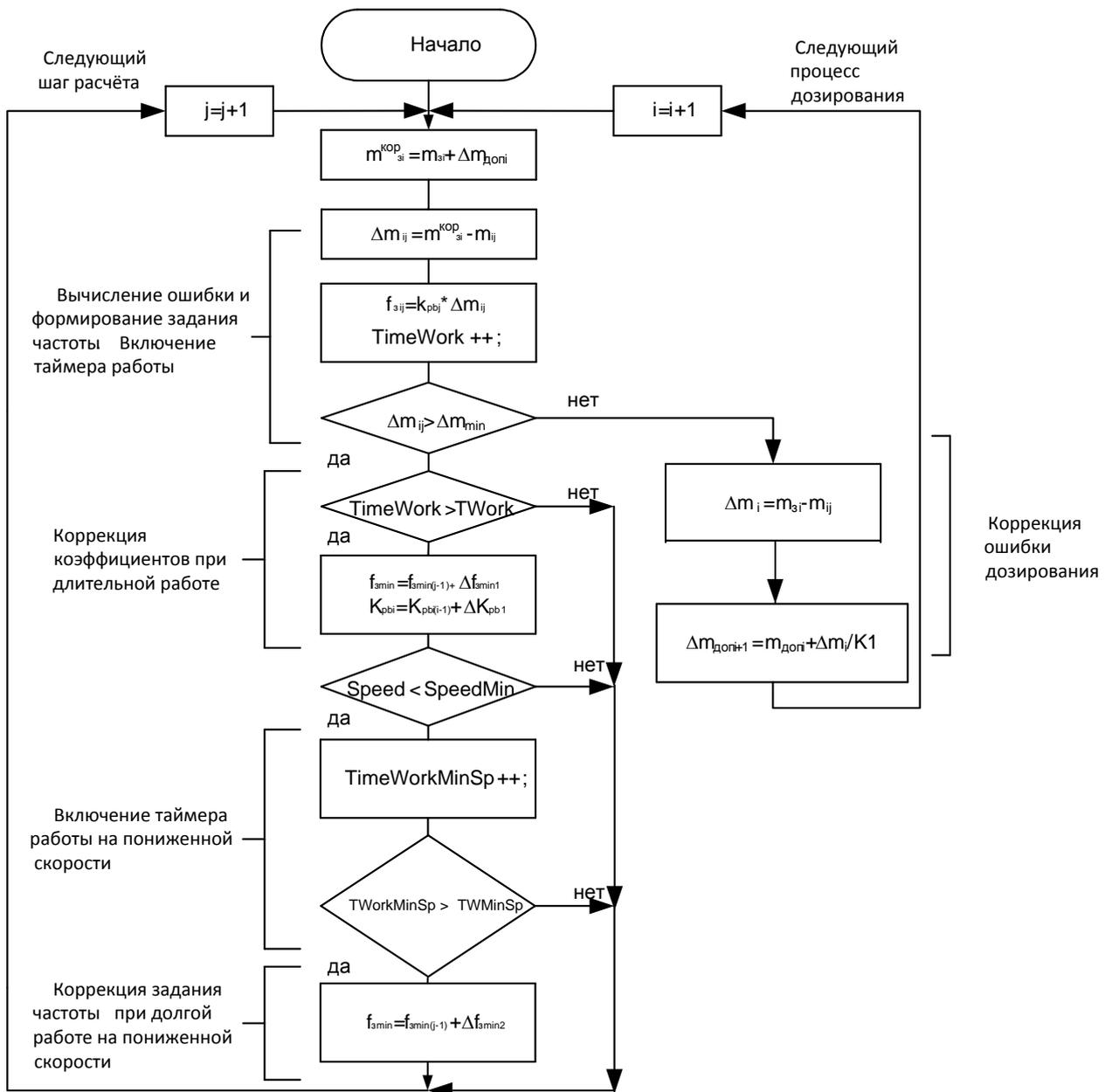


Рис. 3.8. Блок схема алгоритма коррекции задания частоты шнекового дозатора

Исходным параметром является ошибка дозирования по весу предыдущего дозирования.

$$\Delta m_{i-1} = m_{zi-1} - m_{i-1} \quad (3.11)$$

где m_{zi-1} – заданная масса; m_{i-1} – отработанная масса.

Корректирующая добавка к заданию определяется по формуле

$$m_{допi} = m_{допi-1} \pm \frac{\Delta m_{i-1}}{K_1}, \quad (3.12)$$

где $K_1 \approx 2$ – подбирается экспериментально [61].

Расчет задания с коррекцией определяется как

$$m_{3i} = m_3 - m_{доп i} \quad (3.13)$$

Разработанный алгоритм был реализован на языке СИ с помощью механизма *S-Function Builder* в *Simulink MatLab*. Имитационная модель системы управления с алгоритмом коррекции ошибки на основе статистических данных изображена на рисунке 3.9.

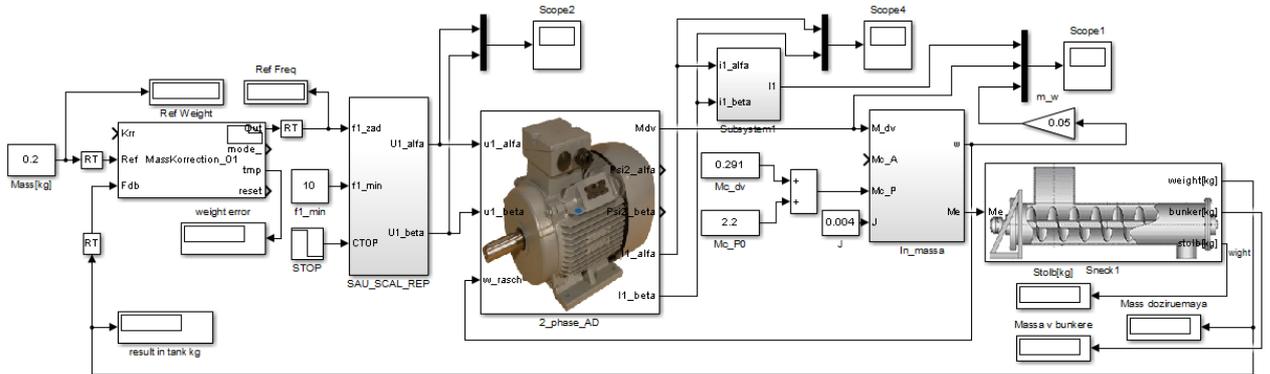


Рис. 3.9. Модель системы управления с алгоритмом компенсации ошибки дозирования

На рис. 3.10 изображен график переходного процесса дозирования одного килограмма материала без алгоритма коррекции задания на основе статистических данных.

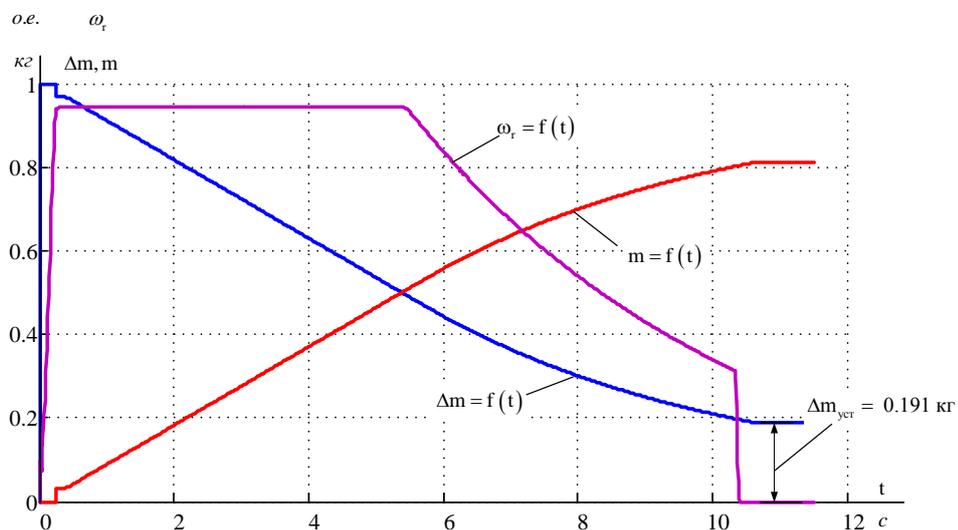


Рис. 3.10. Переходные процессы при первом пуске дозирования (без коррекции задания на основе статистических данных)

При пуске без использования алгоритма коррекции наблюдаем абсолютную ошибку дозирования 0,191 кг или относительную ошибку – 19,1% дозируемого материала.

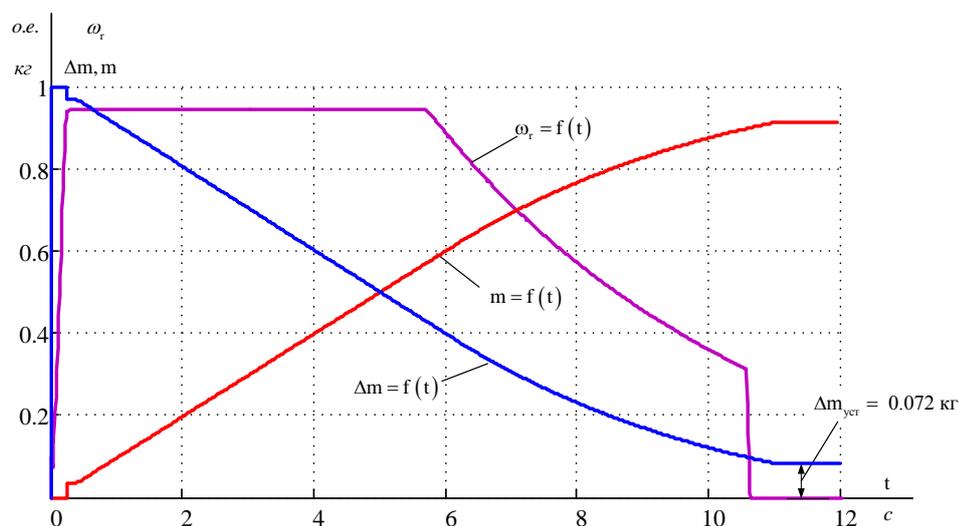


Рис. 3.11. Переходный процесс при последующих циклах дозирования

Из рис. 3.11 видно, что произошла компенсация абсолютной ошибки дозирования в 2,65 раз 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.

3.6. Алгоритм коррекции ошибки, вызванной массой «падающего столба» материала

При дозировании сыпучих грузов тензодатчики фиксируют вес материала, который находится фактически в бункере. Если не учитывать вес падающего столба материала, находящегося в воздухе после остановки шнека, можно получить значительную итоговую ошибку дозирования. В некоторых системах дозирования масса падающего столба может достигать нескольких десятков килограммов. Компенсировать массу падающего столба необходимо при формировании задания системе управления. Масса, не измеряемая датчиками веса, уже находится внутри бункера в состоянии падения. Для ее учета необходимо к сигналу обратной связи прибавить величину вычислен-

ной массы падающего столба. В систему управления поступает измеренная величина массы дозируемого материала в бункере [43]. Если известен насыпной вес дозируемого материала γ и бункер выполнен в виде параллелепипеда, то массу падающего столба можно рассчитать по формуле (2.44).

Геометрические размеры бункера и плотность материала задаются в алгоритме управления как постоянные величины и для контроля массы падающего столба необходима информация с датчиков веса. Подставив в формулу (2.44) значения площади падающего столба $S_{\text{но}}$ из формулы (2.43) и высоты падающего столба $h_{\text{но}}$, рассчитываемой по формуле (2.42) и выполняя преобразования с учетом формул (2.40) и (2.41), получаем выражение для определения массы падающего столба:

$$m_{\text{ст}} = \left[\frac{\pi}{4} \cdot (D_0^2 - d_0^2) \right] \cdot \left[h_0 + \left(h_6 - \frac{m}{\rho \cdot a \cdot b} \right) \right] \cdot \gamma. \quad (3.14)$$

Для бункера, выполненного в виде усеченной пирамиды с параллелепипедом в основании (см. рис. 2.9), масса падающего столба определяется по выражению

$$m_{\text{ст}} = \left[\frac{\pi}{4} \cdot (D_0^2 - d_0^2) \right] \cdot \left[h_0 + \left(h_6 - \frac{m \cdot 3}{\rho \cdot c \cdot (d \cdot e + \sqrt{d \cdot e \cdot a \cdot b} + a \cdot b)} \right) \right] \cdot \gamma. \quad (3.15)$$

Далее вычисляем ошибку дозирования, с учетом корректировки массы «падающего столба» материала, которая поступает на вход регулятора веса в алгоритме управления:

$$\Delta m = m_{\text{зад}} - (m_{\text{ос}} + m_{\text{ст}}), \quad (3.16)$$

где $m_{\text{зад}}$ – заданная масса материала; $m_{\text{ос}}$ – масса, полученная по сигналу обратной связи.

Для имитационного моделирования по формулам, приведенным выше, строим структурную схему (рис. 3.12).

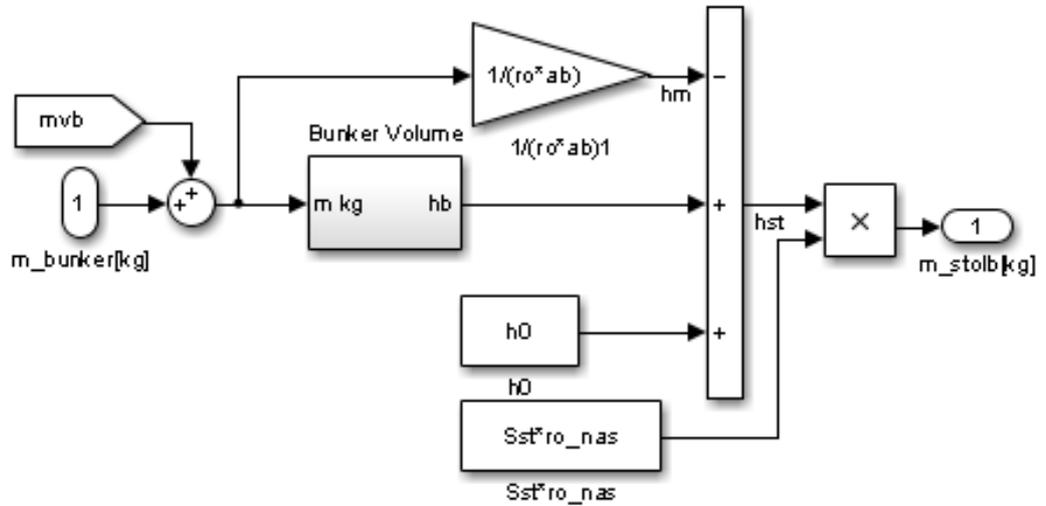


Рис. 3.12. Имитационная модель алгоритма вычисления массы падающего столба материала

Структурная схема алгоритма учета массы падающего столба материала показана на рис. 3.13.

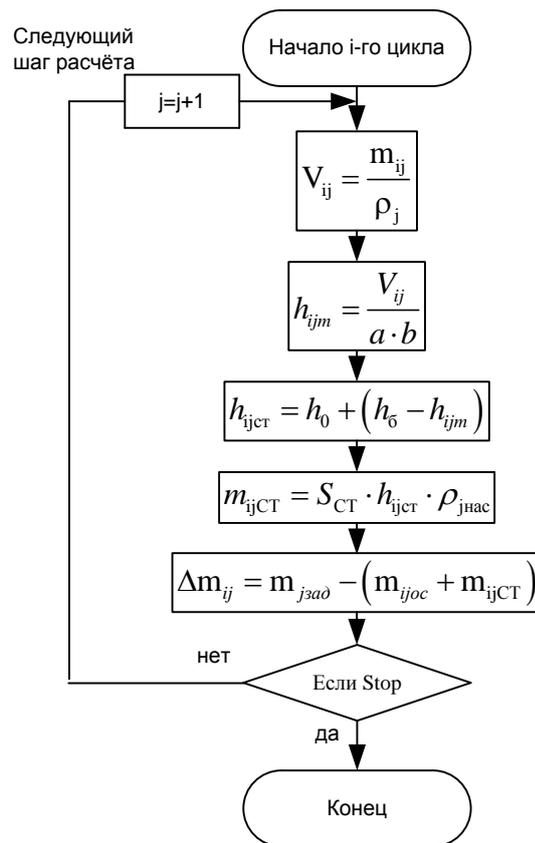


Рис. 3.13. Алгоритм учета массы падающего столба

Повышение точности системы дозирования сыпучих материалов можно достигнуть путем использования совместного применения рассмотренных выше алгоритмов коррекции ошибки дозирования.

Имитационная модель комплексного применения алгоритма учета влияния массы падающего столба в бункер дозатора и алгоритма коррекции ошибки на основе статистических данных представлена на рис. 3.14.

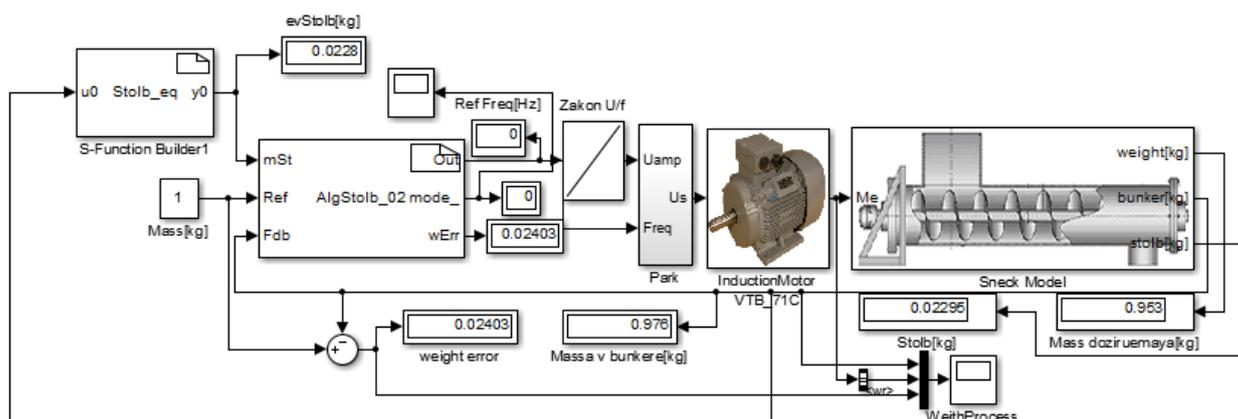


Рис. 3.14. Комплексная имитационная модель коррекции ошибки

Результаты имитационного моделирования дозирования 1 килограмма сыпучего материала при совместном использовании алгоритмов компенсации ошибки приведены на рис. 3.15. Как видно из рис. 3.15, применение алгоритмов компенсации ошибки дозирования позволяет уменьшить абсолютную ошибку дозирования в 7,07 раз, относительно дозирования на имитационной модели с релейным регулятором веса без использования алгоритмов коррекции ошибки (рис.2.17) и результирующая ошибка дозирования составила 2,7%, что соответствует требованиям технического регламента приготовления комбикорма ($\pm 3\%$).

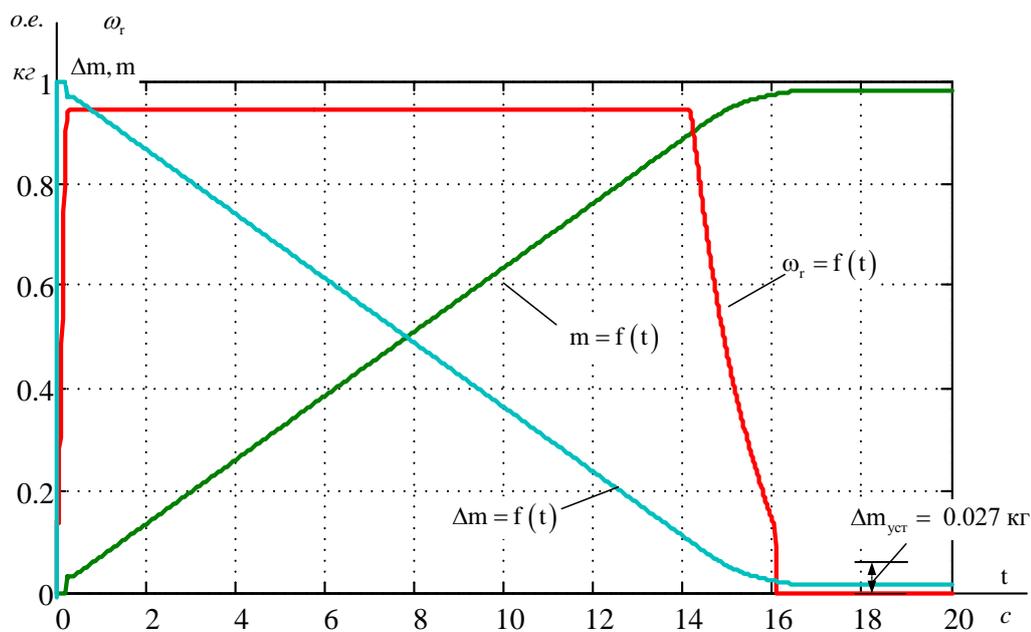


Рис. 3.15. Дозирование при совместном использовании алгоритмов коррекции ошибки

На имитационной модели была проведена серия экспериментов при дозировании материала разного веса при совместном использовании алгоритмов коррекции задания на основе статистических данных и компенсации ошибки дозирования, вызванной массой падающего столба материала. Результаты моделирования дозирования 2 и 3 килограммов материала при использовании алгоритмов коррекции ошибки изображены на рис. 3.16 и 3.17.

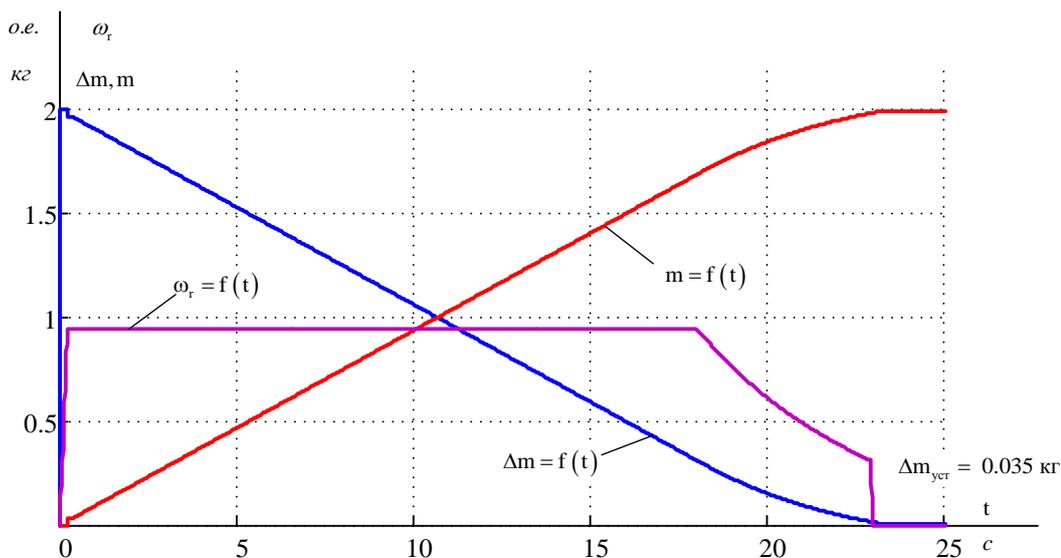


Рис. 3.16. Результаты моделирования дозирования 2 килограммов материала при использовании алгоритмов коррекции ошибки

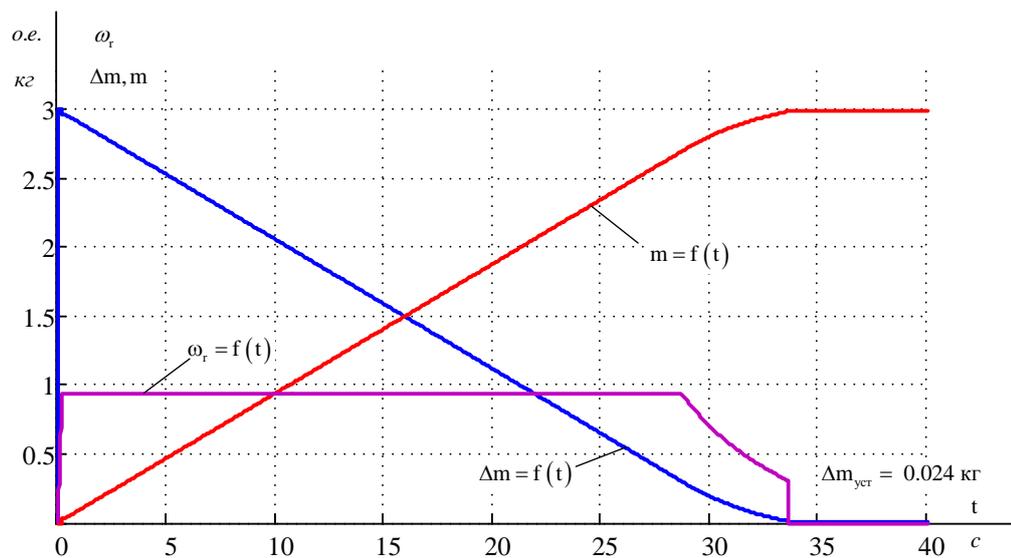


Рис. 3.17. Результаты моделирования дозирования 3 килограммов материала при использовании алгоритмов коррекции ошибки

Гистограмма, показывающая значения ошибки при нескольких циклах дозирования разного задания веса, изображена на рис. 3.18.

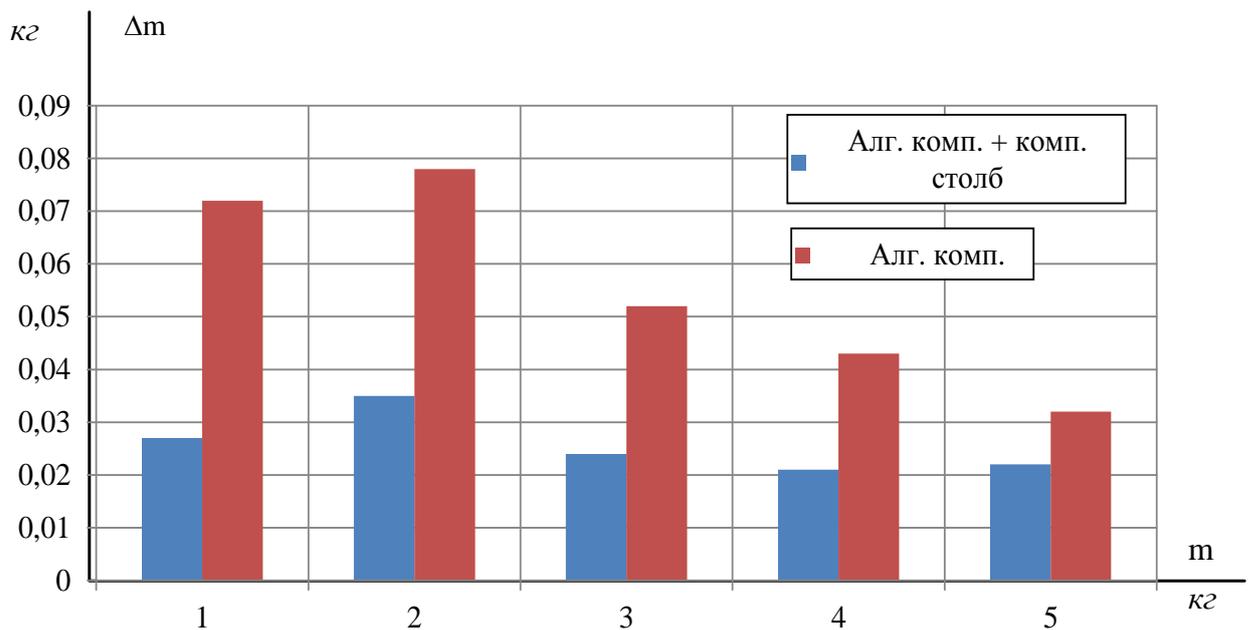


Рис.3.18 Гистограмма ошибки при использовании алгоритмов сигнальной адаптации

Красным цветом показаны результаты работы алгоритма коррекции ошибки по статистическим данным, а синим цветом, представлены результаты работы алгоритма коррекции ошибки по статическим данным и при использовании алгоритма компенсации ошибки, вызванной массой падающего столба материала. Как видно из рис. 3.18, при первом цикле дозирования аб-

солютная ошибка максимальная, а в последующих циклах соблюдается тенденция ее уменьшения. Это можно объяснить тем, что алгоритм компенсации ошибки использует результаты предыдущего дозирования для коррекции текущего.

Алгоритмы, разработанные в данной диссертационной работе, внедрены в систему приготовления комбикормов на предприятиях «Сибирской аграрной группы» САГ Томской области.

Разработанные алгоритмы основаны на использовании статистических данных по каждому дозируемому компоненту отдельно. Проведем серию экспериментов на имитационной модели по дозированию компонентов комбикорма таких как: пшеница, ячмень, горох, отруби, подсолнечный шрот. Статистические данные состоят из 5 циклов дозирования каждого материала веса 1 килограмм. Результаты ошибки дозирования для каждого цикла приведены в таблице 3.1

Таблица 3.1

Цикл	Ошибка дозирования, Δm , кг					
	Ячмень	Пшеница	Горох	Отруби	Кукуруза	Подсолнечный шрот
1	0,102	0,098	0,096	0,175	0,089	0,124
2	0,02	-0,03	-0,032	0,012	0,011	0,028
3	0,007	0,006	0,005	0,011	0,009	0,01
4	0,007	0,008	0,006	0,009	0,008	0,008
5	0,009	0,01	0,011	0,008	0,008	0,01

Гистограмма зависимости ошибки от цикла дозирования для каждого материала приведена на рисунке 3.19

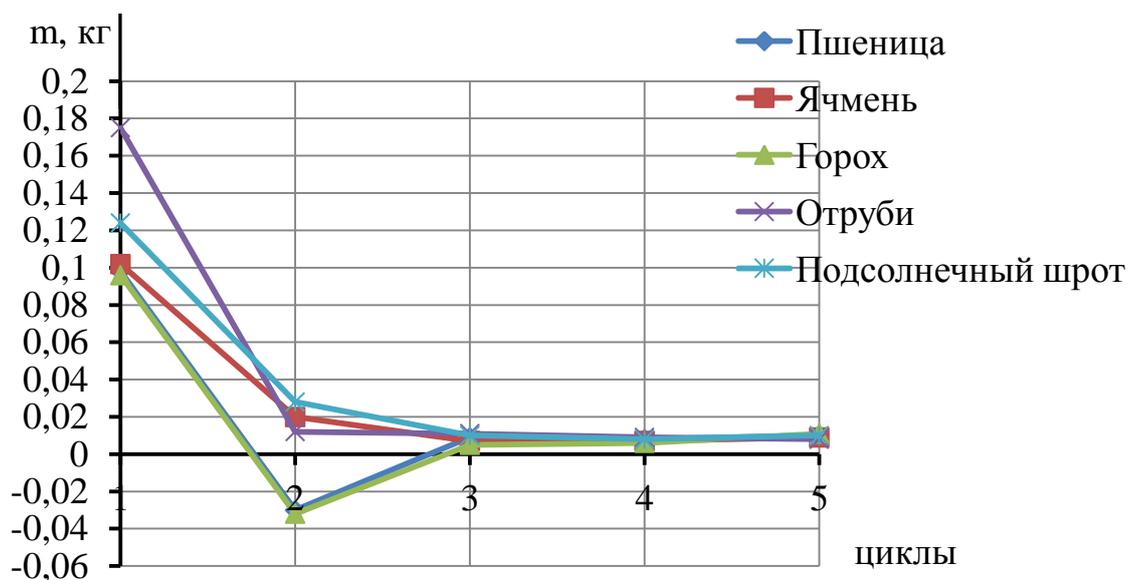


Рис. 3.19 Статистические данные дозирования компонентов комбикорма

Первый цикл дозирования проводился без использования алгоритмов коррекции ошибки дозирования, поэтому абсолютная ошибка является максимальной и больше допустимой величины. Как видно из рисунка 3.19 алгоритмы коррекции ошибки при первых циклах дозирования снижают абсолютную ошибку дозирования до допустимого уровня, а за тем алгоритмы удерживают ошибку в минимальном диапазоне, тем самым обеспечивая качество приготовления комбикорма. В увеличенном масштабе диаграмма дозирования последующих циклов дозирования показана на рисунке 3.20.

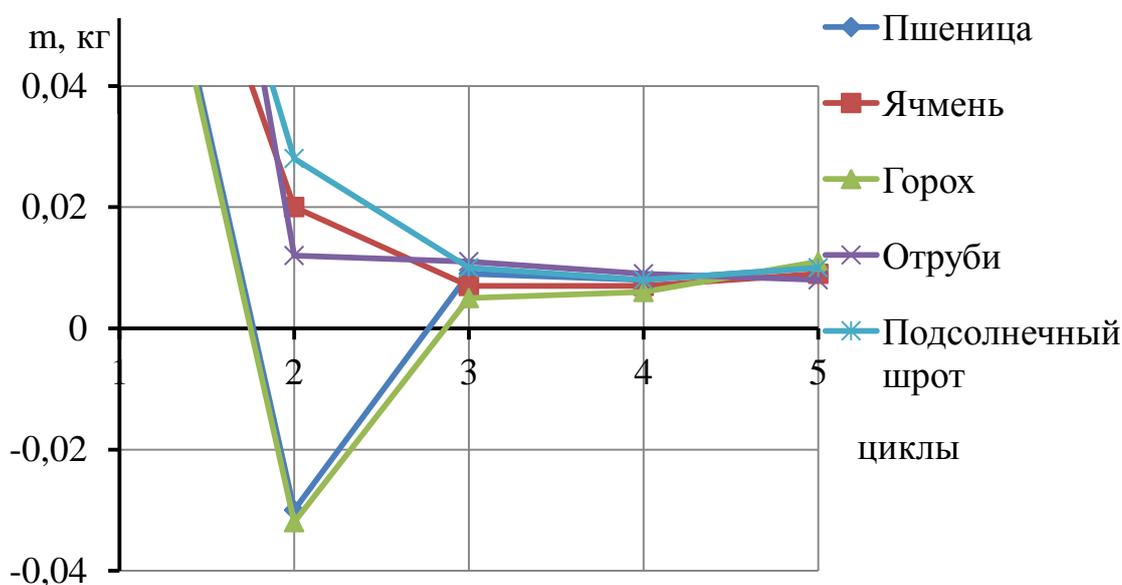


Рис. 3.20 Статистические данные дозирования компонентов комбикорма

3.7. Методика проектирования систем многокомпонентного дозирования

При проектировании систем многокомпонентного дозирования необходимо учитывать все статические и динамические факторы, которые могут влиять на производительность системы и качество приготовления конечного продукта. Для создания подобных систем необходимо придерживаться следующей методики.

А. Оценка количества компонентов, фракционного состава дозируемого материала и определение диапазона изменения их свойств

Комбикорма представляют собой сложную однородную смесь различных кормовых компонентов, предварительно очищенных, измельченных и подобранных по научно обоснованным рецептам с целью наиболее эффективного использования животными питательных веществ.

Основой комбикорма является зерновое сырье, оно составляет примерно 60-65% во всех используемых рецептах комбикорма. Из зерновых культур это: пшеница, ячмень, кукуруза, овес, просо. Их особенность – высокое содержание углеводов до 70%, низкое содержание белка – 10-15% [56]. Бобовые – горох, бобы, соя, люпин. Это высокобелковые культуры с содержанием белка 25-45%. Масличные культуры: подсолнечник, хлопчатник, рапс, сурепка, рыжик, вносятся в комбикорма в виде отходов от производства растительного масла (жмых, шрот). Также в состав могут входить отходы, получаемые при переработке зерна в крупу и муку, отходы пищевой промышленности, корма животного происхождения, грубые корма и др.

Технология приготовления комбикормов состоит из следующих последовательно выполняемых операций: приемка, размещение и хранение сырья; измельчение; дозирование; смешивание; прессование; хранение.

Комбикорма, белково-витаминные добавки и премиксы вырабатывают только по утверждённым рецептам, составленным с учётом допустимых норм включаемых технологически подготовленных составных частей комби-

корма (компонентов комбикорма) в зависимости от вида, возраста и назначения животного или птицы.

Равнозначные компоненты заменяют в соотношении 1:1 для рационального использования различных видов сырья, имеющихся на данном комбикормовом заводе. Равнозначными компонентами являются для злаковых культур: зерно кукурузы, ячмень, рожь, пшеница, овёс, просо; для бобовых культур – горох, соя, чечевица, кормовые бобы, люпин безалкалоидный; зерно-злаковых и бобовых культур: одноимённые сечки и дроблёнки, получаемые в крупяном производстве. При внесении изменений в состав рецепта обязательно рассчитывают его питательность.

Процесс дозирования каждого компонента зависит от гранулометрического состава материала. По гранулометрическому составу сыпучего материала оценивают количественное распределение составляющих его частиц по линейным размерам.

Для определения гранулометрического состава сыпучих материалов используют методы непосредственного измерения, ситового анализа, седиментационного анализа, фильтрации, разделения в поле центробежных сил и электроклассификации [50].

Влажность сыпучих материалов влияет на многие их свойства: сыпучесть, коэффициенты внутреннего и внешнего трения, насыпная объемная масса и т.д.

Гигроскопичность зерновой массы означает ее способность поглощать пары воды из воздуха или выделять ее в окружающую среду. Белковые молекулы зерна способны впитывать до 240%, а мелкодисперсные материалы, такие как крахмал – до 30-38% воды относительно своей массы. Гигроскопичность зерна зависит как от его свойств, так и от свойств воздуха.

В результате взаимодействия зерновой массы с окружающей средой влажность зерна непрерывно изменяется до достижения равновесной влажности.

Самая равновесная влажность зерна устанавливается при насыщении воздуха водяным паром до 100%. Дальнейшее увлажнение может происходить только при впитывании капельно-жидкой влаги. Влажность зерна 7-10% устанавливается при относительной влажности воздуха 15-20%. Это самая низкая граница влажности зерна в производственных условиях.

Зерно и семена зерновых, масличных и бобовых культур через различный химический состав имеют неодинаковую равновесную влажность. Самая высокая она у семян бобовых, средняя – у зерновых, и наименьшая – у масличных культур. Снижение величины равновесной влажности обусловлено уменьшением содержания в зерне гидрофильных веществ. С понижением температуры воздуха равновесная влажность зерна и семян растет.

В. Определение неизменяемых параметров системы многокомпонентного дозирования

К неизменяемым параметрам системы относятся: геометрические размеры бункера дозатора и шнека; расположение шнекового дозатора относительно бункера в вертикальной и горизонтальной плоскости

Для динамического определения массы «падающего столба» материала при дозировании в алгоритм вводятся постоянные величины: геометрические размеры бункера (высота, ширина, длина), расстояние от бункера до шнека, а также паспортные данные шнекового дозатора (диаметр внешний и внутренний, шаг винта).

Производительность и точность дозирования напрямую зависит от угла наклона шнекового дозатора. Коэффициент, учитывающий угол наклона шнекового дозатора необходимо определить и внести как исходные данные в программное обеспечение автоматизированной системы дозирования. По результатам исследований проведенных во 2 главе настоящей диссертации, наиболее оптимальные показатели дозирования можно получить при горизонтальном расположении шнека к линии горизонта. Исходя из этого факта, необходимо либо добиться соответствующего расположения технологиче-

ского оборудования, либо точно определить угол наклона и учитывать эту информацию в алгоритме управления.

С. Настройка математической и имитационной модели с учетом параметров компонентов и технологического оборудования

С помощью имитационного моделирования осуществляется предварительная проверка точности процесса дозирования для различных компонентов кормосмеси с построением количественных зависимостей с учетом параметров электротехнического комплекса и свойств дозируемых компонентов.

Д. Выбор структуры и параметров регулятора веса

Из полученных зависимостей выбирается структура и параметры регулятора веса. Процесс дозирования сыпучего материала не должен сопровождаться перерегулированием и поэтому контур веса настраивается на модульный оптимум с регулятором веса пропорционального типа.

Е. Корректировка процесса дозирования с помощью разработанных алгоритмов коррекции задания веса

Повышение эффективности управления электропривода автоматизированного комплекса дозирования сыпучих материалов производится с помощью применения разработанных сигнальных алгоритмов на основе статистических данных и алгоритма коррекции ошибки дозирования, обусловленной неучтенной датчиками веса массы «падающего столба» материала в бункер-дозатор.

3.8. Выводы

1. Разработан алгоритм управления частотно-регулируемым асинхронным электроприводом, позволяющий дозировать с заданной точностью малые компоненты кормосмеси. Выявлено, что для уменьшения влияния массы «падающего столба» на точность дозирования, необходимо установить порядок дозирования компонентов внутри рецепта от наибольшего компонента к наименьшему компоненту.

2. Установлено, что для уменьшения ошибки дозирования в контур регулирования веса необходимо ввести алгоритм коррекции ошибки на основе статистических данных. Выявлено, что применение алгоритма коррекции ошибки дозирования на основе статистических данных позволяет уменьшить абсолютную ошибку в 2,6 раза.

3. Выявлено, что для исключения переменной ошибки дозирования, возникающей из-за массы падающего столба материала внутри бункера-дозатора, в системе управления частотно регулируемого электропривода необходимо использовать алгоритм динамической коррекции задания на дозирование с учетом компенсации влияния массы падающего столба в реальном времени.

4. Установлено, что совместное использование алгоритмов коррекции ошибки дозирования на основе статистических данных и компенсации ошибки, вызванной весом падающего столба, обеспечивает максимальную точность и эффективность автоматизированного комплекса дозирования сыпучих материалов. Применение разработанных алгоритмов позволяет увеличить точность дозирования в 7 раз, а итоговая ошибка дозирования составляет 2,7%, что соответствует техническому регламенту приготовления кормосмесей.

5. Предложена обобщенная инженерная методика проектирования систем многокомпонентного дозирования для данного типа технологических задач.

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ ДОЗИРОВАНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

4.1. Структура испытательного стенда дозирования сыпучих материалов

На кафедре электропривода и электрооборудования разработан экспериментальный стенд для практической проверки разработанных алгоритмов автоматизированной системы дозирования сыпучих материалов.

Для обеспечения достаточной надежности трехуровневый программно-аппаратный комплекс реальной системы представлен на испытательном стенде (Рис. 4.1). На верхнем уровне системы управления стендом находится специально разработанная SCADA-система. Средний уровень включает в себя модуль релейной коммутации и управляющий контроллер фирмы Fastwel RTU 188-BS. Нижний уровень содержит тензодатчики веса, один шнековый дозатор со спиральным винтом, бункер дозатора с задвижкой и исполнительный частотно-регулируемый асинхронный электропривод Danfoss VLT Micro Drive FC 51 мощностью 0,75 кВт. Взаимодействие между верхним и средним уровнями АСУ ТП стенда осуществляется посредством интерфейса RS-232 на физическом уровне и специально разработанным для стенда протоколом обмена.

На рис. 4.2 представлена функциональная схема асинхронного электропривода шнекового дозатора для автоматического дозирования сыпучих материалов. На рис. 4.2 приняты следующие обозначения:

Модуль МК – модуль микроконтроллера;

ПЧ – преобразователь частоты;

БРК – блок релейной коммутации;

НСУ – нормирующий суммирующий усилитель;

М – асинхронный двигатель;

ТДВ – тензодатчик веса;

ШП – шнековый питатель;

РБ – расходный бункер.

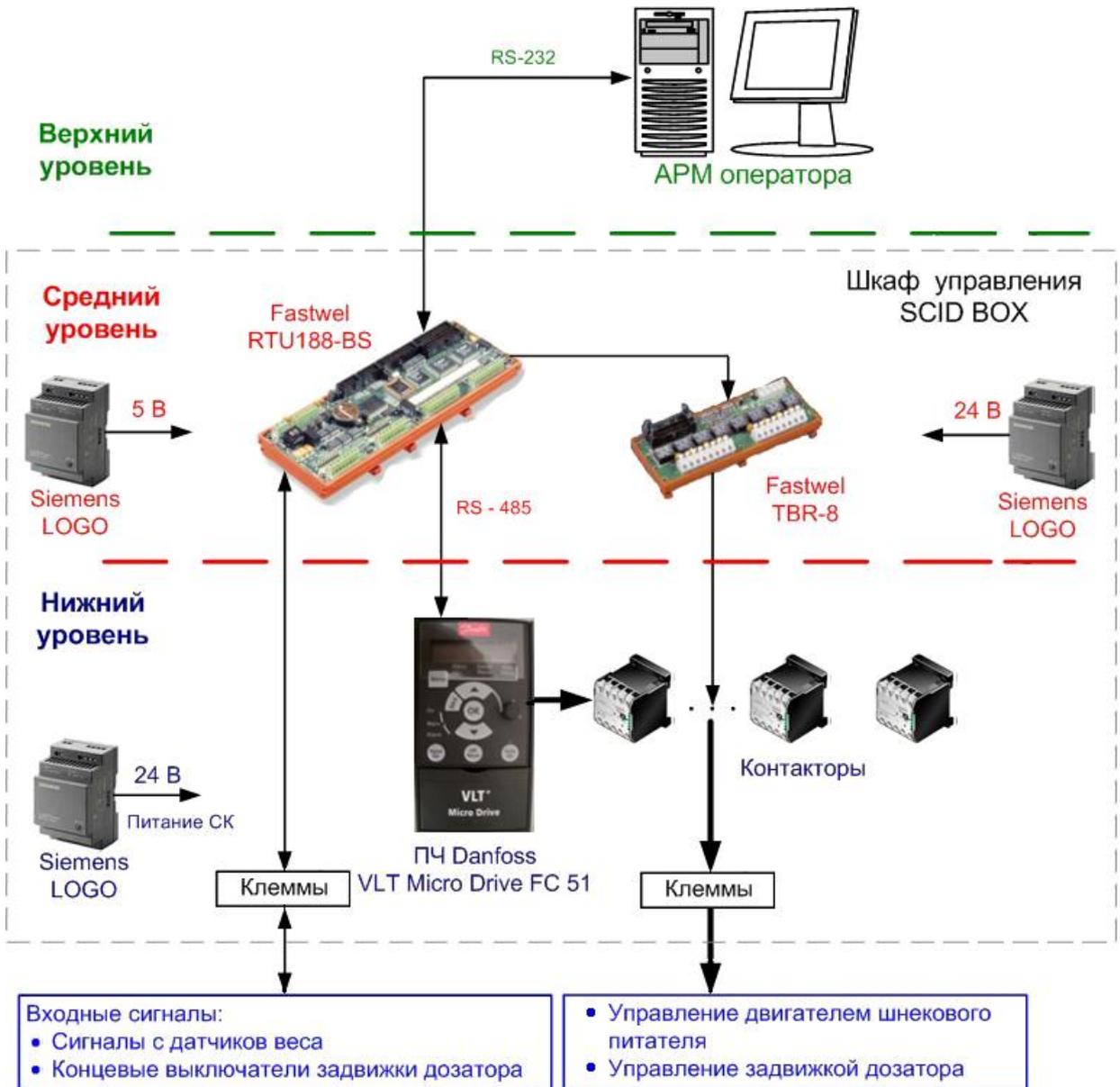


Рис. 4.1. Уровни управления АСУ ТП испытательного стенда для исследования систем дозирования сыпучих материалов

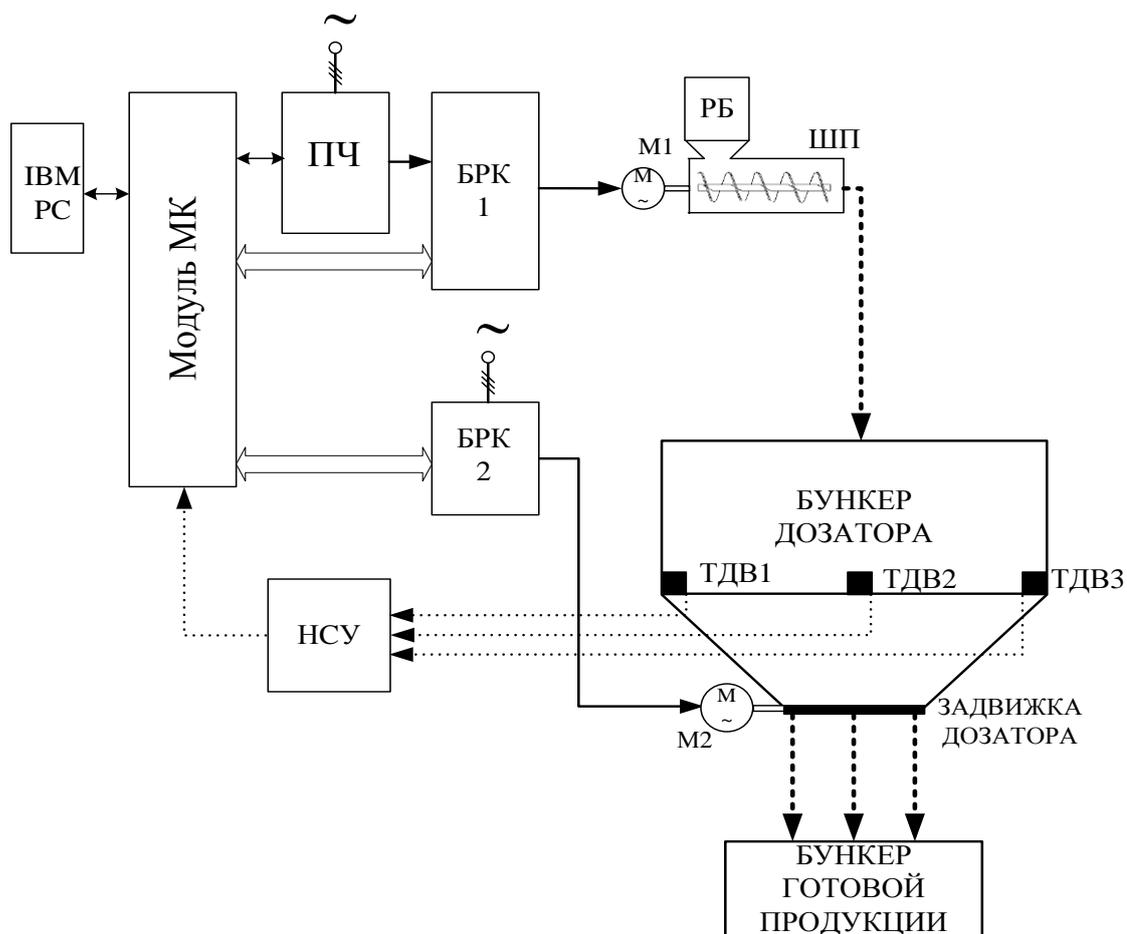


Рис. 4.2. Функциональная схема «Система автоматического дозирования сыпучих материалов» экспериментальной установки

На входе регулятора веса, программно выполненного в микроконтроллере, суммируются сигнал задания на вес, поступающий с персонального компьютера, и сигнал с нормирующего усилителя, пропорциональный текущему весу. Выход регулятора веса является заданием на частоту преобразователя и, соответственно, скорости вращения асинхронного двигателя шнекового питателя. По мере наполнения бункера разница между заданной и действительной массой в бункере уменьшается, что приводит к уменьшению скорости электропривода. Остановка двигателя осуществляется на небольшой скорости, что положительно сказывается на точности дозирования. После остановки двигателя шнекового питателя по сигналу с микроконтроллера коммутируется силовая цепь задвижки дозатора. Перемещение материала в бункер готовой продукции происходит автоматически.

Внешний вид разработанной экспериментальной установки изображен на рис. 4.3.



Рис. 4.3. Экспериментальная установка
«Система автоматического дозирования сыпучих материалов»

Управление автоматической микропроцессорной системы дозирования осуществляется программным способом с применением алгоритмов коррекции ошибки дозирования. Коммутация силовых цепей стенда происходит по команде микроконтроллера с помощью блока релейной коммутации. Управление асинхронным двигателем шнекового питателя осуществляется от преобразователя частоты фирмы Danfoss со скалярным управлением.

Дозирование сыпучего материала происходит из расходного бункера спиральным шнеком в бункер дозатора, который подвешен на три тензодатчика веса. Сигналы с датчиков поступают в нормирующий суммирующий усилитель, где суммируются и нормализуются в стандартный токовый сигнал и в таком виде поступают в микроконтроллер на вход программно выполненного регулятора веса.

Асинхронный двигатель задвижки дозатора включается непосредственно в сеть с управлением останова от концевых выключателей. Все оборудование размещается в герметичном защищенном от пыли и влаги шкафу и располагается на DIN-рейке (рис. 4.4).



Рис. 4.4. Шкаф управления системой автоматического дозирования сыпучих материалов

4.2. Программное обеспечение экспериментальной установки

Программное обеспечение стенда на верхнем уровне разработано в среде Delphi 7 и работает под управлением операционной системы Windows XP, так как с точки зрения разработки собственных SCADA-систем большими перспективами обладает именно программная среда Delphi. Это обусловлено рядом факторов: большая распространенность Delphi в инженерной среде, большое количество утилит и компонентов, предназначенных как для управления аппаратными возможностями промышленных компьютеров, так и для реализации различных сетевых протоколов обмена. Однако в отличие от «классических» SCADA-систем реализация проектов в Delphi сопряжена с такими трудностями, как необходимость создания проекта с нуля, сложность обнаружения ошибок в

коде программы. На среднем уровне программное обеспечение реализовано на языке программирования C++. В качестве операционной системы используется предустановленная дисковая операционная система FDOS фирмы Fastwel [12, 44].

SCADA-система управления технологическим процессом дозирования и смешивания компонентов комбикорм с использованием разработанных в диссертации алгоритмов, внедренная авторским коллективом на предприятии ЗАО «Сибирская аграрная группа» представлена в Приложении П4.

SCADA-система управления экспериментальной установки представлена на рис. 4.5.

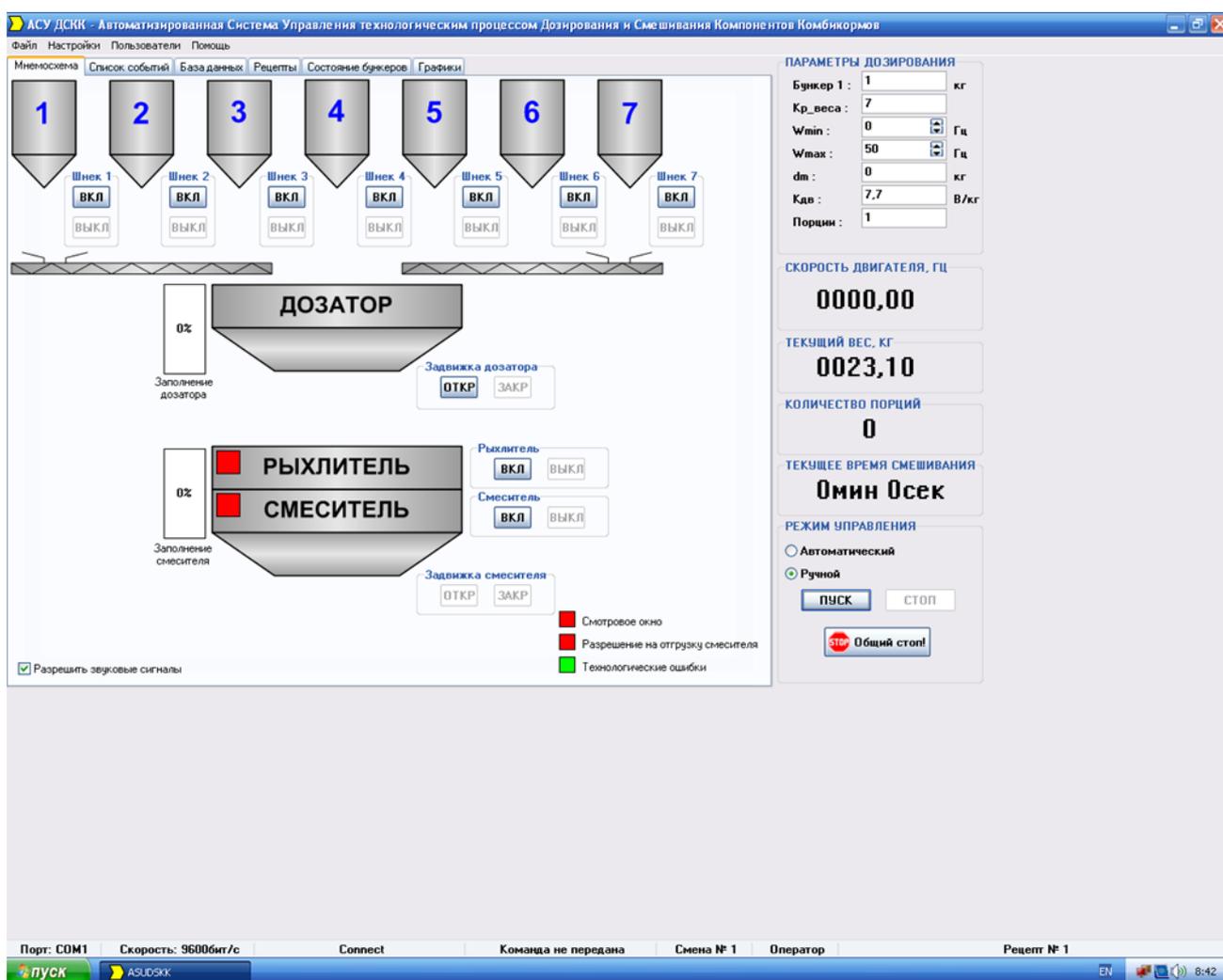


Рис. 4.5. SCADA-системы управления дозирования сыпучих материалов

SCADA система предназначена для автоматического управления и визуализации параметров технологического процесса дозирования сыпучих материалов с рабочего места исследователя на персональном компьютере.

Система может работать как автоматическом, так и в ручном режиме с помощью оператора-исследователя. SCADA система позволяет задавать исходные данные в программе микроконтроллера такие как: заданный вес материала, минимальная и максимальная частота преобразователя, коэффициент регулятора веса и значение калиброванного коэффициента датчика веса.

Текущий вес, поступающий с датчиков веса отображается в SCADA системе в виде числового значения и также с помощью вкладки графики строится переходный процесс текущего веса и задание на скорость шнекового дозатора от времени (рис. 4.6)

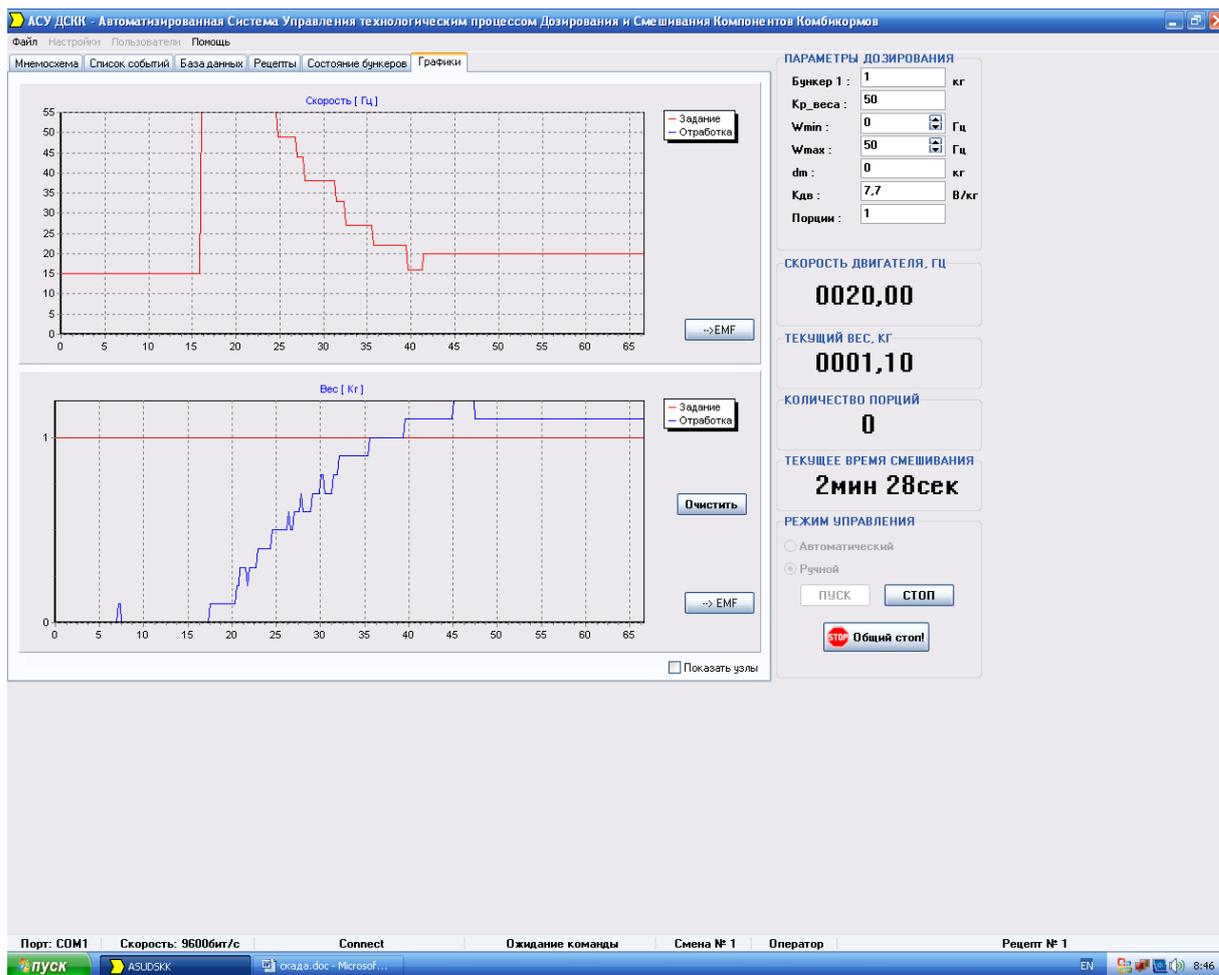


Рис. 4.6. Вкладка «Графики» SCADA-системы управления дозирования сыпучих материалов

4.3 Дозатор с конвейером бесстержневого типа СТ-55

Конвейеры бесстержневые типа СТ предназначены для транспортировки сыпучих пищевых и других продуктов в горизонтальном положении или под наклоном до 90° к горизонту по трассам с прямыми и изогнутыми участками [37, 45].

Технические характеристики конвейера

Конвейер СТ-55 должен иметь следующие основные параметры и характеристики (табл. 4.1) [44].

Таблица 4.1

Наименование показателя	Значение
1. Диаметр трубопровода, мм	55
2. Диаметр гибкой спирали, мм	38
3. Максимальный угол наклона, град.	90
4. Максимальная длина конвейера, м	25
5. Радиус кривизны одного изогнутого участка, м, не менее	1,6
6. Номинальная мощность привода, кВт	0,55...0,70

Показатели надежности:

- средняя наработка на отказ, ч, не менее – 1000;
- установленная безотказная наработка, ч, не менее – 500;
- установленный срок службы до капитального ремонта, лет, не менее – 3;
- коэффициент технического использования, не меньше – 0,9;
- средний срок хранения в заводской упаковке, мес., не менее – 18.

Устройство и работа конвейера

Основой конвейера является его транспортирующая часть – бесстержневой винт в виде спирали, встроенный в цилиндрический кожух (трубу) (рис. 4.7).

Продукт засыпается в загрузочный бункер и вращающейся спиралью транспортируется по магистральному трубопроводу к разгрузочному бункеру, где продукт разгружается.

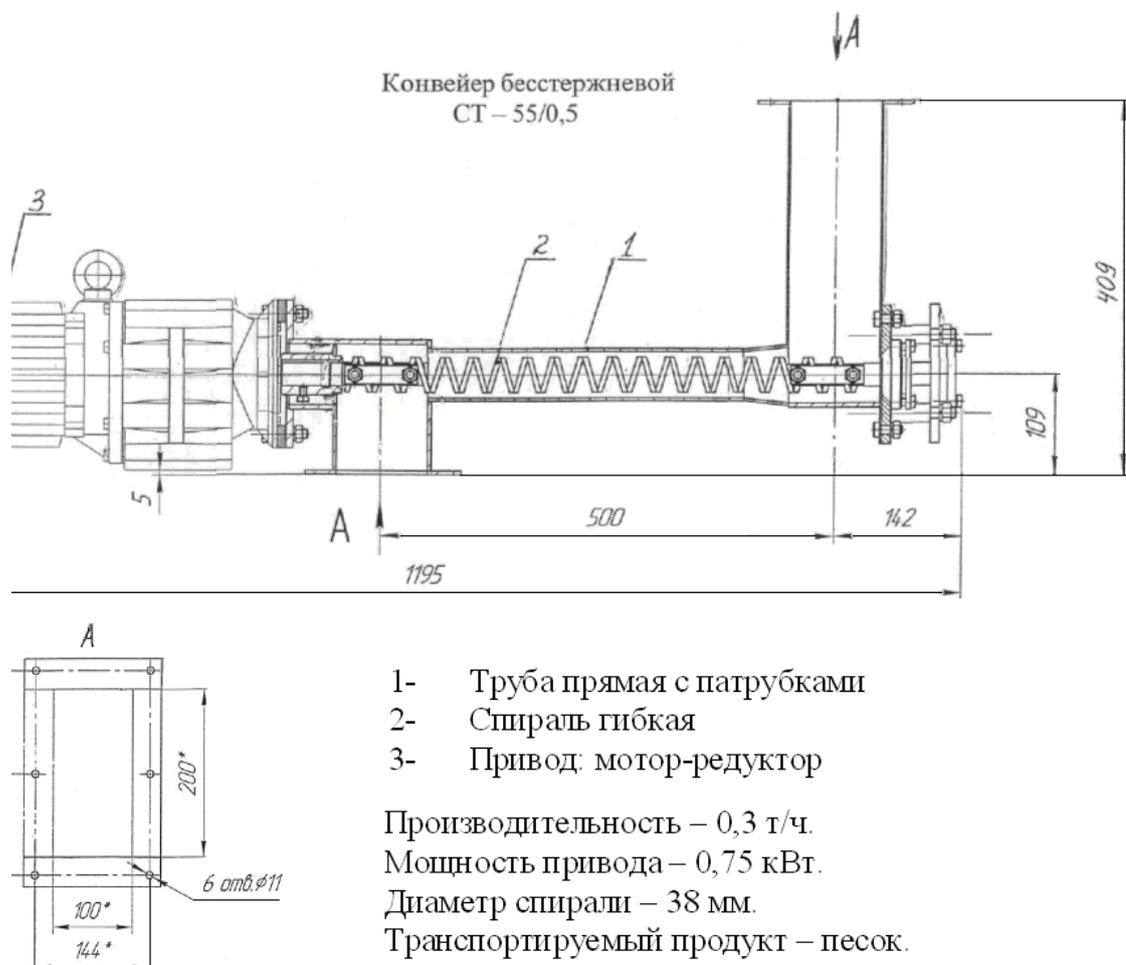


Рис. 4.7. Конвейер бесстержневой типа СТ-55

4.4 Микропроцессорная система управления электроприводом испытательного стенда

4.4.1 Преобразователь частоты Danfoss VLT Micro Drive FC 51

Для экспериментального стенда был выбран преобразователь частоты фирмы Danfoss серии VLT Micro Drive FC 51 мощностью 0,75 кВт для двигателя шнекового питателя серии VTB71С с номинальной мощностью 0,75 кВт.

Частотные преобразователи производства компании Danfoss позволяют:

- осуществлять пуск асинхронного электродвигателя без превышения номинального тока;
- производить разгон и торможение электродвигателя за заданные промежутки времени;

- плавно и ступенчато изменять скорость вращения электродвигателя;
- организовывать замкнутые системы автоматического регулирования;
- защищать электродвигатель от перегрузок и многое другое.

Все устройства поставляются в виде законченных изделий и не требуют никакой доработки.

Силовой канал ПЧ собран по схеме с промежуточным звеном постоянного тока и трехфазным инвертором напряжения (рис 4.6). Переменное напряжение трехфазной сети (фазы А, В и С) поступают на неуправляемый мостовой выпрямитель (диоды VD1–VD6). Выпрямленное напряжение сглаживается электролитическим конденсатором большой емкости С и поступает на трехфазный инвертор VT1–VT6, ключами которого управляет микропроцессорная система. Напряжение на выходе инвертора формируется по закону ШИМ-модуляции и поступает к статорным обмоткам АД.

В качестве силовых ключей инвертора используются IGBT-транзисторы с высокой нагрузочной способностью. Для исключения токов ЭДС самоиндукции в моменты коммутации и устранения обратных напряжений параллельно IGBT-транзисторам включаются быстродействующие диоды VD7–VD13. Шунт $R_{ш}$ включен в силовую цепь для контроля за величиной протекающего тока и выполнения функции защиты. Кроме того, в процессе работы преобразователя происходит постоянный контроль за величиной выпрямленного напряжения.

Выходы модуляторов ШИМ микропроцессорной системы через микросхемы драйверов IGBT подключаются к силовым ключам инвертора. Драйверы выполняют функцию согласования между транзисторами IGBT и управляющими цепями микропроцессорной системы. Кроме того, данные устройства реализуют защитные функции, снимая управляющие импульсы с силовых ключей при пропадании питающего напряжения и перегрузках по току.

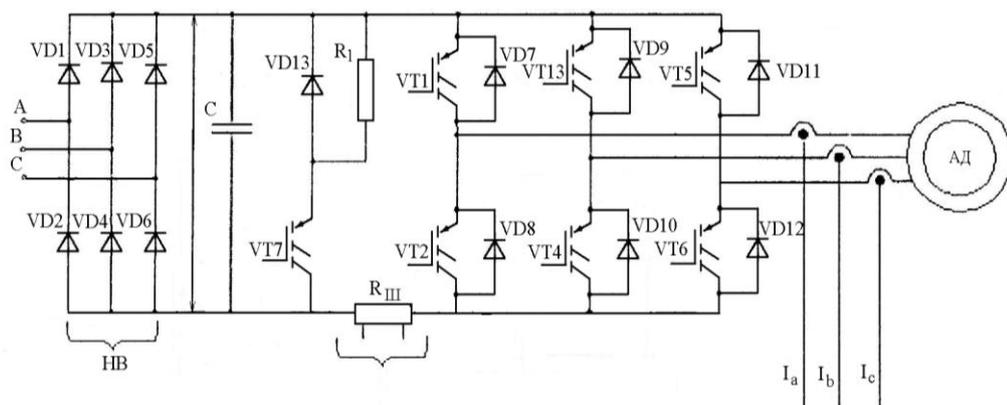


Рис. 4.8. Силовая часть преобразователя частоты

Конструктивно все элементы преобразователя размещены на двух платах, установленных друг над другом в пластиковом корпусе. На верхней крышке расположен жидкокристаллический индикатор и пульт управления. Непосредственно под крышкой находится основная плата управления. На ней располагаются компоненты микропроцессорной системы и разъемы для подключения дополнительных и внешних устройств.

На силовой плате размещен силовой модуль с IGBT-транзисторами, драйвера, датчики тока, конденсаторы фильтра цепи выпрямленного напряжения, блок питания.

Модуль включает в себя диоды выпрямителя, IGBT-транзисторы инвертора, шунт, температурный датчик и дополнительный ключ для «слива» энергии в тормозных режимах. Данный модуль соединен с теплоотводящим радиатором и находится на нижней стороне платы силовых элементов. На этом же радиаторе размещены резистор торможения и температурный датчик контроля теплового режима.

4.4.2 Модуль микроконтроллера RTU188-BS фирмы Fastwel

Назначение модуля микроконтроллера RTU188-BS. Модуль микроконтроллера RTU188-BS выполнен в виде автономного устройства и предназначен для использования в системах управления, сбора данных, контроля и т. п. Модуль может работать в автономном или подчиненном режиме. Кроме того, RTU188-BS может быть подключен к RS232/RS422/RS485 интерфей-

сам, что делает возможным использование микроконтроллера в распределенных системах. Модуль RTU188-BS может быть установлен как на DIN-рейку, так и на панель [44].

Подключение к модулю RTU188 внешних устройств

Ниже приведен перечень интерфейсных плат и устройств, которые могут быть подключены к модулю RTU188-BS:

- RS232-совместимые устройства;
- 2/4-проводные RS422/RS485 сети;
- модули УСО с гальванической развязкой (через плату МРВ-24 или ТВИ-24/16L, ТВИ-24LC);
- терминальные платы с гальванической развязкой ТВ1-хх/хх;
- удаленная кнопка «RESET» (изолированная от системы).

Составные части модуля RTU188-BS:

Процессор Am188ES, частота 40 МГц; супервизор и сторожевой таймер. Модуль процессора имеет супервизор (микросхема отслеживающая сбои напряжения питания) и сторожевой таймер.

Супервизор формирует аппаратный сигнал RESET при понижении питания ниже 4,6 В или при нажатии кнопки сброса.

Сторожевой таймер может использоваться для исключения программных зависаний. Срабатывание таймера происходит при отсутствии программных подтверждений в течение примерно 1,6 с.

Оперативное запоминающее устройство (ОЗУ). Модуль имеет внутреннюю статическую оперативную память размером 512 Кбайт.

Перепрограммируемое постоянное запоминающее устройство (FDD). Для хранения кодов программ и долговременной информации в модуле установлена микросхема электрически перепрограммируемой памяти (далее FFD – Fastwel Flash Disk) размером 512 Кбайт с поддержкой файловой системы.

Часы реального времени RTC. RTU188-BS имеет часы реального времени, построенные на микросхеме DS1307. Эта микросхема содержит 56 до-

ступных пользователю байт энергонезависимой статической памяти. Для питания микросхемы DS1307 используется встроенная литиевая батарея.

Последовательные порты. Микроконтроллер имеет два асинхронных последовательных порта.

Порт изолированного дискретного ввода. Микроконтроллер имеет 16 каналов оптоизолированного дискретного ввода. Все каналы имеют общую землю.

Порт изолированного аналогового ввода. Модуль RTU188-BS имеет изолированный порт аналогового ввода и позволяет измерять 8 аналоговых входов с точностью 12 бит в диапазонах 0...5, 0...10, +5, +10 В (диапазон устанавливается программно по любому каналу) или 0...20 мА.

Универсальный порт дискретного ввода-вывода RTU188-BS содержит 16 неизолированных каналов дискретного ввода-вывода. Уровни сигналов каждого канала соответствуют уровням транзисторно-транзисторной логики (ТТЛ). Нагрузочная способность каждого канала 12 мА.

Порт расширения минимальной конфигурации UNIO48. Универсальный порт ввода-вывода UNIO48 совместим по выходным контактам и управлению с модулем UNIO48-5 фирмы Fastwel. Порт реализован на программируемых логических микросхемах FPGA и предназначен для ввода-вывода 48 логических сигналов. Схема порта может изменяться непосредственно в системе без выключения питания.

Каналы порта могут использоваться для подключения модулей УСО с гальванической развязкой, счета импульсов, измерения и формирования частоты, формирования временных диаграмм и т. д. Этот порт позволяет использовать имеющиеся прошивки для платы UNIO48 фирмы Fastwel.

Электропитание модуля RTU188-BS.

Электропитание модуля производится через соединитель Х6.

Программное обеспечение

При поставке FFD модуля содержит программы, обеспечивающие готовность изделия к немедленной эксплуатации:

- встроенная операционная система, совместимая с DOS 6.22;
- сервисная программа загрузки/выгрузки данных (`ftrans.exe`);
- удаленный отладчик (`tdrl88.exe`)
- утилиты загрузки схемы порта UNIO48 (`isp188.exe`, `isl188.exe`);
- программа записи системных файлов FFD (`nwriter.com`).

4.4.3 Модуль релейной коммутации TBR8

4.4.3.1 Назначение модуля релейной коммутации TBR8

Плата предназначена для коммутации силовых цепей переменного и постоянного тока с помощью электромагнитных реле. Она применяется в составе устройств и функциональных блоков, выполненных на базе микроконтроллеров, процессорных и периферийных модулей фирм Octagon Systems и Fastwel [44].

Плата имеет восемь нормально разомкнутых однополюсных (SPST) каналов, обеспечивающих возможность коммутации цепей при токе нагрузки до 10 А при 270 В переменного тока и/или 30 В постоянного тока.

Управление каналами релейной коммутации осуществляется выходами портов дискретного ввода-вывода общего назначения, имеющими уровни ТТЛ или КМОП.

При подключении платы к портам дискретного ввода-вывода, которые выполнены на базе микросхем, функционально совместимых с адаптерами параллельного интерфейса 82C55 (580BB55), 16 линий порта, которые не задействованы для управления каналами релейной коммутации, могут использоваться для работы с другими устройствами через дополнительный 26-контактный соединитель, входящий в состав платы.

4.4.3.2 Технические данные модуля релейной коммутации TBR8

Количество каналов релейной коммутации – 8. Тип контактных групп реле – нормально разомкнутые однополюсные (SPST-NO).

Параметры коммутируемой нагрузки:

- 270 В при 10 А переменного тока частотой 50 Гц.
- 30 В при 10 А постоянного тока.
- Номинальное время срабатывания реле 8 мс.
- Номинальное время отпускания реле 5 мс.

Сопротивление замкнутых контактов реле не более 50 мОм.

Напряжение пробоя изоляции между катушкой управления и коммутируемыми цепями не менее 2500 В.

Параметры варисторной защиты выходных цепей от перенапряжения:

- максимальное рабочее напряжение варистора – 400 В переменного тока;
- классификационное напряжение варистора – 610 В при постоянном токе 1 мА;
- максимальный пиковый ток варистора 1200 А при длительности импульса не более 20 мкс.

Тип индикации состояния реле – светодиодная индикация состояния цепей управления реле.

Требования по питанию:

- напряжение питания цепей управления реле – 24 В постоянного тока с допустимым отклонением $\pm 10\%$ при потребляемом токе не более 300 мА;
- напряжение питания логических цепей платы – 5 В постоянного тока с допустимым отклонением $\pm 5\%$ при потребляемом токе не более 20 мА.

4.4.3.3 Устройство и работа платы

Структурная схема платы TBR8 приведена на рис. 4.9 [44].

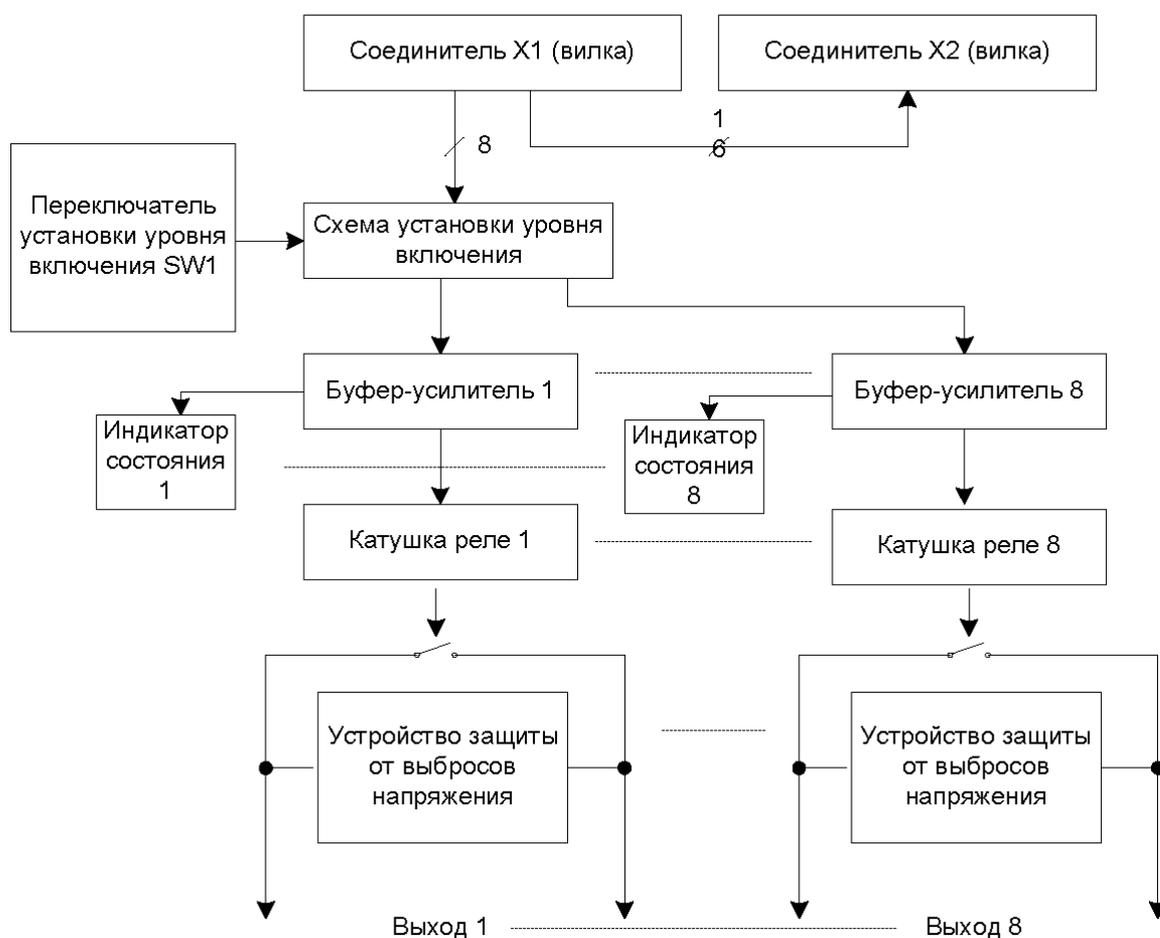


Рис. 4.9. Структурная схема платы TBR8

Подключение платы к 24-канальному порту дискретного ввода-вывода осуществляется через 26-контактный соединитель X1 соединительным кабелем FC-26.

Для управления 8 каналами релейной коммутации платы используются 8 каналов порта, настроенных на вывод. Остальные 16 каналов порта выведены в 26-канальный соединитель X2. Если для управления платой применяется порт дискретного ввода-вывода, совместимый с адаптером параллельного интерфейса 82C55 (580BB55), то включение/ выключение каналов релейной коммутации платы осуществляется линиями группы С порта дискретного ввода-вывода.

Сигналы управления каналами релейной коммутации, имеющие уровни ТТЛ, поступают на схему установки уровня включения, состоящую из восьми элементов ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ. Если при этом переключатель SW1

находится в замкнутом положении, то включение каналов релейной коммутации (замыкание контактных групп реле) осуществляется сигналом с уровнем логической 1. Если переключатель SW1 переведен в разомкнутое положение, то включение канала релейной коммутации производится уровнем логического 0.

Выходы схемы установки уровня включения соединены с буферами-усилителями, которые выполнены на базе полупроводниковых ключей с повышенной нагрузочной способностью в интегральном исполнении и предназначены для управления катушками реле.

Индикаторы состояния каналов релейной коммутации включены параллельно катушкам реле. При включении канала релейной коммутации происходит включение соответствующего светодиодного индикатора состояния.

Параллельно с контактной группой реле включено устройство защиты от кратковременных выбросов напряжения, которые происходят при коммутации контактной группой высокоиндуктивных нагрузок и снижают ресурс контактной группы.

Схема электрическая принципиальная одного канала релейной коммутации приведена на рис. 4.10.

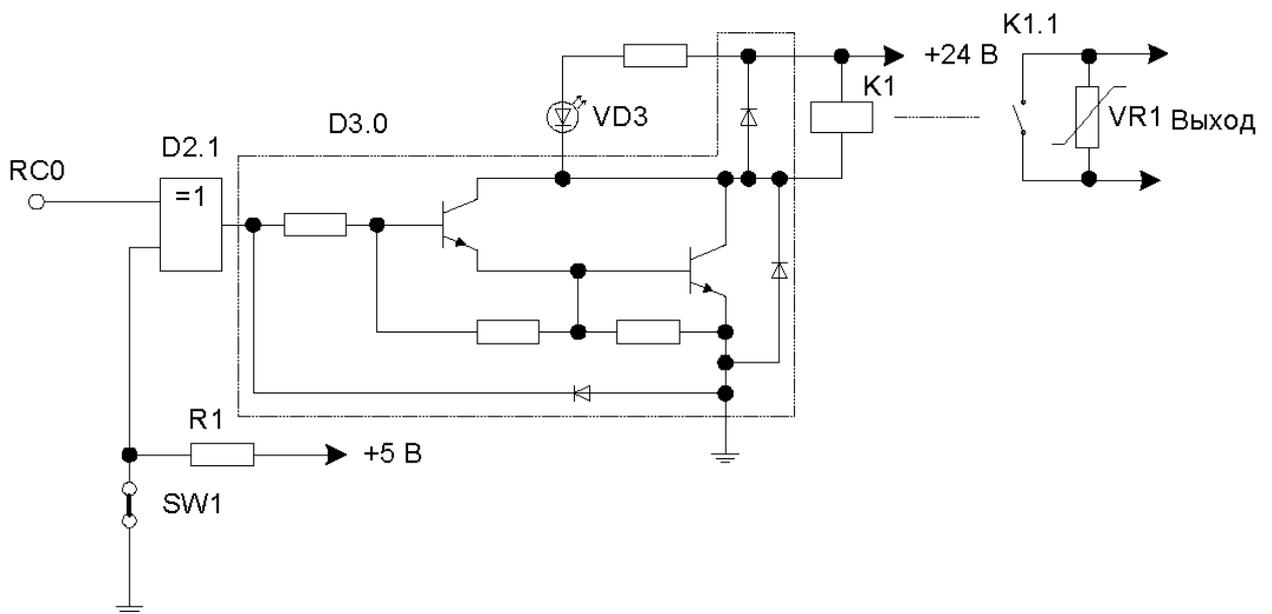


Рис. 4.10. Канал релейной коммутации. Схема электрическая принципиальная

Электрическое питание платы

Электрическое питание логических цепей платы напряжением 5 В осуществляется от модуля дискретного ввода-вывода, управляющего платой, через 26-контактный соединитель X1.

Наличие напряжения 5 В, поданного на плату, отражается свечением светодиодного индикатора «+5V». Ток, потребляемый платой по цепи 5 В, составляет не более 20 мА. Электрическое питание катушек реле осуществляется напряжением $(24,0 \pm 2,4)$ В внешнего источника питания.

Присоединение положительного полюса внешнего источника питания 24 В производится к одному из клеммных соединителей «+24V». Общий провод присоединяется к одному из клеммных соединителей «GND». Наличие напряжения 24 В, поданного на плату, отражается свечением светодиодного индикатора «+24V».

Ток, потребляемый платой по цепи 24 В, составляет не более 300 мА. Допустимая площадь сечения провода не более $2,5 \text{ мм}^2$.

Местоположение соединителей показано на рис. 4.11.

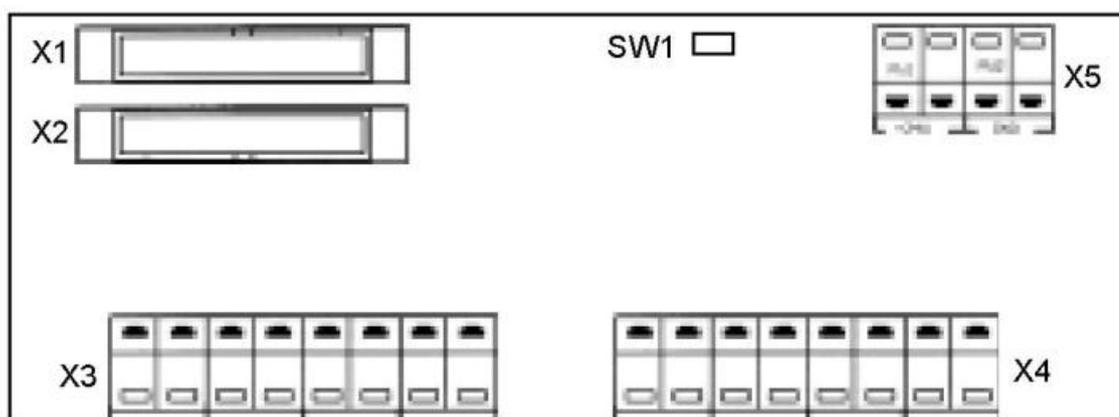


Рис. 4.11. Расположение соединителей на панели релейной коммутации TBR8

Настройка модуля релейной коммутации

Переключателем W1 устанавливается уровень сигнала, при котором срабатывают реле. Если переключатель W1 находится в замкнутом положении, реле срабатывают при низком логическом уровне управляющего

сигнала; если переключатель разомкнут, то реле срабатывают при высоком логическом уровне управляющего сигнала.

Входные сигналы управления состоянием реле подаются на контакты соединителя X1 платы. Сигналы управления имеют уровень ТТЛ или КМОП-логики и обладать нагрузочной способностью не менее 2 мА.

Назначение и нумерация контактов соединителя X1 платы соответствуют принятым в модулях ввода-вывода фирм Octagon Systems и Fastwel. Плата TBR8 использует 8 линий порта C адаптера параллельного интерфейса 82C55 (580BB55). Неиспользуемые 16 линий портов B и A транслируются на линии портов C и B соответственно в соединителе X2.

Соединитель X2 используется для подключения дополнительных терминальных плат к неиспользуемым платой TBR8 каналам ввода-вывода.

Подключение нагрузки должно производиться к клеммам соединителей X3, X4. Допустимая площадь сечения провода не более 2,5 мм². Тип соединителей X3, X4 – пружинный контакт 256502 фирмы WAGO.

4.4.4. Тензодатчик серии С

Датчик состоит из упругого элемента Z-образной формы, штуцера для ввода кабеля, тензорезисторов на клеевой основе, соединенных по мостовой схеме, и элементов термокомпенсации и нормирования.

Место наклейки тензорезисторов и расположения элементов термокомпенсации и нормирования загерметизировано и закрыто пластиной, крепящейся к упругому элементу двумя винтами для защиты от механических напряжений [44]. Датчик имеет следующие параметры (табл. 4.2).

Основные технические данные и характеристики датчика

Показатель	Значение
Наибольший предел измерения (НПИ), т	0,1
Класс точности по ГОСТ 30129 (МОЗМ Р 60)	С
Число поверочных интервалов, ед.	1000
Направление измеряемого усилия	Растяжение/сжатие
Рабочий коэффициент передачи (РКП), мВ/В	1,007
Компенсированный диапазон температур, °С	-10...+40
Рабочий диапазон температур, °С	-30...+40
Допустимая перегрузка, % от НПИ	25
Разрушающая нагрузка, % от НПИ, не менее	300
Входное электрическое сопротивление, Ом	405,0
Выходное электрическое сопротивление, Ом	350,0
Напряжение питания постоянного тока, не более, В	12,0
Потребляемая мощность, не более, ВА	0,4
Электрическое сопротивление изоляции, МОм, не менее	1000
Степень защиты оболочки по ГОСТ 14254 (МЭК 529-89)	IP 65

Измеряемое усилие, воздействуя через силовводящий узел на упругий элемент датчика, вызывает появление деформации в местах наклейки фольговых тензорезисторов. На диагональ питания подается питающее напряжение, с диагонали измерения снимается выходное напряжение. Деформация вызывает изменение сопротивлений тензорезисторов, преобразуемое мостовой электрической схемой в коэффициент передачи датчика (отношение изменения напряжения на диагонали измерения к напряжению питания), пропорциональный измеряемому усилию.

4.5. Результаты экспериментальных и теоретических исследований

Программа экспериментов проводилась для различных значений регулятора веса как с учетом алгоритмов коррекции ошибки и алгоритмов компенсации влияния массы падающего столба материала, так и без них.

В соответствие с программой экспериментов осуществлялось дозирование 1 килограмма материала (гранулы полипропилена) посредством шнекового дозатора. Результаты эксперимента приведены на графиках (Рис. 4.12...4.20). На оси ординат совмещены: задание частоты вращения шнека, текущая масса дозируемого материала на стенде и масса материала, вычисленная на имитационной модели при идентичных эксперименту условиях.

На графиках рис. 4.12...4.20 – f , m – соответственно задание частоты вращения шнека и масса дозируемого материала, полученные экспериментально; m' – дозируемый вес, полученный на имитационной модели.

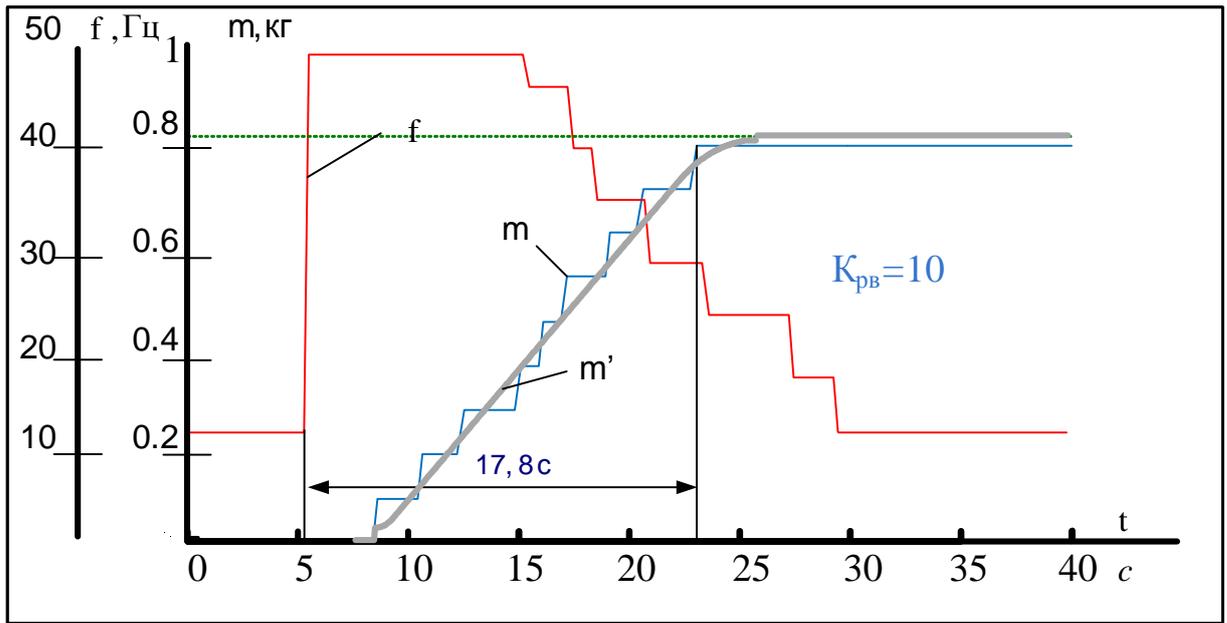


Рис. 4.12. Переходные процессы дозирования при $K_{PB} = 10$
без учета алгоритмов компенсации ошибки

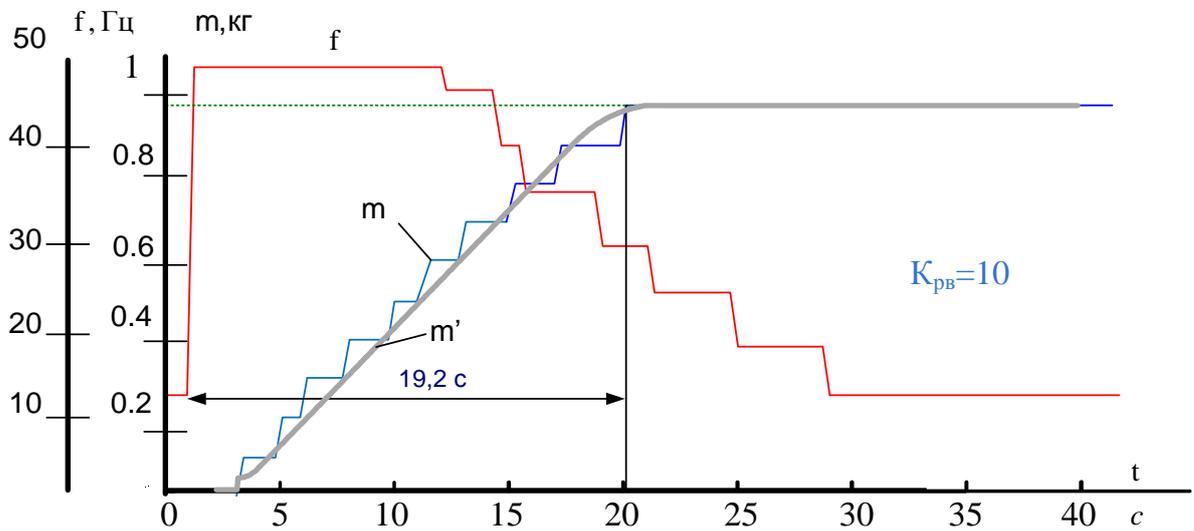


Рис. 4.13. Переходные процессы дозирования при $K_{PB} = 10$
с учетом алгоритмов компенсации ошибки

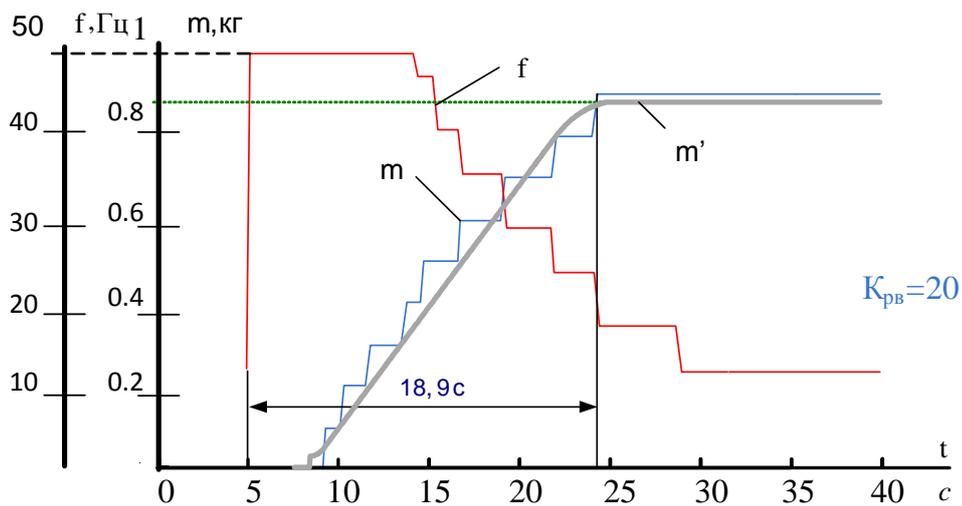


Рис. 4.14. Переходные процессы дозирования при $K_{pv} = 20$ без учета алгоритмов компенсации ошибки

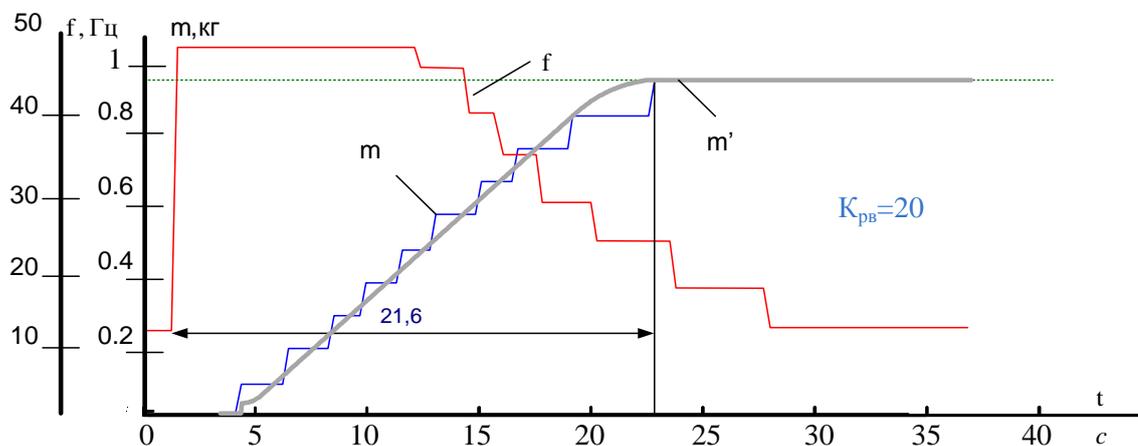


Рис. 4.15. Переходные процессы дозирования при $K_{pv} = 20$ с учетом алгоритмов компенсации ошибки

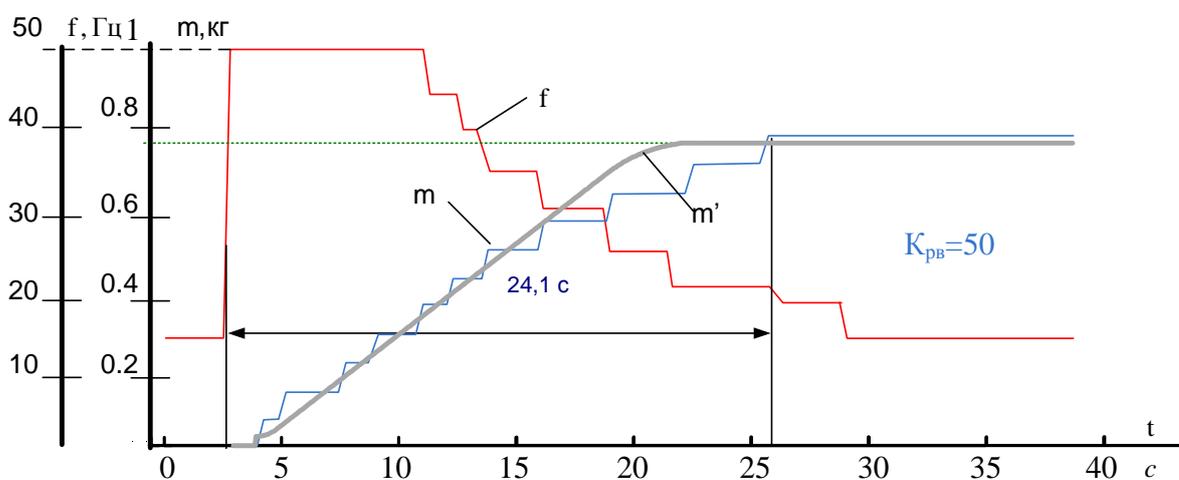


Рис. 4.16. Переходные процессы дозирования при $K_{pv} = 50$ без учета алгоритмов компенсации ошибки

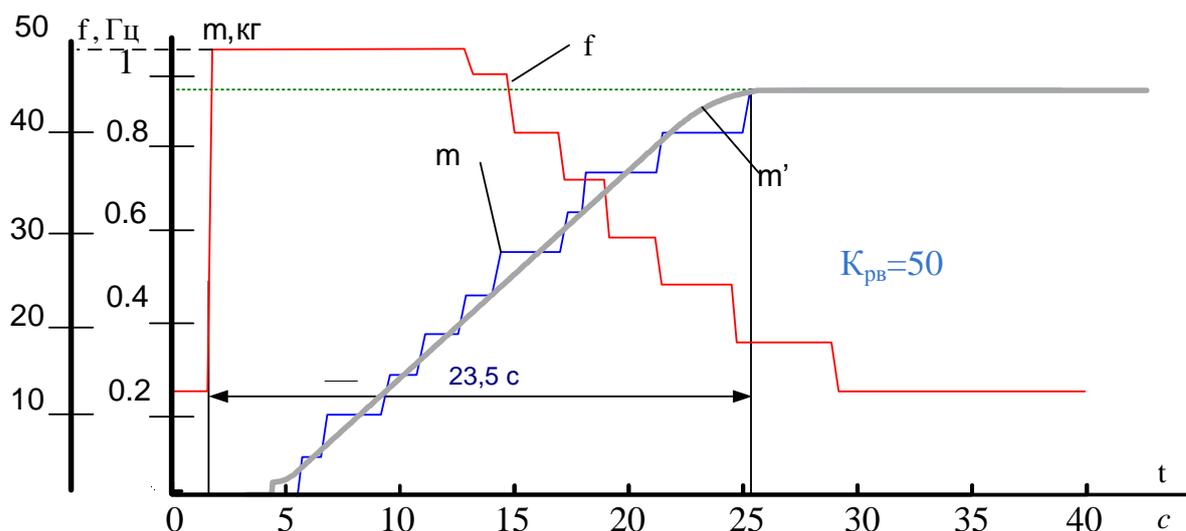


Рис. 4.17. Переходные процессы дозирования при $K_{pv} = 50$
с учетом алгоритмов компенсации ошибки

Произведем исследование на экспериментальной установке при коэффициенте регулятора веса $K_{pv} = 225$. Такое значение регулятора веса получилось при синтезе по классической методике Кесслера с использованием параметров опытной установки.

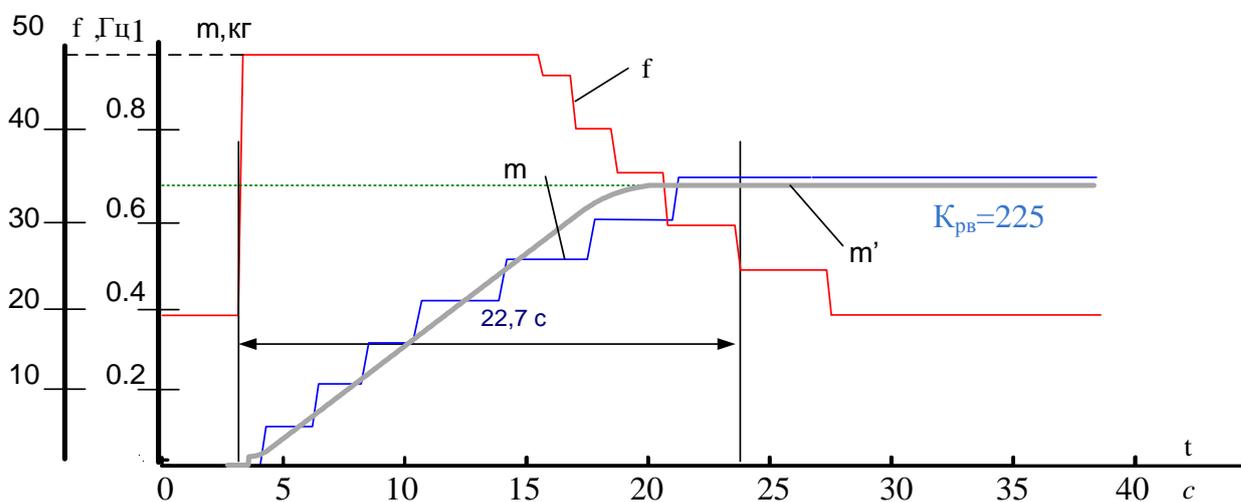


Рис. 4.18. Переходные процессы дозирования при $K_{pv} = 225$
без учета алгоритмов компенсации ошибки

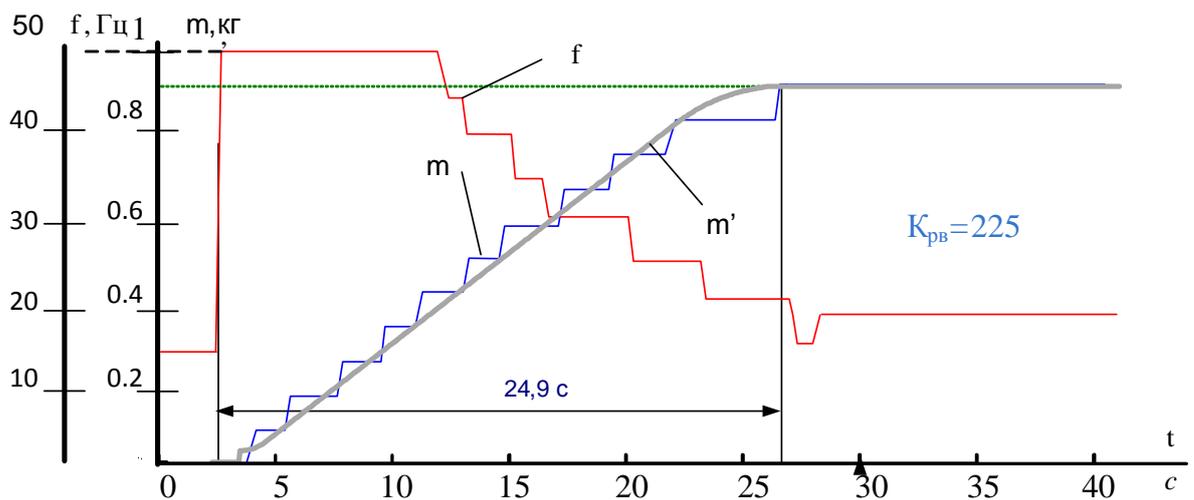


Рис. 4.19. Переходные процессы дозирования при $K_{pv} = 225$ с учетом алгоритмов компенсации ошибки при втором дозировании

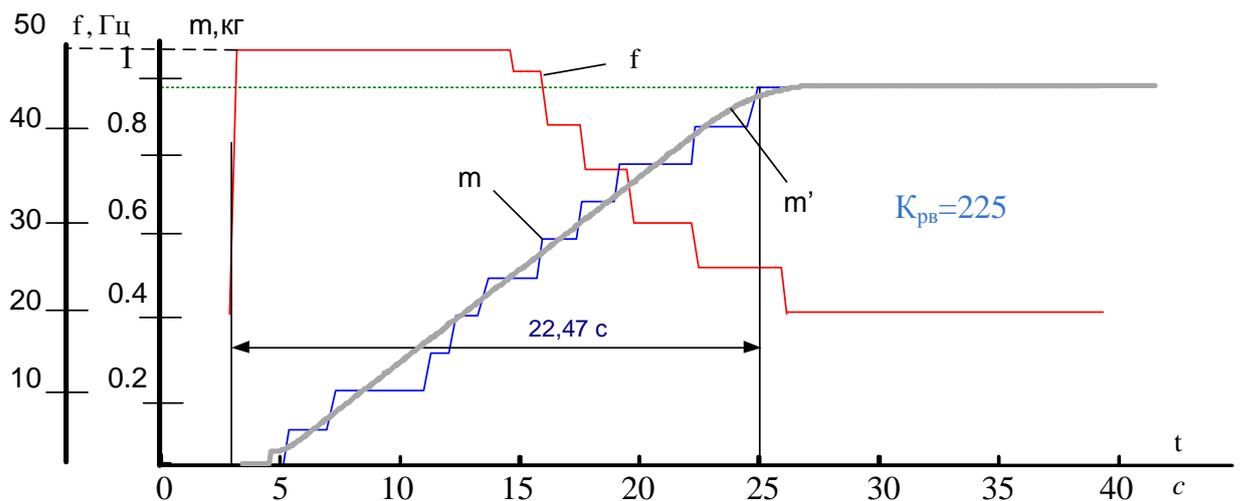


Рис. 4.20. Переходные процессы дозирования при $K_{pv} = 225$ с учетом алгоритмов компенсации ошибки при последнем цикле дозирования

Анализ результатов экспериментов (рис. 4.12...4.20) показал, что применение алгоритмов компенсации ошибки дозирования увеличивает точность дозирования при любом коэффициенте регулятора веса. Количественные показатели результатов экспериментов при применении алгоритма коррекции ошибки дозирования, в зависимости от различных значений регулятора веса приведены в таблице 4.3 и 4.4.

Результаты показывают повышение относительной точности дозирования при различных настройках регулятора веса, при применении алгоритмов компенсации ошибки от 13 до 29 %.

По результатам экспериментов (таблица 4.4) можно сделать вывод, что при применении алгоритмов компенсации ошибки при увеличении точности дозирования, также увеличивается производительность приготовления смеси.

Также с помощью эксперимента доказана полная адекватность разработанных математических моделей, описываемых в данной диссертации.

Таблица 4.3

$K_{рв}$	$\Delta m, \text{кг}$ Без учета алгоритмов компенсации ошибки	$\Delta m, \text{кг}$ С учетом алгоритмов компенсации ошибки	Повышение точности дозирования %	$t_{\text{доз}}, \text{с}$ Без учета алгоритмов компенсации ошибки	$t_{\text{доз}}, \text{с}$ С учетом алгоритмов компенсации ошибки
10	0.19	0.027	16.3	17.8	19.2
20	0.17	0.04	13	18.9	21.6
50	0.23	0.041	18.9	24.1	23.5
225	0.32	0.03	29	22.7	22.47

Таблица 4.4

$K_{рв}$	Производительность, кг/с Без учета алгоритмов компенсации ошибки	Производительность, кг/с С учетом алгоритмов компенсации ошибки	Увеличение Производительности, %
10	0.046	0.051	10.87
20	0.044	0.045	2.27
50	0.032	0.041	27.53
225	0.03	0.043	30.62

4.6. Выводы

1. Созданная экспериментальная установка дозирования позволяет проводить исследования САУ дозирования сыпучих материалов с целью проверки адекватности и точности разработанных алгоритмов.
2. Экспериментально доказано, что применение алгоритмов коррекции ошибки, рассмотренных в данной диссертационной работе, позволяет уменьшить относительную ошибку дозирования на величину от 13% до 29% при различных значениях регулятора веса.
3. Экспериментально установлено, что при применении алгоритмов коррекции ошибки дозирования на основе статистических данных и учета влияния массы падающего столба материала увеличивается производительности системы.
4. С помощью экспериментальных исследований доказана адекватность разработанных в диссертации математических и имитационных моделей путем сравнения с реальным физическим процессом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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, обеспечивающие 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 дозирования сыпучих материалов, который позволил уменьшить абсолютную 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, 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев А.М. Винтовые конвейеры. – М.: Машиностроение, 1972. – 184 с.
2. Першина С.В. Весовое дозирование зернистых материалов / С.В. Першина, А.В., Каталымов, В.Г. Однолько и др. – М.: Машиностроение, 2009. – 260 с.
3. Lyn Bates. Guide to the design, selection, and application of screw feeders. – Wiley, 2008. – 168 p.
4. Шубин И.Н., Свиридов М.М., Таров В.П. Технологические машины и оборудование. Сыпучие материалы и их свойства. – Тамбов: Изд-во Тамбовского государственного технического университета, 2006. – 76 с.
5. Пат. 2410989 Российская Федерация, МПК А23N17/00. Вибрационный смеситель сыпучих кормов [Текст] / Ф.А. Мамедов, Е.В. Хромов; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Российский государственный аграрный заочный университет»; заявл. 20.08.09, опубл. 10.02.11, Бюл. № 23.
6. Карнадуд Е.Н. Программно-аппаратный комплекс для моделирования и мониторинга процессов дозирования в смесеприготовительном агрегате: дис. ... канд. тех. наук. – Кемерово, 2014.
7. Описание весового дозатора непрерывного действия с четырехшнековым питателем [Электронный ресурс] / ООО «Baltic Service – Nord». – Режим доступа: <http://bsnord.narod.ru/dosator.html>
8. Пат. 2054163 Норвегия, МПК G01F13, C25C3/14. Пневматический дозатор для порошкообразных материалов, преимущественно для дозирования оксида алюминия или фторида алюминия [Текст] / Бернт Нагелль; заявитель и патентообладатель Норрис Хюдро А.С.; заявл. 18.10.88, опубл. 10.02.96, Бюл. № 23.
9. Дозирование сыпучих материалов [Электронный ресурс] / STADS. – Режим доступа: <http://stads.ru/uslugi/kompleksnye-resheniya/dozirovanie>

10. Пат. 2276568 Российская Федерация, МПК A23N 17/00 (2006.01). Цех для приготовления комбикормов [Текст] / В.Ф. Ужик, С.А. Булавин, В.И. Грицаенко, А.И. Складов; заявитель и патентообладатель Белгородская государственная сельскохозяйственная академия. – № 2004135407/13; заявл. 3.12.2004; опубл. 20.05.2006, Бюл. № 14. – 9 с.

11. Пат. 2494658 Российская федерация, МПК A23N17/00. Устройство для приготовления многокомпонентных смесей [Текст] / П.Э. Драчук; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Челябинская государственная агроинженерная академия»; заявл. 13.04.12, опубл. 10.10.13, Бюл № 23.

12. АСУ ТП производства комбикормов на базе контроллера Fastwel RTU188-BS / В.Г. Букреев, Н.В. Гусев, М.А. Нечаев и др. // Современные технологии автоматизации. – 2006. – № 1. – С. 74–79.

13. Ляпушкин С.В., Гусев Н.В. Комплексная автоматизация технологического процесса дозирования сыпучих материалов // XII Международная научно-практическая конференция студентов и молодых ученых «Современная техника и технологии». – Томск: Изд-во ТПУ, 2007.

14. Ляпушкин С.В., Гусев Н.В., Букреев В.Г. Автоматизация процесса дозирования сыпучих материалов // Инновационные технологии атомной энергетики и промышленности: сборник статей, посвященный 50-летию Северской государственной технологической академии. – Северск: СГТА, 2009. – С. 86–90.

15. Пат. 54179 Российская Федерация, МПК7 G01G19/22 Автоматическая система дозирования и смешивания сыпучих материалов [Текст] / С.В. Ляпушкин, Н.В. Гусев, В.Г. Букреев, М.А. Нечаев; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Томский политехнический университет»; опубл. 10.06.06.

16. Рогинский Г.А. Дозирование сыпучих материалов / под ред. Б.И. Мордкович. – М.: Химия, 1978. – 176 с.
17. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. – М.: Академия, 2006. – 266 с.
18. Терехов В.М. Системы управления электроприводов. – 3-е изд. – М.: Академия, 2008. – 301 с.
19. Удут Л.С., Мальцева О.П., Кояин Н.В. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч. 1. Введение в технику регулирования линейных систем. Ч. 2. Оптимизация контура регулирования: учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 156 с.
20. Филлипс Ч., Харбор Р. Системы управления с обратной связью. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2001. – 616 с.
21. Ротач В.Я. Теория автоматического управления. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МЭИ, 2004. – 400 с.
22. Народицкий А.Г. Современное и перспективное алгоритмическое обеспечение частотно-регулируемых электроприводов. – СПб.: Санкт-Петербургская электротехническая компания, 2004. – 127 с.
23. Ефремов Е.В. Алгоритм нечеткого управления процессом массового дозирования сыпучих материалов // Автоматизация и управление в промышленности, науке и образовании: сборник трудов юбилейной научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения основателя физико-технического факультета и кафедры ЭАФУ, первого декана В.Н. Титова. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – С. 47–51.
24. Комплексная автоматизация технологических процессов / Н.В. Гусев, М.А. Нечаев, С.В. Ляпушкин, М.В. Коваленко. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – 133 с.
25. Дьяконов В.П. MATLAB 7.*/R2006/R2007: самоучитель. – М.: ДМК-Пресс, 2008. – 768 с.

26. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. – 3-е изд. – М.: Высшая школа, 2001. — 327 с.
27. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.
28. Дартан А.А., Щедрович В.А. Переходные процессы в машинах переменного тока / под ред. А.И. Вольдек. – М., 1963. – 744 с.
29. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, 2008. – 298 с.
30. Vas P. Sensorless Vector and Direct Torque Control. – Oxford: Oxford University Press, 1988.
31. Ляпушкин С.В., Тургенев Д.В. Асинхронный электропривод шнекового питателя // XII Международная научно-практическая конференция студентов и молодых ученых «Современная техника и технологии». – ТПУ, 2006. – Т. 1. – С. 293–295.
32. Ключев В.И., Терехов В.М. Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов: учебник для вузов. – М.: Энергия, 1980. – 360 с.
33. Фираго Б.И., Павлячик Л.Б. Регулируемые электроприводы переменного тока. – Минск: Техноперспектива, 2006. – 363 с.
34. Удут Л.С., Мальцева О.П., Кояин Н.В. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов.– 2-е изд. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. –148 с.
35. Усынин Ю.С. Системы управления электроприводов. – 2-е изд. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. –328 с.
36. Терехин Б.Б. Моделирование систем электропривода в Simulink (MATLAB 7.0.1). – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 320 с.
37. Виднеев Ю.Д. Автоматическое непрерывное дозирование сыпучих материалов. – 2-е изд. – М.: Энергия, 1974. –120 с.

38. Орлов С.П. Дозирующие устройства. – М.: Машиностроение, 1966. – 146 с.
39. Соколов В.И. Основы расчета и конструирования машин и аппаратов пищевых производств. – М.: Машиностроение, 1983. – 447 с.
40. Gale M. Mixing in Single Screw Extrusion. – Smithers Rapra Press, 2009. – 300 p.
41. Куо Б.С. Теория и проектирование цифровых систем управления. – М.: Машиностроение, 1986. – 447 с.
42. Ляпушкин С.В., Гусев Н.В. Синтез регуляторов системы автоматического дозирования сыпучих материалов // Современная техника и технологии: сборник трудов XV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – С. 443–444.
43. Алгоритмы повышения точности в системе дозирования сыпучих материалов / С.В. Ляпушкин, Н.В. Гусев, В.Г. Букреев, М.А. Нечаев // Электромеханические преобразователи энергии: материалы VI Международной научно-технической конференции. – Томск: Изд-во ТПУ, 2013.
44. Комплексная автоматизация технологических процессов. Лабораторный практикум: учеб. пособие / Н.В. Гусев, М.А. Нечаев, С.В. Ляпушкин, М.В. Коваленко. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – 143 с.
45. Пугачев А.В. Контроль и автоматизация переработки сыпучих материалов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 152 с.
46. Шадров Б.В. Технические средства автоматизации. – М.: Академия, 2007. – 368 с.
47. Харазов В.Г. Интегрированные системы управления технологическими процессами. – СПб.: Профессия, 2009. – 592 с.
48. Уланов Г.М. Регулирование по возмущению (компенсация возмущений и инвариантность). – М.: Госэнергоиздат, 1960. – 106 с.

49. Тимошенко С.П., Янг Д.Х., Уивер У. Колебания в инженерном деле / под ред. Э.И. Григолюк; с пер. Л.Г. Корнейчук. – М.: Машиностроение, 1985. – 472 с.

50. Каталымов А.В., Любартович В.А. Дозирование сыпучих и вязких материалов. – Ленинград: Химия, 1990. – 240 с.

51. Поздеев А.Д. Электромагнитные и электромеханические процессы в частотно-регулируемых асинхронных электроприводах. – Чебоксары: Изд-во Чувашского университета, 1998. – 172 с.

52. Петров И.В. Программируемые контроллеры. Стандартные языки и приемы прикладного проектирования / под ред. В.П. Дьяконова. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 256 с.

53. Пановко Я.Г. Введение в теорию механических колебаний. – М.: Наука, 1991. – 256 с.

54. Олссон Г., Пиани Д. Цифровые системы автоматизации и управления. – СПб.: Невский Диалект, 2001. – 557 с.

55. Нестеров А.Л. Проектирование АСУТП: метод. пособие. – СПб.: ДЕАН, 2006. – Кн. 1. – 552 с.

56. Комбикорма, характеристика, виды, состав [Электронный ресурс] / Сельскохозяйственный и фермерский бизнес. – Режим доступа: <http://landwirt.ru/>

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

58. Ляпушкин С.В., Гусев Н.В., Букреев В.Г. Управление электроприводом шнекового питателя // Электромеханические преобразователи энергии: материалы IV Международной научно-технической конференции. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – С. 300–304.

59. Ляпушкин С.В., Гусев Н.В., Букреев В.Г. Система управления технологическим процессом дозирования и смешивания компонентов комбикормов // Известия вузов. Электромеханика. – 2006. – С. 72–74.

60. Ляпушкин С.В., Гусев Н.В., Букреев В.Г. Система управления многодвигательным электроприводом в системе дозирования сыпучих материалов // Сб. Междунар. научно-тех. конф. «Электромеханические преобразователи энергии». – Томск: Изд-во ТПУ, 2005.

61. Ляпушкин С.В., Гусев Н.В., Гнеушев В.В. Статистические методы управления технологическим процессом дозирования сыпучих грузов // Электромеханические преобразователи энергии: материалы V юбилейной Международной научно-технической конференции, посвященной памяти Г.А. Сипайлова. – Томск: ТПУ, 2011. – С. 216–219.

62. А. с. 2010611104. Российская Федерация. Встроенное программное обеспечение для систем управления электродвигателями [Текст] / С.В. Ляпушкин, Н.В. Гусев, А.С. Каракулов, В.С. Саидов; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Томский политехнический университет»; заявл. 14.12.09, опубл. 5.02.10 г.

63. Ляпушкин С.В. Анализ факторов неустойчивости в системе дозирования сыпучих материалов // Сб. Междунар. научно-тех. конф. «Электромеханические преобразователи энергии». – Томск: Изд-во ТПУ, 2007.

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

65. Ляпушкин С.В., Овчинников Д.Н. Автоматизированная система дозирования сыпучих материалов // XII Международная научно-практическая конференция студентов и молодых ученых «Современная техника и технологии». – 2006. – Т. 1. – С. 278–280.

66. Ливенцов С.В., Ефремов Е.В. Нечеткое управление процессом массового дозирования сыпучих материалов // Современная техника и технологии: сборник трудов XV Международной научно-практической

конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – Т. 2. – С. 242–243.

67. Комиссарчик В.Ф. Автоматическое регулирование технологических процессов. – 2-е изд., расш. – Тверь, 2001. — 248 с.

68. Зубкова Т.М., Насыров А.Ш. Учет характера движения материала в канале шнека при математическом моделировании экструдирования растительного сырья // Вестник ОГУ. – 2003. – № 1. – С. 147–151.

69. Геррман Х. Шнековые машины в технологии. – СПб.: Химия, 1972. – 232 с.

70. Электротехнический справочник: в 4 т. / под ред. В.Г. Герасимова. – Т. 2. – 4-е изд. – М.: Изд-во МЭИ, 2007. – 518 с.

71. Электротехнический справочник: в 4 т. / под ред. В.Г. Герасимова. – Т. 4. – 9-е изд. – М.: Изд-во МЭИ, 2004. – 696 с.

72. Белов М.П., Зементов О.И., Козярук А.Е. Инжиниринг электроприводов и систем автоматизации / под ред. В.А. Новикова, Л.М. Чернигова. – М.: Академия, 2006. – 368 с.

73. Белов М.П., Новиков В.А., Рассудов Л.Н. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов. – 3-е изд., испр. – М.: Академия, 2007. – 576 с.

74. Bird J., Ross C. Mechanical Engineering Principles. – Newnes, Butterworth-Heinemann, 2002. – 290 p.

75. Автоматизация процесса непрерывно-поточного дозирования / С.Г. Сажин, В.П. Луконин, С.В. Виноградов, И.В. Смирнов // Приборы. – 2007. – № 3.

76. Кафаров В.В., Глебов М.Б. Математическое моделирование основных процессов химических производств. – М.: Высшая школа, 1991. – 400 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

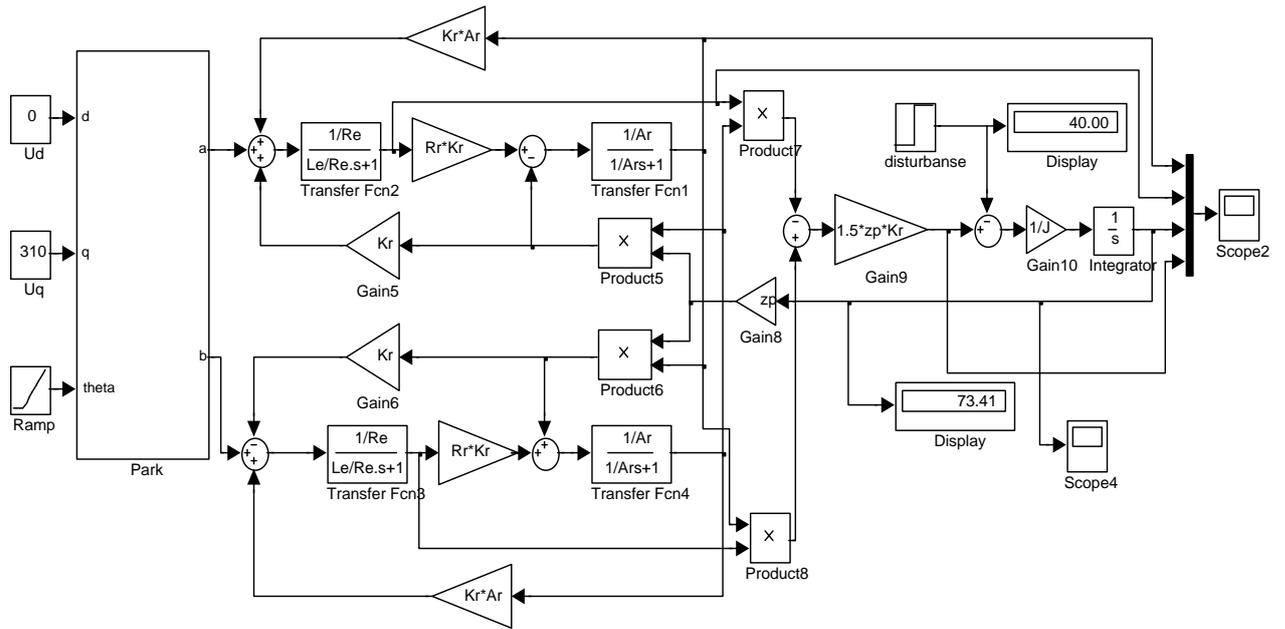


Рис. П1. Структурная схема имитационной модели АКЗ

в неподвижной системе координат в приложении Simulink из пакета MATLAB

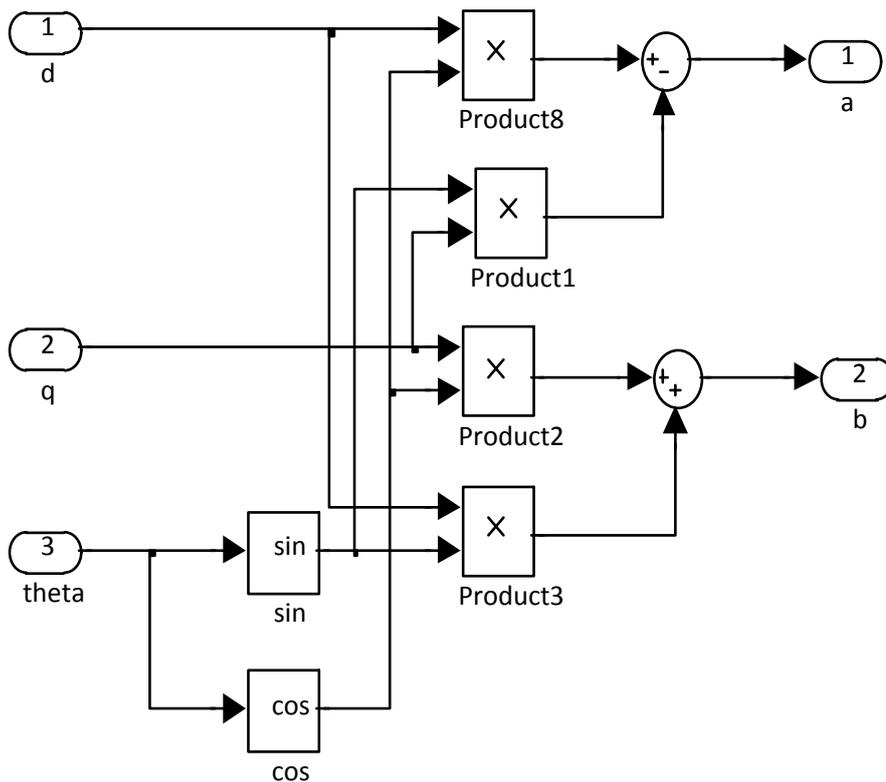


Рис. П2. Подсистема PARK – прямой координатный преобразователь
(*Parke Transformation*)

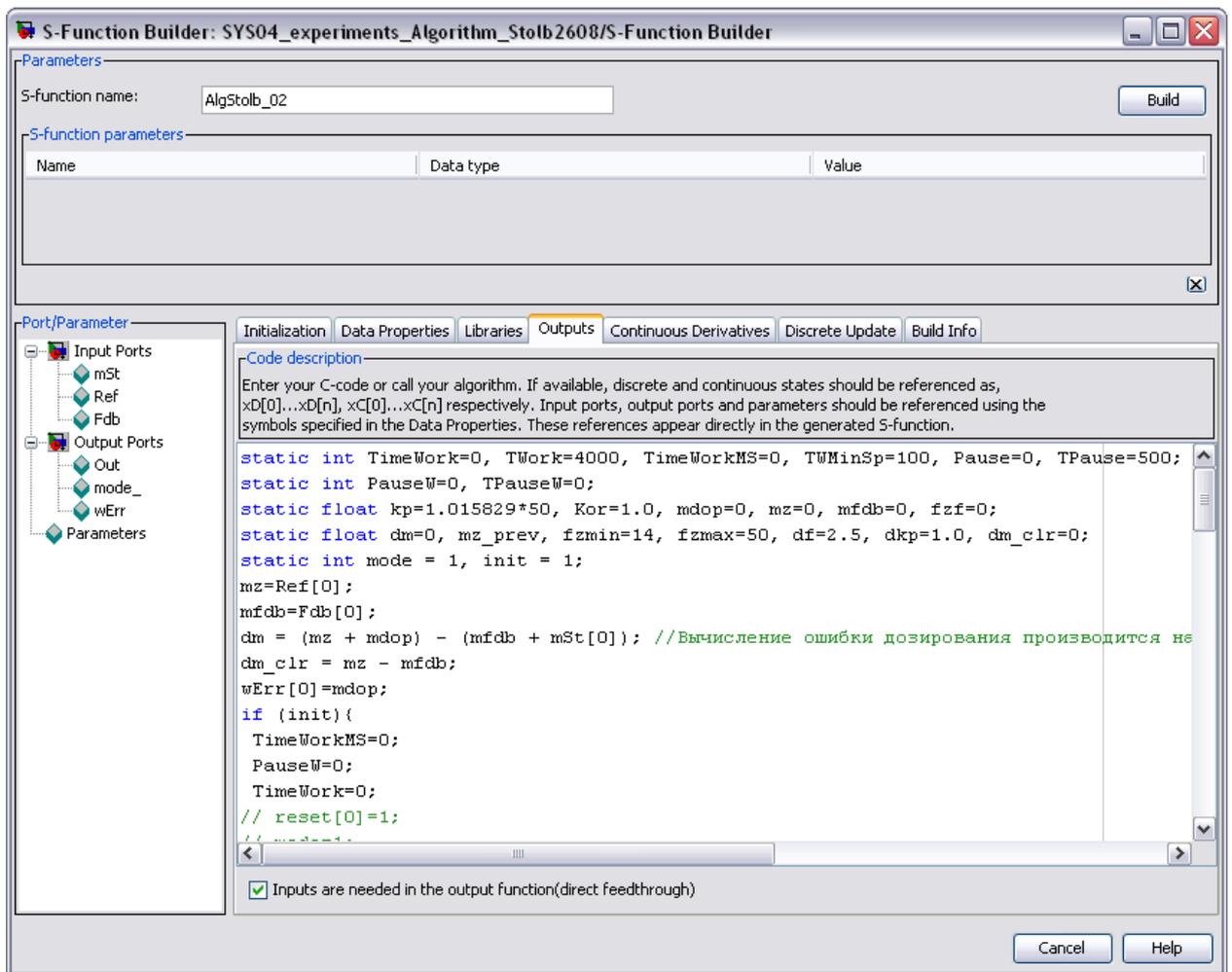


Рис. ПЗ. Алгоритм учета падающего столба на языке С

SCADA-система управления технологическим процессом дозирования и смешивания компонентов комбикормов, внедренная на предприятии ЗАО «Сибирская аграрная группа»

Вход в программу. При входе в программу необходимо выбрать пользователя и ввести пароль и номер смены (рис. П4.1).

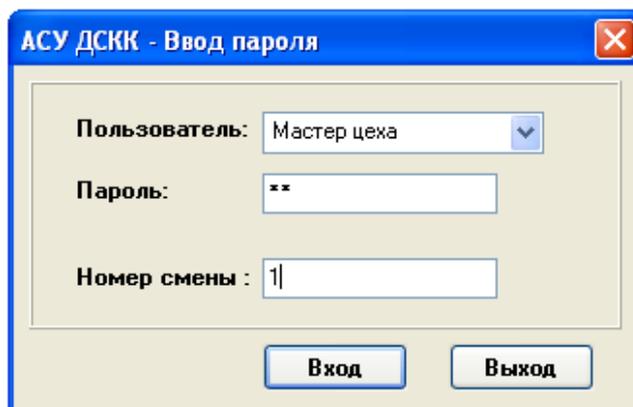


Рис. П4.1. Вход в программу

В программе имеется три пользователя:

Мастер цеха – включает все допустимые возможности оператора, а также управление базами данных.

Зоотехник – наибольший приоритет. Включает все допустимые возможности мастера цеха и оператора, разрешена работа с сохранением базы данных на носитель информации, управление компонентами меню «Технологическая информация».

Оператор – наименьший приоритет. Может управлять процессом смешивания комбикормов, редактировать и выбирать рецепт к исполнению, вносить данные о приходе со склада, осуществлять выгрузку базы данных.

Главное меню (расположено слева над рабочим полем программы) содержит следующие поля:

1. Файл.
 - 1.1. Загрузить настройки по умолчанию.
 - 1.2. Выход.
2. Настройки.

- 2.1. Параметры порта.
- 2.2. Тайменги и параметры дозирования.
- 2.3. Технологическая информация.
3. Пользователи.
 - 3.1. Смена пользователя.
 - 3.2. Изменить пароль пользователя.
 - 3.3. Изменить номер смены.
4. Помощь.
 - 4.1. О программе.

Меню «**Загрузить настройки по умолчанию**» загружает все технологические параметры по умолчанию:

- продолжительность смешивания – 2 мин;
- максимальный дозируемый вес – 1000 кг;
- рецепт № 1;
- порт – COM1;
- технологические параметры выставляются по умолчанию (меню «Технологическая информация»).

Меню «**Выход**» – при входе в это меню программа перед выходом сохраняет все текущие параметры, которые были изменены оператором в процессе работы.

Меню «**Параметры порта**» – выбор порта, по которому осуществляется связь с контроллером.

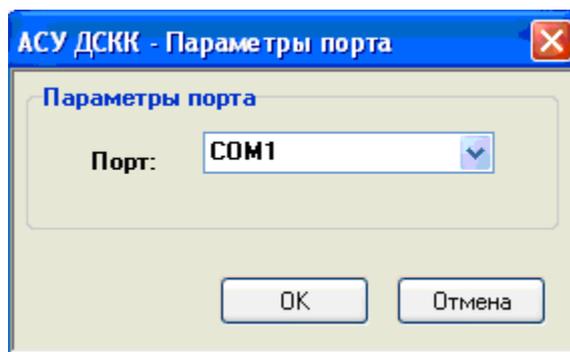
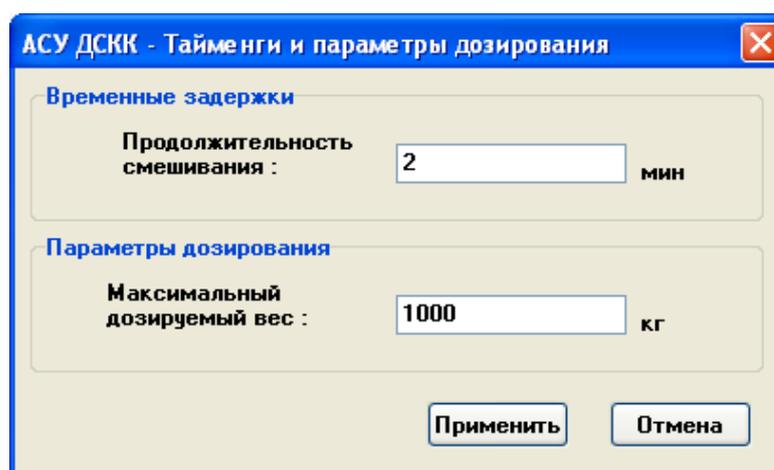


Рис. П4.2. Меню выбора порта

Меню «**Тайменги и параметры дозирования**» – выбор продолжительности смешивания и максимального дозируемого веса (не более 1000 кг).



АСУ ДСКК - Тайменги и параметры дозирования

Временные задержки

Продолжительность смешивания : 2 мин

Параметры дозирования

Максимальный дозируемый вес : 1000 кг

Применить Отмена

Рис. П4.3. Меню выбора параметров дозирования

Меню «**Технологическая информация**» – выбор параметров работы оборудования, логики обнаружения технологических ошибок (см. рис. П4.4.). Помимо этого данные параметры могут быть использованы для отладки оборудования. Содержит следующие параметры:

1. *Подтверждение срабатывания контакторов* – отключает и включает ожидание контроллером подтверждения срабатывания контакторов. В рабочем режиме опция должна быть включена.

2. *Проверка на перегрузку бункера-дозатора* – контроллер анализирует переполнение бункера-дозатора. В рабочем режиме опция должна быть включена.

3. *Ожидание ответа от ПЧ* – отключает и включает проверку ожидания ответа от преобразователя частоты (ПЧ) при переключении контакторов в цепи управления. При отсутствии связи с ПЧ контроллер выдаст сообщение об ошибке в списке событий. В рабочем режиме опция должна быть включена.

4. *Управление по изменению* – компоненты виртуального пульта динамически изменяются в зависимости от информации, поступающей с контроллера. В рабочем режиме опция должна быть включена.

5. *Автодозирование в ручном режиме* – позволяет в ручном режиме произвести дозирование нажатием только одной кнопки «ВКЛ», принадлежащей требуемому шнеку. Останов дозирования происходит автоматически. При выключении этого параметра дозирование в ручном режиме лежит полностью на операторе: так, оператор должен нажать «ВКЛ» при старте дозирования и «ВЫКЛ» при завершении дозирования. Если кнопка «ВЫКЛ» не будет нажата, то компонент из текущего шнека будет высыпаться до тех пор, пока не будет переполнения бункера-дозатора. В рабочем режиме опция должна быть включена.

6. *Рыхлитель работает* – показывает, работает или нет рыхлитель в процессе смешивания компонентов в бункере-смесителе. В рабочем режиме опция должна быть выключена.

7. *Проверка наполнения бункера-дозатора* – включает проверку наполнения бункера дозатора при дозировании. Позволяет обнаружить, пуст или нет бункер с дозируемым компонентом. В случае отсутствия проверки наполнения бункера-дозатора контроль наполнения будет осуществляться по тайм-ауту. Т. е. контроллер выждет некоторое время (в случае, если вес при включенном шнеке не будет изменяться) после чего выдаст ошибку. В рабочем режиме опция должна быть включена.

8. *Проверка выгрузки бункера-дозатора* – проверяет выгрузку смеси из бункера-дозатора. При установленном параметре задвижка дозатора закрывается по завершении процесса выгрузки (когда датчик покажет вес, равный 0). В случае отмены параметра контроллер будет осуществлять отгрузку по тайм-ауту, что не оптимально по быстродействию. В рабочем режиме опция должна быть включена.

9. *Отгрузка из смесителя по датчику* – при установленном параметре задвижка бункера-смесителя откроется только в случае, если датчик в бункере отгрузки покажет готовность приема следующей дозы. В случае отмены параметра отгрузка из бункера-смесителя будет осуществляться по тайм-ауту, что не оптимально по быстродействию. В рабочем режиме опция долж-

на быть включена. При отсутствии датчика опция должна быть отключена, т. к. сигнал готовности никогда не будет снят, даже если бункер отгрузки полон.

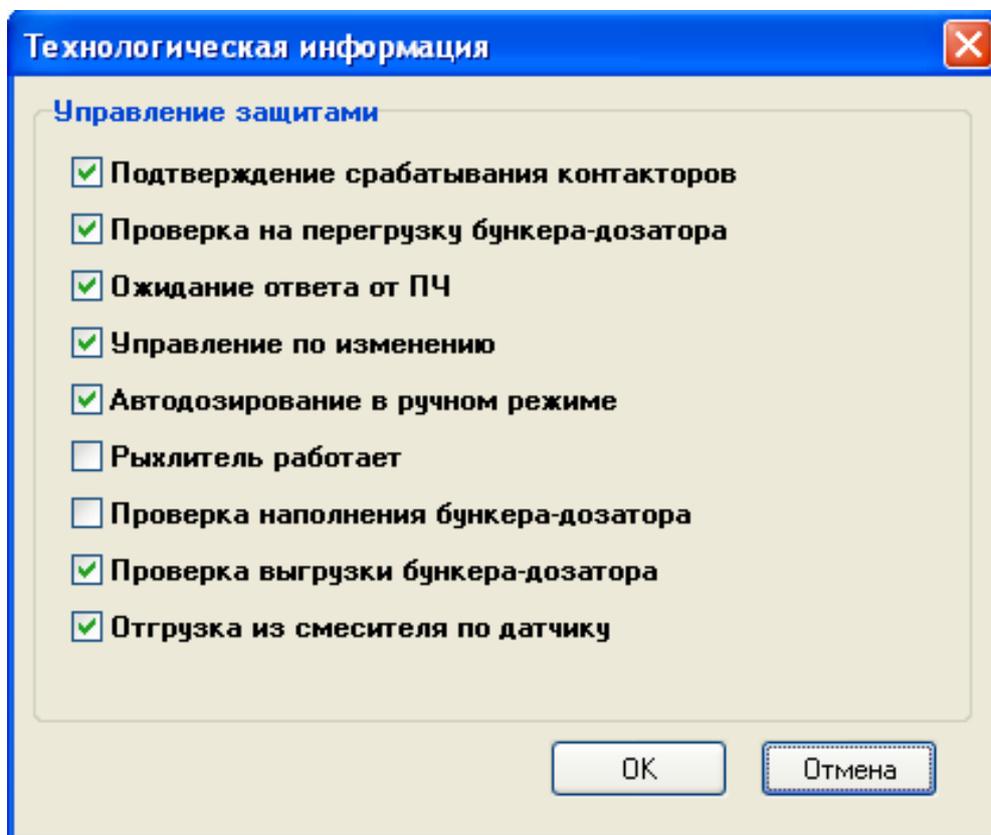


Рис. П4.4. Технологическая информация

Меню «Смена пользователя» – выбор пользователя (рис. П4.5).

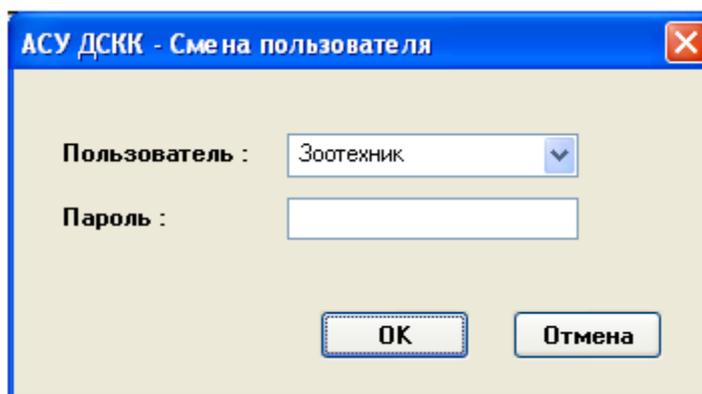


Рис. П4.5. Меню смены пользователя

Меню «Изменить пароль пользователя» – задание нового пароля пользователю (рис. П4.6).

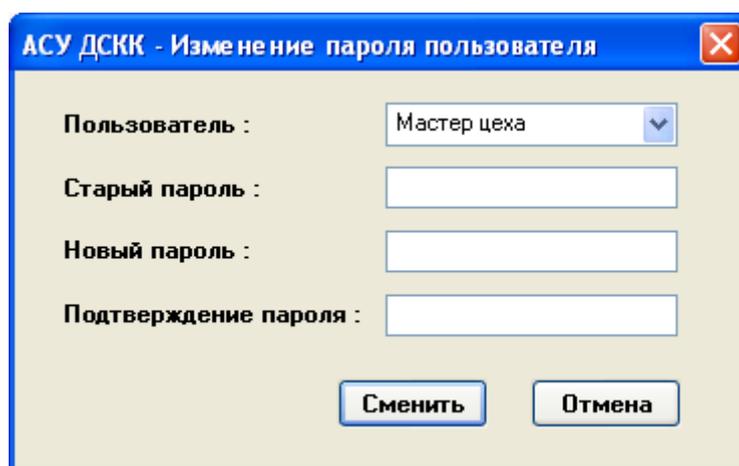


Рис. П4.6. Меню смены пользователя

Меню «**Изменить номер смены**» – изменение номера текущей смены (рис. П4.7).

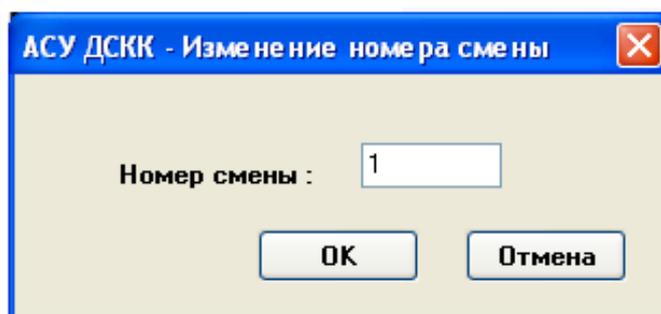


Рис. П4.7. Меню смены пользователя

Закладка «Мнемосхема»

Внешний вид мнемосхемы в режиме ручного и автоматического управления приведен на рис. П4.8, П4.9.

Выбор режима осуществляется путем установления галочки «Автоматический» или «Ручной».

При выборе ручного режима на рабочем поле мнемосхемы появляются кнопки управления запуском и остановом шнеков, открытия и закрытия задвижек. В автоматическом режиме кнопки запуска оборудования скрываются.

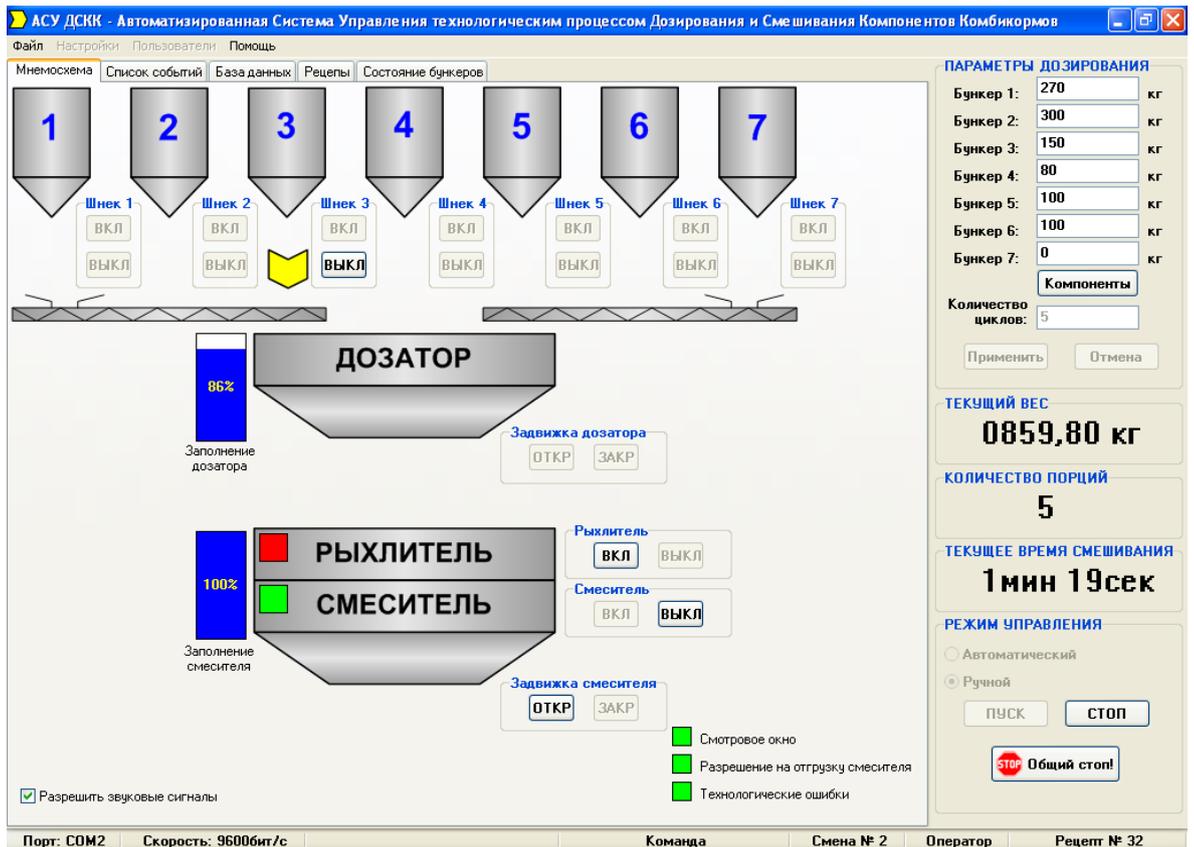


Рис. П4.8. Мнемосхема пульта управления в режиме ручного управления

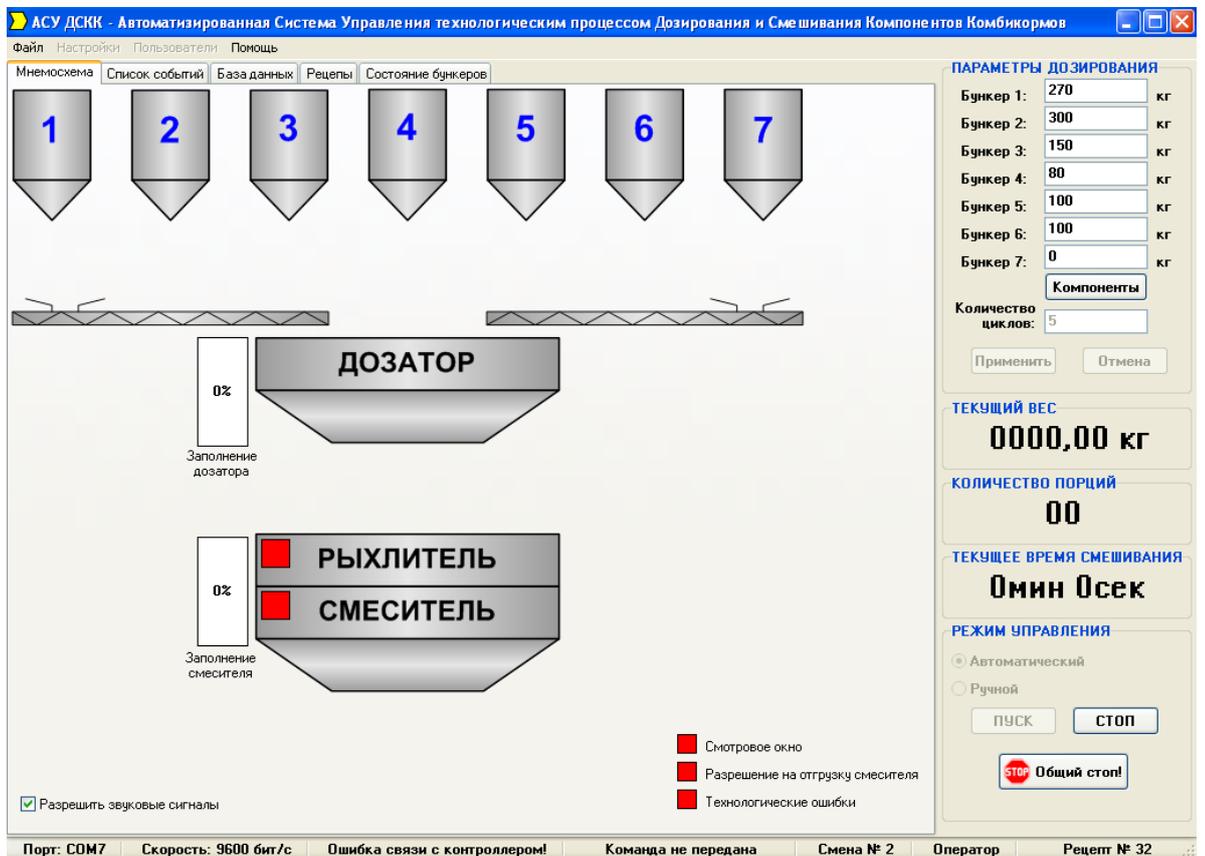


Рис. П4.9. Мнемосхема пульта управления в автоматическом режиме

Общим для всех режимов является отображение заполнения бункера-дозатора и бункера-смесителя, а также отображение запретов и разрешений на работу (справа внизу мнемосхемы): *Смотровое окно* – показывает, открыто (красный цвет) или закрыто (зеленый цвет) смотровое окно; *Разрешение на отгрузку* – обратная связь с датчика отгрузки готовой продукции (зеленый цвет – датчик показывает, что система готова к отгрузке из бункера-смесителя); *Технологические ошибки* – показывают наличие технологических ошибок, отображаемых в списке событий.

Наличие красного цвета в одном из трех индикаторов говорит об остановке текущего режима и переходе в режим ожидания.

Закладка «Список событий»

Список аварийных событий или неверно заданных оператором команд отображается в закладке «Список событий» (рис. П4.10). При этом каждому событию присвоен свой уникальный номер.

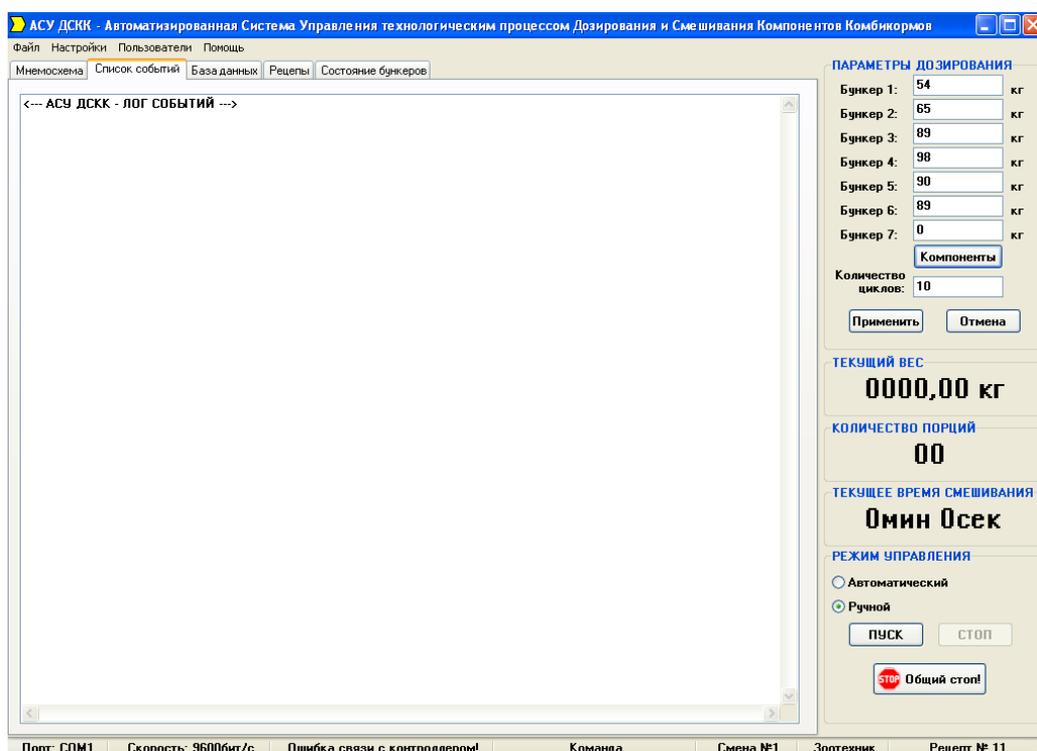


Рис. П4.10. Закладка «Список событий»

Закладка «База данных»

Внешний вид закладки «База данных» приведен на рис. П4.11.

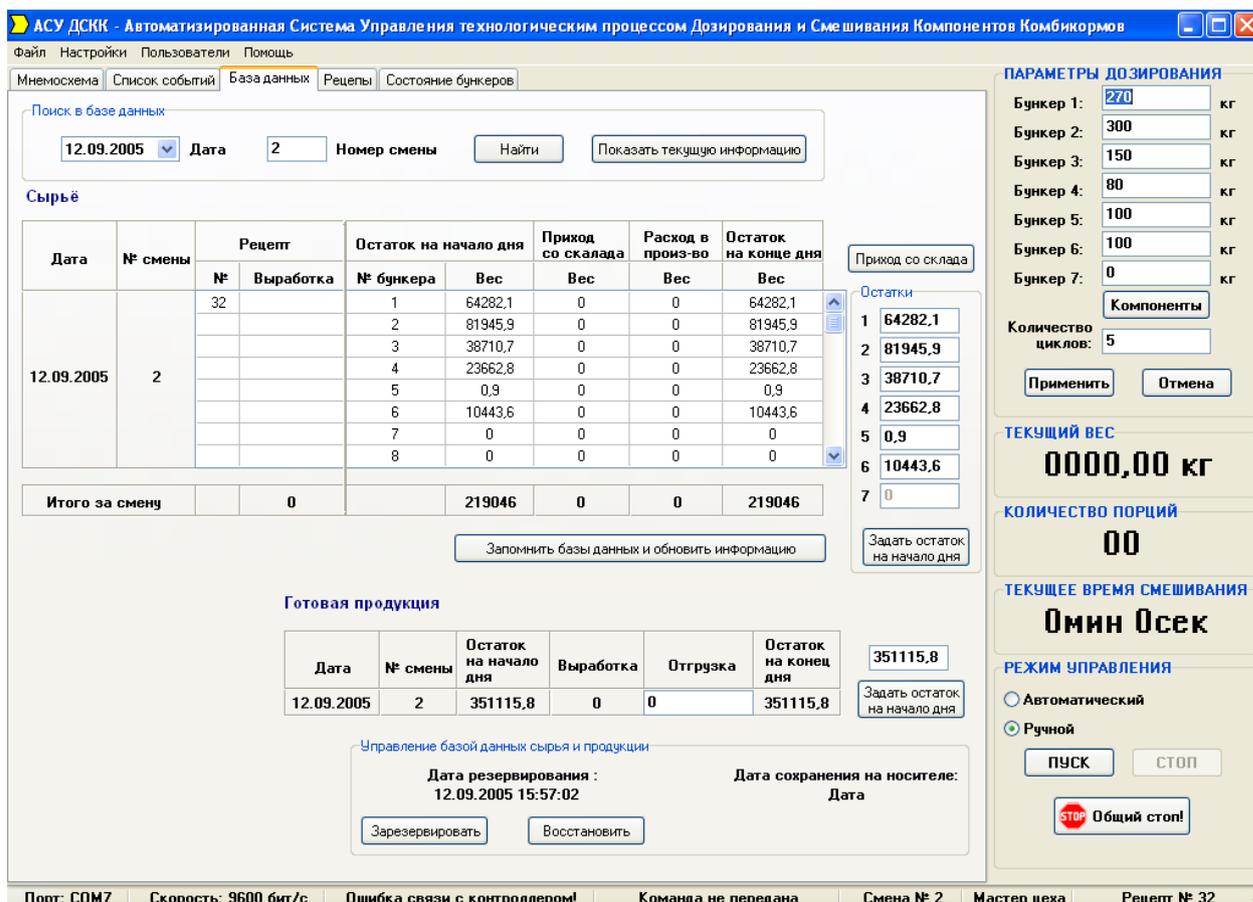


Рис. П4.11. Зкладка «База данных»

Интерфейс базы данных позволяет пользователю получать текущую информацию о технологическом процессе, данные за прошлый период и управлять базой данных.

Для просмотра информации за предыдущий период следует ввести номер смены, выбрать дату и нажать кнопку «Найти». Для вывода текущей информации нужно нажать кнопку «Показать текущую информацию».

Поступление сырья со склада регистрируется нажатием кнопки «Приход со склада» и заполнением необходимых данных в открывшемся окне.

Для принудительного обновления информации о технологическом процессе необходимо нажать кнопку «Записать базы данных и обновить информацию».

Ввод данных об отгрузке осуществляется заполнением поля «Отгрузка» и последующим нажатием клавиши «Enter» или кнопки «Записать базы данных и обновить информацию».

При необходимости изменения данных об остатке сырья на конец дня следует заполнить поля по бункерам в панели «Остатки» и нажать кнопку «Задать остаток на начало дня». Также можно задать остаток готовой продукции.

Предусматривается возможность резервирования и восстановления базы данных. Для этого имеется панель «Управление базой данных сырья и продукции». Кнопки «Зарезервировать» и «Восстановить» позволяют принудительно резервировать и восстанавливать базу данных.

Сохранение на внешнем носителе доступно зоотехнику и мастеру цеха. Для этого нужно скопировать папку «Base», находящуюся в пути «\...\ASUDSKK\Base», на внешний носитель информации (дискета, USB-флешнакопитель и т. д.).

Закладка «Рецепты»

Внешний вид закладки «Рецепты» приведен на рис. П4.12.

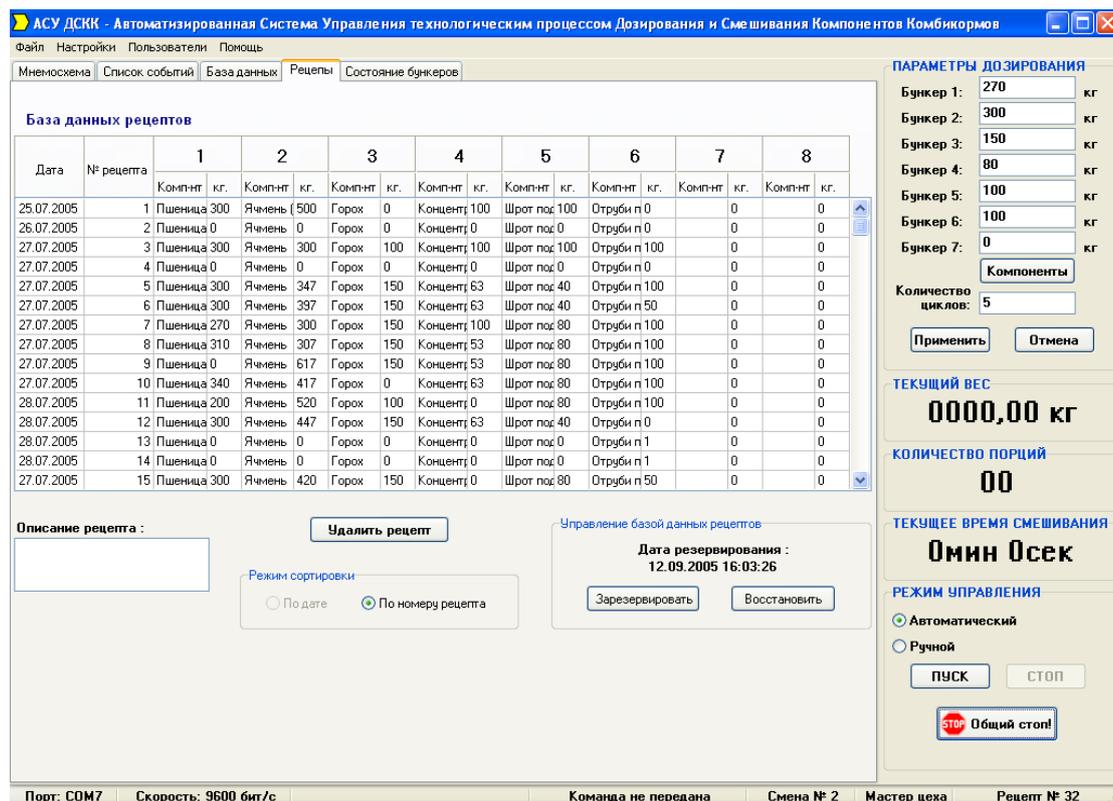


Рис. П4.12. Закладка «Рецепты»

Интерфейс базы данных рецептов позволяет просматривать имеющиеся рецепты и выбирать нужный. Для выбора необходимо дважды кликнуть левой кнопкой мыши на желаемом рецепте.

Для удаления рецепта следует выбрать его и нажать кнопку «Удалить рецепт». Текущий рецепт и отработанные рецепты удалить нельзя.

Предусматривается возможность резервирования и восстановления базы данных рецептов. Для этого имеется панель «Управление базой рецептов». Кнопки «Зарезервировать» и «Восстановить» позволяют принудительно резервировать и восстанавливать базу данных.

Выбор номера рецепта или ввод нового осуществляется нажатием кнопки «Компоненты» на пульте управления либо двойным щелчком мыши на поле таблицы базы данных рецептов, как описано выше.

The screenshot shows a software window titled "АСУ ДСКК - Дозируемые компоненты". Inside, there is a section "Компоненты рецепта". At the top, "Номер рецепта:" is set to "11" and "Описание:" is "Проба тестирование". Below this, there are seven rows for "Бункер 1" through "Бункер 7", each with a dropdown menu for the component name and a text box for the weight in kilograms. The weights are: Бункер 1: 54 кг (Ячмень (Кемин)), Бункер 2: 65 кг (Горох), Бункер 3: 89 кг (Отруби пшеничные), Бункер 4: 98 кг (Пшеница 11%), Бункер 5: 90 кг (Шрот подсолнечный 23), Бункер 6: 89 кг (Концентрат), Бункер 7: 0 кг (Концентрат). At the bottom, "Суммарный вес:" is 485 кг. There are "Применить" and "Отмена" buttons at the bottom right.

Бункер	Компонент	Вес (кг)
Бункер 1:	Ячмень (Кемин)	54
Бункер 2:	Горох	65
Бункер 3:	Отруби пшеничные	89
Бункер 4:	Пшеница 11%	98
Бункер 5:	Шрот подсолнечный 23	90
Бункер 6:	Концентрат	89
Бункер 7:	Концентрат	0
Суммарный вес:		485

Рис. П4.13. Окно компонент

В окне «Дозируемые компоненты» (рис. П4.13) выбирается нужный рецепт или задается новый с помощью выбора компонент и заполнения полей весов. Для принятия рецепта необходимо нажать кнопку «Применить».

Закладка «Состояние бункеров»

Внешний вид закладки «Состояние бункеров» приведен на рис. П4.14. Данная закладка позволяет оператору оценить текущее состояние бункеров с дозируемыми компонентами. Помимо процентного содержания каждого бункера индицируется вес в килограммах.

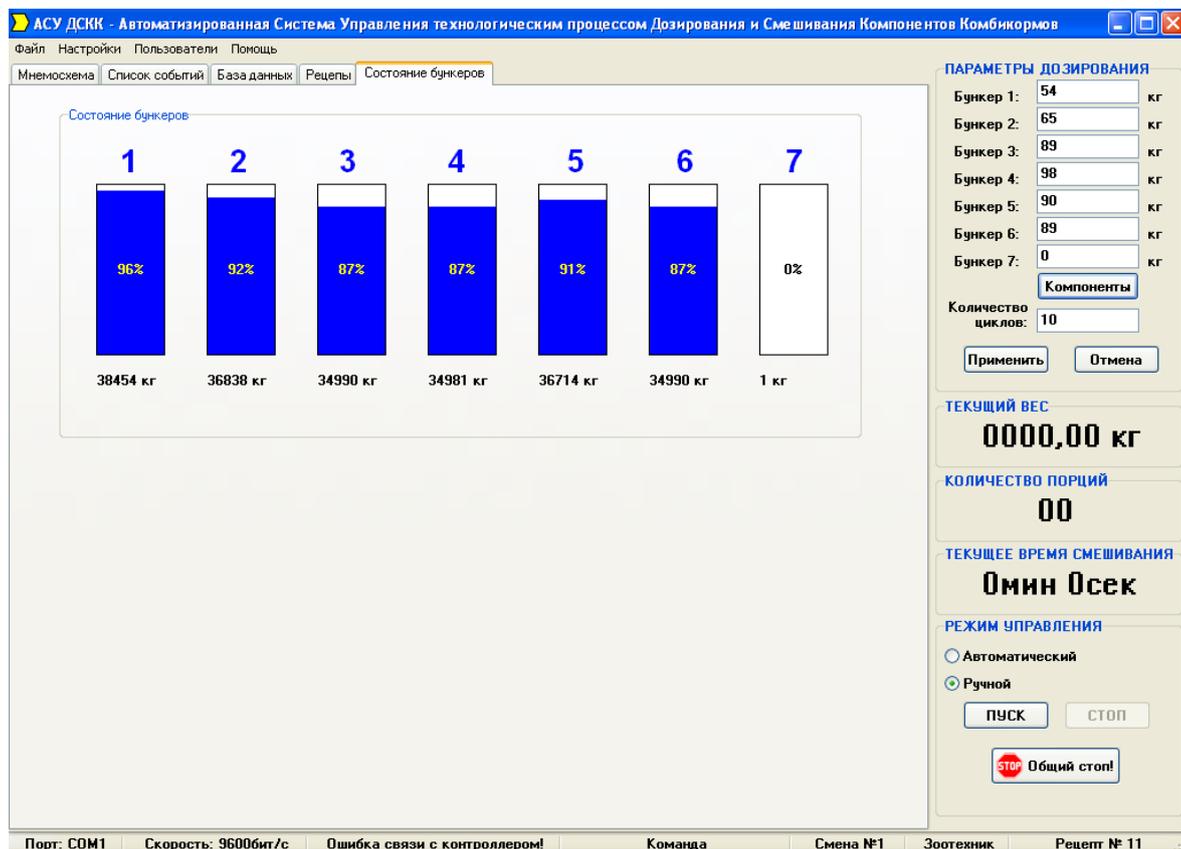


Рис. П4.14. Закладка «Состояние бункеров»

Статусная панель, расположенная внизу виртуального пульта, содержит следующие поля:

1. Порт, по которому установлена связь с контроллером.
2. Скорость обмена между ПК и контроллером.
3. Наличие (*Connect*) или отсутствие связи (*Ошибка связи с контроллером*) с контроллером.
4. Подтверждение отправки команды контроллеру.
5. Номер смены.
6. Пользователь (*Оператор, Мастер цеха* или *Зоотехник*).
7. Номер текущего рецепта.

УТВЕРЖДАЮ



Главный энергетик
Свиноводческого комплекса
ЗАО «Аграрная группа»

Кремис С.И.

2015

АКТ
об использовании результатов диссертационной работы
сотрудника Национального исследовательского Томского политехнического
университета Ляпушкина С. В.

Сотрудниками кафедры электропривода и электрооборудования Национального исследовательского Томского политехнического университета в результате выполнения хозяйственной работы № 7-35/05/11/76 от 28.02.2005 г. между НИ ТПУ и ЗАО «Аграрная группа» (научный руководитель работы, д.т.н., профессор Букреев В.Г, исполнители: Гусев Н.В., Нечаев М.А., Краснов И.Ю., Ляпушкин С.В.) была разработана и внедрена автоматизированная система управления процессами дозирования и смешивания сыпучих материалов. В созданной системе реализовано микропроцессорное управление электроприводами шнековых питателей технологического оборудования и функции управления процессами дозирования, смешивания и отгрузки сыпучих материалов, ведение баз данных рецептов и готовой продукции в течении календарного года, документирование событий, произошедших на всех уровнях системы.

Результаты научных исследований одного из исполнителей этой работы - **Ляпушкина Сергея Викторовича** использовались при разработке структуры цифрового регулятора веса дозируемых материалов и алгоритма сигнальной адаптации задания асинхронным электроприводом шнековых питателей. Предложенные технические решения позволили обеспечить заданную производительность автоматизированной системы подготовки комбикорма и высокую точность (не более 3%) дозирования сыпучих материалов с различными характеристиками.

Научный руководитель работы,
д.т.н., профессор кафедры ЭПЭО
НИ ТПУ
Букреев В.Г

Начальник кормоцеха предприятия
ЗАО «Сибирская аграрная группа»

Софроненко Д.А.

Рис П5 Акт о внедрении в ЗАО «Аграрная группа»



«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Энергетического института ТПУ

В.М. Завьялов

« _____ » 2015 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы соискателя

Ляпушкина Сергея Викторовича в учебном процессе

Национального исследовательского

Томского политехнического университета

Настоящий акт подтверждает, что в результате проведенной диссертационной работы Ляпушкина С.В. «Повышение эффективности управления электроприводом автоматизированного комплекса дозирования сыпучих материалов» передано и используются на кафедре «Электропривода и электрооборудования» Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета:

1. Алгоритмы адаптивной коррекции ошибки дозирования на основе статистических данных и алгоритма учета массы падающего столба материала.

2. Математическая модель системы дозирования, учитывающая различный тип дозируемого материала и динамическое изменение параметров системы.

3. Лабораторно-экспериментальная установка «Автоматическая система дозирования сыпучих на базе контроллера FASTWEL RTU – 188 BS»

Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе при подготовке бакалавров по направлению «Электроэнергетика и электротехника» и магистров по магистерским программам: «Энергосберегающие режимы электрических источников питания, комплексов и систем» и «Электроприводы и системы управления электроприводами» по учебным дисциплинам «Комплексная автоматизация технологических процессов», «Автоматизация технологических комплексов и систем в промышленности» и «Учебно-исследовательская работа студентов», а также в выпускных квалификационных работах студентов, что позволяет повысить качество подготовки выпускников.

Зав. кафедрой ЭПЭО ЭНИН

Ю.Н. Дементьев

Рис Пб Акт о внедрении в «Национально-исследовательском
Томском политехническом университете»