

Некоммерческое акционерное общество  
«АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ»

Кафедра Электропривод и автоматизация промышленных установок  
Специальность 6М071800 – Электроэнергетика

Допущен к защите  
Зав. кафедрой ЭиАПУ  
Сагитов П.И.  
«    »                      2016 г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**  
**пояснительная записка**

Тема «Разработка микропроцессорной системы регулирования  
производительности универсального малогабаритного  
кормоприготовительного агрегата по току нагрузки асинхронного  
электропривода»

Магистрант  Нысанов Ж.А.  
Подпись (Ф.И.О)

Руководитель диссертации  к.т.н., доцент Сапаков А.З.  
Подпись (Ф.И.О)

Рецензент  к.т.н., доцент Сарасенбаев Н.С.  
Подпись (Ф.И.О)

Алматы, 2016 г.

Некоммерческое акционерное общество  
«АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ»

Факультет «Электроэнергетический»  
Специальность 5М071800 – «Электроэнергетика»  
Кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок»

**ЗАДАНИЕ**

на выполнение магистерской диссертации

Магистранту Нысанову Жансеріку Аманұлы

(фамилия, имя, отчество)

Тема диссертации «Разработка микропроцессорной системы регулирования производительности универсального малогабаритного кормоприготовительного агрегата по току нагрузки асинхронного электропривода» утверждена Ученым советом университета №[4] от «28» 10 2014

Срок сдачи законченной диссертации «04»01.2016

Цель исследования является разработка системы регулирование нагрузки электропривода кормоприготовительного агрегата по току асинхронного электродвигателя.

Перечень подлежащих к разработке в магистерской диссертации вопросов или краткое содержание магистерской диссертации: нагрузочные диаграммы электропривода, выбор конструкции устройства регулирование производительности зернодробилки и принципа регулирования нагрузки электропривода, теоретическое исследование процесса регулирование нагрузки электропривода зернодробилки и обоснование режима его работы, выбор параметров устройство регулирование производительности и его конструкции, расчет и выбор мощности электродвигателя устройство регулирующего производительности.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей) Выбор конструкции устройства регулирование производительности зернодробилки и принципа регулирования нагрузки электропривода. Выбор параметров устройство регулирование производительности и его конструкции. Принципы регулирования производительности универсального малогабаритного кормоприготовительного агрегата.

Рекомендуемая основная литература

Рекомендуемая основная литература

- 1) Егоров В.Н., Шестаков В.М. Управление электроприводом: Элементы замкнутых систем автомат. 2) Егоров В.Н., Корженевский-Яковлев О.В. Цифровое моделирование систем электропривода. 3) Пальтов И.П. Качество процессов и синтез корректирующих устройств в нелинейных автоматических системах. 4) Пальтов И.П. Нелинейные методы исследования автоматических систем.

ГРАФИК  
подготовки магистерской диссертации

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
1) проведение литературного обзора по регулируемому электроприводу и устройствам регулирования производительности дробалок по ведущим странам.	сентябрь 2014-декабрь 2014	отчет
2) выбор конструкции устройства регулирования производительности кормоприготовительного агрегата и принципа регулирования нагрузки электропривода.	декабрь 2014-февраль 2015	отчет
3) разработка лабораторного стенда для испытаний выбранного принципа регулирования нагрузки электропривода агрегата и методики испытаний, проведение испытаний.	март 2015-июнь 2015	отчет
4) теоретические исследования процессов в системе регулирования нагрузки электропривода агрегата.	июль 2015-сентябрь 2015	отчет
5) технико-экономическое обоснование эффективности разработанной системы регулирования нагрузки электропривода зернодробилки.	октябрь 2015-декабрь 2015	отчет
6) оформление работы	декабрь 2015-январь 2016	отчет

Дата выдачи задания \_\_\_\_\_

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_ (подпись) Сагитов П.И.

Руководитель диссертации \_\_\_\_\_ (подпись) Сапаков А.З.

Задание принял к исполнению \_\_\_\_\_ (подпись) Нысанов Ж.А.  
Магистрант

## Аннотация

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения. Работа изложена 37 рисунков, списка литературы из 54 наименований.

В диссертационной работе является разработка системы регулирования нагрузки электропривода кормоприготовительного агрегата по току асинхронного электродвигателя.

Объектом исследования является процесс изменения нагрузки электропривода в зависимости от потока поступающего зернового потока на рабочий орган кормоприготовителя.

Теоретической и методологической основой работы (методика исследования) является выбор конструкции устройства регулирования производительности кормоприготовительного агрегата и принципа регулирования нагрузки электропривода. Разработка лабораторного стенда для испытаний выбранного принципа регулирования нагрузки и методики испытаний, проведение испытаний.

Научная новизна. На основании выполненных исследований получены следующие новые научные результаты, была предложена:

- методика выбора конструкции устройства регулирования производительности кормоприготовительного агрегата и принципа регулирования;

- для проведения испытаний по обоснованию параметров агрегата изготовлен макетный образец устройства регулирования производительности;

- результаты лабораторных испытаний по обоснованию параметров устройство регулирования производительности;

- предложена структура системы регулирования производительности агрегата.

Практическая значимость результатов проведенных исследований:

- выбранная конструкция устройства регулирования производительности кормоприготовительного агрегата и принципа регулирования;

- результаты теоретических положений могут использоваться в учебном процессе кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» при курсовом и дипломном проектировании.

## Аңдатпа

Диссертациялық жұмыс кіріспеден, төрт тараудан және қорытындыдан тұрады. Диссертациялық жұмыс 31 суреттен және пайдаланылған әдебиеттер тізімі 54 атаудан құралады.

Диссертациялық жұмыста азық дайындағыш агрегаттың электр жетегінің жүктемесінің жүйесін асинхронды қозғалтқыштың ток бойынша реттеу жүйесінің құрастыру.

Зерттеу нысаны ретінде астық дайындағыш агрегаттың жұмыс органына түсетін астық ағынының өзгеруіне байланысты электр жетегінің жүктелудегі өзгерісінің үрдісі болып табылады.

Жұмыстың теориялық және әдістемелік негізіне (зерттеу әдісіне) азық дайындағыш агрегаттың өнімділігін реттеу құрылғысының конструкциясын және электр жетегінің жүктелуін реттеудің принципін таңдау болып табылады. Таңдалған жүктемелік реттеудің принципін және сынау әдістемесін сынау үшін зертханалық стендті құрастыру.

Ғылыми жаңалық: Жүргізілген зерттеулердің негізінде алынған келесі ғылыми жаңалықтардың нәтижелері, мынандай ұсыныста көрсетілген:

- астықты ұсақтау агрегаттың өнімділікті реттеу құрылғысының конструкциясын және реттеу принципін таңдау әдістемесі;

- агрегаттың параметрлерін негіздеуге байланысты сынау жүргізу үшін өнімділікті реттеу құрылғысының үлгілік макет жасалған;

- өнімділікті реттеу құрылғысының параметрлерін негіздеуге байланысты Зертханалық сынаулардың нәтижелері;

- агрегаттың өнімділікті реттеу жүйесінің құрылымы ұсынылған;

Жасалынған зерттеулер нәтижесінің практикалық маңыздылығы:

- азық ұсақтау агрегатының өнімділікті реттеу құрылғысының таңдалған конструкциясы және реттеу принципі;

- теориялық зерттеудің нәтижелері «Өндірістік құрылғылардың электр жетегі және автоматтандыру» кафедрасының курстық және дипломдық жобалау оқу үрдісінде қолдануға болады.

## Summary

The thesis consists of an introduction, three chapters, conclusion. The work is presented on 89 pages of typewritten text, contains 27 drawings, bibliography of 34 titles.

The purpose of research. The aim of the thesis is to develop a system of regulation of the electric load forage prep unit current induction motor.

Scientific novelty. Based on the investigations, the following new scientific results, was proposed:

- The methods of selecting the design control device performance forage prep unit and the principle of regulation;

- To carry out tests to substantiate the parameters of the unit is made breadboard control device performance;

- The results of laboratory tests on the justification parameter control device performance;

- The structure of the system control unit performance.

The practical significance of the research results:

- The chosen design of the device capacity control food prep unit and the principle of regulation;

- The results of theoretical positions can be used in the educational process of the department "Electric drive and automation of plants" in course and degree designing.

## **Общая характеристика работы**

**Актуальность исследований.** В Республике Казахстан большое количество фермерских хозяйств тесно связано с растениеводством и животноводством. Проблемы в одной из этих отраслей будут всегда взаимосвязаны. Основным аспектом развития производства товаров животного происхождения является создание прочной кормовой базы. Это возможно лишь при наличии агрегатов способных производить кормов высокого качества при минимальных затратах денежных средств.

Следовательно, в настоящее время в КазНИИМЭСХ разработаны ряд универсальных дробилок и кормо дробилок для измельчения зерновых культур, которые востребованы фермерскими хозяйствами. Эти агрегаты отличаются простотой, надежностью и дешевизной и являются агрегатами отечественной разработки наилучшими эксплуатационными показателями процесса работы. К недостатку агрегата можно отнести необходимость ручного регулирования производительности агрегата путем увеличения или уменьшения зазора заслонки и тем самым контролируется поток поступления зерновых материалов на рабочий орган. Подобное контролирование чаще всего приводит к неполной загрузке или перегрузке дробилок. Как показывают результаты работы, большую часть времени электропривод находится в состоянии недогрузки и наоборот зачастую имели место отключения электропривода дробилок из-за перегрузки двигателя, что приводили к перегреву изоляции и выходу ее из строя. Кроме того, эти показатели работ крайне неблагоприятны и с точки зрения как эффективность системы, характеризующий качество выполнения системой цели функционирования.

Таким образом, разработка эффективного регулирования производительности агрегатов способных улучшить качество выполнения системой, цели функционирования являются актуальной научной и практической проблемой.

**Цель исследований.** Целью диссертационной работы является разработка системы регулирования нагрузки электропривода кормоприготовительного агрегата по току асинхронного электродвигателя.

**Объектом исследования** является процесс изменения нагрузки электропривода в зависимости от потока поступающего зернового потока на рабочий орган кормоприготовителя.

**Теоретической и методологической основной работы (методика исследования)** является выбор конструкции устройства регулирования производительности кормоприготовительного агрегата и принципа регулирования нагрузки электропривода. Разработка лабораторного стенда для испытаний выбранного принципа регулирования нагрузки и методики испытаний, проведение испытаний.

**Научная новизна.** На основании выполненных исследований получены следующие новые научные результаты, была предложена:

- методика выбора конструкции устройства регулирования производительности кормоприготовительного агрегата и принципа регулирования;

- для проведения испытаний по обоснованию параметров агрегата изготовлен макетный образец устройства регулирования производительности;

- результаты лабораторных испытаний по обоснованию параметров устройство регулирования производительности;

- предложена структура системы регулирования производительности агрегата.

**Практическая значимость результатов проведенных исследований:**

- выбранная конструкция устройства регулирования производительности кормоприготовительного агрегата и принципа регулирования;

- результаты теоретических положений могут использоваться в учебном процессе кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» при курсовом и дипломном проектировании.

**Публикации по теме диссертационного исследования**

По результатам исследования опубликована научная статья о теме «Разработка микропроцессорной системы регулирования производительности универсального малогабаритного кормоприготовительного агрегата по току нагрузки асинхронного двигателя» в сборнике научных трудов магистрантов АУЭС.



## Содержание

Введение	12
1 Состояние вопроса и постановка задач исследования	15
1.1 Требования к системам управления электроприводам технологических объектов	15
1.2 Описание и анализ технологического процесса	19
1.3 Системы автоматического управления процессом дробления в зернодробилках и дробилках производственного назначения	21
1.4 Нагрузочные диаграммы электропривода измельчителей кормов	23
1.5 Выбор конструкции устройства регулирование производительности зернодробилки и принципа регулирования нагрузки электропривода	24
2 Теоретическое исследование процесса регулирование нагрузки электропривода зернодробилки и обоснование режима его работы	31
2.1 Выбор параметров устройство регулирование производительности и его конструкции	31
2.2 Расчет и выбор мощности электродвигателя устройство регулирующего производительности	34
2.3 Выбор и обоснование датчиков	36
2.4 Принципы регулирования производительности универсального малогабаритного кормоприготовительного агрегата	38
2.5 Система регулирования нагрузки с линейным законом управления	42
3 Исследование показателей качества переходных процессов электропривода кормоприготовительного агрегата в различных режимах работы	47
3.1 Исследование нагрузочных диаграмм электропривода кормоприготовительного агрегата в различных системах управления экспериментальным путем	47
3.2 Снятие токовую нагрузочную диаграмму электропривода агрегата разомкнутой системы регулирования производительности	50
4 Техничко-экономическое показатели применения системы регулирование нагрузки электропривода кормоприготовителя	56
Заключение	62
Перечень сокращений	63

Список литературы	64
Приложение А.1	66
Приложение А.1.1	68

## Перечень сокращений

ОУ – объект управления;

УУ – управляющее устройство;

САУ – система автоматизированного управления;

КПД – коэффициент полезного действия;

ПМК – программируемый логический контроллер

ПИД - пропорционально-интегрально-дифференциальный

АПК – агропромышленный комплекс;

ГСМ – горюче-смазочный материал.

МК – логический микроконтроллер

ОАД–Однофазный асинхронный электродвигатель;

## Введение

В соответствии со «Стратегией индустриально-инновационного развития Республики Казахстан на 2003-2015 годы» рост производительности труда к 2015 году по сравнению с 2000 годом предполагалось увеличить не менее чем в 3 раза и снизить энергоёмкость ВВП в 2 раза [1].

В своем Послании «Казахстан на пути ускоренной экономической, социальной и политической модернизации» Президент РК Н.А. Назарбаев сказал: «Считаю необходимым в дальнейшем обратить особое внимание на индустриализацию аграрного производства через реализацию кластерных инициатив в сфере производства и переработки сельскохозяйственного сырья. Именно сюда надо привлекать внимание частного сектора, сюда привлекать кредиты, в том числе в русле индустриальной политики...» [2].

Животноводство в Казахстане представляет собой одну из важнейших отраслей сельского хозяйства и считается основным из направлений в агропромышленном секторе. В нашей стране от этой отрасли получают около 45% всей валовой продукции сельского хозяйства. Общий подъем материального благосостояния населения страны, улучшение условий и полноценности питания, трудящихся в значительной степени определяются состоянием и развитием животноводства. Оно также является важным экономическим рычагом для Казахстана, ведь для сельского населения животноводство – это генератор занятости и доходов.

Животноводство обеспечивает население страны такими высокоценными продуктами питания, как мясо, молоко, яйцо, масло, сыр, кисломолочные продукты, колбасы, копчености и др.

Казахстан обладает огромными возможностями в этой отрасли, так как территорий для развития этого сектора предостаточно. В настоящее время реализуется программа по развитию животноводства, куда были направлены существенные суммы, результатом этой программы должны стать увеличение кормовой базы, повышение уровня поголовья скота, расширение земель для пастбищ и их оснащение. В результате выполнения всех задач программ, экспортный потенциал Казахстана значительно возрастет. Также, внутренняя потребность в мясе и молочных продуктах на большую часть будет удовлетворена.

Рынок молочной продукции сохраняет положительные тенденции. Сегодня в Казахстане задействованы около 250 небольших заводов мощностью от 5 до 50 тонн молока в день. Основными поставщиками являются частные сельские хозяйства.

Не смотря на стремительное развитие отрасли, все еще существуют негативные факторы, которые влияют на совершение более интенсивных продвижений. В основном это- неусовершенствованная инфраструктура, слабая кормовая база, мелко товарность производства и поголовье беспородного скота (82%).

Вопросы укрепления кормовой базы, как ключевого фактора улучшения эффективности развития животноводства. Совершенно очевидно, что создание кормовой базы для животноводства связано с развитием производства кормов. Известно, что питательные вещества активно усваиваются животными в измельченном виде, так как в измельченных кормах увеличивается активная поверхность частиц. Это способствует ускорению процесса пищеварения и усвояемости питательных веществ.

В настоящее время в КазНИИМЭСХ разработаны ряд зернодробилок и измельчителей обладающими высокой производительности и достаточной степенью надежности, предназначенные для измельчения зерновых материалов. Основными общими недостатками применения этих агрегатов является ручное регулирование зерновых материалов поступающих на рабочие органы агрегатов. При ручном регулировании зерновых материалов, не обеспечивается строгое соблюдение требуемого режима работы агрегата. От неудовлетворительного режима работы агрегата, в первую очередь приводит к недопустимой перегрузке или недогрузке рабочего органа, а вследствие этого и преждевременный выход из строя электродвигателя. Следовательно, разработка системы регулирования нагрузки электропривода кормоприготовителя является актуальной проблемой.

Решение проблемы, поддержание необходимого номинального режима работы кормоприготовительного агрегата, возможно использованием в них современных автоматизированных систем регулирования нагрузки электропривода, позволяющей при минимальных энерго затратах создавать и поддерживать требуемую нагрузку на уровне заданной величины при неустойчивости зернового потока поступающего на рабочий орган агрегата.

Целью диссертационной работы является разработка системы регулирования производительности универсального малогабаритного кормоприготовительного агрегата по току нагрузки асинхронного электропривода.

- Провести литературный обзор по регулируемому электроприводу и устройствам регулирования производительности дробилок;
- выбрать конструкцию устройства регулирование производительности кормоприготовительного агрегата и принципа регулирования нагрузки электропривода;
- разработать лабораторный стенд для испытаний выбранного принципа регулирования нагрузки электропривода агрегата и методики испытаний, проведение испытаний;
- теоретический исследовать процессы в системе регулирования нагрузки электропривода агрегата;
- обосновать эффективность разработанной системы регулирование нагрузки электропривода кормоприготовителя.

# **1 Состояние вопроса и постановка задач исследования**

## **1.1 Требования к системам управления электроприводам технологических объектов**

Одним из важных факторов, влияющих на эффективность работы технологических объектов, в том числе кормоприготовительных агрегатов, является система управления электроприводом.

Система управления электропривода, как комплекс конструкционных, технологических и эксплуатационных факторов среды в производственных условиях оказывает наряду с физическим старением деталей, существенное влияние на показатели надежности и производительности труда агрегатов.

При несоблюдении оптимальных параметров системы управления электропривода происходит снижение объема выпуска продукции и экономических показателей агрегата [4].

Система управления электропривода кормоприготовительных агрегатов определяется рядом факторов производственной среды: плохим технологическим процессом, проведением плохого ремонта агрегата, нарушением норм и правил при эксплуатации, негативном влиянием эксплуатационных действий, несовершенством контроля и управления качеством работы. Степень воздействия каждого из указанных факторов на работу агрегата различна и может изменяться в зависимости от сочетания с остальными.

В процессе своего функционирования любой электропривод агрегата оказывается подверженным воздействию различных внешних и внутренних дестабилизирующих факторов, которые приводит к нарушению номинального режима работы агрегата, что приводит к недогрузке или перегрузке электродвигателя. Но если эти процессы очень часто повторяются и протекают достаточно долго, это приводит к критическому нагреву обмоток электродвигателя и быстрому выходу ее из строя.

Нарушение оптимальных систем регулирования электропривода вызывает изменения момента инерции нагрузки вращающегося электродвигателя рабочего органа агрегата и ведет к снижению эксплуатационных свойств агрегата и, как следствие, к повышенной опасности внезапного отказа рабочего органа и снижению производительности технологической линии.

Известны два способа автоматического регулирования электропривода переменных систем: регулирование по возмущению и регулированию, по отклонению координаты от заданного значения с помощью отрицательной обратной связи по регулируемой переменной.

Первый принцип основан в поддержании таких условий работы электропривода, которые соответствуют постоянству момента нагрузки рабочего органа агрегата, и способствует его улучшению качества работы.

Более перспективным представляется принцип создания системы регулирования электропривода по возмущению на базе микропроцессорных элементов, которая строго учитывает отклонение нагрузки от номинального значения и целенаправленным изменением одного или нескольких факторов стимулирует стабилизацию тока в силовых цепях электродвигателях агрегата, повышая его производительность [5, 6]. Например, по данным [7], был достигнут, значительный эффект при регулировании нагрузки электропривода агрегата за счет непрерывного поддержания номинального режима работы в течение всего периода производства. За тридцать дней производительность увеличился на 9,8% по сравнению с контрольной группой при одновременной экономии электроэнергии на 15%.

Преимущества системы регулирования электропривода по возмущению на базе микропроцессорных элементов при регулировании потоков зерновых материалов поступающих на рабочий орган кормоприготовительного агрегата показаны [8]:

При дроблении зерновых материалов с кормоприготовительными агрегатами стимулирующими факторами могут выступать:

- зерновой поток поступающего в камеру измельчения агрегата;
- нагрузочное регулирование результирующей номинальный режим работы.

Распространенный способ регулирования потока поступающих зерновых материалов в камеру измельчения кормоприготовителя реечными задвижками с ручным [8, 9] и электрическим приводом позволяет снизить динамические нагрузки агрегата. Дальнейшим развитием этого следует признать определение оптимальных режимов работы, которые обеспечат номинальный режим работы электропривода рабочего органа агрегата.

В отношении регулирования нагрузки электропривода на базе микропроцессорных элементов для сельскохозяйственных агрегатов имеется конкретная обоснованная рекомендация – перерегулирование изменении нагрузки, соответствующая качественным условиям, должна быть не более 10% [11].

Оптимальная загрузка зерновым потоком поступающего на рабочий орган для малогабаритных агрегатов не определена. В общем случае, величина потребляемого тока электродвигателем агрегата при загрузке зерновым потоком должна быть не больше допустимого предела от номинального его значения. Этим снижается нагрузка на электродвигатель агрегата, исключается риск перегрева электродвигателя, активизируется система контроля управления контролем зерновых потоков поступающих на рабочий орган агрегата [12].

Широко применяемая система регулирования электропривода с подчиненным регулированием параметров [13, 14, 15, 16] служит для поддержания заданный режим работы при изменении нагрузки.

Нагрузочное регулирование электропривода переменного тока предусмотрено в [17]. Для системы регулирования электропривода

применяются три основные жесткие обратные связи: по скорости и напряжению и току двигателя, а также их различные комбинации. Для систем стабилизации скорости двигателя применяются отрицательные связи по скорости и напряжению и положительная связь по току. Для стабилизации момента двигателя применяется отрицательная связь по току и положительные связи по скорости и напряжению.

На современном этапе развития наиболее надежной и экономичной считается система электроприводов с микропроцессорным управлением, построенного по принципу подчиненного регулирования, с учетом различных способов формирования сигналов обратных связей.

Микропроцессорное управление электропривода улучшает энергетические и динамические показатели агрегата, уменьшает величину потерь энергии в переходных процессах и позволяет решить практически любое техническое задание. Кроме того, микропроцессорное управление способствует повышению надежности и снижению эксплуатационных затрат при условии правильного выбора всех его составляющих.

По указанной управлению электропривода срока службы электродвигателя составляет 10-15 лет, наработка на отказ в течение времени двухлетней гарантией работы 4000-6500 ч. КПД электропривода без учета потерь в двигателе составляет в зависимости от мощности 0,8-0,85. Коэффициент мощности составляет 0,8-0,85.

Основными требованиями в нашем случае являются высокая точность стабилизации нагрузки электропривода агрегата и быстродействие системы регулирования при различных изменениях возмущающих воздействий.

Рассмотрим вопрос количественной оценки основных показателей качества системы автоматического регулирования нагрузки электропривода агрегата с учетом указанных требований.

Динамическая точность.

При формулировании требований к динамической точности отправным моментом является наиболее полное использование электродвигателя привода по нагреву при условии обеспечения его перегрузочной способности.

Тепловой режим двигателя достаточно полно характеризуется величиной эквивалентного по нагреву тока  $I_{\text{экв}}$  [66].

$$I_{\text{экв}} = \sqrt{1/T \int_0^{T_{\text{ц}}} I_{\text{д}}^2(t) dt}, \quad (1.1)$$

где:  $T_{\text{ц}}$  – длительность цикла работы двигателя.

Относительную ошибку стабилизации регулируемой величины по нагреву  $\varepsilon$  оценим выражением

$$\varepsilon = \frac{I_{\text{экв}} - I_{\text{y}}}{I_{\text{y}}}, \quad (1.2)$$



где:  $I_y$  – уставка тока, равная номинальному значению нагрузки.

Функционал (1.2) удобно использовать в дальнейшем в качестве целевой функции при оптимизации параметров автоматического регулятора.

Перерегулирование.

Величина допустимого перерегулирование  $\sigma_A$  выбирается из условия обеспечения перегрузочной способности электродвигателя привода агрегата. Перегрузочная способность  $\lambda_n$  асинхронного электродвигателя по току определяется выражением [66].

$$\lambda_n = \frac{I_{g \max}}{I_y} \quad (1.3)$$

где  $I_{g \max}$  – максимально допустимое значение тока двигателя.

Величину  $I_{g \max}$  – максимально допустимое значение динамической ошибки стабилизации представим в виде

$$I_{g \max} = y_{\max} - I_y,$$

Поскольку величина перерегулирование определяется выражением [27]

$$\sigma_A = \frac{y_{\max}}{I_y},$$

то с учетом (1.3) получим неравенство, определяющее допустимую величину перерегулирование

$$\sigma_A \leq \lambda_n - 1$$

На практике для обеспечения устойчивой работы электропривода при колебаниях напряжения питающей сети необходимо в полученное выражение ввести поправочный коэффициент [66]

$$\sigma_A \leq k_3 (\lambda_n - 1)$$

где  $k_3$  – коэффициент запаса.

Быстродействие.

Быстродействие системы целесообразно оценивать длительностью переходного процесса  $t_{\pi}$  при отработке импульсного аддитивного

возмущения. Для обеспечения устойчивой работы привода с учетом характера импульсного воздействия потребуем, чтобы величина  $t_n$  не превышала 2,5-3 с.

## 1.2 Описание и анализ технологического процесса

Автоматические системы можно условно разделить на малые и большие. Малые системы однозначно определяются свойствами процесса и ограничены одним типовым процессом, его внутренними связями, а также особенностями аппаратного оформления. Большие системы представляют собой совокупность малых систем и отличаются от них количественного и качественной оценки работы.

Один из самых важных этапов в процессе приготовления высококачественного муки и крупы – это измельчение исходных компонентов.

Измельчение – это достаточно энергоемкая технологическая операция, которая выполняется в процессе подготовки исходных компонентов к смешиванию. Процессы измельчения играют важную роль во многих пищевых производствах. Основные закономерности процессов измельчения рассмотрим на примере процесса помола зерна в сортовую муку.

Объекты управления процессом сортового помола зерна определяются технологией производства муки. Одним из основных направлений, позволяющих повысить эффективность работы мельницы, является автоматизация управления технологическими процессами. В подготовительном отделении наибольший интерес как объект автоматизации представляет процесс формирования помольных партий. На практике расчет соотношения компонентов в помольной партии зерна производят по одному из показателей этом не всегда удается получить зерновую смесь со стабильными (стекловидное, выходу клейковины, зольности и др.) выходом. С целью стабилизации указанных свойств был предложен метод составления зерновой смеси одновременно по трем показателям качества зерна: стекловидное, выходу сырой клейковины и зольности. Показатель "стекловидность" оказывает влияние на процесс подготовки и переработки зерна, выход сырой клейковины на хлебопекарные свойства муки, выход сырой клейковины и зольность на качество готовой муки, отвечающей стандарту.

Технологические процессы в размольном отделении мельницы в основном осуществляются на трех видах машин: вальцовых станках, отсевах и ситовейках. Из них только вальцовый станок имеет регулирующий орган, позволяющий изменять зазор между вращающимися валками станка. Таким образом, управление процессами в размольном отделении при существующих технологических машинах возможно только изменением режима работы вальцовых станков.

Всякая система состоит из взаимосвязанных частей и в определенном смысле представляет собой замкнутое целое. В любой промышленной автоматической системе управления всегда можно выделить две взаимодействующие между собой основные части: объект управления (ОУ) и управляющее устройство (УУ). В случае, когда в системе управления все функции по обработке информации о цели и результатах управления, выработке управляющих воздействий и их передаче на управляющие устройства выполняются без участия человека, система называется автоматической.

Система управления режимом измельчения состоит из следующих элементов: самотека, вальцового станка, пневмоприемника, циклона-разградителя, шлюзового затвора, рассева, расходомера, регулятора, за датчика, исполнительного механизма регулирования зазора. Сигнал с расходомера подается в измерительный блок регулятора, где сравнивается с сигналом за датчика; при несоответствии между этими сигналами возникает сигнал рассогласования, который поступает в электронный блок регулятора. Электронный блок усиливает сигнал рассогласования до величины, необходимой для приведения в действие электродвигателя исполнительного механизма.

Анализ технологического процесса измельчения зерна. Предназначение молотковой дробилки – измельчение зерна в обойную муку, различных компонентов комбикорма и повторного измельчения муки. Процесс измельчения происходит под воздействием удара и сопровождается истиранием. При этом, скорость рабочих органов выбирается между 40-120 м/с. Скорость молотков – один из важнейших факторов, который влияет на эффективную работу дробилки. При увеличении частоты ударов молотков о частицы продукта, степень его измельчения также увеличивается. Если скорость молотков низкая, то эффективность работы падает и увеличивается расход энергии.

В зависимости от типа сырья выбирается нужная скорость вращения молотков, что позволяет достигнуть определенной степени помола. Измельчитель для зерна оснащен определенным числом быстровращающихся молотков, количество которых напрямую зависит от мощности электродвигателя. Мельница снабжена пневмосистемой, которая отвечает за всасывание зерна через заборник. Сырье поступает через шланг определенного диаметра в улавливатель. Затем сырье попадает в молотковую камеру, в которой происходит помол до определенного размера. Готовый продукт через выпускной патрубок подается наружу. Через гибкий напорный трубопровод перемолотый корм поступает в резервуар для хранения кормовой смеси.

Таким образом, если скорость вращения вальцов изменится при помощи тахогенератора (звено обратной связи), построить цепь управления, то процесс можно автоматизировать.

### 1.3 Системы автоматического управления процессом дробления в зернодробилках и дробилках производственного назначения

К наиболее значительным работам, посвященным анализу факторов, влияющих на процесс дробления в зернодробилке, изучению дробилки как объекта автоматического управления и разработке систем автоматического управления относятся исследования Г.Д. Афанасьева [4], В.А. Олейникова и О.Н. Тихонова [3], С.А. Панкратова [8], М.А. Субботина [9, 10, 14] и др.

Г.Д. Афанасьев [5] исследовал систему регулирования нагрузки зернодробилки как объект автоматического управления по каналу производительность – потребляемая на дробление мощность. Экспериментальные исследования проводились на универсальных дробилках, не имеющих устройства дистанционного управления величиной разгрузочной щели.

Методика экспериментальных исследований предусматривала определение наиболее вероятной кривой переходного процесса (мощности дробления) при многократных скачкообразных изменениях входного параметра (производительности). Определена передаточная функция зернодробилки по управляющему воздействию

$$W(p) = \frac{K}{Tp+1} * e^{p\tau} \quad (1.4)$$

Наиболее вероятная кривая переходного процесса получена при условии, что отсутствуют случайные возмущения на входе объекта. При этом в работе [4] отмечается, что в производственных условиях отсутствует возможность поддержания производительности и физико-механических свойств руды на строго постоянном уровне после подачи скачкообразного возмущения по производительности на вход дробилки. На основании проведенных исследований предложена система регулирования загрузки дробилки по нагрузке приводного двигателя.

В.А. Олейников и О.Н. Тихонов [5] провели аналогичные исследования зернодробилки как объекта автоматического управления. Запас материала в зернодробилке оценивался потребляемой на дробление мощностью. Передаточную функцию зернодробилки предложено аппроксимировать аperiodическим звеном первого порядка

$$W(p) = \frac{K}{Tp+1} \quad (1.5)$$

С.А. Панкратов и др. [50] исследовали влияние регулирования величину разгрузочной щели на их производительность. На основании проведенных статистических исследований определены корреляционные зависимости

между исследуемыми величинами для дробилок КМЗ-5 при дроблении различных зерновых материалов.

Аппроксимация зависимостей, произведенная кривыми вида:

$$Q = C \frac{d_{cp} + c_1}{d_{cp} + c_2} \quad (1.6)$$

где:  $Q$  - производительность в т/час;

$C, C_1, C_2$  – постоянные для различных зерновых материалов;

$d_{cp}$  – средний размер разгрузочной щели.

Для кормоприготовительных агрегатов не менее важной проблемой является обеспечение требуемого гранулометрического состава измельченного материала на выходе агрегата конечных стадий (Л.2). Система автоматического регулирования соотношения фракций в измельченном материале появились сравнительно недавно.

М.А. Субботин и др. [8, 9, 10] провели исследования зернодробилок как объектов автоматического регулирования, в результате чего разработана система автоматического регулирования нагрузки электропривода агрегата.

Результаты проведенных исследований показали, что основными факторами, влияющими на процесс дробления, являются изменения зернового потока поступающего на рабочий орган и изменение величины разгрузочной щели дробилки. Это в дальнейшем предопределило выбор в качестве регулирующего воздействия – изменение величины разгрузочной щели зернодробилки. В качестве выходного параметра системы регулирования использовано номинальный ток двигателя рабочего органа агрегата.

Передаточная функция зернодробилки по каналу изменение величины щели – соотношение фракции на выходе представлена апериодическим звеном первого порядка [7]

$$W(p) = \frac{K}{Tp+1} \quad (1.7)$$

Получены статические характеристики зависимости от изменений потока зернового материала и от изменения размера разгрузочной щели дробилки.

Определена регулировочная характеристика [8], обеспечивающая заданное соотношение зернового материала при функциональной зависимости:

$$\sigma = \frac{\theta}{0,00025\sigma_{ск}} + C \quad (1.8)$$

где:  $\theta$  - заданное значение зернового материала по весу;  
 $\delta$  - размер щели зернодробилки, мм;  
 $C$  – постоянная величина (для зернодробилок среднего дробления  $C=22$ ).

На основании проведенных исследований разработаны системы непрерывного и дискретного регулирования.

Вместе с тем в работе [9] справедливо отмечается, использование весового соотношения двух фракций готового продукта после измельчения не является лучшим решением, так как в технологических схемах агрегата, продукта дробления двух-трех агрегатов смешиваются еще до поступления на рабочий орган и контроль за отдельным агрегатом становится затруднительным или совсем невозможным.

Разработка локальных систем автоматического регулирования процессов дробления производится с учетом возможности их использования в сложных системах автоматического регулирования многостадийного процесса дробления.

В США, на заводе фирмы «Массачусетс броукен стоун» применено магнитное логическое устройство для автоматического поддержания максимальной производительности двухступенчатой, камнедробильной установки [6]. Для поддержания оптимального режима работы дробилки вторая стадия дробления производится контролю нормального заполнения. Если заполнение выше нормы дается сигнал на работу первой дробилки с большей степенью измельчения. При перегрузке двигателя второй дробилки автоматический уменьшается подача исходной горной массы в первую дробилку.

Разработана система автоматического регулирования трехстадийного процесса дробления [2] предусматривающая включение систем автоматического регулирования процесса дробления в щековой [3] и конусных дробилках [7, 9] или в щековой и двух роторной дробилке [9] в автоматизированную технологическую линию завода.

#### **1.4 Нагрузочные диаграммы электропривода измельчителей кормов**

В целях повышения эффективности использования электропривода агрегата необходимо изучение и технико-экономическое обоснование режимов работы электропривода агрегата. Исследованиями установлено [20], что нагрузочные диаграммы электропривода кормоприготовительных машин (измельчителя агрегата АПК-10 и универсальной дробилки ДКУ-1,0), получаемые при измельчении сочных, грубых и зеленых кормов в реальных условиях, имеют значительное отличие от нагрузочных диаграмм, снятых в лабораторных условиях, нагрузка указанных машин характеризуется большой неравномерностью, которая приведена в рисунке 1.1. Для получения более

правильного результата при анализе таких нагрузочных диаграмм необходимо использовать теорию случайных функций. Представленную нагрузочную диаграмму в виде синусоиды следует рассматривать как первое приближение к реальным диаграммам.

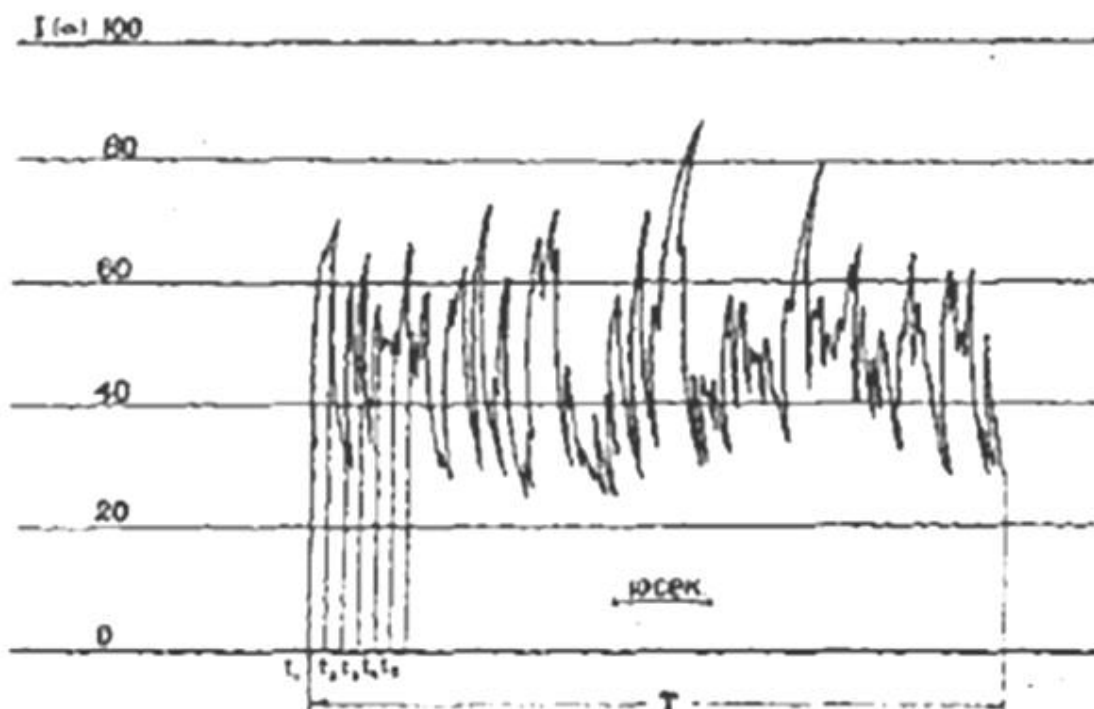


Рисунок 1.1 - Нагрузочная диаграмма электропривода дробилки АКУ-1,0 при измельчении кормовой свеклы

В результате анализа нагрузочных диаграмм электропривода измельчителя агрегата и дробилки установлено, что их нагрузка является стационарной случайной функцией (математические ожидания  $m_i$  и среднеквадратические отклонения  $\sigma_i$  почти постоянны для каждой характерной загрузки машины) [20, 21, 34].

На параметры нагрузочных диаграммы влияют виды кормовых культур. При одной и той же загрузке машины резные измельчаемые материалы дают неодинаковые значения  $m_i$  и  $\sigma_i$ . При переработке одного и того же вида корма с увеличением загрузки машины растут величины  $m_i$  и  $\sigma_i$ .

### 1.5 Выбор конструкции устройства регулирование производительности зернодробилки и принципа регулирования нагрузки электропривода

В качестве регулирующего устройство производительности выбраны следующие: задвижка речная с электрическим приводом ЗРЭ-200; задвижка с электроприводом типа У8-ТЭА-16; задвижки речные с электроприводом У8-

ТЭА-16. Далее, из этих устройств регулирования определяется наиболее эффективная задвижка по групповым показателям качества системы для регулирования зернового потока. Групповые показатели определяются по техническим параметрам для каждого вида задвижки. Для этого приведены краткие описания характеристики параметров конструкций задвижек.

1) ЗРЭ-200 – представляет собой сварной прямоугольный корпус 1, внутри которого по направляющим 2 перемещается шибер 3. В нижней части шибера закреплена зубчатая рейка 4, которая сопрягается с шестерней 5, насаженной на приводной вал 6, соединенный с мотор-редуктором 7. Для ограничения хода шибера в задвижке установлены два концевых выключателя 8, при помощи которых также можно регулировать величину перекрытия шиберам рабочего окна. В случае аварийного отключения электричества в задвижке предусмотрено закрытие заслонки. Благодаря применению подшипников, в качестве направляющих, обеспечивается плавное перемещение шибера, уменьшается сопротивление и, как следствие, меньшее потребление электроэнергии по сравнению с аналогами, а также повышается ресурс эксплуатации задвижек. Конструкция речной задвижки с электрическим приводом приведена в рисунке 1.1.

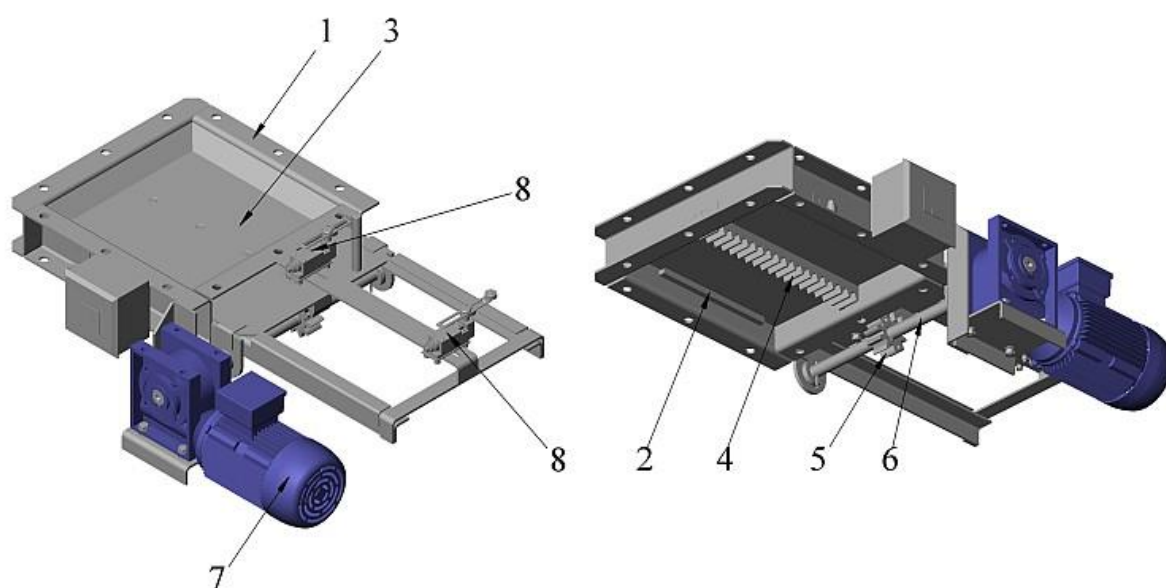


Рисунок 1.2 – Конструкция речной задвижки с электрическим приводом

2) Основными узлами У8-ТЭА-16 являются корпус 1 механизма заслонки и электропривод. Корпус сварен из листовой стали, в средней части имеет прорезь и направляющие для заслонки. К торцевым частям корпуса приварены фланцы из угловой стали. Механизм задвижки включает в себя: заслонку с рейками 2, концевые выключатели 3 вал привода 4 заслонки с шестернями и соединительной муфтой, которые приведены в рисунке 1.2. Приводится в движение от мотор-редуктора 5 мощностью 0,44 кВт.



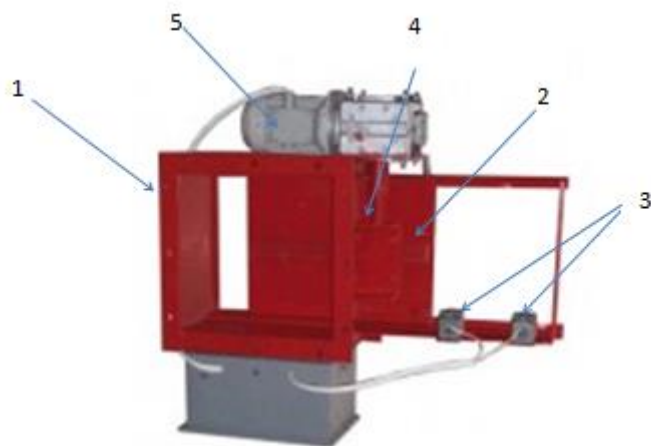


Рисунок 1.3 - Конструкция реечной задвижки с электрическим приводом

3) Основными частями задвижка УЗР-ОО являются: сварной корпус 1, шибер 2 с приваренной к нему рейкой, шестерня, штурвал с осью. Задвижка имеют электропривод 3 и конечные выключатели 4 для дистанционного управления. Корпус задвижка представляет собой сварную коробку из листовой стали с фланцами: верхним и нижним, которые приведены в рисунке 1.3. Шибер перемещается при помощи зубчатой рейки и шестерни, закрепленной на оси штурвала.



Рисунок 1.4 - Конструкция реечной задвижки с электрическим приводом

Данные описания технических характеристик в обобщённом виде для этих устройств сводится в таблицу 1.1.

Таблица 1.1 – Технические характеристики устройство регулирования производительности

Характеристики	ЗРЭ-200	У8-ТЭА-16	УЗР-ОО
Мощность привода, кВт	0,25	0,44	1,0
Сечение отверстий, м <sup>2</sup>	0,4	0,4	0,45
Напряжение, В	220	220	220
Время открытия задвижка, с	6,0	6,5	6,0
Аварийное отключение	заслонка полностью закрывается	заслонка остается открытым	заслонка остается открытым
Высота, мм	150	140	145
Масса, кг	47	49	47
Стоимость задвижки, тг	80000	92442	221400

Эффективность работы задвижки с электроприводом является функцией групповых показателей качества системы

$$k_{\text{э}} = f(k_{\text{н}}, k_{\text{м}}, k_{\text{эн}}, k_{\text{мн}}). \quad (1.9)$$

Групповые показатели в свою очередь определяются единичными показателями качества: надежность  $k_{\text{н}} = \{k_{\text{зз}}\}$ ; технические показатели  $k_{\text{м}} = \{m_{\text{м}}, s_{\text{мн}}, p_{\text{з.р}}\}$ ; энергетические показатели  $k_{\text{эн}} = \{P_{\text{э}}, u_{\text{э}}\}$ .

В качестве показателя надежности работы устройства регулирования принимаются параметры аварийное отключение  $k_{\text{з.з}}$  и время открытия задвижки  $t_{\text{з}}$ . При аварийных отключениях в виде отключения электроэнергии заслонка полностью закрывается и тем самым поступление зернового потока на рабочий орган агрегата прекращается, что исключает возникновение перегрузки работающего агрегата. Тем самым эти показатели позволяют улучшить коэффициент технической готовности всех систем агрегата.

Техническими показателями являются рабочая масса  $m_{\text{м}}$ , сечение отверстий заслонки  $s_{\text{мн}}$  и габаритные размеры  $p_{\text{з.р}}$ . Устройства регулирования должны иметь минимальные габаритные размеры, простую и прочную конструкцию, а также должны быть приспособлены к применению автоматического управления.

Энергетические показатели выражают способность объекта потреблять мало энергии с высокой эффективностью и приспособленность к достижению оптимальных затрат. Соответствующими единичными показателями являются потребляемая мощность  $P_{\text{э}}$  и рабочее напряжение  $u_{\text{э}}$ .

Экономический показатель стоимость устройства  $k_{\text{с}}$  в данном случае имеет важное значение для выбора варианта, ему присвоен значимый вес который приведен в таблице 1.2.

Таким образом, зависимость (1.1) была сформирована эвристическим методом, в частности, методом экспертных оценок в виде следующей функции

$$k_{\text{э}} = \sum_{i=1}^m c_{\text{э}i} k_i' \quad (1.10)$$

здесь:  $k_i'$  - единичный показатель качества;

$c_{\text{э}i}$  - весовые коэффициенты или «веса» единичных показателей,

$$\sum_{i=1}^m c_{\text{э}i} = 1, \quad c_{\text{э}i} > 0, \quad i = 1, m.$$

В состав экспертов были включены специалисты, близкие к рассматриваемому. Экспертиза осуществлялась индивидуально методом попарного сопоставления показателей. Форма листа экспертной оценки коэффициентов весомости параметров устройств регулирования производительности и результаты экспертной оценки приведены в приложении А.

Среднее арифметическое значение веса  $i$ -й характеристики по мнениям всех экспертов определяют по формуле

$$\bar{k}(i) = \frac{\sum_{j=1}^m k(j, i)}{n_{\text{э}}}, \quad (1.11)$$

где:  $k(j, i)$  - веса или ранги показателей качества;

$i$  – номер эксперта ( $i=1, 2, \dots, n_{\text{э}}$ );

$j$  – номер показателя ( $j=1, 2, \dots, m$ ).

Полагаем, что истинное значение исследуемой величины находится внутри диапазона оценок и что обобщенное коллективное мнение является вполне достоверным.

Степень согласованности экспертов оценивается статистическими и эвристическими показателями. Статистическими показателями являются дисперсия и коэффициент вариации.

По каждому оцениваемому фактору  $j$  дисперсия весов оценок экспертов

$$\sigma_i^2 = \frac{\sum_{j=1}^m [k(j, i) - \bar{k}(i)]^2}{m}, \quad (1.12)$$

и коэффициент вариации  $j$ -го показателя

$$v_j = \frac{\sigma_i}{k(i)}. \quad (1.13)$$

Результаты обработки мнений экспертов даны в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Результаты ранжирования показателей эффективности системы регулирования устройства производительности

Параметр	Мощность привода, кВт	Сечение отверстий, м <sup>2</sup>	Напряжение, В	Время открытия задвижки, с	Аварийное отключение	Высота, мм	Масса, кг	Стоимость задвижки, тг
	$P_{zi}$	$s_{mi}$	$u_{zi}$	$t_{zi}$	$k_{zzi}$	$p_{z.p.i}$	$m_{mi}$	$k_{ci}$
Ранг	1	2	3	4	5	6	7	8
Вес	0,11	0,18	0,05	0,20	0,26	0,05	0,05	0,12

Тогда целевая функция (1.10) запишется как

$$\begin{aligned}
 k_{zi} &= C_{e1}P_{zi} + C_{e2}s_{mi} + C_{e3}u_{zi} + C_{e4}t_{zi} + C_{e5}k_{zzi} + C_{e6}p_{z.p.i} + C_{e7}m_{mi} + C_{e8}k_{ci} = \\
 &= 0,11 * P_{zi} + 0,18 * s_{mi} + 0,05 * u_{zi} + 0,20 * t_{zi} + 0,26 * k_{zzi} + 0,05 * p_{z.p.i} + \\
 &+ 0,05 * m_{mi} + 0,12 * k_{ci}.
 \end{aligned} \quad (1.14)$$

Затем параметры каждого регулирующего устройства оцениваются экспертами по десятибалльной шкале, результаты которых приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Результаты оценки параметров регулирующих устройств по десятибалльной шкале

Характеристики	Вес	ЗРЭ-200	У8-ТЭА-16	УЗР-00
Мощность привода, кВт	0,11	8	7	6
Сечение отверстий, м <sup>2</sup>	0,18	10	10	8
Напряжение, В	0,05	4	4	4
Время открытия задвижки, с	0,20	10	7	10
Аварийное отключение	0,26	10	3	3
Высота, мм	0,05	7	9	8
Масса, кг	0,05	8	6	8
Стоимость задвижки, тг	0,12	10	6	5

Далее необходимо наши баллы умножить на вес данного параметра. Результаты определения, эффективного устройство регулирования производительности приведены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Расчет суммарных весов параметров для каждого устройство регулирования производительности

Характеристики	Вес	ЗРЭ-200	У8-ТЭА-16	УЗР-00
1	2	3	4	5
Мощность привода, кВт	0,1	$8*0,10=0,8$	$7*0,10=0,7$	$6*0,10=0,6$
Сечение отверстий, м <sup>2</sup>	0,19	$10*0,19=1,90$	$10*0,19=1,9$	$8*0,19=1,52$
Напряжение, В	0,04	$7*0,06=0,42$	$7*0,06=0,42$	$7*0,06=0,42$
Время открытия задвижки, с	0,19	$10*0,20=2$	$7*0,20=1,4$	$10*0,20=2$
Аварийное отключение	0,26	$10*0,26=2,6$	$3*0,26=0,78$	$3*0,26=0,78$
Высота, мм	0,05	$7*0,05=0,35$	$9*0,05=0,45$	$8*0,05=0,40$
Масса, кг	0,05	$8*0,05=0,4$	$7*0,05=0,35$	$8*0,05=0,40$
Стоимость задвижки, тг	0,12	$10*0,12=1,2$	$7*0,12=0,84$	$6*0,12=0,66$
1	2	3	4	5
Сумма	1	9,37	6,18	6,57

Результаты расчета суммарных весов параметров для каждого устройство регулирования производительности показывают, что задвижка маркой ЗРЭ-200 оказался самым эффективным.

## **2 Теоретическое исследование процесса регулирование нагрузки электропривода зернодробилки и обоснование режима его работы**

### **2.1 Выбор параметров устройство регулирование производительности и его конструкции**

На основе анализа литературных источников установлены основные технические требования для разработки системы регулирований нагрузки электропривода зернодробилки: общие, технологические и энергетические показатели.

Система регулирования нагрузки электропривода должна отвечать следующим общим требованиям:

– обеспечивать высокую производительность исполнительного механизма электропривода;

- обеспечивать нужные скорости, моменты при разгоне и торможении электропривода;
- высокую точность регулирование потока зернового материала поступающего на рабочий орган;
- обладать надежностью работы в агрессивной среде;
- обладать энергосберегаемостью;
- допускать возможность быстрого ремонта (например, замены зубчатой рейки);
- иметь небольшую стоимость.

В соответствии с результатами исследований системы регулирования нагрузки электропривода зернодробилки приведенной в разделе 1 при номинальном режиме работы, электродвигатель загружается в пределах от 17 до 21 А. Следовательно, в этих пределах также изменяется момент нагрузки электропривода, практический пропорционально сопротивлению на его валу, изменение происходит от 0,007 до 0,014 Нм. Эти номинальные значения тока и момента должны быть обеспечены при потоке зерновых материалов 0,15 - 0,31 м<sup>3</sup>/с проходящего через регулирующее устройство производительности.

Сечение отверстий устройство регулирующего производительности должны быть для зернодробилки с мощностью 1 кВт – 0,4 м<sup>2</sup>. Для этого сечение отверстий по методике указанной в п. 2.3 выбрано устройство регулирующее производительности следующими геометрическими размерами: длина - 550 мм, ширина – 425 мм и ширина – 200 мм.

Предлагаемая нами система регулирование нагрузки электропривода собирается из устройства регулирующего производительности, управляющих средств и программного обеспечение представляющих собой законченный агрегат для дробления зерновых материалов. Из набора таких устройств и программных средств можно собирать систему для регулирование требуемого номинального режима работы агрегата.

Система регулирования нагрузки состоит из: персонального компьютера - 1; устройства регулирования производительности - 2; зернодробилки - 3; микроконтроллера - 4; асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором - М1; однофазного асинхронного электродвигателя – М2; магнитного пускателя - КМ; кнопок - SB1, SB2; автомата - QF; амперметра - А1; вольтметра - V1; датчика тока - ДТ; сигнальной лампы – НЛ.

Предлагаемая система регулирование нагрузки приведена на рисунке 2.1. Здесь в качестве устройство регулирование производительности выбрана задвижка ЗРЭ-200. Логический контроллер выбран марки Овен 8-разрядный RISC-процессором 200 мГц с гарвардской архитектурой. Подробно вопросы выбор устройства регулирование рассмотрены в разделе 2.3.

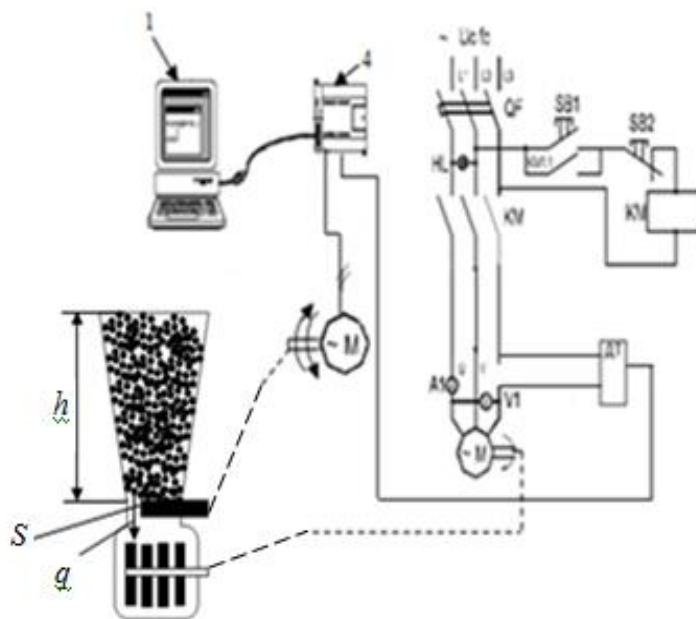


Рисунок 2.1 - Принципиальная электрическая схема стенда

Выбранное устройство имеет следующие преимущества:

- обеспечивается номинальное регулирование зернового потока, что исключает от перегрузки электродвигателя по току в режиме полной нагрузки агрегата;
- обеспечивается закрытие заслонки при аварийных отключениях напряжения основной сети, что исключает перегрузки электродвигателя рабочего органа под действием подающего зернового потока;
- достаточная номинальная пропускная способность устройство регулирования производительности позволяет с наибольшим экономическим эффектом использовать имеющиеся зерновые материалы для дробления.

## 2.2 Расчет и выбор мощности электродвигателя устройство регулирующего производительности

Для расчета и выбора мощности электродвигателя устройство регулирования производительности необходимо предварительно определить его установленную мощность. При определении установленной мощности электродвигателя для устройство регулирование возникает необходимость расчета статических и динамических нагрузок, а также моментов инерции, приведенных к валу электропривода.

Устройство регулирование производительности включает в себя редуктор Р, зубчатая рейка З, двигатель Д, зерновой груз Г, которые приведены в рисунке 2.2.

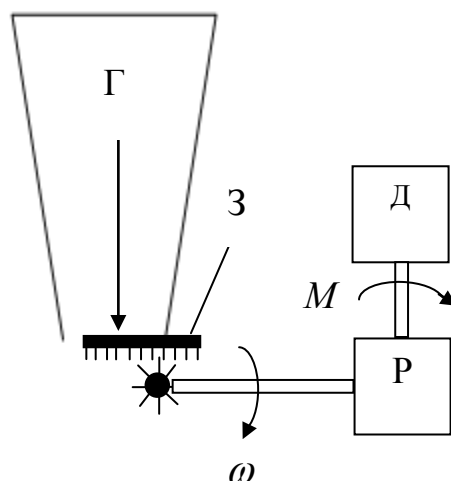


Рисунок 2.2 – Устройство регулирование производительности

Приведенный к валу двигателя привода устройство регулирование момент инерции зубчатой рейки при открывании или закрывании без нагрузки определяется как

$$J_{про} = \frac{m_n v^2}{\omega^2}, \text{ кг*м}^2 \quad (2.1)$$

Суммарно приведенный момент инерции привода при закрывании или открывании зубчатой рейки определяем следующим образом

$$J_{\Sigma 0} = J_{дв} * \delta + J_{про}, \text{ кг*м}^2 \quad (2.2)$$

Статический момент, приведенный к валу двигателя, при закрывании или открывании зубчатой рейки без нагрузки найдем как

$$M_{c0} = \frac{G_n v}{\omega \eta_p}, \text{ Нм} \quad (2.3)$$

Динамический момент, приведенный к валу двигателя, при закрывании или открывании зубчатой рейки будут

$$M_{дин.0} = J_{\Sigma 0} \frac{d\omega}{dt}, \text{ Нм} \quad (2.4)$$

с постоянным ускорением

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega}{t_n}, \text{ рад/с}^2.$$



Статический момент, приведенный к валу двигателя, при закрываний или открываний зубчатой рейки с зерновым грузом

$$M_{c\leftrightarrow} = \frac{(G_n + G_z)v}{\omega\eta_p}, \text{ Нм} \quad (2.5)$$

Приведенный к валу двигателя момент инерции зубчатой рейки с зерновым грузом

$$J_{np} = \frac{(m_n + m_z)v^2}{\omega^2}, \text{ кг*м}^2 \quad (2.6)$$

Динамический момент при равномерном нарастании скорости при закрывании или открывании зубчатой рейки с зерновым грузом за 1 с.

$$M_{дин} = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt}, \text{ Нм} \quad (2.7)$$

где:  $J_{\Sigma} = J_{\delta} * \delta + J_{np}$ , кг\*м<sup>2</sup> – суммарный момент инерции привода, приведенный к валу двигателя.

$$M = M_c + M_{дин}, \text{ Н*м} \quad (2.8)$$

Мощность двигателя привода устройство регулирование производительности при закрывании или открывании зубчатой рейки определяется моментом М и скоростью вала двигателя  $\omega$

$$P_z = M * \omega, \text{ Вт} \quad (2.9)$$

Подставляя в (2.1)...(2.9) данные устройства: масса груза  $m_r=15$  кг; масса пластины  $m_n=4$  кг (вес  $G_r=m_r*g=147$  Н;  $G_n=m_n*g=19,6$  Н); установившаяся угловая скорость двигателя  $\omega = \frac{2\pi}{60}n = 104$  рад/с; скорость открывания и закрывания зубчатой рейки  $v=1$  м/с; момент инерции с коэффициентом  $\delta$ , учитывающий момент инерции передачи,  $J_{\delta} \delta = 0,015$  кг\*м<sup>2</sup>; КПД редуктора  $\eta_p = 0,5$ , определяем  $J_{np} = 0,0003$  кг\*м<sup>2</sup>,  $J_{\Sigma 0} = 0,05$  кг\*м<sup>2</sup>,  $M_{c0} = 0,07$  Нм,  $M_{дин.0} = 5,2$  Нм,  $M_{c\leftrightarrow} = 3,5$  Нм,  $J_{np} = 0,0017$  кг\*м<sup>2</sup>,  $M_{дин} = 4,6$  Нм,  $J_{\Sigma} = 0,07$  кг\*м<sup>2</sup>,  $M = 8,1$  Н\*м,  $P_z = 240$  Вт.

Таким образом, по рассчитанной мощности  $P_z = 240$  Вт выбираем электродвигатель устройство регулирования производительности.

### 2.3 Выбор и обоснование датчиков

Необходимо стабилизировать частоту вращения рабочего органа вальца. Диапазон регулирования  $y_0 = 250 \pm 5$  об/мин.

Согласно заданию  $y_0 = 250$  об/мин (середина диапазона). Подбираем датчики с диапазоном 200...300 об/мин и классом точности 1,0, включенный по мостовой схеме.

В этом случае:  $y_0 = \frac{250 - 200}{300 - 200} \times 100\% = 50\%$  от диапазона датчика. Это допустимо. Погрешность датчика  $\delta\% = 200 \cdot 1 / 100 = 2$  об/мин, то есть меньше допустимого отклонения. Выбираем тахогенератор ТП-75-20-0,2. Его технические характеристики приведены в таблице 2.1.

В технологическом процессе измельчения зерна широко применяются датчики уровня, для контроля количества сыпучего вещества по его уровню (показатель объема); поплавковые датчики – линейное перемещение поплавка обеспечивает слежение за уровнем жидкости. Для перемещения уровня сыпучих веществ предусматривают вибрации поплавка. Основными элементами САУ являются чувствительные элементы: датчики; преобразователи; усилители; исполнительные механизмы; объекты регулирования; команд аппараты и элементы защиты.

Для требуемого изменения зазора между вальцами применяется многооборотный исполнительный механизм, разработанный на базе серийного исполнительного механизма ПР-1М. Вручную зазор регулируется штурвалом. Крайние значения зазора ограничены пределами хода исполнительного механизма. Для этого в исполнительном механизме установлены микропереключатели, производящие отключение электродвигателя в крайних положениях.

Таблица 2.1 - Технические характеристики тахогенератора ТП -75-20-0,2

Крутизна выходного напряжение	20+4 мВоб/мин
Номинальная частота вращения	3000об/мин
Максимальная частота вращения	6000об/мин
Минимальная частота вращения	0,1об/мин
Нагрузочное сопротивление, не менее	10кОм
Погрешность в диапазоне частот вращения	30-4000 об/мин не более 0,2%
Коэффициент пульсации при максимальной частоте вращения	1,0%
Масса	не более – 0,3 кг
Щетки	марки СГ 1.

## 2.4 Принципы регулирования производительности универсального малогабаритного кормоприготовительного агрегата

Необходимо описать принципы регулирования производительности универсального малогабаритного кормоприготовительного агрегата.

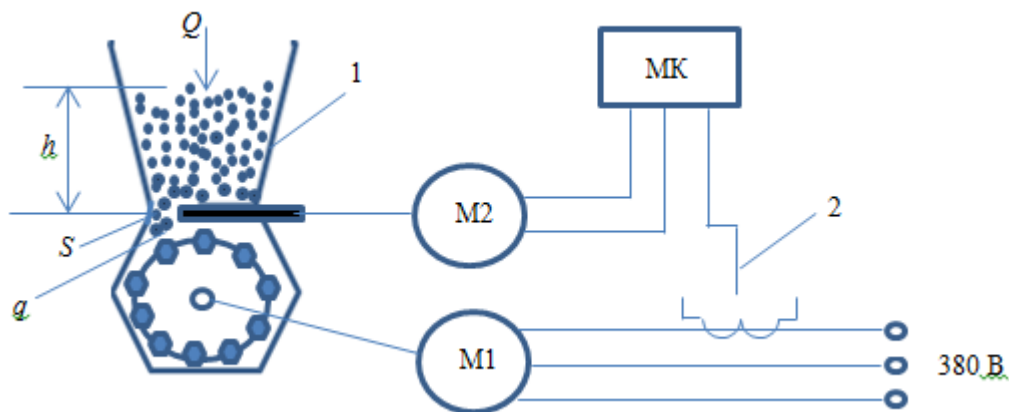
Этапы:

1. Построение и описание функциональной схемы системы регулирования производительности кормоприготовительного агрегата.
2. Определение элементов, входящих в состав устройства управления.
3. Выбор элементов устройства управления.

Прежде чем приступить к разработке структурной схемы, будет уместно рассмотреть упрощенную функциональную схему технологического процесса дробления, которая приведена на рисунке 2.3.

Основной управляемой параметр – момент сопротивления на валу двигателя кормоприготовителя, управляющий параметр – устройство регулирования зернового потока поступающего на рабочий орган агрегата.

Контур управления электропривода, включающее в себя регулятор (задвижка) зернового потока поступающего на рабочий орган, через микропроцессорную систему, имеющей обратные связи по току, воздействует на моменты нагрузки электродвигателя. На выходе датчика тока микропроцессором фиксируется сигнал, увеличивающийся или уменьшающийся относительно номинального значения электродвигателя.



1 – приемная камера зернового материала; 2 – датчик тока; М1 – электродвигатель рабочего органа агрегата; М2 – электродвигатель задвижки; МК – логический микроконтроллер

Рисунок 2.3 – Функциональная схема системы регулирования момента электропривода кормоприготовителя

Если регулируемая величина не соответствует установленного значения для электродвигателя агрегата, то на микропроцессор поступает сигнал с задвижки, выполняющая функции исполнительного органа, при этом до тех

пор будет перемещаться, уменьшая (увеличивая) величину зернового потока, пока сигнал не достигнет требуемого значения тока.

Для управления зерновым потоком  $Q$  (в  $\text{м}^3/\text{с}$ ) мы можем изменять величину переходных отверстий  $S$  ( $\text{мм}^2$ ) задвижки. Таким образом, величина  $S$  – это регулируемая величина, а поток  $Q$  – сигнал управления. Для обратной связи используем датчик, измеряющий величину тока  $I$  в цепи статора приводного двигателя при различных режимах работы.

Построим математическую модель объекта, то есть кормоприготовителя. Поток на выходе задвижки  $Q$  (в  $\text{м}^3/\text{с}$ ) показывает, сколько зерновых материалов вытекает из бункера за 1 с – это нагрузка.

Изменение площади сечения задвижки зависит от разности потоков  $Q-q$  и высоты уровня зернового материала  $h$ . Если разность потоков постоянно в течение интервала времени  $\Delta t$ , то  $\Delta S(t) = \frac{Q(t) - q(t)}{h} \Delta t$ . В общем случае нужно использовать интервал:

$$\Delta S(t) = \frac{1}{h} \int_0^t (Q(t) - q(t)) dt. \quad (2.10)$$

Пусть в момент времени  $t=0$  уровень зернового материала равен заданному значению, а входной и выходной потоки равны ( $Q(0)=q(0)=q_0$ ), так что уровень не меняется. Этот режим мы примем за номинальный (рабочую точку). Для того, чтобы получить уравнение в отклонениях, представим потоки в виде

$$Q(t) = q_0 + \Delta Q(t), \quad q(t) = q_0 + \Delta q(t), \quad (2.11)$$

где:  $\Delta Q(t)$  и  $\Delta q(t)$  – малые отклонения потоков от номинального режима. Тогда, опуская знак приращения  $\Delta$ , можно записать модель объекта управления в форме

$$S(t) = \frac{1}{h} \int_0^t (Q(t) - q(t)) dt. \quad (2.12)$$

Здесь  $S(t)$ ,  $Q(t)$  и  $q(t)$  обозначают отклонения этих величин от номинальных значений. Заметим, что эта модель может быть записана как дифференциальное уравнение (если найти производные обеих частей равенства)

$$\frac{dS(t)}{dt} = \frac{1}{h} [Q(t) - q(t)]. \quad (2.13)$$

В качестве обратной связи мы будем использовать сигнал с датчика тока. Ошибки управления вычисляется, как разница между заданными и измеренными токами электродвигателя рабочего органа, показанного в п. 2.2.

На основе лабораторных результатов показанной во втором разделе рассчитываются основные показатели работы электропривода рабочего органа агрегата, приведенной в таблице 2.2. Как показывают результаты исследования, нарушение баланса потока зернового материала поступающего на рабочий орган агрегата приведет к изменению (несабильности) номинальной величины тока электродвигателя рабочего органа. Это свою очередь вызывает включение системы регулирования электропривода задвижки, тогда всякое отклонение режима от заданного приведет к резкому изменению величины площади поперечных сечений,  $S(m)^2$  регулирующей задвижки. Вместе с тем, как показывают результаты проведенного исследования, из-за транспортного запаздывания, при поступлении зернового потока на рабочий орган через задвижку, приведет к изменению (нестабильности) номинальной величины тока  $I(A)$  электродвигателя агрегата. Этот недостаток можно уменьшить или даже вовсе устранить применяя пропорционально-интегрально-дифференциальный закон регулирования (ПИД закон).

ПИД предполагает установление и поддержание заданного значения тока нагрузки электродвигателя, при достижении близкой к номинальной за счет рациональной подачи поступающего зернового потока на рабочий орган. Результаты проведенных лабораторных исследований системы управления величиной тока нагрузки приведены в таблице 1.

Величина потока зернового материала поступающего на рабочий орган агрегата, выраженная в процентах от его максимальной величины рассчитывается по формуле

$$П = \frac{100}{k_p} \left( \Delta I + \frac{1}{k_i} \int_0^1 \Delta I dt - k_d \frac{dI}{dt} \right) \quad (2.14)$$

где:  $k_p$ ,  $k_i$ ,  $k_d$  – пропорциональный, интегральный и дифференциальный коэффициенты регулирования соответственно (ПИД коэффициенты).

Таблица 2.2 – Результаты лабораторных исследований системы регулирования нагрузки электропривода

Показатель	Результаты исследований				
	$S, m^2$	0,001	0,003	0,006	0,012
$I, A$	10	15	21	27	30
$q, m^3/c$	0,07	0,15	0,31	0,46	0,62

Первое слагаемое в выражении (пропорциональная составляющая) прямо пропорционально «невязке»  $\Delta I = I_{уст.} - I$  - разности токовой уставки  $I_{уст.}$

и измеренного значения тока  $I$ . Его смысл в том, что при «невязке»  $\Delta I = K_p (A)$  регулятор, закрывая или открывая задвижку, начнет снижать или увеличивать ток электродвигателя рабочего органа.

Второе слагаемое в установившемся режиме регулирования равно величине потока зернового материала, необходимой для поступления зернового материала на рабочий орган при  $\Delta I = 0$ .

Третья составляющая пропорциональна величине потока зернового материала поступающего на рабочий орган агрегата с обратным знаком и должна препятствовать резким изменениям тока рабочего органа (дифференциальная составляющая).

Для того, чтобы достичь высокого качества регулирования величину потока зернового материала необходимо правильно настроить, при этом регулятору – задать три коэффициента. Настройка регулятора для поддержания постоянства заданной величины зернового потока осуществляется по методике [12], указанной в таблице 2.3.

Таблица 2.3. Методика подбора ПИД коэффициентов

Тип регулирования	Пропорциональный коэффициент $k_p$	Интегральный коэффициент $k_i$	Дифференциальный коэффициент $k_d$
Только P	$1,4 * \Delta I$	выключено	выключено
P+I	$1,6 * \Delta I$	$2,4 * \tau$	выключено
P+I+D	$1,2 * \Delta I$	$1,5 * \tau$	$0,2 * \tau$

Подставляя в (2.14) результаты лабораторного исследования системы регулирования нагрузки  $k_p=1,2, k_i=1,5, k_d=0,2, \Delta I=4$  А,  $\tau=0,02$  с определяем наиболее оптимальную величину подачи зернового потока на рабочий орган агрегата в пределах приблизительно от  $0,15 \text{ м}^3/\text{с}$  до  $0,31 \text{ м}^3/\text{с}$ .

## 2.5 Система регулирования нагрузки с линейным законом управления

Система регулирования нагрузки электропривода агрегата строится по принципу замкнутых систем автоматического управления. Конструктивная простота в сочетании с достаточно высокой точностью объясняют тот факт, что эти системы нашли широкое практическое применение. В основу принципа действия систем, использующих в качестве исполнительных органов момент инерции массы, положен закон сохранения момента нагрузки.

Основными режимами работы системы регулирования нагрузки электропривода являются:

- режим регулирования момента нагрузки электропривода рабочего органа;

- режим приведения статистического момента к валу электродвигателя, при закрывании или открывании зубчатую рейку с нагрузкой;
- режим программных управлений логических элементов;
- режим регулирования поступающего зернового потока на рабочий орган агрегата.

Работа устройства регулирующего производительности заключается в создании управляющего момента, действующего на рабочий орган агрегата путем изменения момента нагрузки. Момент нагрузки поступающего на рабочий орган, зависит от режима работы устройства регулирования производительности.

Основными параметрами, которыми характеризуется устройство регулирования производительности, являются: масса груза  $m_r$ ; момент инерции передачи  $J_{про}$ , кг\*м, угловая скорость  $\omega_o$ , рад/с; вращающий момент  $M$ .

Основными параметрами, которыми характеризуется электропривод рабочего органа, являются: масса пластины  $m_n$ ; момент инерции  $J_{ог}$ , кг\*м.

Допустим, что зерновой поток, поступающий на рабочий орган стремится отклонить момента нагрузки от номинального режима работы.

Отклонение момента нагрузки измеряет датчик тока и выдает электрический сигнал в логический контроллер, который выработает команду на изменение площади проходного сечения таким образом, чтобы ликвидировать возникшее отклонение.

Устройство регулирования нагрузки как стабилизирующий объект может быть использован для поддержания номинального режима работы. В этом режиме регулирования контроль за количеством подаваемого зернового материала в рабочий орган агрегата осуществляется по сигналам датчика тока.

Изменение электромагнитного момента приводного двигателя агрегата напрямую определить затруднительно. Так как доступными для измерения величинами являются токи обмоток статора, то момент сопротивления дробилки определим из условий соответствия процессов изменения амплитуды реального, снятого при работе зернодробилки тока статора и полученного в результате моделирования привода с искомым моментом сопротивления.

Изменение площади сечения задвижки может быть достигнуто вследствие поступательного движения шибера за счет приложения к штоку постоянного или переменного во времени момента  $M_A(t)$ . Характер момента определяется типом привода.

Во время перемещение шибера задвижки создается инерционный момент элементов привода, действующий на зубчатую рейку, вследствие чего шестерни редуктора начинают вращаться

$$T_m = I_m * \omega_m, \quad (2.1)$$

где:  $T_m$  - управляющий момент, создаваемый главным приводом, Н\*м;  
 $I_m$  - момент инерции главного привода относительно оси вращения, кг\*м<sup>2</sup>;  
 $\omega_m$  - угловое ускорения главного привода, с<sup>-2</sup>.

Угловое ускорение, которое получает подвижная зубчатая рейка, описывает следующим выражением

$$\omega_n = \frac{T_m}{I_n}. \quad (2.2)$$

где  $\omega_n$  – угловое ускорение вала зубчатой рейки, с<sup>-2</sup>;  $I_n$  - момент инерции зубчатой рейки относительно ее оси вращения, кг\*м<sup>2</sup>.

Изменяя площадь проходного сечения задвижки, можно управлять зерновым потоком поступающего на рабочий орган агрегата, структурная схема приведена на рисунке 2.4.

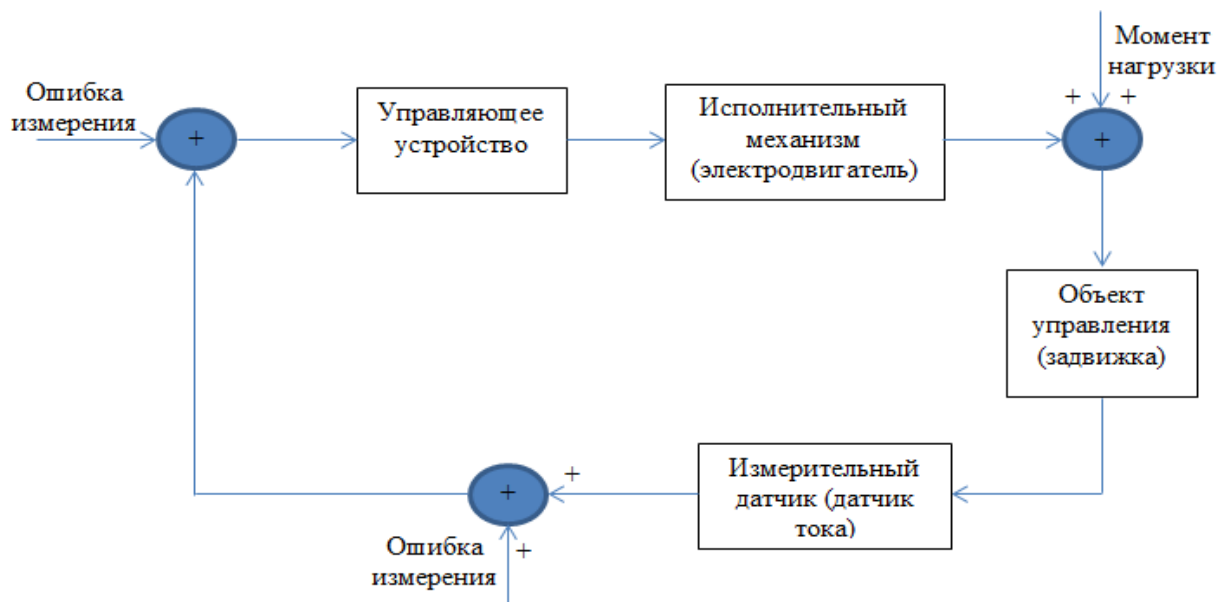


Рисунок 2.4 – Структурная схема системы регулирования нагрузки электропривода агрегата

Управление системой регулирования происходит по замкнутому контуру управления, качества управляющего устройство выступает логический контроллер, исполнительным органом является электропривод, объектом управления выступает задвижка, а устройством обратной связи является датчик тока.

Моделирование осуществляется в среде инженерных расчетов MATLAB, а в частности в приложении Simulink. Модель всей системы представлена на рисунке 2.1. Как видно из данной модели, в ней присутствует часть, математически описывающая асинхронный двигатель, а также часть,



которая описывает работу системы управления. Как раз программа, представленная ниже, описывает работу системы управления.

Перед моделированием в командной строке MATLAB необходимо прописать команду «ad=data», что присвоит модели данные исследуемого двигателя и рассчитает номинальный режим работы с ориентацией по полю соответственно.

Отметим, что параметры структурной схемы (рисунок 2.5) выбраны согласно [13]. Переходные процессы динамики системы регулирования нагрузки с обратной связью по току (рисунок 2.6) получены на основе программы в системе MATLAB. Программа на языке

Matlab для получения переходного процесса в системе стабилизации момента нагрузки показана на рисунке 2.7.

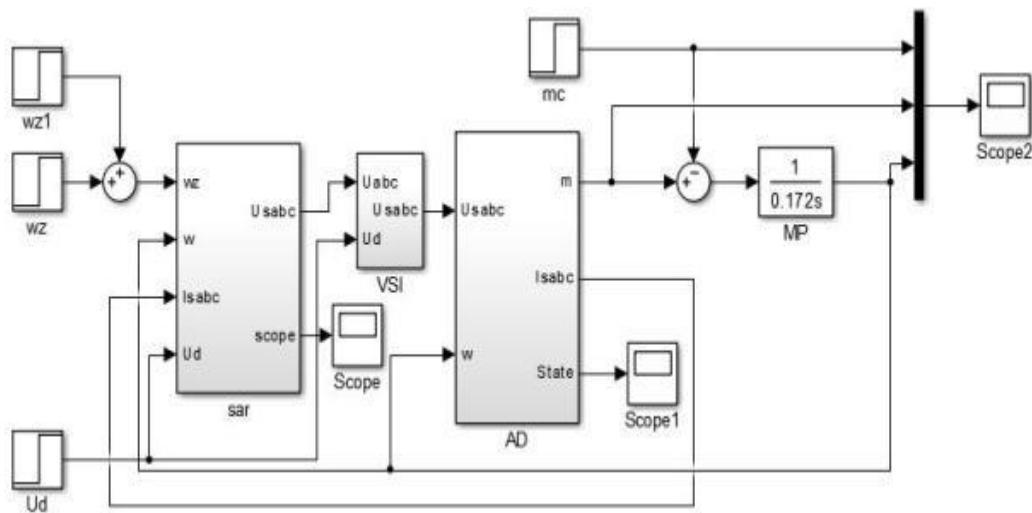


Рисунок 2.5. Схема модели в Simulink

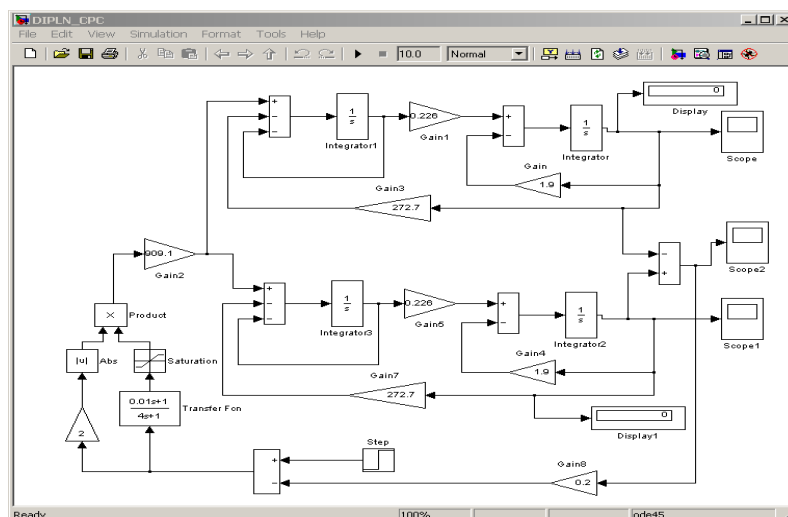


Рисунок 2.6 Структурная схема регулирования нагрузки асинхронного электропривод в системе MATLAB

```
Editor - C:\Program Files\MLAB71\work\PROG_TPN.m
File Edit Text Cell Tools Debug Desktop Window Help
function mmtpn
- x0=[0;0;0;0];
- interval=[0 10];
- [T,X]=ode113(@system,interval,x0);
- plot(T,X(:,1)*2,'b-',T,X(:,2),'r-');
- %hold off
- grid
function dx=system(t,x)
- dx=zeros(4,1);
- dx(1)=0.377*x(2);
- dx(2)=145*x(4)-18.2*x(3)-1.9*x(2);
- dx(3)=230.3*x(4)-30.3*x(3);
- dx(4)=30-0.3*x(2)-3*x(1);
end
end
```

Рисунок 2.7 – Программа на языке Matlab для получения переходного процесса в системе стабилизации момента нагрузки

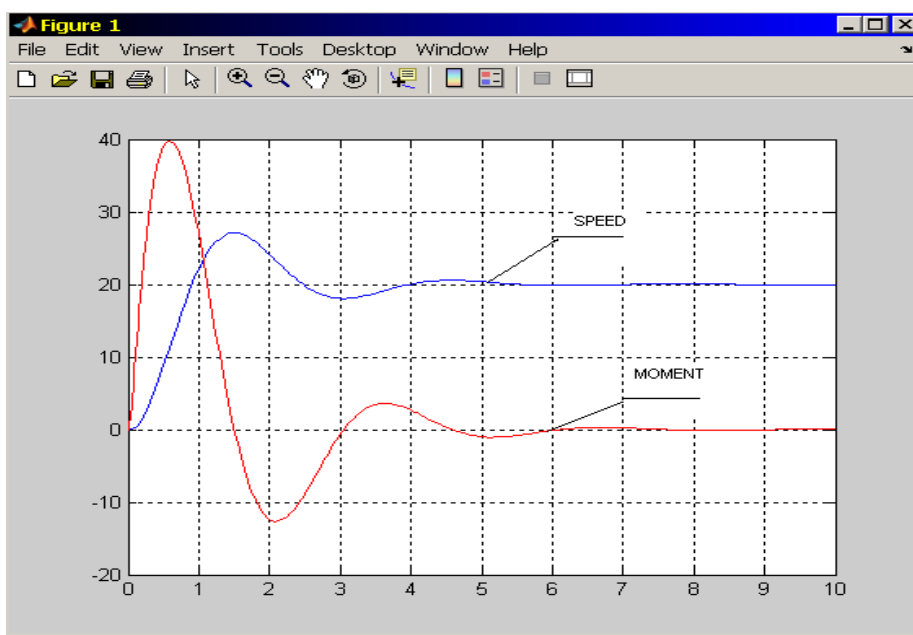


Рисунок 2.8 - Переходные процессы динамики системы регулирования нагрузки с обратной связью по току

Из рисунка 2.8 видно, что процесс динамики системы регулирования нагрузки электропривода агрегата устойчив.

### 3 Исследование показателей качества переходных процессов электропривода кормоприготовительного агрегата в различных режимах работы

#### 3.1 Исследование нагрузочных диаграмм электропривода кормоприготовительного агрегата в различных системах управления экспериментальным путем.

Управление кормоприготовителей можно предоставить как сложная динамическая система. Определение динамических и статических характеристик в виде дифференциальных уравнений связано необходимостью выполнения большого объема вычислительных и исследовательских работ, как правило, не позволяют получить точных математических моделей без корректировки параметров типовых регуляторов в процессах работы автоматической системы регулирования.

В настоящее время типовые регуляторы при проведении пусконаладочных работ настройки может выполняться вручную или автоматический, без участия человека.

Важно подчеркнуть, что подстройка контроллера может не дать требуемого качества регулирования по причинам, не зависящим от качества заложенных в него алгоритмов. Например, объект управления может быть плохо спроектирован (зависимые контуры регулирования, большая задержка, высокий порядок объекта); объект может быть нелинейным; датчики могут быть расположены не в том месте, где нужно и иметь; плохой контакт с объектом, уровень помех в канале измерения может быть недопустимо большим; разрешающая способность датчика может иметь слишком большую инерционность или гистерезис; могут быть ошибки в монтаже системы, плохое заземление, обрывы проводников и т.д. Поэтому прежде чем начинать настройку регуляторов, необходимо убедиться в отсутствии перечисленных проблем.

При этом настройку регулятора выполняют по реакции системы на ступенчатое воздействие, осуществляемое управляющим органом, по переходной характеристике системы. Классическая схема управления объектом с единичной отрицательной обратной связью показана на рисунке 1.

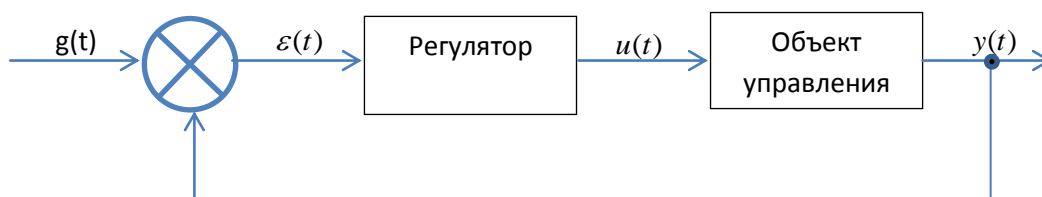


Рисунок 3.1- Управление с отрицательной обратной связью

Назначение регулятора системы заключается в оптимизации переходных характеристик объекта управления с помощью задающего сигнала  $u(t)$  так, чтобы реальный выходной сигнал  $y(t)$  как можно меньше отличался от желаемого выходного сигнала  $g(t)$ . Регулятор вырабатывает управление, используя ошибку регулирования  $e(t)=g(t)-y(t)$ .

Рассмотрим основные показатели качества процесса управления применительно к типовой одноконтурной автоматической системе регулирования.

На рисунке 2 показаны графики переходных процессов, вызванных ступенчатым изменением задания (рисунок 3.2,а) и ступенчатым возмущающим воздействием (рисунок 3.2, б).

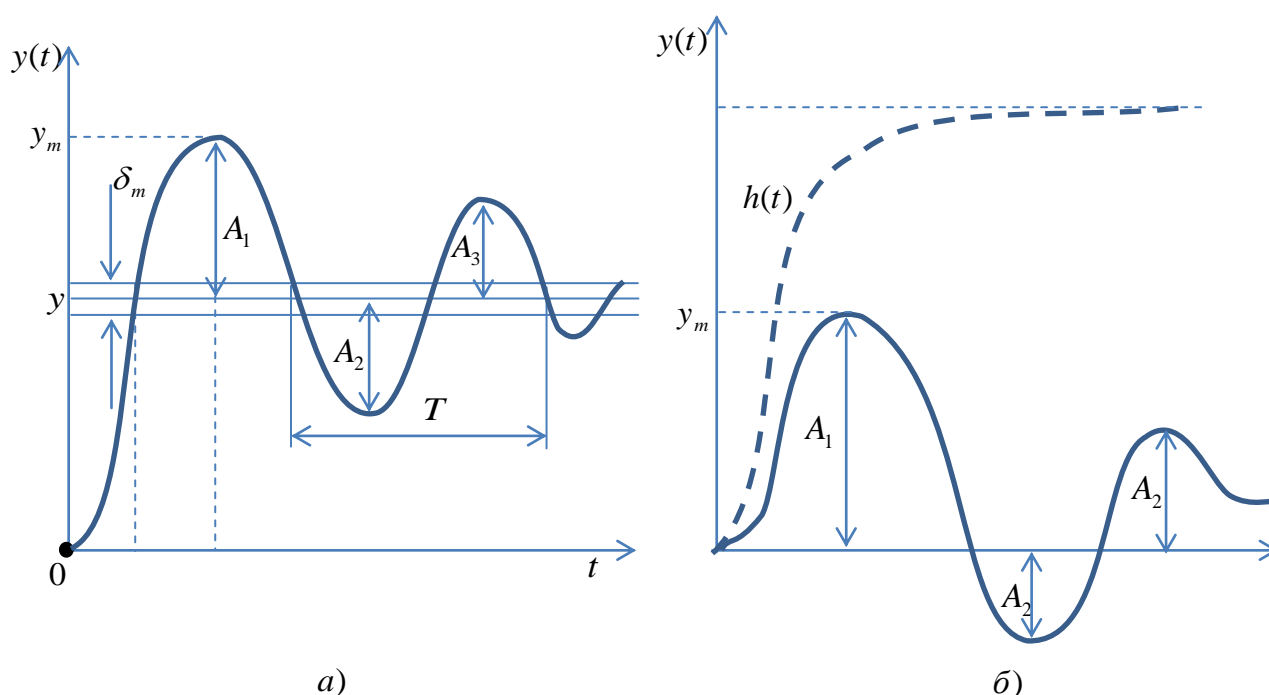


Рисунок 3.2. Переходные процессы по каналам задающего (а) и возмущающего (б) воздействия

К прямым показателям качества относятся следующие основные показатели: величина перерегулирование  $\delta$ , динамический коэффициент регулирования  $R_g$ , время регулирования  $t_p$ , степень затухания  $\psi$ .

Перерегулирование  $\delta$  определяется отношением первого максимального отклонения управляемой переменной  $y(t)$  от её установившегося значения к этому установившемуся значению для переходных процессов, вызванных изменением задающего воздействия.

$$\delta = \frac{y_m - y(\infty)}{y(\infty)} 100\% = \frac{A_1}{y(\infty)} 100\%. \quad (3.1)$$

Качество считается удовлетворительным, если перерегулирование не превышает 30-40%.

Для переходных процессов, вызванных возмущающим воздействием на входе объекта (рисунок 3.2, б), перерегулирование можно определить как отношение второго (отрицательного) максимального отклонения  $A_2$  к первому максимальному отклонению  $A_1$

$$\delta = \frac{A_2}{y_m - y(\infty)} 100\% = \frac{A_2}{A_1} 100\%. \quad (3.2)$$

Отметим, что первое максимальное отклонение  $y_m$ , возникающее от возмущения на входе объекта, является показателем качества. При формировании требований к системе указывают допустимое значение максимального отклонения.

Динамический коэффициент регулирования  $R_g$  равен отношению первого максимального отклонения  $y_m$  к отклонению выходной переменной  $y(t)$  объекта, не охваченного обратной связью с регулятором (нерегулируемого объекта), вызванному тем же возмущением

$$R_g = \frac{y_m}{y(t)_0} 100\%, \quad (3.3)$$

где:  $R_g$  – коэффициент, показывающий, насколько эффективно компенсирующее действие регулятора на объект.

Время регулирования  $t_n$  определяется интервалом времени от момента приложения ступенчатого воздействия до момента, после которого отклонения управляемой величины  $y(t)$  от её нового установившегося значения  $y(\infty)$  становятся меньше некоторого заданного числа  $\delta_n$ , т. е. до момента, после которого выполняется условие

$$|y(t) - y(\infty)| \leq \delta_n.$$

На практике величину  $\delta_n$  принимают обычно равной 5% от установившегося значения  $y(\infty)$ .

Дополнительными временными показателями качества являются время нарастания  $t_n$ , время достижения первого максимума  $t_m$  и период затухания колебаний  $T$ , которое приведено в рисунке 1, а. Эти показатели вместе с  $t_n$  характеризуют быстродействие системы регулирования.

К прямым показателям качества относится степень затухания

$$\psi = \frac{A_1 - A_3}{A_1} = 1 - \frac{A_3}{A_1}, \quad (3.4)$$

где:  $A_1$  и  $A_3$  – соседние максимальные отклонения (амплитуды) одного знака.

Интенсивность затухания колебаний считается удовлетворительной, если  $\psi = 0,75 - 0,95$ .

Колебания системы можно оценивать наряду с показателями  $\delta$  и  $\psi$  количеством переходов  $N$  величины  $y(t)$  через установившееся значение  $y(\infty)$  на интервале  $t_n$ .

### **3.2 Снятие токовой нагрузочной диаграммы электропривода агрегата разомкнутой системы регулирования производительности**

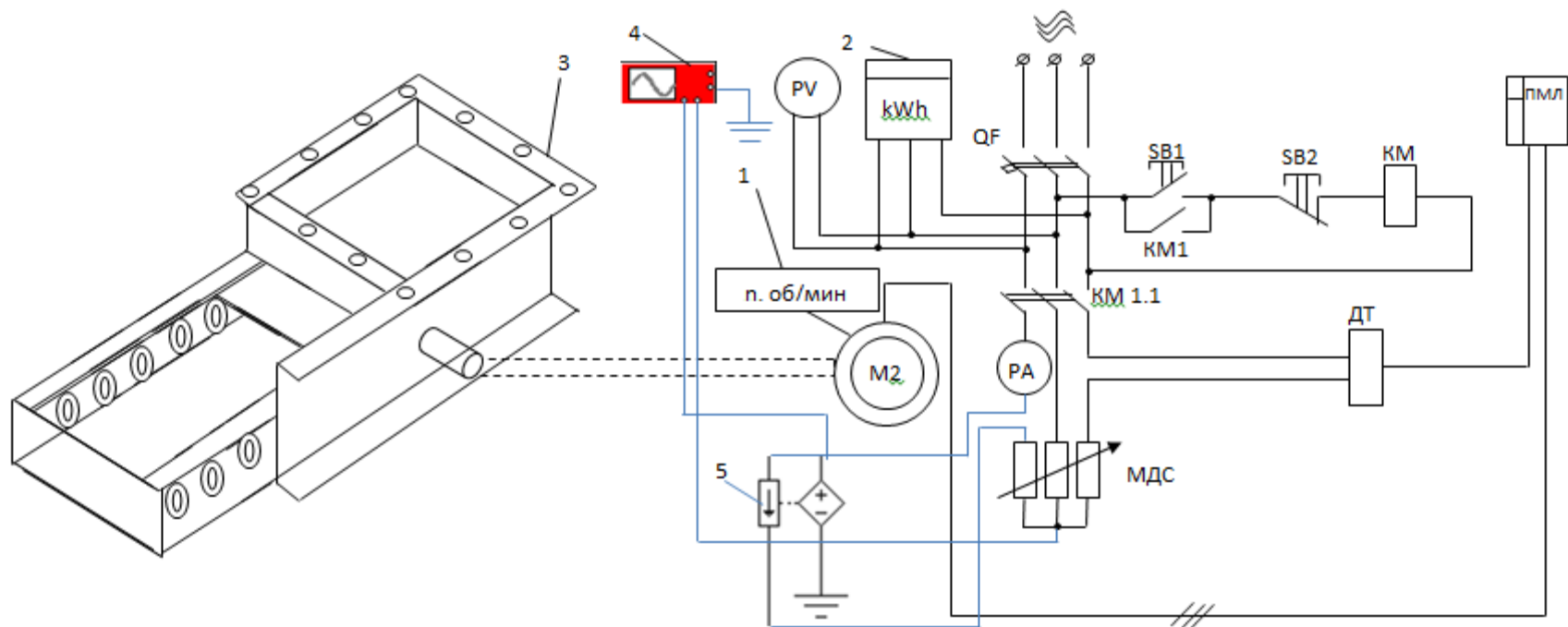
Схема для исследования переходных процессов электропривода кормоприготовительного агрегата ДУ-5,5 представлена на рисунке 3.3, на основе которого будут проводиться научные исследования. Агрегат предназначен для измельчения всех видов стебельных и зерновых кормов, кукурузных початков, грубых кормов в муку, а также для приготовления комбикормов и кормосмесей, состоящих из грубых кормов и силоса или снега.

Для исследования электропривода агрегата используются следующие приборы и средства: трехфазный счетчик активной электрической энергии; тахометр для измерения частоты вращения электродвигателя; осциллограф; электронные весы; вольтметр переменного тока; амперметр переменного тока. Перед проведением лабораторных исследований необходимо привести измерительные приборы и средства управления агрегата в исходное состояние.

Общий вид лабораторного стенда приведен на рисунке 3.4.

Назначения системы автоматизации лабораторного стенда, в соответствии с заложенной программой при изменениях тока, значения тока через датчик тока (ДТ) передается контроллеру ПЛК, который сравнивая его с заданным значением тока, передает соответствующий управляющий сигнал пусковому устройству КМ2 и КМ3 двигателя М2. В результате последняя открывается или закрывается. В программе были приняты  $I_{раб1}=2,5A$ ,  $I_{ном}=2A$ ,  $I_{раб2}=1,5A$ . В соответствии с поставленной задачей были разработаны алгоритм и блок-схема системы автоматизации, которые приведены в рисунке 3.5.

Нагрузка электропривода характеризуется величиной потока зернового материала, подаваемого в рабочий орган агрегата, величину которого меняли движением задвижки вручную.



1 – тахометр для измерения частоты вращения электродвигателя; 2 – счетчик активной электрической энергии; 3- задвижка; 4 - осциллограф; 5 – добавочное сопротивление; QF – автоматический выключатель; PV – вольтметр переменного тока; PA – амперметр переменного тока; SB1 –кнопка пуск ; SB2 – кнопка стоп; KM – катушка пускателя ПМЕ; KM 1.1 блокирующий контакт катушки; ПМЛ-100 – логический контроллер; ДТ – датчик тока; МДС – модуль добавочных сопротивлений.

Рисунок 3.3 – Принципиальная схема испытательного стенда для лабораторных исследований ДУ-5,5



Рисунок 3.4 – Общий вид лабораторного стенда для исследования системы регулирования нагрузки



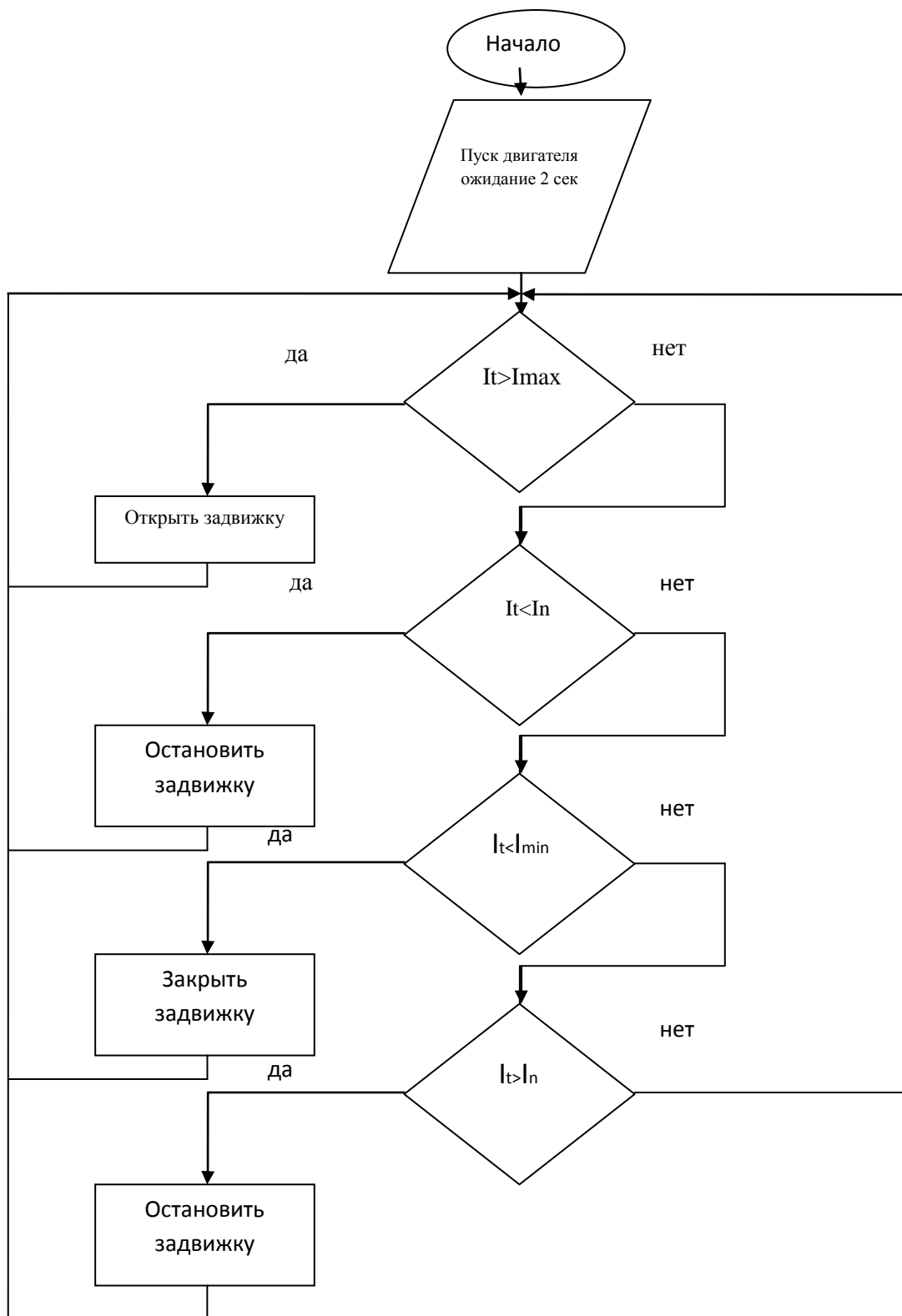


Рисунок 3.5 - Блок-схема системы регулирования нагрузки электропривода

Порядок проведения лабораторной исследований:

- 1) проверить схему соединения измерительных приборов и средств управления агрегата, задвижку необходимо привести в положение «закрето».

Заполнить бункер зерновым материалом до верхнего уровня;

2) подготовить протоколы наблюдений и расчетов. Включить автоматический выключатель и кнопку «Пуск» магнитного пускателя, соответственно запустится двигатель рабочего органа. Необходимо проверить направление вращения ротора электродвигателя агрегата. Если направления вращения не соответствует заявленной технической характеристики агрегата, поменять направления вращения;

3) в процессе проведения опыта необходимо снять несколько точек холостого хода агрегата без нагрузки. Данные опыта занести в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 Результаты исследование электропривода агрегата разомкнутой системы регулирования без нагрузки

Обозначения величин	Номера исследования							
	1	2	3	4	5	6	7	8
$n$ , об/мин	1460	1462	1452	1457	1473	1541	1578	1607
$U_{\phi}$ , В	106	144	156	157	191	211	218	218
$I_C$ , А	1,18	1,06	1,06	1,12	0,43	0,46	0,51	0,63
$P_C$ , Вт	261,08	269,45	282,23	290,89	304,10	305,12	308,11	308,52
$\omega$ , 1/с	152,81	153,02	151,98	152,98	152,49	154,17	161,29	165,16
$S$ , В·А	0,066	0,067	0,059	0,063	0,075	0,125	0,125	0,152
$\cos(\varphi)$	0,172	0,174	0,177	0,178	0,181	0,182	0,183	0,185
$\Delta P_{\text{ЭЛСТ}}$ , Вт	117,73	123,02	131,18	136,76	145,35	148,27	149,20	150,10
$\Delta P_{\text{МЕХ.АД}}$ , Вт	11,00	11,00	11,00	11,00	11,00	11,00	11,00	11,00
$P_B$ , Вт	40,54	81,64	144,49	211,30	222,76	239,02	240,10	241,12
$M_B$ , Н·м	0,35	0,64	1,08	1,55	1,63	1,74	1,81	1,87
$\eta$	56,53	48,49	47,93	47,93	47,94	48,80	50,00	51,00

1) Снять осциллограмму переходного процесса изменение тока во времени без нагрузки, которая приведена в рисунке 3.6.

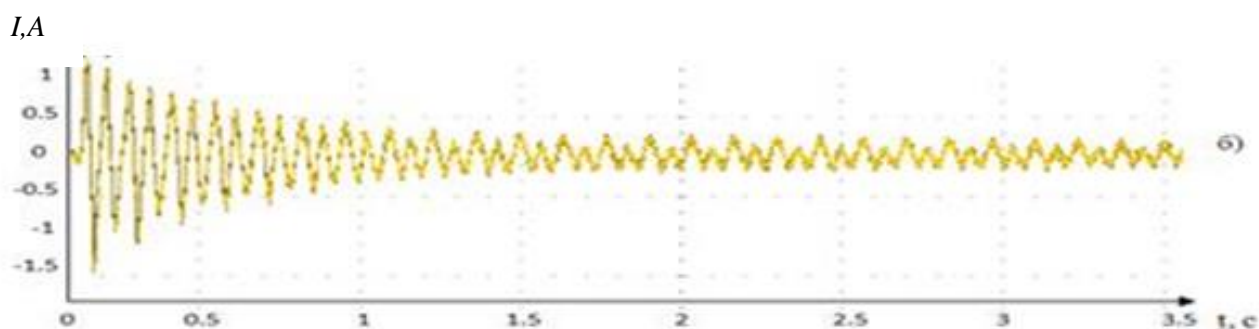


Рисунок 3.6. Осциллограмма переходного процесса изменение тока во времени без нагрузки

5) Нанести возмущающее воздействия передвижением задвижка в положении, соответствующее увеличению зернового потока поступающего на рабочий орган агрегата. При изменении потока зернового материала

необходимо контролировать ток статора. Он не должен превышать номинального тока.

б) Увеличивая момента нагрузки электропривода до номинального значения тока статора, снять несколько точек, фиксируя необходимые величины в таблицу 3.2.

Таблица 3.2. Результаты исследование электропривода агрегата разомкнутой системы регулирования с нагрузкой

Обозначения величин	Номера исследования							
	1	2	3	4	5	6	7	8
$n$ , об/мин	1496	1491	1485	1475	1446	1440	1300	1289
$U_{\phi}$ , В	188	178	176	170	168	160	150	132
$I_C$ , А	0,76	0,78	0,80	0,87	0,90	0,98	1,0	1,3
$P_C$ , Вт	162,01	271,40	350,12	410,09	436,90	643,20	760,10	856,50
$\omega$ , 1/с	195	181	156	153	150	148	146	142
$\Delta P_{\text{ЭЛСТ}}$ , Вт	133,70	135,12	138,23	142,90	142,93	145,12	148,20	152,80
$\Delta P_{\text{МЕХАД}}$ , Вт	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75
$P_B$ , Вт	12,56	116,18	278,80	479,10	508,12	589,12	600,10	688,20
$M_B$ , Н·м	0,15	0,81	1,12	1,56	1,84	3,12	3,56	4,75
$\eta$	7,70	12,13	34,12	42,23	74,40	76,78	78,23	80,00

7) Снять осциллограмму переходного процесса изменение тока во времени с нагрузкой.

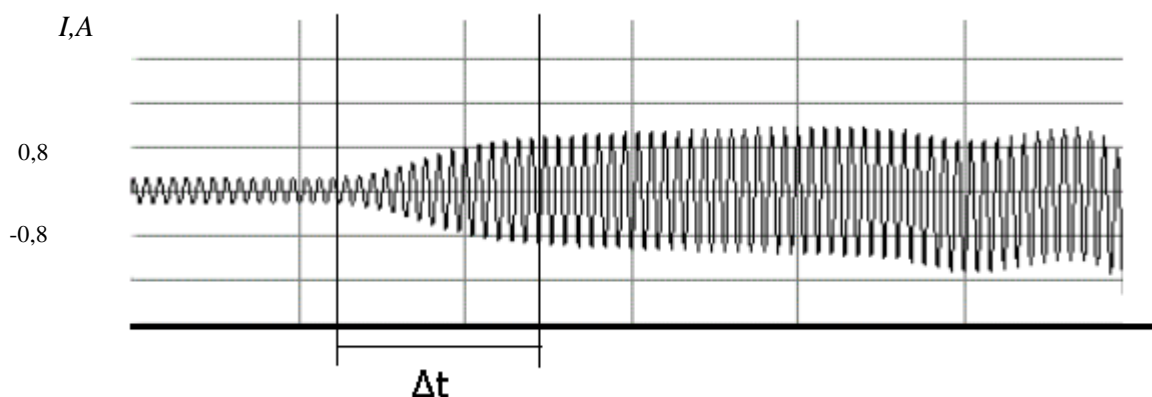


Рисунок 3.6 - Осциллограмма переходного процесса изменение тока во времени с нагрузкой

Нагрузка электропривода характеризуется величиной потока зернового материала, подаваемого в рабочий орган агрегата, величину которого меняли движением задвижки вручную.

В бункер был засыпан 30 кг сухого зерна и через каждые 3 с открывали задвижку на 1 см. Осциллограммы для каждого положения задвижки приведены в рисунках 3.7,

Рисунок 3.7 - Положение 1 (задвижка открыта на 1 см)

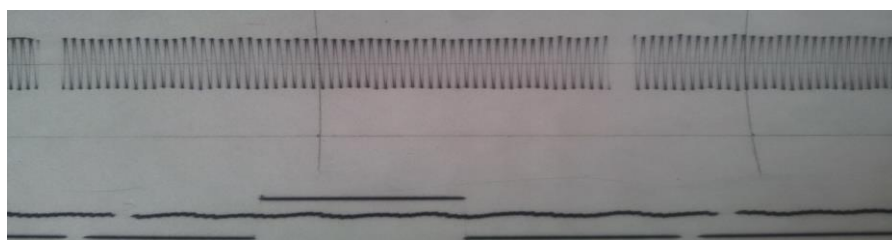


Рисунок 3.8 - Положение (задвижка открыта на 2 см)

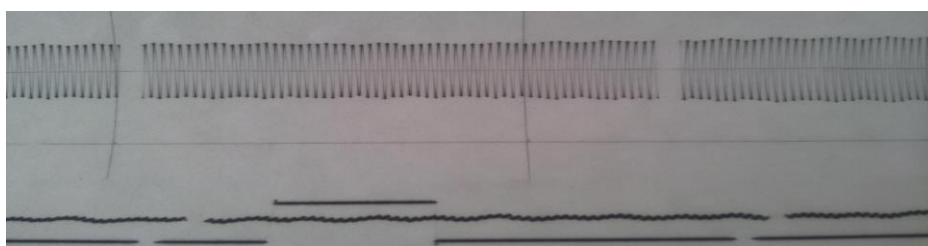


Рисунок 3.9 - Положение (задвижка открыта на 3 см)

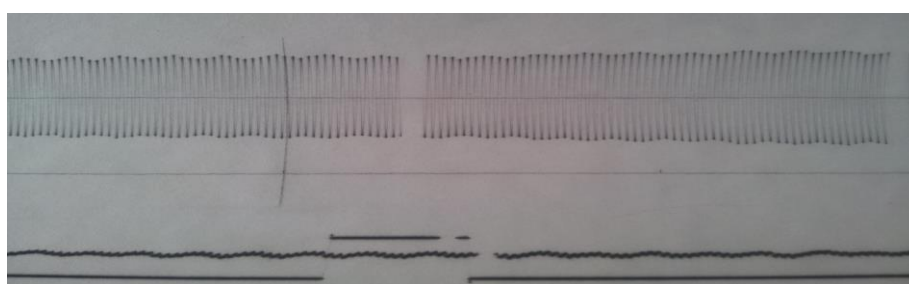


Рисунок 3.10 - Положение (задвижка открыта на 4 см)

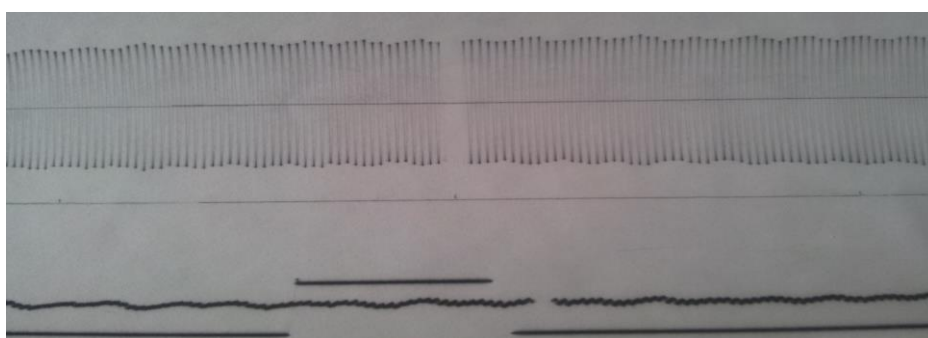


Рисунок 3.11 - Положение (задвижка открыта на 5 см)

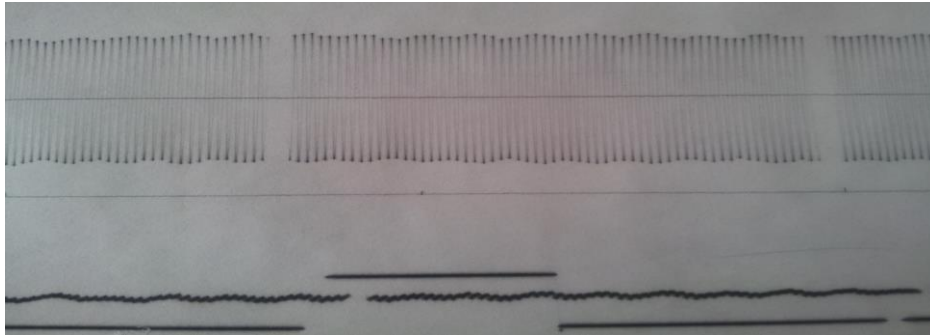


Рисунок 3.12 - Положение (задвижка открыта на 6 см)

Расчетные формулы:

Частота вращения двигателя, 1/с

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot n$$

Полная мощность, потребляемая из сети, В·А

$$S = 3 \cdot U_{\phi} \cdot I_C$$

$\cos(\varphi)$  электродвигателя

$$\cos(\varphi) = \frac{P_C}{S},$$

где  $P_C$  – активная мощность, потребляемая из сети, Вт.

Электрические потери в цепи статора, Вт

$$\Delta P_{\text{ЭЛСТ}} = 3 \cdot I_C^2 \cdot r_C,$$

где:  $r_C$  – сопротивление фазы обмотки статора.

Полезная мощность на валу двигателя, Вт

$$P_B = P_C - \Delta P_{\text{ЭЛСТ}} - \Delta P_{\text{МЕХ.АД}},$$

где  $\Delta P_{\text{МЕХ.АД}}$  – механические потери двигателя, Вт.

Момент на валу двигателя, Н·м

$$M_B = \frac{P_B}{\omega}$$

Коэффициент полезного действия в двигательном режиме электродвигателя

$$\eta = \frac{P_B}{P_C}$$

Подставляя в (3.2)...(3.4) результаты лабораторных исследований  $A_1=1,4$  А,  $A_2=1,0$  А,  $A_3=0,7$  А,  $y_m=1,5$  А определяем показатели качества переходного процесса изменение тока электропривода агрегата во времени с нагрузкой  $\delta = 71,4$ ,  $R_g = 0,53$ ,  $\psi = 0,5$ . Таким образом, разомкнутая система регулирования не обеспечивает устойчивости и требуемого качества переходного процесса электропривода агрегата.

#### **4 Техничко-экономические показатели применения системы регулирование нагрузки электропривода кормоприготовителя**

Определим основные технико-экономические показатели двух сравниваемых вариантов системы регулирования зернового потока поступающего на рабочий орган агрегата кормоприготовителя мощностью на 1 кВт.

При первом (базовом) варианте применяется система ручного регулирования нагрузки электропривода кормоприготовителя.

Во втором (новом) варианте используется система микропроцессорной системы регулирование нагрузки электропривода.

Годовой экономический эффект определяется по формуле [27, 28]

$$\mathcal{E}_T = (P_B - P_H) + Ц\Delta M, \quad (4.1)$$

где  $P_B$  и  $P_H$  – приведенные затраты в базовом и новом варианте системы регулирования нагрузки, тг;

$Ц$  – закупочная цена единицы продукции (зерно), тг/кг;

$\Delta M$  – изменение количества продукции, связанное с внедрением новой системы регулирования нагрузки, кг.

Приведенные затраты находим как

$$P_B = E_H \cdot K_B + I_B, \quad P_H = E_H \cdot K_H + I_H, \quad (4.2) (4.3)$$

где  $K_B, I_B$  и  $K_H, I_H$  – соответственно капиталовложения и годовые эксплуатационные издержки в базовом и новом варианте, тг;  $E_H$  – нормативный коэффициент эффективности.

Годовые эксплуатационные издержки рассчитываются по формуле

$$I = I_A + I_{TP} + I_3 + C_{\text{Э}}, \quad (4.4)$$

где  $I_A$  – амортизационные отчисления от балансовой стоимости оборудования системы регулирования нагрузки, тг;

$I_3$  – зарплата электромонтеров, обслуживающих электрооборудование системы регулирования, тг;

$C_{\text{Э}}$  – стоимость электрической энергии, тг.

Амортизационные отчисления находим как

$$I_{AB} = a_B \cdot K_B, \quad I_{AH} = a_H \cdot K_H, \quad (4.5) \quad (4.6)$$

где  $a_B$  и  $a_H$  – нормы амортизационных отчислений агрегата ручного и микропроцессорного регулирования нагрузки.

Отчисления на текущий ремонт

$$I_{TPB} = \rho_B \cdot \beta_B \cdot K_B, \quad I_{TPH} = \rho_H \cdot \beta_H \cdot K_H, \quad (4.7) \quad (4.8)$$

где  $\rho_B$  и  $\rho_H$  – норма отчислений на текущий ремонт устройств ручного и автоматического регулирования нагрузки электропривода;

$\beta_B$  и  $\beta_H$  – коэффициенты, показывающие соотношения годовой загрузки устройств ручного и автоматического регулирования нагрузки к нормативной.

Предусматриваем, что в первом варианте агрегат работает в ручном режиме, а во втором варианте зерновой поток поступающий на рабочий орган управляются в автоматическом режиме. Затраты на электроэнергию определяем как

$$C_{\text{Э}} = n_{\text{сут}} \cdot T_{\text{д}} \cdot P_{\text{уст}} \cdot \Pi_{\text{Эд}} + n_{\text{сут}} \cdot T_{\text{н}} \cdot P_{\text{уст}} \cdot \Pi_{\text{Эн}}, \quad (4.9)$$

где  $n_{\text{сут}}$  – число суток;

$T_{\text{д}}$  – продолжительность работы агрегата в течение суток при дневном тарифе на электроэнергию, час;

$P_{\text{уст}}$  – установленная мощность агрегата, кВт;

$C_{\mathcal{E}\delta}$  – стоимость 1 кВт\*час электрической энергии дневного тарифа, тг.

Расчет стоимости дополнительной продукции производим следующим образом

$$C \Delta M = \mathcal{E}_{\delta 1} + \mathcal{E}_{\delta 2}, \quad (4.10)$$

$$\mathcal{E}_{\delta 1} = C \cdot m_3 (N_H - n_H) \cdot \left( \frac{n_B}{N_B} - \frac{n_H}{N_H} \right), \quad (4.11)$$

$$\mathcal{E}_{\delta 2} = C \cdot m_3 (N_H - n_H) \cdot \left( \frac{\Delta m}{100} \right), \quad (5.12)$$

где  $\mathcal{E}_{\delta 1}$  и  $\mathcal{E}_{\delta 2}$  – стоимость дополнительной продукции за счет соответственно уменьшения трудоемкости и прироста выпуска продукции, тг;  $m_3$  – масса зерна, кг;

$N_H, n_H$  и  $N_B, n_B$  – общее количество и уменьшения трудоемкости соответственно в предлагаемом и базовом варианте системы регулирования нагрузки, час.

Расчеты были проведены для следующих данных:  $K_B = 61915$  тг;  $K_H = 35000$  тг;  $E_H = 0,15$ ;  $a_B = 0,121$ ;  $a_H = 0,166$ ;  $\rho_B = \rho_H = 0,14$ ;  $\beta_B = 0,58$ ;  $\beta_H = 0,16$ ;  $C_{\mathcal{E}\delta} = 16$  тг;  $C = 800$  тг/кг;  $N_H = 25$  час;  $n_H = 4$  час;  $N_B = 25$  час;  $n_B = 1$  час;  $p_{\text{сут}} = 5$  суток; продолжительность работы агрегата в течение суток 5 час; установленная мощность оборудования системы регулирования нагрузки  $P_{\text{устБ}} = 5$  кВт, нового  $P_{\text{устН}} = 5$  кВт;  $t_3 = 1000$  кг;  $\Delta m = 31\%$  [119,120].

Основные результаты расчета экономической эффективности применения системы регулирования нагрузки электропривода агрегата приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Техничко-экономические показатели

Показатели, тыс. тг	Варианты	
	базовый	новый
Капвложения	61,9	35,0
Приведенные капвложения	22,8	8,3
Амортизационные отчисления	7,1	6,7
Отчисления на текущий ремонт	5,0	0,7
Заработная плата	10,0	10,0
Затраты на электроэнергию	2,0	2,0
Эксплуатационные издержки	5,8	3,3
Приведенные затраты	8,5	4,8



Стоимость дополнительной продукции	–	37,0
Годовой экономический эффект	–	40,6
Годовой экономический эффект в расчете на 100 кг измельченного зерна	–	0,5

Таким образом, предлагаемая система регулирования нагрузки электропривода позволяет увеличить срок службы и снизить эксплуатационные расходы за счет предотвращения перегрузки агрегата. Уменьшить суммарный расход энергии на измельчение зерновых материалов.

Кроме того, система регулирования позволяет получить наибольшей возможной производительности конечного продукта, в максимальном использовании подводимой к агрегату энергии за счет оптимальной загрузки рабочего органа агрегата.

Также система регулирования позволяет уменьшить трудоемкости и прироста выпуска продукции. Годовой экономический эффект от внедрения системы регулирования нагрузки для вышеприведенных условий составляет 40,6 тыс. тг в год.

При организации производства и реализации процесса измельчения агрегатами с системой регулирования нагрузки необходимо, для исключения коммерческого риска, определить условия безубыточности. Это возможно установить через известные величины постоянных и переменных затрат для измельчения зерновых материалов, объема производства и реализации.

Общие затраты на измельчение зерна будут

$$I = I_c + I_v, \quad (4.13)$$

где  $I_c$  – постоянные издержки, не зависящие от объема производства, тг;

$I_v$  – переменные издержки зависящие от него, тг.

Средства, поступающие от реализации измельченного зерна в течение одного месяца, определим как

$$C = C n, \quad (4.14)$$

где  $C$  – рыночная стоимость одного килограмма измельченного зерна;  
 $n$  – количество реализуемых измельченных зерен.

Прибыль найдем как

$$P = C - I. \quad (4.15)$$

На рисунке 5.1 представлен график позволяющий определить условие безубыточности производства. Здесь показаны зависимости общих, постоянных и переменных затрат, а средства поступающих от реализации измельченных зерен от объема реализации. Расчеты проводились для  $I_c = 105 \text{ тыс.тг/мес}$  (зарплата исполнительного персонала – 63 тыс. тг, амортизация – 129 тг, налог – 681 тг, связь – 2640 тг, коммунальные услуги – 4500 тг и затраты на ГСМ – 34050 тг в месяц) и  $I_v = 178 \text{ тг}$  за 1 кг получаемой продукции (затраты на электроэнергию – 7 тг, транспортные расходы – 21 тг, зарплата рабочих – 45 тг и непредвиденные расходы – 10% от суммы на один агрегат),  $C = 80 \text{ тг}$ .

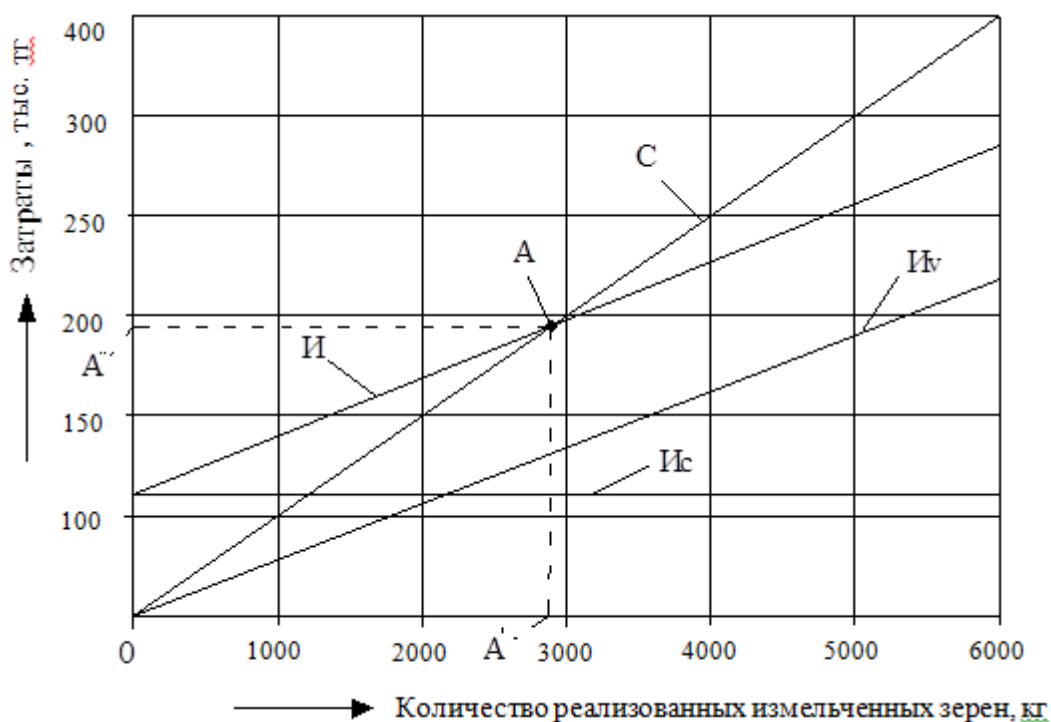


Рисунок 4.1 – График определения точки безубыточности производства и реализации измельченных зерен

Точка А на рисунке, лежащая на пересечении зависимостей издержек и доходов от количества реализованных измельченных зерен, соответствует условию безубыточности производства, А' показывает необходимый для этого объем реализации продукции в количестве 2900 кг, А'' равные объемы издержек производства и средств от реализации измельченных зерен указанного количества.

Меньший объем производства убыточен, больший прибылен. Разница по оси ординат прямых I и C, левой точки А, дает объем убытка, правей, объем прибыли в зависимости от количества реализованных продуктов.

## Заключение

Одним из основных направлений развития животноводства агропромышленного комплекса является создание прочной кормовой базы. В работе выдвинуто предположение о том, что нужно разработать агрегаты с системой регулирования производительности, способных производить кормы высокого качества при минимальных затратах денежных средств.

1. Предложена методика выбора конструкции устройства регулирования производительности кормоприготовительного агрегата и принципа регулирования.

2. Для проведения испытаний выбранного принципа регулирования нагрузки электропривода агрегата и методики испытаний разработан лабораторный стенд.

3. Предложена структура системы регулирования производительности агрегата позволяющий работать электропривод в номинальном режиме.

4. Внедрение предлагаемой системы регулирования нагрузки электропривода позволяют уменьшить трудоемкости и прироста продукции. Годовой экономический эффект от внедрения системы регулирования составил около 120 тыс. тг в года на 100 тыс. кг измельченного зерна.

## Список литературы

1. Стратегия индустриально-инновационного развития Республики Казахстан на 2003-2015 годы.
2. Егоров Владимир Николаевич, Шестаков В.М. Динамика систем электропривода. – Л.: Энергоатомиздат. 1983.
3. Егоров В.Н., Шестаков В.М. Управление электроприводом: Элементы замкнутых систем автомат. Л., 1978.
4. Егоров В.Н., Корженевский-Яковлев О.В. Цифровое моделирование систем электропривода. Л., 1986.
5. Пультов И.П. Качество процессов и синтез корректирующих устройств в нелинейных автоматических системах. М. 1975.
6. Пальтов И.П. Нелинейные методы исследования автоматических систем. Л., 1976.
7. П.М. Василенко., И.И. Василенко. Механизация и автоматизация процессов приготовления и дозирования кормов.
8. Jury E.J., Lee V.W. On the stability of a certain class of nonlinear sampled – data systems – IEEE AC, №1.
9. Клушанцев Б.В., Колесников С.В. Разработка системы автоматического регулирования ширины разгрузочной щели дробилки крупнокускового дробления: Дисс. На соискание уч. Сте. Кан. Тех. Наук.//Днепропетр, горный ин. Артема. 1990.-172с.
10. Камалетдинов А.В. Автоматизация процесса дробления твердых строительных материалов конусными дробилками. Дисс. На соискание уч. Степ. Кан. Тех. Наук. 2002.-187 с.
11. Макаров Т.А., Щур В.В., Панышин Б.А. Автоматический контроль уровня сыпучих сред. «Промышленная энергетика», 1976, №11, с 23-25.
12. Воронов А.А. Основы теории автоматического управления. М.: «Энергия», 1985, с 148.
13. Гольдин М.Л. Контроль автоматизация процессов дробления и измельчения руд. М.: «Атомиздат».
14. Ключев А.С., Колесников А.А. Оптимизация автоматических систем управления по быстродействию. М.: Энергоиздат, 1982.
15. Копелович А.П. Инженерные методы расчета при выборе автоматических регуляторов.
16. Беннеран Ибрахим Тахир. Автоматизированный асинхронный электропривод с оптимальными режимами работы. Дисс. К.т.н., 05.09.03.
17. Абрамов Геннадий Михайлович. Автоматизация управления технологическим процессом хранения картофеля на основе микропроцессорных систем. 05.13.07. 1997.
18. Раженко А.С. Автоматическая оптимизация измельчения на этапе крупно образования при сортовом помоле пшеницы 05.13.07. М.1983.

19. Сидоренко Ю.А. Повышение производительности самоходного кормоуборочного комбайна путем автоматизации управления загрузкой его двигателя. Минск 1983.

20. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при потоке оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 289 с.

21. Антонец И. В. Оптимальное управление краном-штабелёром по критерию максимальной производительности //автоматизация и современные технологии. 2008. №10. С.12-16.

22. А 224 Копелович Александр Павлович и др. Автоматизированная система управления для металлургического завода. М., 1973.

23. Копелович А.П. Автоматическое регулирование работы газогенераторных станций. М., 1956.

24. Копелович Александр Павлович. Автоматический контроль и регулирование в черной металлургии. Справочник. М., 1967.

25. Автоматизация промышленных установок: Сборник статей. Томск. 1975.

26. Автоматизированный электропривод, автоматизация и телемеханизации производственных процессов. Сборник статей. Ташкент. 1969.

27. Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентильных преобразователей. Сборник статей. Челябинск, 1974.

28. Кузьмин Иван Ваисльевич. Оценка эффективности и оптимизация автоматических систем контроля и управления. М., «Советское радио», 1971.

29. Лернер В.С. Оптимальное управление налагающимися микропроцессорами на основе вариационных принципов. Кишинев Штиница 1972.

30. Магидов Эдуард Аркадьевич. Системный подход в проектировании автоматизированных систем управления. – М.: Электроника, 1979. 55с.

31. Клушанцев Б.В. Конструктивные решения узлов щековых дробилок, повышающие их надежность. Обзор. М., 1968.

32. Основы построения автоматизированных систем контроля сложных объектов. Под ред. Проф. Д-р. Физ.

33. Жилль И.К. и Декольн П.А. Об устойчивости вынужденных колебаний в нелинейных системах автоматического регулирования. М., 1960.

34. Кюпфмюллер К. Пределы точности систем регулирования. М., 1960.

35. Боронихин А.С., Юрий Семеевич. Лабораторный практикум по основам автоматизации и контролю производства».

36. Таран, В.А. Математические вопросы автоматизации производственных процессов. М. Высшая школа, 1968.

37. Методы повышения качества системы автоматического регулирования. Кишнев. 1973.

38. Смит Отто Дж Автоматическое регулирование. Перевод с англ. М. 1962.

39. Такер Г.К. Упрощенные методы анализа систем автоматического регулирования. Графические методы исследования и улучшения систем автоматического регулирования технолог. Процессов . Госэнергоиздат, 1963.
40. Хэммонд П. Теория обратной связи и ее применения. Перевод с англ. М. А. Берманта. М. Физматиз. 1961.
41. Неколны Я и Бенеш И. Совместный контроль устойчивости и качества регулирования и его применение в статической динамике. М., 1960.
42. Нишида Фуджио. Синтез систем регулирования со многими переменными с помощью дискретных корректирующих звеньев. М., 1960.
43. Ольденбургер Р. И Накада Т. Стабилизация самовозбуждающихся систем. М., 1960.
44. Откер Р. О регулировании объектов с запаздыванием. М., 1960.
45. Попов В.М. Критерий качества нелинейных регулируемых систем. М., 1960.
46. Розенблюм Арнаольд. Системы регулирования с интегральными ограничениями и критерием качества, определяемым состоянием в заданный момент времени. М., 1960.
47. Смит О. Основные принципы автоматического управления. М., 1960.
48. Стаут Т.М. Математические модели для систем автоматического регулирования с вычислительными устройствами. М., 1960.
49. Такааси И. процесс регулирования при ограничении скорости. М., 1960.
50. Тидеманн А.Т. и Хиггинс Т. Дж. Методика систематического определения влияния изменений параметров в системах автоматического регулирования. М., 1960.
51. Четтерджи Х.К. Регулирование процессов со многими переменными. М., 1960.
52. Экслби Г.С. Практические методы определения качества замкнутых системы управления. М., 1960.
53. Агур Устус Маратович. Применение алгебры Буля при проектировании схем автоматики. Конспект лекций. Таллин 1974.
54. Густарев Б.М., Кувшинников Б.А. Основы инженерных методов анализа устойчивости замкнутых систем. М. 1968.



Таблица 1 – Экспертная оценка параметров

Параметры	Ранг параметра по оценке эксперта			Сумма рангов	Отклонение	Квадратическое отклонение
	Э1	Э2	Э3			
Мощность привода, кВт (X1)	10	11	10	33	67	4489
Сечение отверстий, м <sup>2</sup> (X2)	19	17	18	57	43	1849
Напряжение, В (X3)	4	5	5	15	85	7225
Время открытия задвижка, с (X4)	19	21	19	62	38	1444
Аварийное отключение (X5)	26	24	26	79	21	441
Высота, мм (X6)	5	5	5	5		
Масса, кг (X7)	5	5	5	15	85	7225
Стоимость задвижки, тг (X8)	12	12	12	39	61	3721
Итого	100	100	100	300	0	26394