Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Белов Николай Владимирович

ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ПРИВОДА КОНУСНОЙ ДРОБИЛКИ

Специальность 2.8.8 – **«Геотехнология, горные машины»**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель: доцент, к.т.н. Бородина Марина Борисовна

Москва, 2024

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Особенностью горнодобывающей промышленности является поточность производства. Поэтому выход из строя одного из участков технологических машин приводит к остановке всего производственного процесса. Внеплановый ремонт дробильных агрегатов является причиной остановки всего технологического процесса, что влияет на объём производства. Эта проблема характерна как для горно- обогатительных предприятий, так и для карьеров строительных материалов, где используется процесс дробления. В связи с этим, снижение простоев дробильного оборудования приводит к высокопроизводительной и надежной работе всего горного предприятия, поэтому является актуальной научной задачей.

Анализ способов защиты горного оборудования от динамических нагрузок и случайных перегрузок, возникающих при попадании негабаритов и не дробимых тел в дробилку, выявил необходимость установки в её привод самовосстанавливающегося предохранительного устройства с гидроупругими элементами, способного снижать воздействие динамических нагрузок на её узлы. С учётом анализа конструкций установлено, что для привода конусной дробилки подходит гидромеханическое предохранительное устройство с зубчатым дифференциалом, передающее заданные крутящие моменты, способное адаптироваться к режиму работы дробилки путём изменения своих параметров. На данный момент работа привода конусной дробилки с установленным новым гидромеханическим предохранительным устройством не исследована, что не позволяет изучить все его возможности и является сдерживающим фактором для внедрения в производство в виде зубчатого дифференциала. Это подтверждает, что исследование привода конусной дробилки с гидромеханическим предохранительным устройством новой конструкции, способным эффективно защитить привод от возникающих в процессе работы динамических нагрузок и перегрузок, является необходимым и актуальным.

Степень научной проработанности темы исследования. Защита элементов конусных дробилок от попадания не дробимого элемента путём автоматического регулирования разгрузочной щели рассмотрена авторами: Масленников В.А., Лагунова Ю.А., Калянов Е.А., Шаталов В.П., Толстов С.Г., Кочетов Е.В. и другие.

Вопросы защиты металлургического и горного оборудования, от характерных для этого типа производств динамических нагрузок исследовали в своих работах: Артюх В.Г., Большаков В.И., Булавин К.А., Веренев В.В., Кель В.Я., Корнеева Е.Н., Крутик А.В., Нижник А.В., Решетов Д.Н., Сопилкин Г.В., Шишкарёв М.П., Яременко О.В., Мироненко С.В. и другие.

Цель работы: Разработка рациональных параметров гидромеханического предохранительного устройства для привода конусной дробилки с целью повышения эффективности его защиты от перегрузок.

Идея работы состоит в разработке такой методики расчёта параметров гидромеханического предохранительного устройства с дифференциальным зубчатым передаточным механизмом, которая позволит рассчитывать и настраивать рациональные параметры гидросистемы под заданные требования в условиях максимальных динамических нагрузках при эксплуатации конусных дробилок.

Задачи исследования:

1. Выполнить выбор конструкции на основании анализа существующих предохранительных систем и устройств, с целью использования для защиты привода конусной дробилки от воздействия высоко динамичных и интенсивных пиковых нагрузок, возникающих в процессе дробления материалов.
2. Математически смоделировать нагрузки, действующие на элементы привода дробилки в процессе её эксплуатации.
3. Путём математического моделирования работы гидромеханического предохранительного устройства получить зависимости, которые позволят охарактеризовать работу привода конусной дробилки от параметров гидросистемы устройства с дифференциалом на всех этапах её работы.
4. Создать экспериментальный образец гидромеханического предохранительного устройства и провести комплекс испытаний на работающей дробилке, подтверждающих его работоспособность, а также получить информацию, подтверждающую результаты математического моделирования, на основании исследований, полученных экспериментальным путем.
5. Разработать методику расчета параметров гидромеханического предохранительного устройства с дифференциальным зубчатым передаточным механизмом, которая позволит рассчитывать и настраивать рациональные параметры гидросистемы устройства под заданные требования в условиях максимальных динамических нагрузках при эксплуатации конусных дробилок.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Созданная математическая модель отражает динамику работы гидромеханического предохранительного устройства в приводе конусной дробилки, отражает: приведенные к валу двигателя конусной дробилки его механические характеристики и позволяет определять параметры работы привода при разных конструктивных и эксплуатационных параметрах предохранительного устройства в условиях воздействия динамических нагрузок.
2. Математическая модель системы привода конусной дробилки с гидромеханическим предохранительным устройством, позволяющая обеспечить снижение воздействия динамических и ударных нагрузок различной частоты и амплитуды на элементы привода дробилки.
3. Математическая модель работы привода конусной дробилки с предохранительным устройством в режиме воздействия динамических и ударных нагрузок различной частоты и амплитуды, заключающаяся в выявлении влияния величины начального давления в гидроаккумуляторе гидросистемы предохранительного устройства на величину нагрузок, действующих на привод.

.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается статистической информацией, фундаментальными положениями теоретической механики и гидравлики, дифференциального и интегрального исчисления, использованием при расчетах сертифицированных программ, экспериментальных данных, подтверждающих теоретические исследования с применением поверенного измерительного оборудования.

Научная новизна работы состоит в разработке математической модели привода конусной дробилки с гидромеханическим предохранительным устройством защиты привода от воздействия пиковых динамических нагрузок, исследование и обоснование его рациональных параметров.

Методы исследования. Нелинейные дифференциальные уравнения математической модели решались численными методами Рунге-Кутта 4-го, 5-го порядка с использованием комплекса MatLab Simulink, точность вычислений которого составляет 0,001. Экспериментальные исследования изготовленного опытного образца проводились в приводе работающей конусной дробилки. Фиксация и обработка тока электродвигателя проведена на современной цифровой аппаратуре обработки данных, с использованием соответствующего программного обеспечения.

Научное значение работы состоит в разработке методики позволяющей рассчитать рациональные параметры гидромеханического предохранительного устройства привода конусной дробилки, позволяющей определять его конструктивные параметры, и осуществлять настройку гидросистемы в соответствии с требованиями условий эксплуатации.

Практическое значение работы:

1. Разработана методика расчета параметров гидромеханического предохранительного устройства с дифференциальным зубчатым передаточным механизмом в приводе конусной дробилки, позволяющая определять его конструктивные параметры и обеспечивать эффективную защиту элементов привода.
2. Разработан, изготовлен и испытан опытный образец конструкции гидромеханического предохранительного устройства с дифференциальным зубчатым передаточным механизмом в приводе конусной дробилки, увеличивающий эффективность защиты элементов привода и способный само восстанавливаться после срабатывания в процессе передачи больших крутящих моментов, а также с возможностью регулирования параметров при работе привода дробилки.
3. Изготовленный образец внедрён в работу дробилки КСД-1200 на предприятии ООО «ПромМашКомплект».
4. На разработанную конструкцию гидромеханического предохранительного устройства конусной дробилки, получен патент РФ на изобретение № 2792483 23 марта 2023г**.**

Личный вклад автора. Автор провел теоретические и экспериментальные исследования, математическое моделирование работы конусной дробилки с установленным гидромеханическим предохранительным устройством, разработал методику расчета рациональных параметров начального давления в

гидроаккумуляторе и создал новую схему комбинированного гидромеханического предохранительного устройства связанного с механизмом регулирования щели дробилки исключающего остановку дробилки под завалом, способного снижать влияние динамических нагрузок на элементы привода и предохранять привод от перегрузок .

Реализация результатов диссертационной работы.

Разработанная в процессе диссертационной работы конструкция реализована и принята к использованию в ООО «ПромМашКомплект», результаты научных и практических исследований используются в учебном процессе СТИ НИТУ «МИС и С» при подготовке студентов.

Апробация работы. Материалы научной работы докладывались, обсуждались и были положительно оценены:

Всероссийской научно – практической конференции студентов и аспирантов, Старый Оскол, 2018;

Региональной научно-практической конференции студентов и аспирантов, Старый Оскол, 2018;

XVI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство», Старый Оскол, 2019;

XVII международной научно-практической конференции «Энерго- и ресурсосбережение – XXI век», Орёл, 2019;

XXVII Международном научном симпозиуме «НЕДЕЛЯ ГОРНЯКА», Москва 2020;

XVII Всероссийской научно-практической конференции студентов и аспирантов «СТИ НИТУ МИС и С», Старый Оскол, 2020;

Первой международной научно-практической конференции «Современные материалы и технологии восстановления и упрочнения деталей промышленного оборудования», Старый Оскол, 2021;

XIX Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство», Старый Оскол, 2023.

.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 17 научных работах, из них 5 - в рекомендованных ВАК при Минобрнауки РФ, 2 патента РФ на изобретение и 3 статьи в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, из которых 1 – в журнале, индексируемом в базе данных Scopus.

Объем и структура работы. Диссертационная работа представлена на 138 страницах основного текста и состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка, использованных литературных источников из 108 наименований, 6 приложений, включает 61 рисунок и 5 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность научно-исследовательской работы, сформулированы цель, идея и научные положения, выносимые на защиту, дана оценка научной и практической значимости работы, а также её реализация.

В **первой главе** представлен анализ научных трудов по теме диссертации, связанных со статистикой отказов узлов конусных дробилок, возникающих в результате действующих нагрузок, на них. Разработана классификационная схема отказов элементов конусной дробилки, рис.1, по результатам которой выявлено три типа отказов по степени их прогнозируемости:

- прогнозируемые отказы - износ футеровки броней;
- слабо прогнозируемые отказы - излом вала, излом зубьев шестерни, разрушение баббитовой поверхности эксцентрика и пр.;
- внезапные отказы, возникающие при попадании недробимого тела в зону дробления.

Проблемой износа броней дробилки занимались: Крагельский И.В., Кощеев В.Н., Тененбаум М.М, Гадфильд Р., Сергиев А.П. и другие.

Проведённый анализ известных технических решений выявил конструкцию предохранительного устройства наиболее рациональную для защиты привода от динамических нагрузок и перегрузок – гидромеханическое предохранительное устройство с передаточным механизмом в виде зубчатого дифференциала, с высокой нелинейной податливостью, которую можно регулировать в процессе работы привода дробилки.

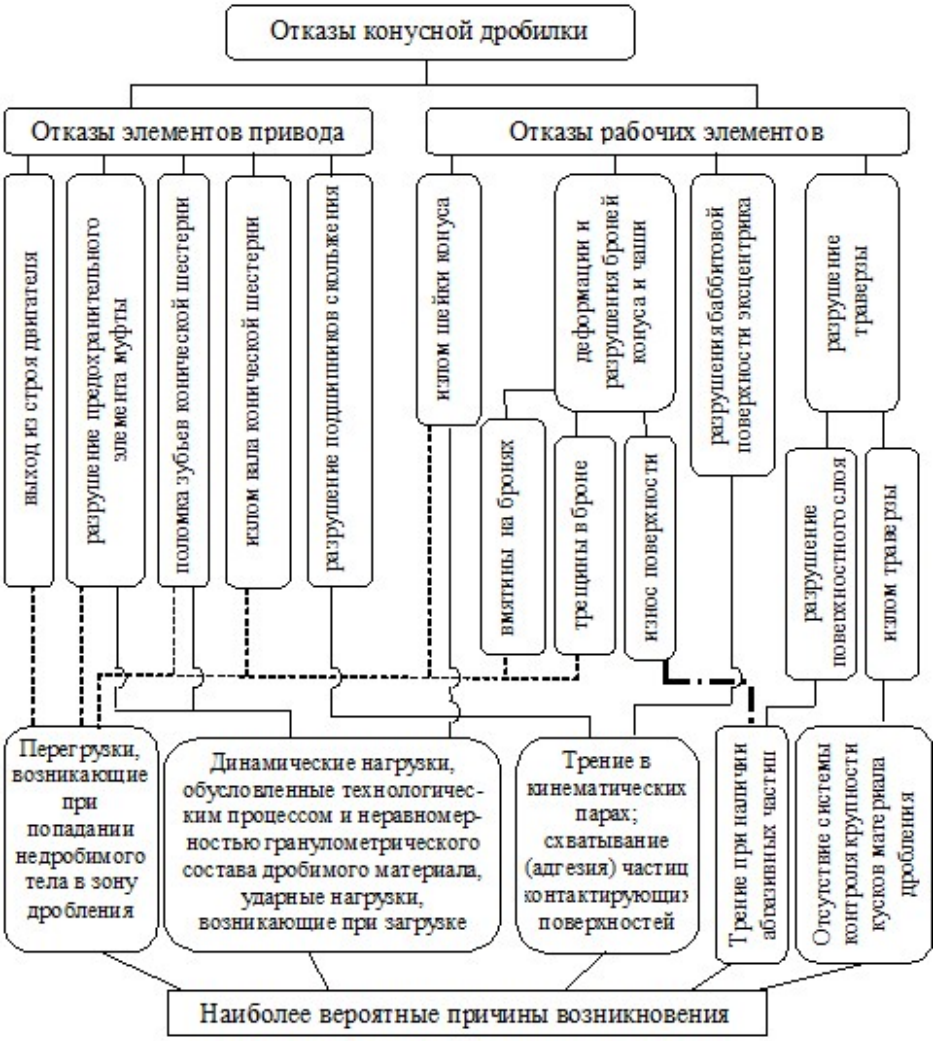


Рис. 1 Схема отказов элементов конусных дробилок
и причин их возникновения

— · – - прогнозируемый отказ; —— - слабо прогнозируемый отказ;
- - - - - внезапный отказ

На основе выполненного анализа сформулирована цель и задачи, научная новизна и практическая значимость выполненного диссертационного исследования.

Во **второй главе** представлена конструкция и разработанная математическая модель исследуемого гидромеханического предохранительного устройства рис.2, которое содержит ведущий 1 и ведомый 2 валы - связанные между собой через конический дифференциал 4, а также с регулировочным валом 3, на котором установлена гидромашина 5, представляющая собой обращаемый аксиально-плунжерный гидронасос-мотор. Гидромашина 5 с помощью своей напорной линией соединена с гидроаккумулятором 6. При достижении критического давления, управляемый кран 9, связывает гидромашину 5 с гидроаккумулятором 6 и со сливной ёмкостью 7. Положение крана 9 регулируется системой управления 10, которая срабатывает при заданном давлении в напорной линии гидромашины 5, измеряемом датчиком давления 8.

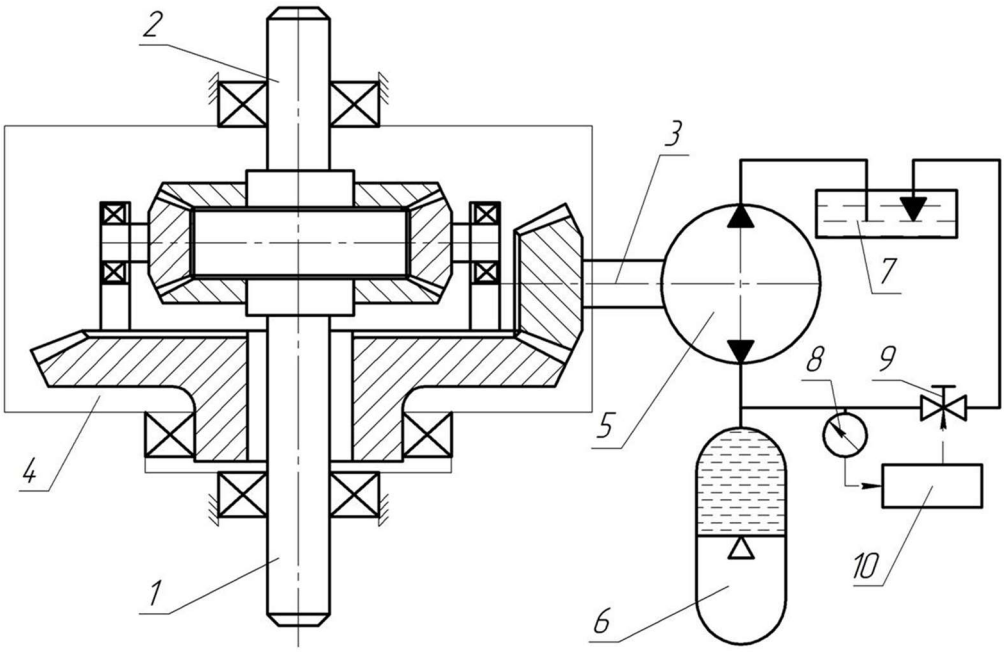


Рис. 2. Гидромеханическое предохранительное устройство с дифференциальным зубчатым передаточным механизмом

Работу предохранительного устройства можно подразделить на три основных режима.

1. Пуск. При включении электродвигателя конусной дробилки кран 9 открыт (если есть необходимость разогрева двигателя при разгоне). При этом вращение вала двигателя, связанного с ведущим валом 1 полностью передаётся регулировочному валу 3 гидромашины 5, работающей, в данном случае, в режиме гидронасоса, качая жидкость по холостому контуру до разогрева двигателя. Далее система управления 10 закрывает кран 9, и гидронасос 5 начинает закачивать жидкость в гидроаккумулятор 6, плавно увеличивая давление и момент на регулировочном валу 3 до уравновешивания момента сопротивления на ведомом валу 2. При этом регулировочный вал 3 останавливается, удерживаемый от вращения гидромашиной 5, работающей в режиме гидротормоза. При этом, движение вала 1 передаётся валу 2. В таком порядке реализуется плавный пуск привода конусной дробилки.

2. Рабочий режим. Увеличение момента сопротивления на ведомом валу 2 приводит к работе гидромашины 5 в режиме насоса, при котором закачивая жидкость в гидроаккумулятор 6 и увеличивается давление в гидросистеме. Снижение момента на ведомом валу 2 приводит к работе гидромашины 5 в режиме мотора, отдавая часть накопленной в гидроаккумуляторе энергии обратно в гидросистему.

Режиме защиты от перегрузки. При превышении момента сопротивления на ведомом валу 2 его предельно допустимого значения в течении продолжительного времени, давление в гидроаккумуляторе 6 увеличивается до критического – в результате открывается кран 9 системой управления 10, и рабочая жидкость из гидромашины 5 и гидроаккумулятора 6 поступает на слив 7. Давление в гидросистеме понижается и гидромашина 5, работает, как

гидронасос, что позволяет валу 3 вращаться. В результате чего происходит срабатывание предохранительного устройства.

После устранения причины перегрузки привода гидромеханическое предохранительное устройство, работает как при пуске привода. При этом не затрачиваются ресурсы на восстановление, как у большинства предохранительных муфт.

Управление параметрами работы предохранительного устройства может осуществляться за счёт изменения следующих параметров гидросистемы: давления газа в камере гидроаккумулятора 6; производительности регулируемого гидромотора насоса 5, при изменении расхода жидкости в гидросистеме.

При составлении математической модели предохранительного устройства, моменты инерции элементов дробилки, а также самой дробилки приводим к валу 2, момент инерции и движущий момент электродвигателя приводим к валу 1, а силы и моменты, действующие со стороны гидросистемы, приводим к валу 3. При этом, принимаем следующие допущения: процессы, происходящие при работе гидропневматического демпфера, являются изотермическими; сжимаемость жидкости в гидросистеме и упругость элементов передаточного механизма малы по сравнению с упругостью, задаваемой гидроаккумулятором; коэффициенты трения контактирующих поверхностей являются постоянными.

Математическая модель базируется на уравнениях Лагранжа 2 рода, представленных в обобщенных координатах. В качестве обобщённых координат выбираем следующие независимые переменные: угол поворота вала 2 - φ_2 и регулирующего вала 3 -φ_3. Вращение вала 1 выражаем через обобщённые координаты:

$$\dot{\varphi_1} = \dot{\varphi_2} + \frac{\dot{\varphi_3}}{i} \tag{1}$$

где i – передаточное отношение конического дифференциала.

Система уравнений, описывающая динамику работы привода с гидромеханическим предохранительным устройством, записываем в виде:

$$\begin{cases} (J_1 + J_2) \cdot \ddot{\varphi}_2 + \frac{J_1}{i}\ddot{\varphi}_3 = \mathrm{M_Д} - \mathrm{M_C} \\ \left(\frac{J_1}{i^2} + J_3\right) \cdot \ddot{\varphi}_3 + \frac{J_1}{i}\ddot{\varphi}_2 = \frac{\mathrm{M_Д}}{i} - \mathrm{M_{ГС}} \end{cases} \tag{2}$$

где J_1– приведённый к валу 1 момент инерции привода дробилки; J_2– приведённый к валу 2 момент инерции дробилки, $J_2 = (J_{\text{кон}} + J_{\text{к}} + J_{\text{в}}) \cdot \frac{1}{i^2} + J_{\text{в-ш}}$; $J_{\text{кон}}$ – момент инерции дробящего конуса; $J_{\text{к}}$ - момент инерции конического колеса; $J_{\text{в}}$ - момент инерции вала-эксцентрика; $J_{\text{в-ш}}$ - момент инерции вала-шестерни; J_3 – приведённый к валу 3 момент инерции элементов передачи и гидромашины; i – передаточное отношение конической передачи; $M_Д$– приведённый момент на валу 1 электродвигателя; $M_{ГС}$ - приведённый момент на валу 3 гидромашины, M_C– приведённый момент сопротивления к валу 2 со стороны дробилки.

Приведённый к валу 1 момент инерции привода дробилки равен моменту асинхронного электродвигателя, который описывается его механической характеристикой.

Для составления имитационной модели приведённого момента сопротивления на валу 2, воспользуемся статистическими данными записи нагрузок на вал привода, но без предохранительного устройства:

$$\mathrm{M_C} = \begin{cases} 0{,}15\mathrm{M_н}\text{, при } 0 \le t < 120 \\ 1{,}9\mathrm{M_н}\text{, при } 120 \le t < 122 \\ 0{,}9\mathrm{M_н} + 0{,}1\mathrm{M_н} \cdot \sin(k_1 t) + 0{,}8\mathrm{M_н} \cdot \sin(k_2 t) \end{cases} \quad (3)$$

где $M_н$ - номинальный момент на валу привода.

Приведённый к валу 3 момент зависит от процессов, происходящих в гидроаккумуляторе гидросистемы, а также от трения жидкости при её движении в трубопроводах:

$$\mathrm{M_{ГС}} = \mathrm{M_р} \pm \mathrm{M^T_{жид}}\ , \quad (4)$$

где M_p – момент на валу гидромашины, создаваемый давлением в гидросистеме, и определяемый из уравнения $M_p = M_{p0} + c \cdot \varphi_3$, где M_{p0} – момент сопротивления, создаваемый начальным давлением в газовой камере гидроаккумулятора. При этом, значение M_{p0} определяется по формуле $M_{p0} = p_0 \cdot V_1$, где p_0 - начальное давление в газовой камере аккумулятора; $V_1 = Q/\Omega_n$ - объём жидкости, проходящий через гидромашину, при её повороте на один радиан; Q – производительность (расход) гидромашины при номинальной угловой скорости вращения вала Ω_n; c – коэффициент крутильной жёсткости устройства, зависящий от рабочих параметров гидроаккумулятора, $c = \dfrac{p_0 \cdot {V_1}^2}{V_0 - V_1 \cdot \varphi_3}$; V_0 – начальный объём, занимаемый газом в газовой камере гидроаккумулятора; $M^T_{жид}$ – момент сопротивления на валу гидромашины, создаваемый трением жидкости в гидросистеме, $M^T_{жид} = \mu \cdot \dot{\varphi}_3 + \nu \cdot \dot{\varphi}_3^2$, а величины μ и ν - параметры демпфирования, характеризующие соответственно рассеяние энергии при ламинарном и турбулентном течении жидкости по трубопроводам и определяемые числом Рейнольдса.

Разработанная математическая модель является системой нелинейных неоднородных дифференциальных уравнений второго порядка, которая содержит уравнения, описывающие электромагнитные процессы, происходящие в асинхронном электродвигателе, а также процессы, происходящие в гидравлической системе. Такую систему уравнений целесообразно решать численными методами, моделируя процесс работы дробилки с гидромеханическим предохранительным устройством с использованием программы Matlab Simulink (рис.3).

Задаём модель работы асинхронного электродвигателя блоком Asynchronous Machine SI Units, после этого имитируем подачу напряжения на обмотки электродвигателя, которую моделируем трехфазным блоком подачи

напряжения Three-Phase Programmable Voltage Source, учитывающим общее заземление.

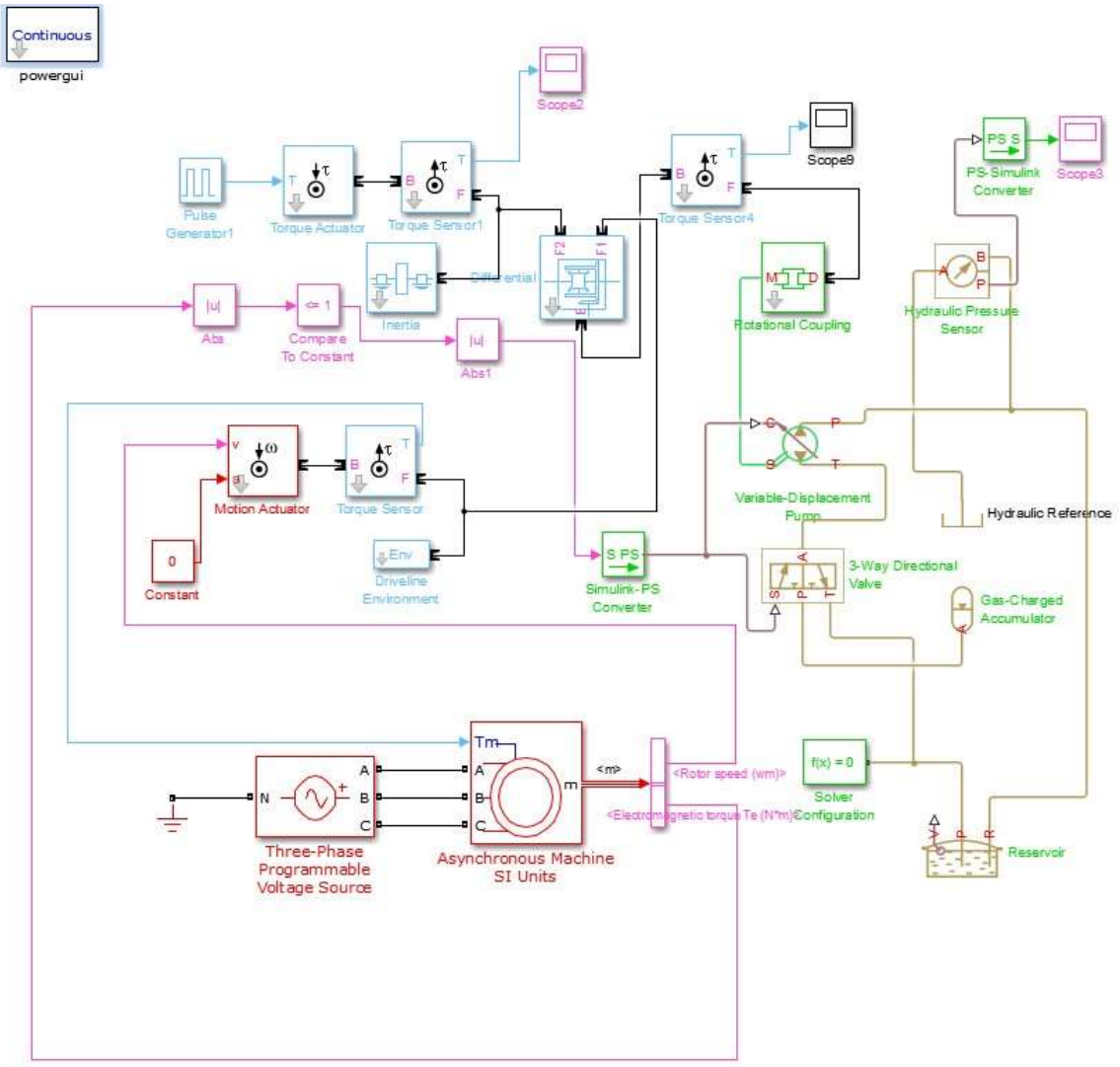


Рис. 3. Математическая модель привода дробилки с гидромеханическим предохранительным устройством

Механическая часть предохранительного устройства состоит из дифференциального механизма и моделируется блоком Differential, который распределяет движение, передаваемое от двигателя на два вала, один из которых связан с электродвигателем, моделируемым блоком Out1, а другой с гидромашиной, моделируемой блоком Conn 1.

Гидравлическая система предохранительного устройства связана с механической частью блоком Rotational Coumpling, передающим момент на блок аксиально- плунжерного гидравлического мотора, моделируемого блоком Hydraulic Motor, с двумя гидросистемами - напорной (T) и всасывающей (P). Напорная система соединяет гидромотор с гидропневматическим аккумулятором, моделируемым блоком Gas-Charged Accumulator, а всасывающая связывает гидромотор с гидравлическим баком, моделируется блоком Reservoir. В напорной системе установлен предохранительный клапан, работу которого моделируем блоком Check Valve. Сброс жидкости осуществляется обратно в гидравлический бак. Для фиксации изменения

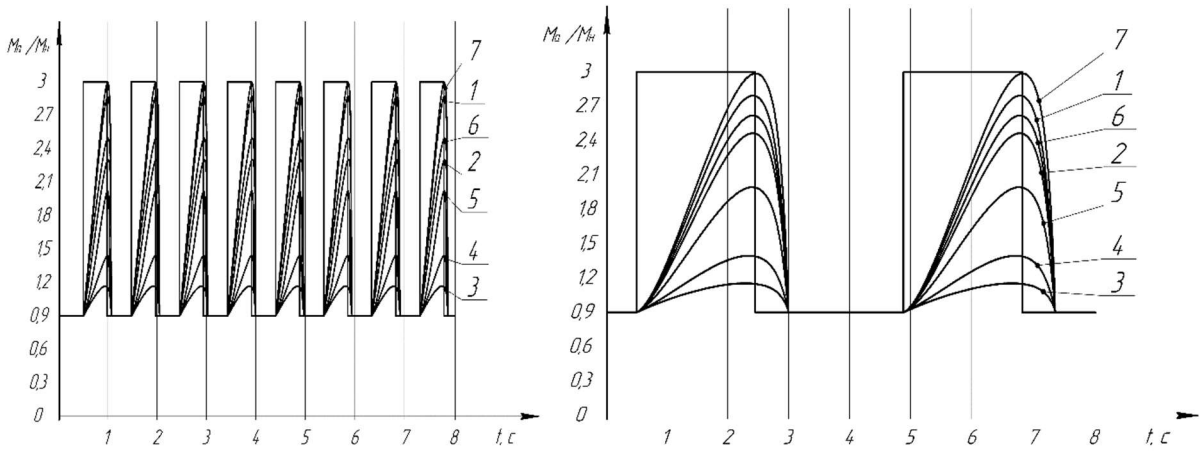
давления установлен датчик давления, моделируемый блоком Hydraulic Pressure Sensor и предающий данные на блок PS Simulink Converter для визуализации всех происходящих процессов на экране монитора пользователя.

Момент сопротивления, в зависимости от задачи исследования, моделируется блоком Pulse Generator (показан на рисунке 3), имитирующем серию импульсных нагрузок, или блоком Band-Limited White Noise, который генерирует нормально распределенные случайные числа, подходящие для использования в непрерывных или гибридных системах для имитации работы дробилки.

Выполнены исследования работы привода под действием серии импульсных нагрузок разной частоты (рис. 4,5) и амплитуды (рис. 6), а также под действием рабочей нагрузки дробилки (рис. 7).

В результате проведённых теоретических исследований установлены:

- зависимости, позволяющие определить и обосновать рациональный параметр – начальное давление в гидропневмоаккумуляторе (рис.6);



а) б)

Рис.4 Зависимости момента на валу двигателя в режиме демпфирования серии импульсных нагрузок с периодом 1 с. (а) и 4 с. (б) при различных начальных давлениях в гидроаккумуляторе: 1- p0=3атм; 2- p0=5атм; 3- p0=70атм; 4- p0=100атм; 5- p0=120атм;6- p0=140атм; 7- p0=150атм.

- рациональное значение начального давления в гидроаккумуляторе равно 70 атм, при котором отношение амплитудного момента к номинальному, воздействующего на вал электродвигателя, является минимальной, равным 1,2.

- что изменение частоты серии кратковременных нагрузок ($0{,}25 \ldots 1\ с^{-1}$) практически не влияет на рациональное значение начального давления в гидроаккумуляторе, и незначительно изменяет амплитуду действующей динамической нагрузки (рис. 5,6);

- что изменение амплитуды кратковременной нагрузки (при одинаковой длительности воздействия), действующей со стороны конусной дробилки, практически не влияет на амплитуду момента, приходящего на вал электродвигателя (рис.7), поскольку нагрузки, действующие в дробилке, являются кратковременными, иногда по величине, превышающие номинальные в два и более раза, что очень важно в работе предохранительного устройства;

- что предложенное устройство способно демпфировать высокоинтенсивные нагрузки на исполнительном органе механизма, снижая их амплитуду в 6 раз (рис.7), а также защищать привод при кратковременных перегрузках.

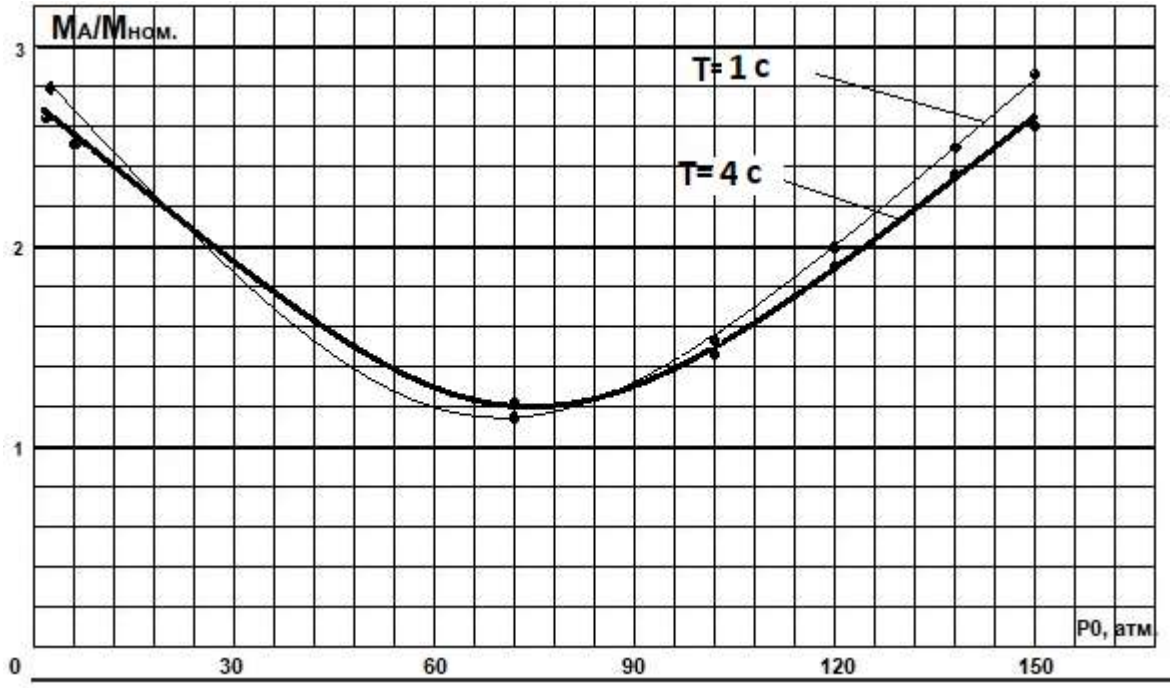


Рис.5 Зависимость амплитудного момента на валу электродвигателя от начального давления в гидроаккумуляторе предохранительного устройства

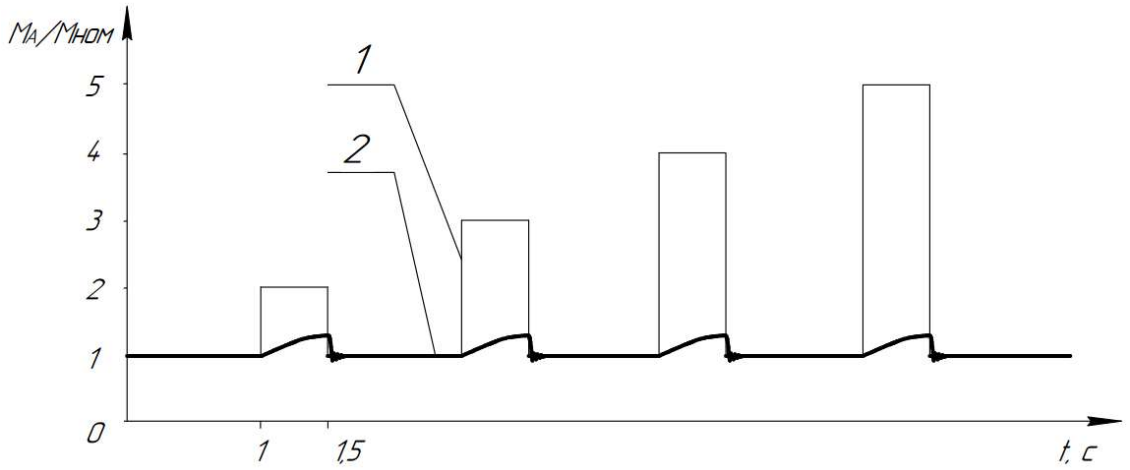


Рис. 6 Величина момента на валу электродвигателя при разной амплитуде нагрузки

1 – момент со стороны дробилки; 2 – момент на валу электродвигателя

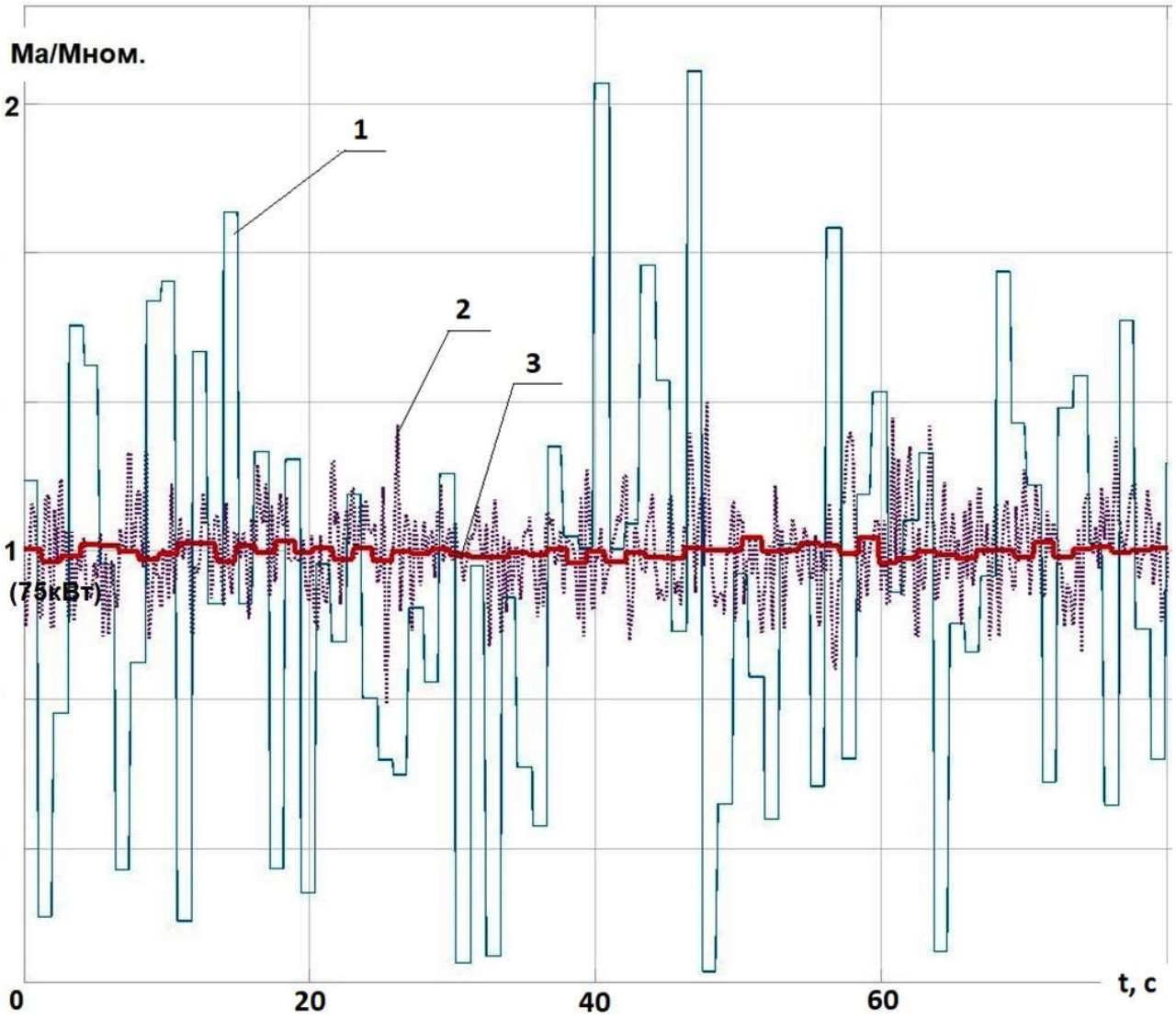


Рис.7 Зависимости момента при нагрузке, имитирующей дробление материала 1 – с жёсткой трансмиссией; 2 – с гидромеханическим предохранительным устройством; 3 – момент сопротивления, возникающий со стороны дробилки

Сравнение амплитуд действующих нагрузок на вал двигателя в приводе с упругим предохранительным устройством и с жёсткой связью показало высокую эффективность защиты привода упругодемпфирующим гидромеханическим устройством с дифференциальным передаточным механизмом.

В третьей главе описаны - методика и результаты экспериментальных исследований. При проведении экспериментальных исследований были поставлены следующие задачи: 1) создать опытный образец предохранительного устройства с дифференциальным зубчатым передаточным механизмом и установить его на испытываемое оборудование; 2) оценить нагрузки возникающие в приводе дробилки, при дроблении материала, путём измерения тока электродвигателя; 3) установить опытный образец в привод дробилки и проверить его функциональную работоспособность; 4) определить ток электродвигателя в процессе дробления с установленным в приводе предохранительным устройством; 5) провести анализ результатов опытных испытаний и сравнить их с полученными теоретическими результатами.

Испытания опытного образца разрабатываемого предохранительного устройства проводились на оборудовании дробильно –сортировочной установки предприятия ООО ПромМашКомплект», на конусной дробилке КСД-1200,

Для регистрации результатов экспериментов использовалось измерительное устройство – «регистратор многоканальный технологический РМТ 69L используемое для измерения силы тока двигателя, на конусной дробилке.

После настройки параметров измерительного устройства РМТ 69L был проведён помол щебня фракции 0 – 80 мм. В процессе помола измерялись колебания тока, возникающие при работе конусной дробилки, которые показали, что в процессе дробления возникают кратковременные нагрузки высокой интенсивности, вследствие чего ток двигателя превышает номинальное значение в 150 А, что свидетельствует о возникающих кратковременных перегрузках.

В рамках проведения работ совместно с предприятием ООО «ПромМашКомплект» был спроектирован и изготовлен опытный образец предохранительного устройства с зубчатым дифференциальным механизмом, рис.8.

Рис. 8. Опытный образец предохранительного устройства дробилки с зубчатым дифференциальным механизмом.

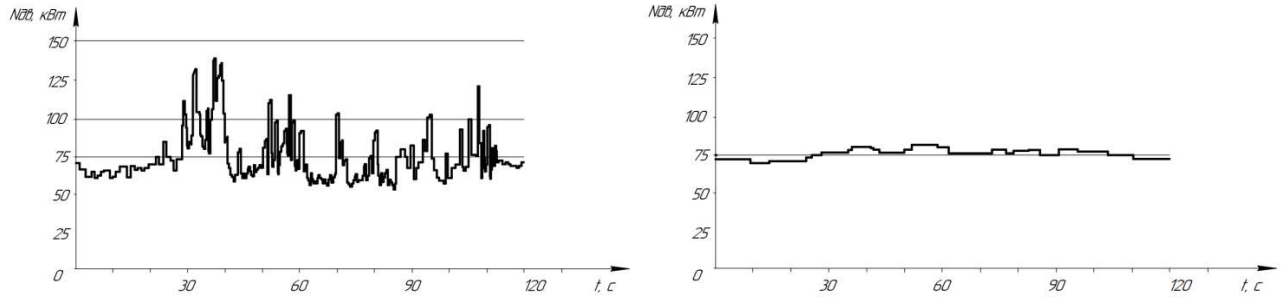
В качестве передаточного устройства выбран дифференциал ведущего моста автомобиля КАМАЗ, в гидросистему которого был установлен аксиально-плунжерный гидромотор 3102.112.

После установки опытного образца в привод конусной дробилки, был проведён пуск и визуальная оценка работоспособности предохранительного устройства.

При проведении экспериментов построены графики изменения тока электродвигателя дробилки (рис.9).

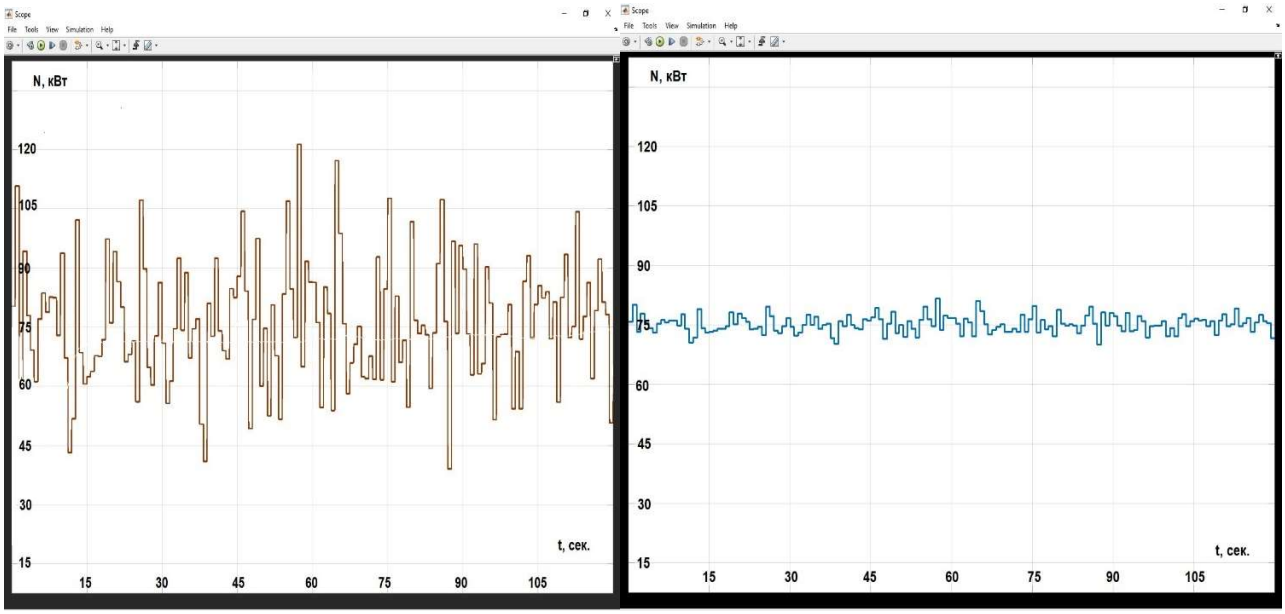
На данном этапе сравнили характер изменений значений мощности привода электродвигателя рис.10, до и после установки предохранительного устройства. На рис.11 представлены сравнительные результаты теоретических и экспериментальных исследований изменения напряжения в электродвигателе

при применении предохранительного устройства. Сравнение этих зависимостей подтверждает адекватность математической модели.



а) б)

Рис.10. Экспериментальные графики изменения мощности привода дробилки: а) до установки предохранительного устройства в привод, б) с предохранительным устройством в приводе



а) б)

Рис.11. Теоретические графики изменения напряжения в приводе: а) до установки предохранительного устройства в привод, б) с предохранительным устройством в приводе

В результате проведения опытных испытаний было установлено, что:

- разработанный опытный образец предохранительного устройства дробилки подтверждает работоспособность новой конструкции;

- предохранительное устройство эффективно снижает негативное воздействие кратковременных высокоинтенсивных нагрузок на привод дробилки КСД-1200 в среднем в 6 раз.

- характер полученных в результате опытных испытаний значений тока электродвигателя подтверждает результаты теоретических исследований.

В **четвертой главе** представлена разработанная методика и рекомендации по проектированию гидромеханических предохранительных устройств в приводе дробилки, с учётом результатов проведённых исследований.

Основными конструктивными параметрами механизма предохранительного устройства являются передаточное отношение конического дифференциала, а также конструктивные параметры зубчатых колес.

Для гидросистемы основными параметрами являются: тип и рабочий объем гидромашины, начальное и максимальное давление в гидросистеме, объём гидроаккумулятора, диаметры проходных отверстий трубопроводов напорной и сливной магистралей.

Гидравлическая и механическая части предохранительного устройства, кинематически связаны с гидромашиной, поэтому момент на валу гидромашины, регулируемый давлением в напорной магистрали гидропривода и зависящий от усилия на исполнительном органе дробилки является общим параметром, как для гидравлической, так и для механической частей предохранительного устройства.

Основными параметрами функционирования предохранительного устройства являются: начальное давление в гидроаккумуляторе, передаваемый крутящий момент, предельное давление в гидросистеме и время срабатывания.

Методика расчета предполагает расчет рациональных параметров элементов гидросистемы предохранительного устройства, на базе зависимостей, полученных теоретическим путем, а также расчет параметров механических элементов предохранительного устройства.

Разработанная методика расчёта содержит следующие этапы:

- рекомендации по выбору типа гидромашины;

- проектировочный и проверочный расчёт основных конструктивных параметров передаточного механизма;

- методика расчёта определения рациональных конструктивных параметров гидросистемы предохранительного устройства, с учётом результатов теоретических исследований;

- рекомендации по настройке при пуско-наладочных работах предохранительного устройства и начальных параметров гидросистемы, в зависимости от характера нагрузок и режима работы конусной дробилки.

По предложенной методике разработан и создан опытный образец предохранительного устройства для экспериментальных исследований, а также разработан эскизный проект конструкции гидромеханического предохранительного устройства с зубчатым передаточным механизмом для привода конусной дробилки КСД-1200 предприятия ООО «ПромМашКомплект».

В приложениях приведены копии патентов РФ на изобретение, копии

актов о экспериментальных исследованиях и внедрении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основе теоретических и экспериментальных исследований дано решение актуальной научной задачи повышения эффективности защиты привода конусной дробилки от динамических нагрузок и перегрузок путем внедрения нового гидромеханического предохранительного устройства с заданными рациональными параметрами, что способствует увеличению срока эксплуатации элементов приводов конусных дробилок и имеет важное научно-практическое значение для горной промышленности.

Основные научные результаты, выводы и рекомендации, полученные лично автором:

1. Анализ отказов конусных дробилок и способов их предотвращения позволяет обосновать необходимость установки гидромеханического предохранительного устройства с зубчатым дифференциалом, способного снижать влияние динамических нагрузок на элементы привода и предохранять привод конусной дробилки от воздействия перегрузок.

2. В результате математического моделирования получены зависимости, позволяющие определить и обосновать рациональные параметры гидромеханического предохранительного устройства. Так, например, для дробилки КСД-1200 (используемой при проведении опытных испытаний) рациональное значение начального давления в гидроаккумуляторе равно 70 атм, при этом амплитуда момента, действующего непосредственно на вал электродвигателя, является минимальной.

3. Установлено влияние частоты и амплитуды кратковременных нагрузок на параметры предохранительного устройства. Частоты кратковременных нагрузок и её изменение в интервале от 0,25 до 1 Гц не значительно меняет амплитуду динамической нагрузки, действующей на привод и не влияет на рациональное значение начального давления в гидроаккумуляторе. Изменение амплитуды кратковременной нагрузки (при одинаковой длительности её воздействия, действующей со стороны конусной дробилки, практически не влияет на амплитуду момента на валу электродвигателя. Поскольку нагрузки, действующие в дробилке, являются кратковременными, но иногда превышающие номинальную величину в два и более раза, то такое свойство предохранительного устройства является важным.

4. Экспериментально подтверждена работоспособность гидромеханического предохранительного устройства. Графики изменения потребляемой мощности, полученные теоретическим и экспериментальным путём подтверждают адекватность имитационной и математической модели.

5. Проведённые экспериментальные исследования подтверждают, что предохранительное устройство эффективно снижает амплитуду кратковременных интенсивных нагрузок - крутящего момента. Полученные

теоретическим и экспериментальным путём амплитудные значения потребляемой электродвигателем мощности снижаются примерно в 6 раз по отношению к приводу без предохранительного устройства.

6. Разработана методика расчета параметров гидромеханического предохранительного устройства с дифференциальным зубчатым передаточным механизмом, позволяющая рассчитать и настроить рациональные параметры гидросистемы устройства под заданные требования и условия эксплуатации конусных дробилок.

7. Разработано принципиально новое комбинированное гидромеханического предохранительного устройство, отличающееся от ранее разработанных тем, что гидросистема предохранительного устройства связана с гидроцилиндрами подъёма чаши напорной линией с установленным в ней управляемым краном, позволяющая согласовать работу предохранительного устройства и устройства регулирования щели, для исключения остановки работы дробилки под завалом и при попадании недробимого тела в зону дробления. На разработанную схему подана заявка и выдан патент РФ на изобретение.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки РФ и изданиях из базы данных Scopus

1. Белов Н.В., Бородина М.Б., Смирнова О.А., Часовских А.С. Анализ отказов элементов конусных дробилок и причин их возникновения // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2021. № 3. С. 17-27

2. Белов Н.В., Бородина М.Б., Груздова О.А., Мироненко С.В. Моделирование нагрузок в приводе конусной дробилки // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2022. № 12. С. 93-102

3. Белов Н.В. Экспериментальные исследования гидромеханического предохранительного устройства в приводе конусной дробилки // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2023. – № 23. – С. 197-204

Результаты изобретательской деятельности

4. Белов Н.В., Бородина М.Б., Андрюшенков Д.Н. Конусная дробилка. Патент РФ № 2744272, 04.03.2021. Заявка№2020107419

5. Белов Н.В., Бородина М.Б., Груздова О.А., Часовских А.С. Гидромеханическое предохранительное устройство конусной дробилки. Патент РФ № 279248322.03.2023. Заявка№2022129319.

Публикации в других изданиях

6. Исмоилова С.Г., Белов Н.В., Бойко П.Ф. Повышение сроков службы эксцентриков конусных дробилок. Сборник материалов пятнадцатой Всероссийской научно-практической конференции студентов и аспирантов, Том I, Старый Оскол, 2018. С. 153-156.

7. Новоточинов А.П., Белов Н.В., Бойко П.Ф. Модернизация эксцентрикового узла конусных дробилок. Сборник материалов пятнадцатой Всероссийской научно-практической конференции студентов и аспирантов, Том I, Старый Оскол, 2018. С. 170-173.
8. Новоточинов А.П., Белов Н.В., Бородина М.Б. Защита привода конусной дробилки ККД-1500/180 от ударных нагрузок. Сборник материалов Шестнадцатой Всероссийской научно-практической конференции студентов и аспирантов, СТИ НИТУ «МИСиС», Старый Оскол. 2019. С. 157-160.
9. Белов Н.В., Бородина М.Б., Смирнова О.А., Часовских А.С. Неисправности конусных дробилок ККД 1500/180. Сборник материалов Шестнадцатой Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство», СТИ НИТУ «МИСиС», Старый Оскол. 2019. С. 157-160
10. Бородина М.Б., Белов Н.В. Повышение энергоэффективности приводных систем горного и металлургического оборудования. В сборнике: Энерго- и ресурсосбережение – XXI век. Материалы XVII международной научно-практической конференции. Орёл. 2019. С. 270-274.
11. Белов Н.В., Смирнова О.А., Бородина М.Б. Способы снижения отказов конусных дробилок. Сборник материалов Семнадцатой Всероссийской научно-практической конференции студентов и аспирантов, СТИ НИТУ «МИСиС», Старый Оскол. 2020. С. 169-173.
12. Белов Н.В., Груздова О.А., Бородина М.Б. Надёжность конусных дробилок. В сборнике: Современные материалы и технологии восстановления и упрочнения деталей промышленного оборудования. Сборник материалов первой международной научно-практической конференции. Старый Оскол, 2021. С.10-18
13. Белов Н.В., Груздова О.А., Бородина М.Б. Повышение энегроэффективности приводных систем дробильно-измельчительного оборудования. В сборнике: Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство. XVII всероссийская научно-практическая конференция. Старый Оскол, 2021. С. 206-211.
14. Белов Н.В., Бородина М.Б., Груздова О.А. Моделирование предохранительного устройства конусной дробилки. В сборнике: Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство. Материалы девятнадцатой Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Старый Оскол, 2023. С. 199-209
15. Белов Н.В. Обоснование выбора типа гидромашины для предохранительного устройства конусной дробилки. В сборнике: Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство. Материалы девятнадцатой Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Старый Оскол, 2023. С. 210-215
16. Белов Н.В., Бородина М.Б., Мироненко С.В. Моделирование динамики работы предохранительного устройства в приводе конусной дробилки // Научно-технический вестник Поволжья. –2023. – №11. – С. 26-32

17. Сергиев А.П., Белов Н.В., Макаров А.В., Владимиров А.А. Тенденции совершенствования конусных дробилок. Сборник материалов Пятнадцатой Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство», СТИ НИТУ «МИСиС», Старый Оскол. 2018. С. 263-268.

Приложение 1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2744272

КОПУСНАЯ ДРОБИЛКА

Патентообладатель: ***Публичное акционерное общество "Уральский завод тяжелого машиностроения" (RU)***

Авторы: ***Белов Николай Владимирович (RU), Бородина Марина Борисовна (RU), Андрюшенков Дмитрий Николаевич (RU)***

Заявка № **2020107419**
Приоритет изобретения **18 февраля 2020 г.**
Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации **04 марта 2021 г.**
Срок действия исключительного права
на изобретение истекает **18 февраля 2040 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

Приложение 2

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2792483

Гидромеханическое предохранительное устройство конусной дробилки

Патентообладатель: ***Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский технологический университет "МИСИС" (RU)***

Авторы: ***Белов Николай Владимирович (RU), Бородина Марина Борисовна (RU), Груздова Оксана Андреевна (RU), Часовских Андрей Сергеевич (RU)***

Заявка № **2022129319**
Приоритет изобретения **11 ноября 2022 г.**
Дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **22 марта 2023 г.**
Срок действия исключительного права на изобретение истекает **11 ноября 2042 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

Приложение 3

Соглашение о намерениях

г.Старый Оскол «20» 01 2022г.

Общество с ограниченной ответственностью «ПромМашКомплект» в лице директора Чекрыгина Игоря Сергеевича, действующего на основании Устава, с одной стороны «Сторона 1», и коллектива авторов в лице Белова Н.В., с другой стороны «Сторона 2», а вместе именуемые «Стороны», заключили настоящее соглашение о нижеследующем:

1. Стороны руководствуются по существу настоящего Соглашения действующим законодательством Российской Федерации, прямо или косвенно регламентирующим отношения Сторон, учредительным и внутренними документами Сторон, а также нормативно-правовыми актами, которые могут быть приняты компетентными органами в период действия настоящего соглашения.

2. Целью взаимного сотрудничества является - Выбор конструкции, разработка, исследование и опытные испытания промышленного образца гидромеханического предохранительного устройства для конусной дробилки.

3. Стороны пришли к соглашению, что их производственный и финансовый потенциал дает им основание установить долгосрочное и взаимовыгодное сотрудничество в области экспериментальных исследований гидромеханического предохранительного устройства на дробилке КСД-1200.

4. Основные направления сотрудничества Сторон:
Сторона 2
- разработка конструкторской документации на основании проведенных исследований для изготовления гидромеханического предохранительного устройства.
– изготовление промышленного образца, разработка конструктивных изменений действующего оборудования для монтажа гидромеханического предохранительного устройства в привод дробилки КСД -1200, с обязательным условием восстановления в проектное состояние.
– монтаж, экспериментальные исследования, промышленные испытания при работе в приводе дробилки и демонтаж гидромеханического предохранительного устройства с восстановлением проектного состояния привода.
Сторона 1
- предоставление оборудования на период проведения экспериментальных исследований и промышленных испытаний.

5. Для реализации основных направлений сотрудничества, предусмотренных пунктом 4 настоящего Соглашения, Стороны обязуются выполнить следующее:
Привлечь необходимое количество персонала для обеспечения выполнения основных направлений сотрудничества. Разработать конструкторскую документацию для изготовления гидромеханического устройства, изготовить промышленный образец и провести исследования.

6. Стороны обязуются не вмешиваться в оперативную деятельность друг друга.

7. Стороны назначают своих полномочных представителей для проведения консультаций и переговоров на предмет реализации предусмотренных настоящим Соглашением договоренностей.

8. Любые изменения и дополнения к настоящему Соглашению действительны при условии, если они совершенны в письменной форме и подписаны уполномоченными представителями Сторон.

9. Настоящее Соглашение составлено в двух аутентичных экземплярах, по одному экземпляру для каждой из Сторон.

10. Подписи сторон:

От имени ООО «ПромМашКомплект»
ИНН 3128123964, ОГРН 1173123016879, КПП 780101001
(наименование стороны)
директор
(должность)
Чекрыгин И.С.
(Ф.И.О.)

От имени коллектива авторов
(наименование стороны)
к.т.н., доцент, Бородина М.Б.

аспирант Белов Н.В.
(должность, Ф.И.О.)

Приложение 4

УТВЕРЖДАЮ

Директор ООО «ПромМашКомплект»

_____Чекрыгин И.С.

«_24_»_____мая_____2021г.

АКТ

Проведения испытаний гидромеханического предохранительного устройства

«_24_»_____мая_____2021г г.Старый Оскол

В период с 20 октября 2020 года по 21 мая 2021 года на базе Открытого общества с ограниченной ответственностью «ПромМашКомплект» проведены: промышленные и экспериментальные исследования - гидромеханического предохранительного устройства, изготовленного и установленного в привод дробилки КСД-1200 на дробильно – сортировочной установке. В период проведения исследований регистрация показаний работы привода дробилки фиксировалась до внесения конструктивных изменений и после модернизации согласно разработанной конструкторской документации по установке гидромеханического предохранительного устройства в привод дробилки.

При разработке опытного образца гидромеханического предохранительного устройства с зубчатым дифференциалом для привода конусной дробилки использовались основные идеи:

1) Патента РФ RU 2744272 C1. Конусная дробилка, авторы Белов Н.В., Бородина М.Б., Андрюшенков Д.Н.

2) Статьи: «Повышение энергоэффективности приводных систем горного и металлургического оборудования», авторы: Белов Н.В., Бородина М.Б., издана в сборнике: Энерго- и ресурсосбережение – XXI век. Материалы XVII международной научно-практической конференции. 2019. С. 270-274.

Цель испытаний: исследование работы гидромеханического предохранительного устройства в приводе конусной дробилки при возникновении динамических нагрузок (ударно-импульсных) и случайных перегрузок, возникающих в процессе работы.

Результаты испытаний:

1) Выполнены замеры токовой нагрузки и моментных перегрузок, возникающих при работе конусной дробилки КСД-1200 с проектным приводом. Результаты испытаний фиксировались регистратором PMT 69L.

2) Проведены замеры токовой нагрузки после монтажа гидромеханического предохранительного устройства в привод дробилки КСД – 1200 при дроблении материала, а также искусственно созданы условия перегрузки (прохождение не дробимого тела через зону дробления).

3) После обработки полученных данных построены графики изменения токовой нагрузки при работе конусной дробилки под нагрузкой с гидромеханическим предохранительным устройством и без него.

4) При возникновении перегрузки, предохранительное устройство сработало, защитив привод. Но это спровоцировало остановку дробилки под завалом. При этом устройство разгрузки дробилки от недробимых тел не успевало среагировать. Принято решение доработать конструкцию предохранительного устройства таким образом, чтобы согласовать его работу с устройством разгрузки дробилки от недробимых тел.

Выводы:

1) Опытный образец подтверждает работоспособность разработанного гидромеханического предохранительного устройства для защиты привода конусной дробилки, характерным отличием которого является: плавный пуск, повышенная податливость и возможность увеличивать угол относительного закручивания полумуфт, высокой точностью и стабильностью срабатывания, способного передавать большие крутящие моменты, с возможностью изменять параметры устройства даже в процессе работы.

2) Эффективно снижает негативное воздействие кратковременных высокоинтенсивных нагрузок в 3-4 раза (что подтверждает результаты теоретических испытаний);

3) Характер полученных в результате опытных испытаний значений тока электродвигателя подтверждает результаты теоретических исследований.

4) По результатам выявленного конструктивного недостатка принято решение доработать конструкцию, а результаты доработки защитить патентом.

Руководитель к.т.н., доцент Бородина М.Б

Ответственный исполнитель, аспирант Белов Н.В.

Приложение 5

УТВЕРЖДАЮ

Директор

ООО «ПромМашКомплект»

_____И.С.Чекрыгин

«05» декабря 2022г.

Акт

Научно-технической комиссии о реализации научных результатов кандидатской диссертации Белова Николая Владимировича на тему «Обоснование параметров гидромеханического предохранительного устройства привода конусной дробилки»

Научно-техническая комиссия в составе: директора Чекрыгина И.С., конструктора Перкиной Е.В., начальника цеха Лушникова И.Н., составили настоящий акт о том, что были использованы на предприятии при расчёте и проектировании гидромеханического предохранительного устройства с дифференциальным передаточным механизмом для защиты привода конусной дробилки КСД – 1200 научные результаты диссертационной работы Николая Владимировича Белова:

1.Разработана методика расчета параметров, позволяющая проектировать гидромеханические предохранительные устройства с зубчатым передаточным механизмом для приводов конусных дробилок, эффективные с точки зрения минимизации динамических нагрузок на привод.

2. По методике разработан эскизный проект конструкции гидромеханического предохранительного устройства с дифференциальным зубчатым передаточным механизмом, обладающий свойствами демпфирования динамических нагрузок и защиты привода конусной дробилки от перегрузок.

3. Разработан, изготовлен и исследован в приводе дробилки КСД – 1200 опытный образец гидромеханического предохранительного устройства с дифференциальным передаточным механизмом, характерным отличием которого является: плавный пуск, повышенная податливость и возможность увеличивать угол относительного закручивания полумуфт, высокой точностью и стабильностью срабатывания, способного передавать большие крутящие моменты, с возможностью изменять параметры устройства даже в процессе работы привода и обладающего функцией самовосстановления после срабатывания.

4. Проведение испытаний опытного образца при возникновении перегрузки, показало, что устройство разгрузки дробилки от недробимых тел не успевало среагировать. Принято решение доработать конструкцию предохранительного устройства таким образом, чтобы согласовать его работу с устройством разгрузки дробилки от недробимых тел. (Заявка о выдаче патента на изобретение №2022129319(064210) Гидромеханическое предохранительное устройство конусной дробилки от 11.11.2022 года, авторы Белов Н.В., Бородина М.Б., Груздова О.А, Часовских А.С.).

На дробильном комплексе предприятия ООО «ПромМашКомплект» принято решение к будущему внедрению доработанного опытного образца в привод конусной дробилки КСД - 1200.

Конструктор Перкина Е.В.

Начальник цеха Лушников И.Н.