

На правах рукописи



Булавин Константин Алексеевич

ДИНАМИКА ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ  
УПРУГОДЕМПФИРУЮЩИХ МУФТ С  
ВИНТОВЫМ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМ МЕХАНИЗМОМ

01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов  
и аппаратуры

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Курск – 2013

Работа выполнена в Старооскольском технологическом институте им. А.А.Угарова (филиале) Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС».

Научный руководитель: кандидат технических наук  
**Бородина Марина Борисовна**

Официальные оппоненты: **Крюков Владимир Алексеевич**,  
доктор технических наук, профессор,  
Тульский государственный университет,  
профессор кафедры проектирование механизмов и  
деталей машин

**Чернышев Владимир Иванович**,  
доктор технических наук, профессор,  
Государственный университет – учебно-научно-  
производственный комплекс, г. Орел,  
профессор кафедры динамика и прочность  
машин

Ведущая организация: Воронежский государственный технический  
университет

Защита состоится 11 декабря 2013 г. в 16<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.105.01 при Юго-Западном государственном университете по адресу: 305040, г.Курск, ул. 50 лет Октября, 94 (конференц-зал).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Юго-Западного государственного университета

Автореферат разослан «7» ноября 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 212.105.01



Лушников Борис Владимирович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Практически все типы технологических машин: металлургических, горнорудных, производств строительных материалов работают в режиме периодического воздействия динамических нагрузок и перегрузок (статического и динамического характера), следствием которых являются поломки деталей в результате усталостных и статических разрушений. Это, кроме значительных затрат на восстановление, приводит к существенным потерям производства.

Наиболее универсальный, простой и эффективный метод снижения колебаний нагрузок и защиты приводов тяжело нагруженных технологических машин от перегрузок – установка в приводах предохранительных упругодемпфирующих муфт повышенной податливости. В настоящее время не существует таких муфт, рассчитанных на большие моменты, способных эффективно демпфировать значительные колебания нагрузок и удовлетворяющих всем требованиям, предъявляемым к муфтам для тяжело нагруженных технологических машин.

Наиболее перспективными для применения в тяжело нагруженных технологических машинах являются гидромеханические предохранительные упругодемпфирующие муфты. Они обладают всеми свойствами и преимуществами гидросистем: сравнительно малыми габаритными размерами, высоким быстродействием, высоким КПД, хорошими динамическими характеристиками, способностью эффективно демпфировать значительные колебания нагрузок, имеют высокую точность срабатывания, надежность и хорошую управляемость.

В настоящее время при проектировании тяжело нагруженных приводов началась разработка структурных схем и конструкций гидромеханических муфт с винтовым исполнительным механизмом. Исследования по динамике работы таких муфт в режиме упругого демпфирования отсутствуют. В связи с этим задача исследования закономерностей динамики функционирования предохранительных упругодемпфирующих гидромеханических муфт является актуальной.

Результаты по теме диссертации были получены в ходе выполнения государственной НИР (№ Гос. регистр. 01200108881), а также в рамках госконтракта с «Государственным фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» №3425/5861 от 18 августа 2005 г. (№ Гос. регистр. 0120.0 600996).

**Объект исследования** – предохранительная упругодемпфирующая самовосстанавливающаяся гидромеханическая муфта с винтовым исполнительным механизмом.

**Предмет исследования** – динамические процессы и закономерности работы гидромеханических упругодемпфирующих муфт с винтовым исполнительным механизмом, в режиме упругого демпфирования технологических нагрузок.

**Цель работы** – совершенствование гидромеханических упругодемпфирующих муфт с винтовым исполнительным механизмом путём выявления особенностей работы в режиме упругого демпфирования, научное обоснование методики и рекомендаций по проектированию гидромеханических муфт.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Разработать математическую модель динамики работы гидромеханической муфты и исследовать в режиме упругого демпфирования.
2. Определить рациональные начальные параметры гидросистемы гидромеханической муфты.
3. Определить закономерности работы гидромеханических муфт в режиме упругого демпфирования основных технологических нагрузок.
4. Провести экспериментальные исследования работы макета муфты на стенде при внезапно приложенной и импульсной нагрузках.
5. Провести систематизацию муфт с учётом комплекса новых технических решений.

**Методы исследований.** Теоретические исследования базировались на фундаментальных положениях соответствующих разделов теоретической механики, дифференциального и интегрального исчисления, теории оптимального управления, математического моделирования с применением пакета Matlab и Mathcad.

Экспериментальные исследования проводились на разработанном и изготовленном специализированном испытательном стенде с применением современной цифровой аппаратуры обработки данных, в частности платы АЦП L 154, и микропроцессорной техники. Программное обеспечение разработано на языке C++ в среде Borland C++ Builder 5.

**Научная новизна работы и научные положения, выносимые на защиту:**

1. Математическая модель упругодемпфирующей гидромеханической муфты с передаточным механизмом винт-гайка, основанная на совместном решении дифференциальных уравнений динамики передаточного механизма муфты и зависимостей, описывающих механическую характеристику электродвигателя и гидромеханику работы гидропневмодемпера с учётом сопротивления жидкости в управляемом гидродресселе гидросистемы, позволяющая определить динамические коэффициенты муфты и закономерности динамики процесса упругого демпфирования основных технологических нагрузок при разных начальных параметрах муфты.

2. Научное обоснование определения рациональных начальных параметров гидросистемы гидромеханической упругодемпфирующей муфты, основанное на принципе Максимиума Понтрягина, позволяющее минимизировать динамические нагрузки, передаваемые муфтой на привод.

3. Закономерности динамики работы муфты в режимах упругого демпфирования основных технологических нагрузок в зависимости от начальных параметров гидросистемы муфты (начального объема и давления в гидропневмодемпере, параметров и вида гидродресселя), подтверждающие преимущества предварительно напряженных упругодемпфирующих гидромеханических муфт с исполнительным механизмом винт-гайка.

4. Обобщённая классификация гидромеханических муфт с различными видами исполнительных механизмов, основанная на комплексе новых техниче-

ских решений, позволяющая создавать структурно-функциональные схемы и конструкции муфт с требуемыми свойствами.

**Практическая полезность работы.** Созданы новые схемы предохранительных упругодемпфирующих гидромеханических муфт, отличающихся от известных повышенной податливостью и значительным углом относительного закручивания полумуфт (более  $45^0$ ), высокой точностью и стабильностью срабатывания, способные передавать большие моменты (более  $0,2 \text{ МН} \cdot \text{м}$ ) и обладающие функцией самовосстановления после срабатывания. Различные виды исполнительных механизмов позволяют сконструировать муфту для различных приводов и нагрузок. Созданные схемы защищены четырьмя патентами на изобретения РФ, являются новым видом гидромеханических муфт и удовлетворяют всем основным требованиям, предъявляемым к муфтам для тяжело нагруженных технологических машин.

Разработанные методика и алгоритм расчета позволяют создавать рациональные с точки зрения минимизации динамических нагрузок конструкции гидромеханических муфт с исполнительным механизмом винт-гайка.

Разработанная конструкция предохранительной упругодемпфирующей самовосстанавливающейся гидромеханической муфты с винтовым исполнительным механизмом для привода вращающейся печи для производства извести позволяет за счет значительного угла относительного закручивания полумуфт (более  $90^0$ ), возможности регулирования величины жесткости и демпфирования снизить колебательные нагрузки в приводе и надежно защитить привод от поломок.

**Реализация результатов работы.** В научно-технической фирме ООО «СОПИН-Сервис» внедрены: методика расчета основных параметров гидростатической муфты с передаточным устройством типа винт-гайка и разработанный эскизный проект этой муфты. Спроектирован и изготовлен макет гидростатической муфты и стенд для ее испытаний. Макет и стенд внедрены в учебный процесс. Разработана конструкция гидростатической предохранительной упругодемпфирующей самовосстанавливающейся муфты для привода вращающейся печи для производства извести на ОАО «ОЭМК».

**Апробация работы.** Материалы исследований докладывались и получили положительную оценку на: Международной научно-технической конференции «Вопросы проектирования, эксплуатации технических систем в металлургии, машиностроении, строительстве» (Старый Оскол, 1999); Международной научной конференции «Образование, наука, производство и управление в XXI веке» (Старый Оскол, 2004); Научно-технической конференции ОАО «ОЭМК» (Старый Оскол, 2005); Международной научно-практической конференции «Образование, наука, производство и управление» (Старый Оскол, 2006, 2009); IV Международном научном симпозиуме (Орел, 2010), V Международном научном симпозиуме (Орел, 2013). Диссертационная работа была рассмотрена и одобрена на расширенном заседании кафедры мехатроники и международного инжиниринга Государственного университета – учебно-научно-производственного комплекса, г. Орел.

**Публикации.** Основное содержание диссертации отражено в восемнадцати научных работах, из них 3 – в рецензируемых журналах и изданиях, в том числе получено четыре патента РФ на изобретения и два патента на полезную модель.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, библиографического списка, включающего 103 наименования, и 4 приложений. Работа изложена на 148 листах машинописного текста, содержит 38 рисунков, 5 таблиц.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### 1. Обоснование способа защиты технологических машин от динамических нагрузок

Проведен анализ нагрузок в приводах технологических машин. Результаты исследований защиты приводов тяжело нагруженных машин представлены в работах таких авторов, как: Г.В.Сопилкин, В.Г.Артюх, Г.В.Артюх, В.И.Большаков, В.В.Веренев, В.Я.Кель., Е.Н.Корнеева, А.В.Крутик, В.Ф.Кучеренко, А.В.Нижник, В.Я.Седуш, В.В.Смирнов, М.П.Шишкарёв, Р.А.Яковлев, О.В.Яременко

Были исследованы нагрузки в приводе вращающейся печи (рис. 1).

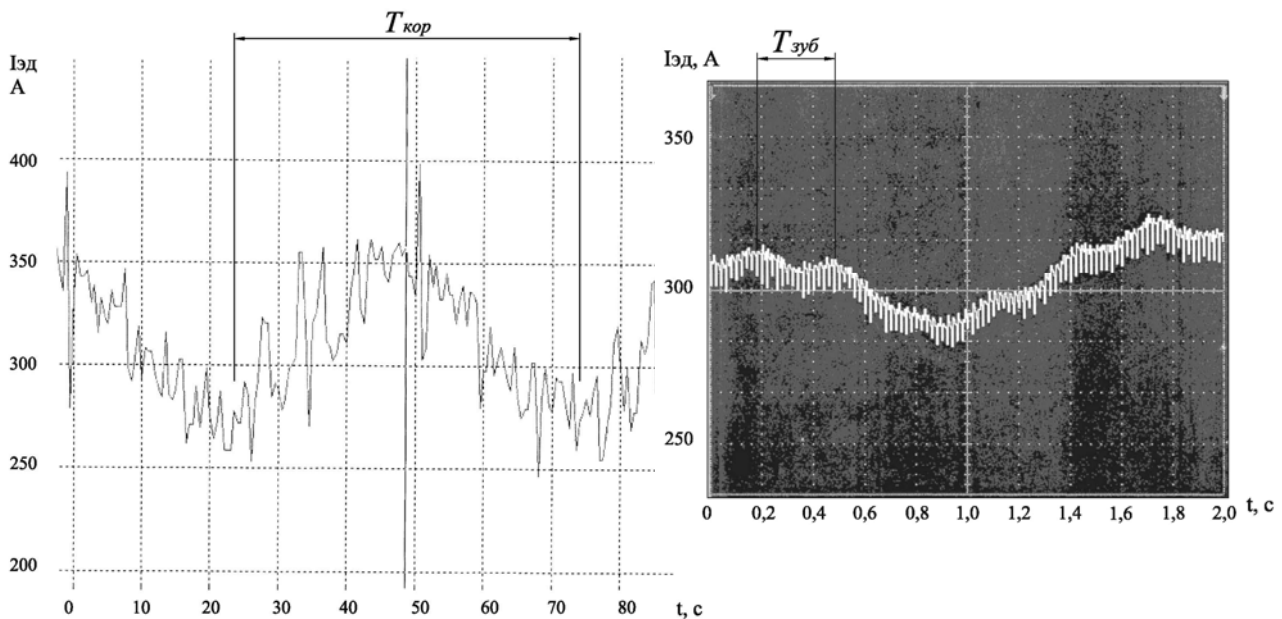


Рис.1. График тока электродвигателя вращающейся печи

Колебания низкой частоты вызваны кривизной оси корпуса 1 печи и происходят с периодичностью его вращения  $T_{кор}=50$  с (при  $n_{кор}=1,2$  об/мин) и амплитудой  $A_{кор}\approx 0,14M_{ном}$ . Апероодические колебания с амплитудой  $0,06M_{ном}\dots 0,16M_{ном}$  вызваны нецилиндричностью бандажей. Колебания с периодом  $T_{зуб}=0,31$  с вызваны входом в зацепление зубьев прямозубой открытой зубчатой передачи. Они имеют амплитуду  $0,02M_{ном}$ .

Установлено, что перспективной является защита приводов тяжело нагруженных машин при помощи предохранительных упругодемпфирующих гидромеханических муфт.

Анализ известных технических решений показал, что наиболее рациональным является применение гидромеханических муфт с винтовым исполнительным механизмом. Работы, исследующие динамику работы таких муфт в режиме упругого демпфирования технологических нагрузок, отсутствуют.

## 2. Моделирование работы муфты в режиме упругого демпфирования

На рисунке 2 приведена конструкция гидромеханической муфты с винтовым исполнительным механизмом, наиболее подходящая для применения в приводе вращающейся печи.

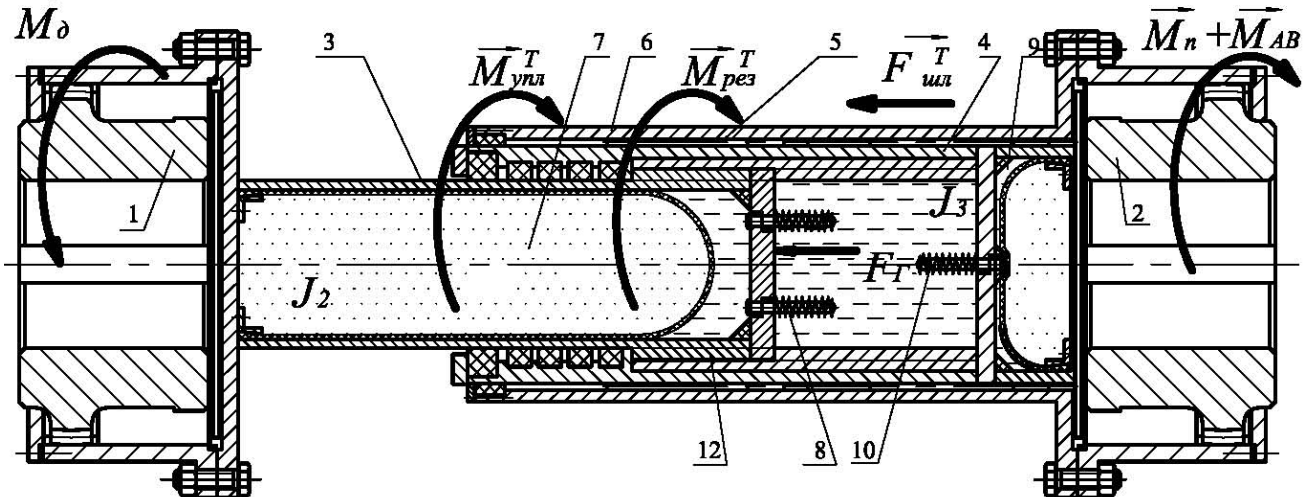


Рис. 2. Гидромеханическая предохранительная упругодемпфирующая муфта с передаточным устройством в виде механизма винт-гайка

При возрастании момента на муфте полумуфты 1 и 2, а вместе с ними корпус 4 (гайка) и шток 3 гидроцилиндра (винт) относительно проворачиваются. Корпус 4 гидроцилиндра перемещается по несамотормозящейся резьбе 12 и шлицам 5 влево (см. рис. 2), и часть рабочей жидкости перетекает в гидродемпфер 7 (установленный в гидроцилиндре 3) до тех пор, пока не установится равновесное состояние. При этом происходит упругое демпфирование колебаний. Если момент на муфте превышает допустимый, то корпус гидроцилиндра 4 смещается в левое (см. рис. 2) положение и перемещает золотники 8 и 10. Гидродемпфер 7 отсекается от полости гидроцилиндра, а гидроаккумулятор 9 (рабочее давление в котором в этот момент значительно ниже, чем в полости гидроцилиндра) соединяется с полостью гидроцилиндра, и остатки рабочей жидкости перетекают туда. Шлицы 5 на корпусе гидроцилиндра выходят из зацепления со шлицами на втулке 6, что обеспечивает размыкание полумуфт 1 и 2. После отключения привода корпус гидроцилиндра 4 смещается вправо под действием давления жидкости в гидроаккумуляторе 9, золотники 8 и 10 занимают исходное положение, жидкость из гидродемпфера перетекает в полость гидроцилиндра, полумуфты 1 и 2 останавливаются и занимают исходное положение. Муфта, таким образом, автоматически приходит в исходное состояние, то есть самовосстанавливается.

При разработке математической модели муфты были приняты следующие допущения:

1) процессы, происходящие при работе гидropневматического демпфера, являются изотермическими;

2) коэффициент трения сопрягаемых поверхностей принимается постоянным;

3) предполагаем механическую характеристику электродвигателя постоянного тока линейной;

4) момент инерции корпуса вращающейся печи обжига извести, открытой зубчатой передачи, полумуфты 1 (см.рис.2) приводим к винту 3 (момент инерции  $J_2$ ); момент инерции редуктора печи, полумуфты 2 и шлицевой втулки 6 приводим к гайке 4 (момент инерции  $J_3$ ). Момент инерции, движущий момент и скорость электродвигателя приводим к массе  $J_1$ , связанной с полумуфтой 1 жесткостью  $c$ ;

5) момент жидкостного трения при дросселировании рабочей жидкости через золотники 8 (см.рис. 2) представим в виде

$$M_{жид}^T = \mu(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3) + \nu(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3)^2 \text{sign}(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3),$$

где  $\mu$ ,  $\nu$  - параметры демпфера, характеризующие ламинарное и турбулентное течение жидкости соответственно,

$\varphi_2, \varphi_3$  - углы поворота масс  $J_2$  и  $J_3$  соответственно.

Так как муфта является предварительно напряженной, то процесс работы состоит из двух этапов. Если момент упругости в муфте меньше, чем момент предварительного напряжения, то уравнения движения для трехмассовой модели имеют вид

$$\begin{cases} J_1 \ddot{\varphi}_1 = i_{ред}^2 \cdot k_{эд} \cdot (\omega_0 / i_{ред} - \dot{\varphi}_1) - c(\varphi_1 - \varphi_2); \\ J_2 \ddot{\varphi}_2 = c(\varphi_1 - \varphi_2) - c_{\max}(\varphi_2 - \varphi_3); \\ J_3 \ddot{\varphi}_3 = -M_n + c_{\max}(\varphi_2 - \varphi_3). \end{cases}$$

При превышении моментом упругости момента предварительного напряжения в работу включается гидромеханический преобразователь и движение системы описывается уравнениями:

$$\begin{cases} J_1 \ddot{\varphi}_1 = i_{ред}^2 \cdot k_{эд} \cdot (\omega_0 / i_{ред} - \dot{\varphi}_1) - c(\varphi_1 - \varphi_2); \\ J_2 \ddot{\varphi}_2 = c(\varphi_1 - \varphi_2) + (M_{Г0} + c_{\min}(\varphi_2 - \varphi_3 - \alpha_0) + M_{жид}^T) \times \\ \times (-1 - f_{\Sigma}^T \times \text{sign}(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3)); \\ J_3 \ddot{\varphi}_3 = -M_n + (M_{Г0} + c_{\min}(\varphi_2 - \varphi_3 - \alpha_0) + M_{жид}^T) \times \\ \times (1 + f_{\Sigma}^T \times \text{sign}(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3)), \end{cases} \quad (1)$$

где  $\omega_0$  - частота вращения ротора электродвигателя;  $i_{ред}$  - передаточное отношение привода;  $\varphi_1$  - угол поворота массы  $J_1$ ;  $c_{\max}$  - жесткость муфты на первом этапе;  $M_{Г0}$  - момент предварительного напряжения муфты;  $\alpha_0$  - угол относительного поворота масс  $J_2, J_3$  на первом этапе движения.



Коэффициенты диф. уравнений системы (1)

Коэф.	Формула	Прим.
$c_{\min}(\varphi_m)$	$\frac{M_{\Gamma 0} \cdot S_{\Gamma}}{V_0 - S_{\Gamma}} \cdot \frac{r_{\text{рез}}}{\frac{(\varphi_2 - \varphi_3 - \alpha_0) \cdot r_{\text{рез}}}{\text{tg} \gamma}} \cdot \frac{r_{\text{рез}}}{\text{tg} \gamma}$	Жесткость муфты на втором этапе
$f_{\Sigma}^T$	$f_{\text{рез}}^T \cdot \text{tg} \gamma + f_{\text{унл}}^T + \left( 1 \pm \left( \frac{f_{\text{рез}}^T}{\sin \gamma} + f_{\text{унл}}^T \right) \right) \frac{r_{\text{рез}}}{r_{\text{унл}} \text{tg} \gamma} \cdot f_{\text{унл}}^T$	Суммарный коэффициент трения в элементах муфты

Для расчета основных параметров и элементов гидростатической муфты необходимо определить рациональные характеристики: жесткости упругого элемента и демпфера.

За критерий качества (оптимальности) принят суммарный момент упругости и жидкостного трения в муфте. Жесткость  $c_m(t)$  и демпфирование  $\mu_m(t)$  и  $\nu_m(t)$  являются управлениями. Обозначим:  $c_m(t)=u_1(t)$ ,  $\dot{c}_m(t)=u_2(t)$ ,  $\mu_m(t)=u_3(t)$ ,  $\dot{\mu}_m(t)=u_4(t)$ ,  $\nu_m(t)=u_5(t)$ ,  $\dot{\nu}_m(t)=u_6(t)$  – управления, тогда минимизируемый функционал:

$$J = \int_{t_0}^{t_1} \dot{M}_y dt = (u_1 \dot{\alpha}_m + u_2 \alpha_m + u_4 \dot{\alpha}_m + u_3 \ddot{\alpha}_m + u_6 \dot{\alpha}_m^2 + u_5 2 \dot{\alpha}_m \ddot{\alpha}_m) dt.$$

Задача синтеза оптимального закона движения полумуфт упругой муфты: среди всех допустимых управлений  $u=u(t)$ , переводящих трехмассовую механическую систему из начального положения ( $t=0$ ) в конечное ( $t=t_1$ ) при воздействии внезапно приложенной нагрузки, найти такое, для которого функционал ( $J$ ) принимает наименьшее возможное значение. Для нахождения оптимального управления и оптимального закона движения полумуфт упругой муфты используется принцип Максимуа Понтрягина.

Исходная система уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\alpha}_{m0} = u_1 \alpha_{m2} + u_2 \alpha_{m1} + u_4 \alpha_{m2} + u_3 \alpha_{m3} + u_5 \alpha_{m2}^2 + u_4 2 \alpha_{m2} \alpha_{m3}; \\ \dot{\alpha}_{m1} = \alpha_{m2}; \\ \dot{\alpha}_{m2} = \alpha_{m3}; \\ \dot{\alpha}_{m3} = \alpha_{m4}; \\ \dot{\alpha}_{m4} = -\alpha_{m4} \frac{u_3}{J_2} \left( \frac{J_2}{J_3} + 1 \right) - \alpha_{m3} \frac{u_1}{J_2} \left( \frac{J_2}{J_3} + 1 \right) - (\alpha_{m3}^2 + \alpha_{m2} \alpha_{m4}) \frac{2u_5}{J_2} \left( \frac{J_2}{J_3} + 1 \right) - \\ - \alpha_{m3} \frac{c}{J_2} + M_n \frac{c}{J_2 J_3} - \alpha_{m1} \frac{u_1 c}{J_2 J_3} - \alpha_{m2} \frac{u_3 c}{J_2 J_3} - \dot{\alpha}_{m2}^2 \frac{u_5 c}{J_2 J_3} - M_{\Sigma}^T \frac{c}{J_2 J_3}. \end{array} \right. \quad (2)$$

Гамильтониан имеет вид

$$\begin{aligned}
 H = & \psi_0 (u_1 \alpha_{m2} + u_2 \alpha_{m1} + u_4 \alpha_{m2} + u_3 \alpha_{m3} + u_6 \alpha_{m2}^2 + u_5 2 \alpha_{m2} \alpha_{m3}) + \\
 & + \psi_1 \alpha_{m2} + \psi_2 \alpha_{m3} + \psi_3 \alpha_{m4} + \\
 & + \psi_4 \left[ -\alpha_{m4} \frac{u_3}{J_2} \left( \frac{J_2}{J_3} + 1 \right) - \alpha_{m3} \frac{u_1}{J_2} \left( \frac{J_2}{J_3} + 1 \right) - (\alpha_{m3}^2 + \alpha_{m2} \alpha_{m4}) \frac{2u_5}{J_2} \left( \frac{J_2}{J_3} + 1 \right) \right] + \\
 & + \psi_4 \left[ -\alpha_{m3} \frac{c}{J_2} + M_n \frac{c}{J_2 J_3} - \alpha_{m1} \frac{u_1 c}{J_2 J_3} - \alpha_{m2} \frac{u_3 c}{J_2 J_3} - \alpha_{m2}^2 \frac{u_5 c}{J_2 J_3} - M_\Sigma^T \frac{c}{J_2 J_3} \right].
 \end{aligned}$$

На первом этапе решения задачи оптимизации находим параметры жесткости упругого элемента муфты для двухмассовой системы без демпфера. На втором этапе – параметры демпфера и амортизатора на примере трехмассовой системы.

В результате решения задачи оптимизации параметров упругого элемента было установлено, что:

1. Оптимальные управления существуют. Управление  $u_1$  (жесткость муфты  $c_m$ ) является кусочно-постоянной функцией, принимающей значения  $u_{min}$  и  $u_{max}$ . В начальный момент времени при оптимальном процессе значение управления равно  $u_{max}$ . При оптимальном процессе происходит 2 переключения управления за цикл движения фазовой точки.

2. Оптимальное управление может достигаться при установке амортизатора с предварительным (закручиванием) напряжением  $\alpha_0$ , причем момент предварительного напряжения амортизатора должен быть равен моменту номинальной нагрузки:  $\alpha_0 c_{max} = M_n$ , а жесткость его должна быть минимальной. Для гидромеханической муфты это означает, что гидроаккумулятор гидродемпфера должен быть заряжен начальным давлением, соответствующим номинальному моменту, а объем гидроаккумулятора должен быть максимальным, исходя из конструктивных соображений. Фазовый портрет оптимальной траектории движения фазовой точки показан на рисунке 3.

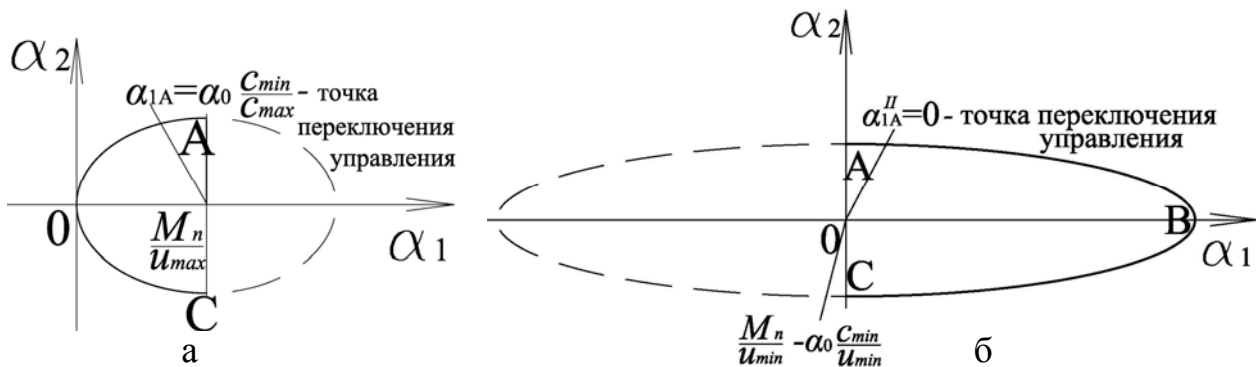


Рис. 3. Фазовый портрет оптимальной траектории движения фазовой точки: а – на первом этапе движения; б – на втором этапе движения

3. Жесткость упругой связи  $C$  без предварительно закрученного амортизатора должна быть максимальной ( $c_{\max}$ ), то есть в кинематической цепи муфты не должно быть никаких дополнительных упругих элементов.

4. Величина коэффициента динамичности двухмассовой системы  $\eta = 1 + \sqrt{u_{\min} / u_{\max}}$ , где  $u_{\min} = c_{\max} c_{\min} / (c_{\max} + c_{\min})$ , при оптимальном управлении уменьшается с уменьшением отношения  $u_{\min} / u_{\max}$  (рис.4).

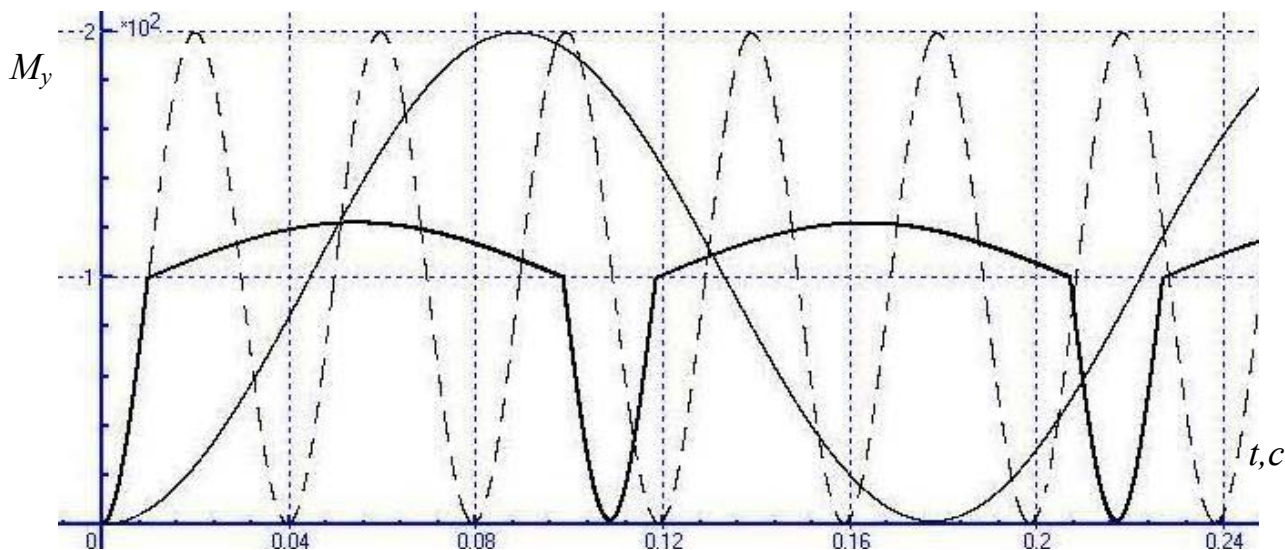


Рис. 4. График переходного процесса в двухмассовой механической системе без демпфера при внезапном приложении момента нагрузки: — предварительно напряженная муфта; - - - без муфты; — мягкая муфта

5. Оптимальные управления  $u_3$  и  $u_5$  (параметры демпфера  $\mu_m$  и  $\nu_m$ ) имеют точки разрыва (первого рода). На первом этапе движения системы демпфирование определяется конструктивными параметрами муфты, а на втором этапе — значение управлений определяем численными методами исходя из условия минимума максимального момента.

### 3. Исследование динамики работы муфты в режиме упругого демпфирования

Так как принцип Максимума дает только необходимые условия оптимальности, то для определения рациональных параметров жесткости и демпфирования проведем моделирование динамики при помощи численных методов. Для трехмассовой системы и внезапном нагружении найдем рациональные параметры жесткости амортизатора и демпфера (рис.5).

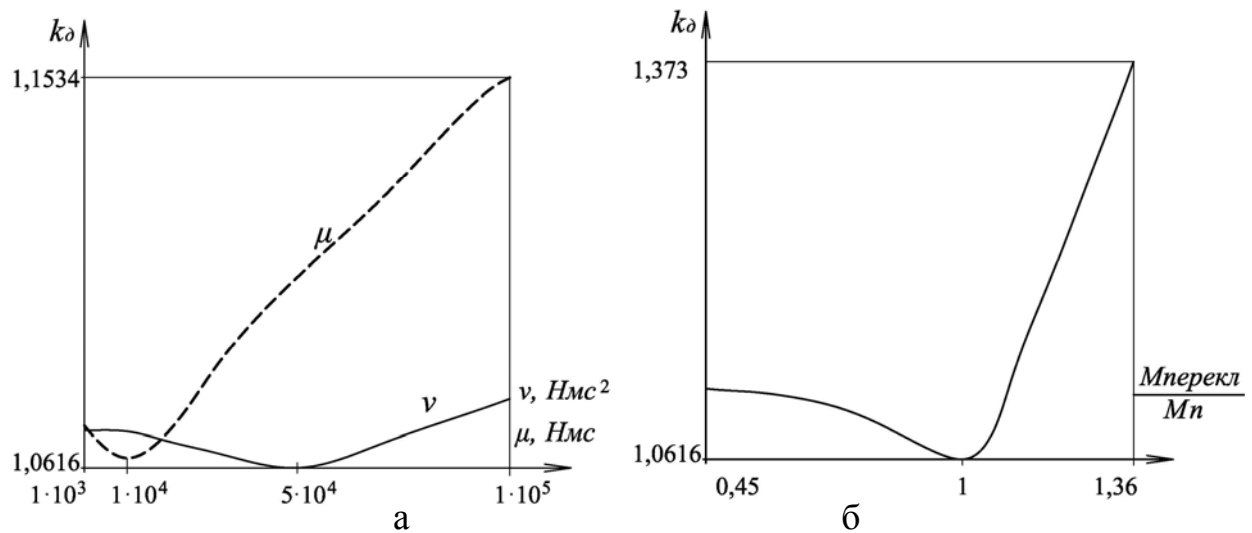


Рис.5. Коэффициент динамичности в муфте вращающейся печи в зависимости: а – от демпфирования; б – от величины предварительного напряжения муфты

Графики переходных процессов изображены на рисунке 6.

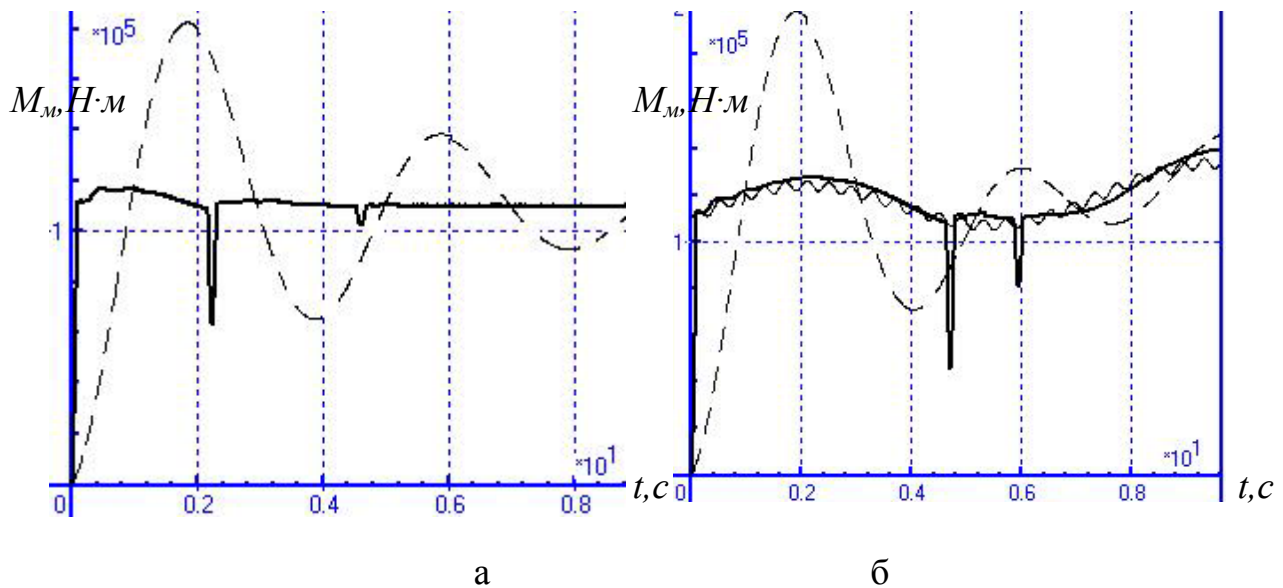


Рис. 6. График переходного процесса в муфте вращающейся печи: а – при внезапном приложении момента нагрузки,  $M_n$ ; б – при внезапном приложении момента нагрузки и колебательном нагружении. Моменты: — передаваемый предварительно напряженной муфтой; - - - мягкой муфтой; — колебательный момент нагрузки  $M_n$ , приложенный к полумуфте 2 (массе  $J_3$ )

Так как при работе вращающейся печи при максимальной производительности имеют место пиковые моменты перегрузки, то для определения характера работы муфты, а также параметров амортизатора и демпфера были проведены исследования динамики в случае воздействия на рабочий орган машины кратковременного аварийного момента перегрузки (рис. 7).

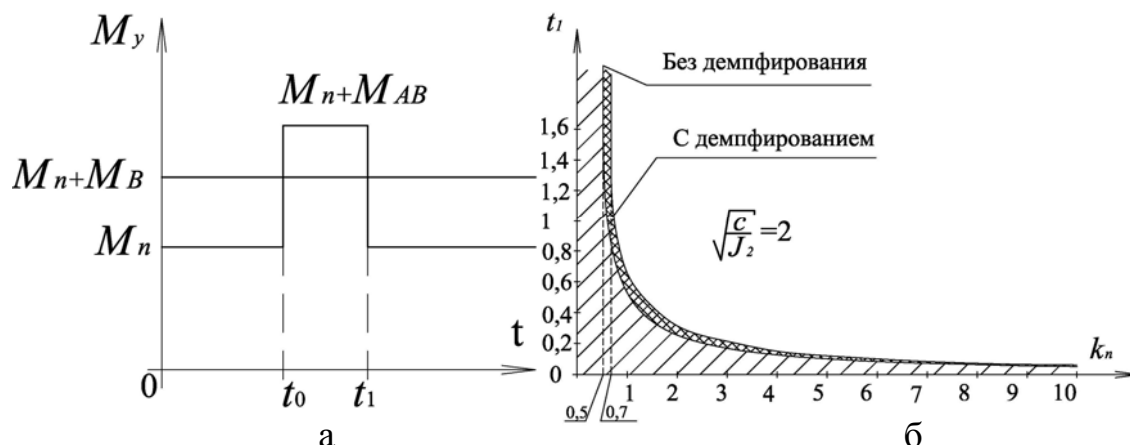


Рис. 7. Графики: а – момента пиковой перегрузки; б – функции времени воздействия пиковой перегрузки (не приводящей к выключению муфты) от величины коэффициента перегрузки без демпфирования и с демпфированием

$k_n = M_{AB}/M_B$ , где  $M_B$  – момент выключения,  $M_{AB}$  – аварийный момент.

Наличие в муфте демпфера увеличивает время воздействия и величину пикового момента перегрузки, который не приведет к выключению муфты. Особенно заметным это увеличение становится при коэффициентах перегрузки меньше 1,5.

#### 4. Экспериментальные исследования гидромеханической муфты в режиме упругого демпфирования

Создан макет гидросистемы муфты, макет гидромеханической муфты с винтовым исполнительным механизмом и экспериментальный стенд для его испытаний (рис. 8). Проведены испытания макета муфты.

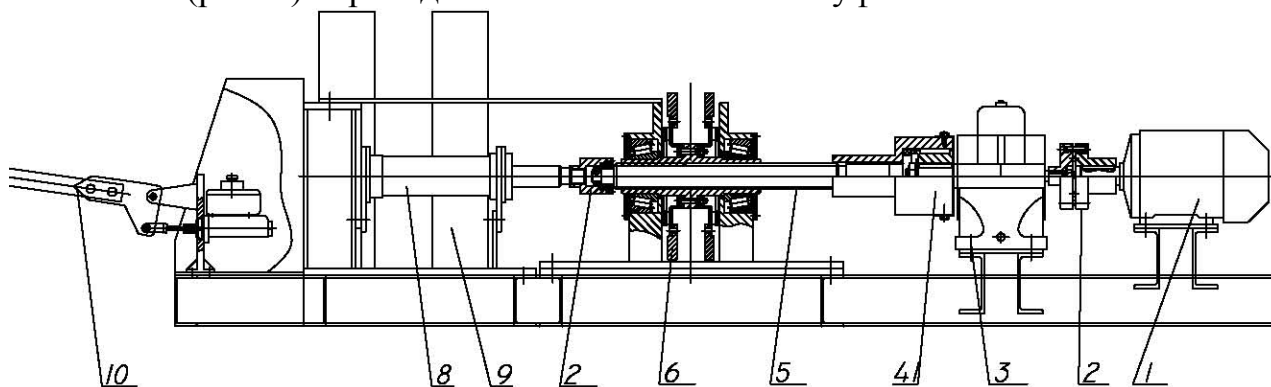


Рис. 8. Схема экспериментального стенда: 1 – электродвигатель; 2 – муфта соединительная; 3 – редуктор; 4 – шлицевая втулка; 5 – винт; 6 – гайка с дисковыми тормозами; 7 – упорный подшипник; 8 – гидроцилиндр; 9 – гидросистема муфты; 10 – нагрузочные рычаги

На рисунке 9 представлены показания датчиков стенда: первый верхний график – датчик давления гидросистемы муфты; второй – датчик давления тормозной системы нагрузочного устройства; третий – потенциометрический датчик, определяющий осевое смещение винта; четвёртый – контактный тахометр, определяющий частоту вращения вала электродвигателя.

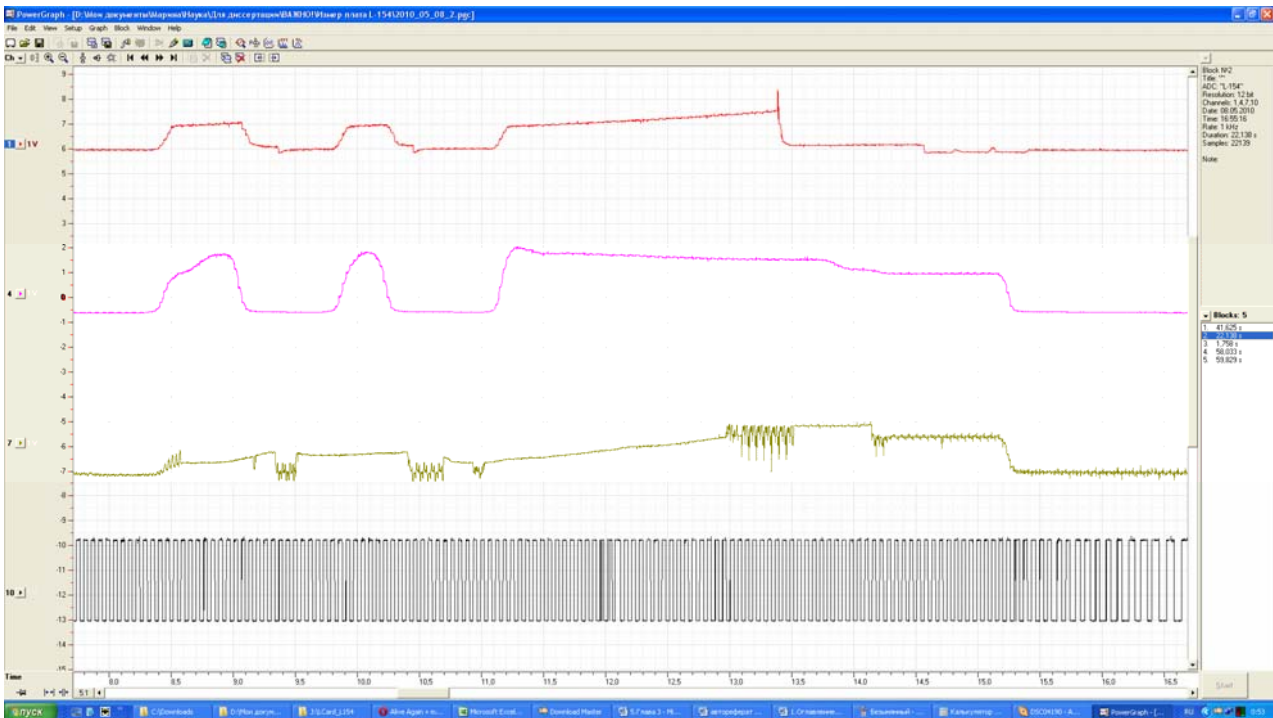


Рис. 9. Показания датчиков, записанные в программе PowerGraph 2.0 и представленные на экране ЭВМ

Экспериментально подтверждены теоретические выводы моделирования динамики гидромеханической муфты, а также результаты выбора рациональных параметров муфты. Величина расхождения теоретических результатов и результатов экспериментов не превышает 18%.

### 5. Методика расчёта параметров гидромеханической муфты. Особенности расчёта гидромеханической муфты с подвижной гидросистемой

На основании обобщенной структурной схемы (рис.10) разработана

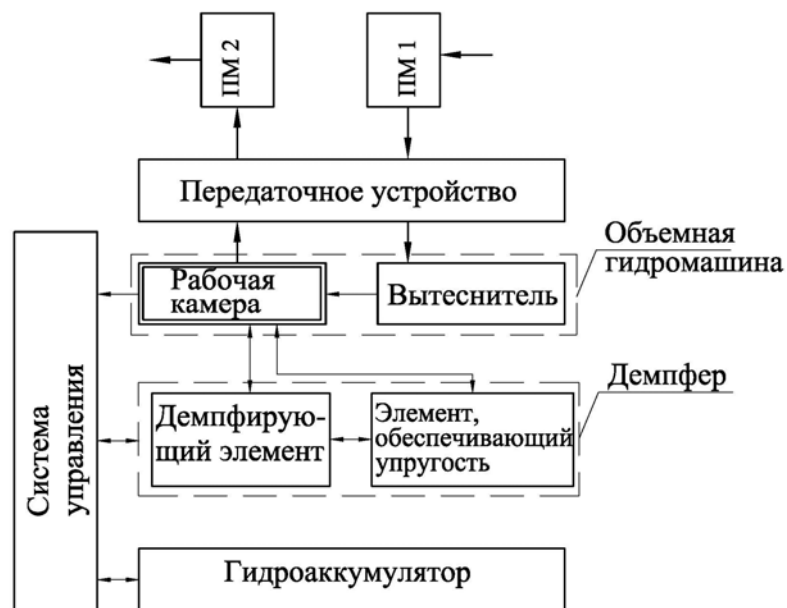


Рис. 10. Обобщенная структурная схема гидростатической муфты:  
ПМ1, ПМ2 – полумуфты 1 и 2

конструкция муфты для привода вращающейся обжиговой печи, позволяющая снизить динамические нагрузки в приводе и надежно защитить привод от перегрузок.

На основании найденных рациональных параметров амортизатора и демпфера, результатов исследования динамики работы муфты разработана инженерная методика расчета конструкции муфты с гидромеханическим исполнительным механизмом с передаточным устройством в виде механизма винт-гайка.

### **Основные результаты и выводы**

1. На основании разработанных обобщенной структурной схемы гидростатической муфты и классификаций по способу конструктивной реализации основных элементов обобщенной структурной схемы и по функциональным признакам получена возможность создания структурных схем и конструкций гидромеханических муфт с заданными свойствами.

2. Созданы конструкции гидромеханических муфт, которые в наибольшей степени удовлетворяют основным требованиям, предъявляемым к муфтам для тяжело нагруженных технологических машин. Созданные новые конструкции фактически являются новым видом гидромеханических муфт – предохранительными упругодемпфирующими самовосстанавливающимися гидромеханическими муфтами.

3. Установлено, что для минимизации коэффициента динамичности при воздействии внезапно приложенной нагрузки жесткость упругой муфты должна дискретно изменяться. При моменте упругости меньшем, чем номинальный момент нагрузки, жесткость должна быть максимальной. При превышении моментом упругости в муфте значения номинального момента нагрузки жесткость должна становиться минимальной. Рациональное управление может достигаться при установке амортизатора с предварительным напряжением, причем момент предварительного напряжения амортизатора должен быть равен моменту номинальной нагрузки. Величины максимального упругого момента и коэффициента динамичности системы при рациональном управлении уменьшаются с уменьшением отношения значений минимальной жесткости к максимальной.

Наличие демпфера в муфте уменьшает максимальный момент в приводе. Максимальное снижение коэффициента динамичности достигается применением турбулентного дросселя. Величина демпфирования определяется для конкретных параметров технологической машины, исходя из условий минимума максимального момента в муфте. Для разработанной конструкции муфты для привода вращающейся печи  $k_0=1,062$ .

4. Установлено, что время воздействия и величина момента пиковой перегрузки, который не приведет к выключению упругодемпфирующей предохранительной муфты, тем больше, чем меньше жесткость упругой муфты. Наличие в муфте демпфера увеличивает время воздействия и величину пикового момента перегрузки с  $0,5M_B$  до  $0,7M_B$ , который не приведет к выключению муфты.

5. Разработанная с учетом результатов решения задачи определения рациональных параметров муфты, динамики работы муфты инженерная методика

расчета муфты с передаточным устройством в виде механизма винт-гайка позволяет производить расчет муфты с рациональными параметрами.

6. На основании исследования динамики муфты установлено, что минимальные динамические нагрузки в приводе достигаются при значениях параметра турбулентного дросселя  $\nu=5 \times 10^4 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$ .

**Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:**

#### **Публикации в рецензируемых журналах и изданиях**

1. Бородина, М.Б. Динамика работы гидромеханической муфты с управляемым параметром [Текст] / М.Б. Бородина, К.А. Булавин, Л.А. Савин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии –2013. – №3-2. – С. 44-49.
2. Бородина, М.Б. Использование гидростатических муфт для защиты приводов тяжело нагруженного оборудования [Текст] / М.Б. Бородина, К.А.Булавин, Б.А. Шевченко // Сталь. – 2006. – №3. – С.68 – 72.
3. Гидростатические муфты приводов тяжело нагруженных металлургических машин [Текст] / Л.А. Рыбак, М.Б. Бородина, К.А. Булавин [и др.] // Приводная техника. – 2002. – №3. – С. 21-24.

#### **Другие публикации**

4. Пат. 2186270 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> F 16 D 25/06, 25/08. Гидростатическая муфта [текст] / Бородина М.Б., Булавин К.А., Крахт В.Б. [и др.]. Бюл.№21. 2002.
5. Пат. 2231698 Российская Федерация МПК<sup>7</sup> F 16 D 25/06. Гидростатическая муфта [текст] / Бородина М.Б., Булавин К.А., Крахт В.Б. [и др.]. Бюл.№18. 2004.
6. Пат. 2239736 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> F 16 D 25/06. Гидростатическая муфта [текст] / Бородина М.Б., Булавин К.А., Крахт В.Б. [и др.]. Бюл.№31. 2004.
7. Пат. 2310778 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> F16 D 25/06, 25/08. Гидростатическая муфта [текст] / Бородина М.Б., Булавин К.А., Крахт В.Б. [и др.]. Бюл.№32. 2007.
8. Пат. на полезную модель 100618 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> G 01 M 13/02. Испытательный стенд [текст] / Булавин К.А., Бородина М.Б., Савин Л.А. [и др.]. Бюл.№35. 2010.
9. Пат. на полезную модель 104264 Российская Федерация МПК<sup>7</sup> F 16 D 31/00. Гидромеханическая муфта [текст] / Булавин К.А., Бородина М.Б., Савин Л.А. [и др.]. Бюл.№13. 2011 г.
10. Анализ конструкций гидростатических муфт [Текст] / В.Б. Крахт, Г.В. Сопилкин, К.А. Булавин [и др.] // Вопросы проектирования, эксплуатации технических систем в металлургии, машиностроении, строительстве. Часть 1 // Труды международной научно-технической конференции. – Старый Оскол: Изд-во СОФ МИСиС, 1999. – С.161–163.



11.Классификация нового класса гидростатических муфт [Текст] / Л.А. Рыбак, М.Б. Бородина, К.А. Булавин [и др.] // Полвека Белгородской области: итоги, проблемы, перспективы: Сборник научных трудов. – Старый Оскол: Изд-во СТИ МИСиС, 2003. – С. 112-117.

12.Булавин, К.А. Разработка конструкции и расчет параметров гидростатической муфты для привода вращающейся обжиговой печи [Текст] / К.А. Булавин // Образование, наука, производство и управление в XXI веке: Сборник трудов Международной научной конференции. Т.2. – Старый Оскол: ООО «ТНТ», 2004. – С.33 - 37.

13.Булавин, К.А. Использование гидростатических муфт для защиты приводов металлургического тяжелонагруженного оборудования [Текст] / К.А. Булавин, М.Б. Бородина, Б.А. Шевченко // Материалы научно-технической конференции ОАО «ОЭМК». - Старый Оскол: Изд-во ОАО «ОЭМК», 2005. - С. 121-124.

14.Новые схемы гидростатической муфты для привода вращающейся обжиговой печи [Текст] / В.Б. Крахт, Б.А. Шевченко, К.А. Булавин [и др.] // Образование, наука, производство и управление: материалы региональной научно-технической конференции. Т.1.– Старый Оскол: СТИ МИСиС, 2005.–С. 168-174.

15.Бородина, М.Б. Экспериментальное исследование макета гидросистемы гидростатической муфты [Текст] / М.Б. Бородина, К.А. Булавин, Б.А. Шевченко // Образование, наука, производство и управление: сборник трудов Международной научно-практической конференции. Т.4. – Старый Оскол, 2006. – С. 505 – 509.

16.Создание макета гидростатической муфты и экспериментального стенда для его исследования [Текст] / Б.А. Шевченко, К.А. Булавин, М.Б. Бородина [и др.] // Образование, наука, производство и управление: сборник трудов Международной научно-практической конференции.Т4. – Старый Оскол, 2006. – С. 510 – 512.

17.Бородина, М.Б. Экспериментальные исследования предохранительной муфты с гидромеханическим исполнительным механизмом [Текст] / М.Б. Бородина, К.А. Булавин, Л.А. Савин // Ударно-вибрационные системы, машины и технологии: материалы IV Международного научного симпозиума / под ред. д-ра техн. наук, проф. Л.С. Ушакова. – Орел: ОрелГТУ, – 2010. – С. 211-217.

18.Бородина, М.Б. Моделирование динамики работы упругодемпфирующей муфты с гидромеханическим исполнительным механизмом [Текст] / М.Б. Бородина, К.А. Булавин // Ударно-вибрационные системы, машины и технологии: материалы V международного научного симпозиума / под ред. д-ра техн. наук, проф. Л.С. Ушакова. – Орел: ОрелГТУ, 2013. – С. 42-47.

Подписано в печать 06.11.2013. Формат 60 x 84 1/16  
Усл. печ. л. 1,0. Тираж 130 экз. Заказ № 207

Отпечатано в типографии «Тонкие наукоёмкие технологии»  
309500, Белгородская обл., г. Старый Оскол, м-н Макаренко, д. 40.  
Тел./факс (4725) 42-35-29, 42-35-39, 32-25-29