

ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УДК 621.833.6 (043.3)

Трусов
Игорь Валерьевич

**ОБОСНОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ
ПРЕЦЕССИОННОЙ ПЕРЕДАЧИ СО СФЕРИЧЕСКИМИ ЗУБЬЯМИ И
ФУНКЦИЕЙ КОМПЕНСИРУЮЩЕЙ МУФТЫ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 05.02.02 - машиноведение, системы приводов и детали машин

Могилев 2015

Работа выполнена в Государственном учреждении высшего профессионального образования «Белорусско-Российский университет»

Научный руководитель

Громько Петр Николаевич

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Теоретическая
механика» ГУ ВПО «Белорусско-
Российский университет», г. Могилев

Официальные оппоненты

Оппонирующая организация

Защита состоится «__» _____ 2015 г. в 11⁰⁰ на заседании Совета по защите диссертаций Д 02.18.01 при Белорусско-Российском университете по адресу: 212030, г. Могилев, пр-т Мира, 43, ком. 323, e-mail: f_av@bru.mogilev.by, телефон ученого секретаря (0222)- 22-11-93.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного учреждения высшего профессионального образования «Белорусско-Российский университет».

Автореферат разослан «__» _____ 2015 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций

А.С. Мельников

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Электромеханические привода широко распространены в промышленности и сельском хозяйстве. Как правило, они состоят из электродвигателя, редуктора (мотор-редуктора), компенсирующей муфты, рабочего органа и жесткой рамы, на которой крепятся указанные изделия. Однако на практике встречаются случаи, когда по технологическим или конструктивным соображениям установка привода на жесткой раме невозможна. Например, монтаж электромеханических приводов на недостаточно жестких стержневых конструкциях на значительной высоте. При этом упругие деформации элементов конструкции, вызванные ветровыми нагрузками, а также температурными воздействиями приводят к несоосности между вращающимися звеньями привода, которая в некоторых случаях не может быть компенсирована применяемые для этих целей муфтами. Ужесточение элементов конструкции привода приводит к увеличению его массы и габаритов, а следовательно, и повышению себестоимости изготовления.

Наиболее рациональный путь в случае монтажа электромеханического привода на корпусе недостаточно жесткой конструкции - это отказ от использования массивной рамы, опорных элементов и компенсирующих муфт. То есть, весь электромеханический привод представляет собой мотор-редуктор, закрепленный с помощью фланца непосредственно на корпусе установке. Возникающие при этом погрешность монтажа, заключающаяся в несоосности выходного вала мотор-редуктора и вала рабочего органа установки, должна устраняться путем обеспечения повышенных требований к точности изготовления и сборки или применением различного рода компенсирующих элементов. Однако при эксплуатации электромеханического привода нет никаких гарантий, что из-за различного рода деформаций, вызванных низкой жесткостью элементов конструкции или температурным расширением не возникнет взаимных перекосов базирующих деталей. Указанный перекос может привести к критическому ухудшению эксплуатационных свойств привода и даже к потере его работоспособности.

Одним из способов, позволяющих сохранить работоспособность привода при наличии несоосности валов мотор-редуктора и рабочего органа - это использование в приводе такого мотор-редуктора, эксплуатационные свойства которого нечувствительны в широких пределах к погрешности пространственного расположения его выходного вала. Разработка такого мотор-редуктора стала возможной на основе прецессионной передачи со сферическими зубьями центрального колеса, исследованию влияния на эксплуатационные свойства которого указанной выше погрешности и посвящена данная работа.

Ранее проектирование и исследования прецессионной передачи со сферическими зубьями не проводились. Преимуществом предлагаемого варианта прецессионной передачи является то, что в конструкции мотор-

редуктора, разработанного на его основе, реализуется функция компенсирующей муфты.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами и темами. Выбранная тема соответствует приоритетным направлениям научных исследований в Республике Беларусь на 2011-2015 гг.: 7.1. механика, надежность, безопасность и экологичность машин, трение и износ в машинах, методы расчета, моделирования, проектирования, конструирования и испытаний машин, агрегатов и узлов; 7.2. процессы функционирования машин и механизмов, механических, гидравлических, газовых и биомеханических систем, электронные системы управления узлами и агрегатами мобильных машин..

Научные исследования по теме диссертации проводились в рамках:

– задания № 66 раздел механика 2.29 – «Разработка интеллектуальных систем управления качеством новых типов механических передач на основе компьютерного моделирования с целью повышения их технического уровня» (раздел задания 2.29.1 «Создание динамических моделей контактного взаимодействия звеньев коническо-цилиндрической прецессионной передачи с разработкой на их основе способов снижения кинематической погрешности и вибрационных характеристик прецессионных редукторов»), № гос. рег. 20061430, 2006 – 2010 гг.;

– задания 1.13 ГПНИ «Механика, техническая диагностика, металлургия» (Развитие научных основ механики технических систем, методов и средств их диагностики, создание и совершенствование технологических процессов в металлургии и машиностроении), задание «Совершенствование методов расчета, моделирования, проектирования, конструирования и испытаний малогабаритных приводных систем на базе передач с промежуточными телами качения», раздел задания «Разработка методики расчета и проектирования низких по себестоимости приводных механизмов, созданных на основе прецессионной роликковой передачи, с последующим их внедрением в конструкции различных машин и механизмов», № гос. рег. 20121617, 2012 – 2013 гг.;

– задания 1.37 ГПНИ «Механика, техническая диагностика, металлургия», раздел задания: «Минимизация массогабаритных и стоимостных параметров механических передач с промежуточными телами качения на основе разработки способов снижения влияния на выходные показатели погрешностей изготовления и упругих деформаций звеньев».

Цель и задачи исследования

Цель: обоснование эксплуатационных свойств и расчет параметров прецессионной передачи со сферическими зубьями центрального колеса при реализации ею функции компенсирующей муфты.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать аналитические зависимости оценки влияния на основные эксплуатационные свойства прецессионной передачи (кинематическую точность вращения выходного вала, КПД) погрешности пространственного расположения ее выходного вала, возникающей при монтаже и эксплуатации в составе электромеханического привода.

2. Разработать и провести исследования компьютерных моделей различных вариантов прецессионной передачи по определению влияния погрешности расположения ее выходного вала на кинематическую точность и КПД.

3. Разработать зависимости для расчета параметров прецессионной передачи со сферическими зубьями, позволяющую спроектировать мотор-редуктор с функцией компенсирующей муфты.

4. Рассчитать параметры, изготовить образцы мотор-редукторов на основе различных вариантов прецессионной передачи и провести экспериментальные исследования по оценке возможности реализации ими функции компенсирующей муфты.

5. Спроектировать конструкцию прецессионного мотор-редуктора со сферическими зубьями для привода ковшового элеватора и провести его стендовые и эксплуатационные испытания.

Объект исследования – прецессионная передача со сферическими зубьями и разработанные на ее основе мотор-редукторы.

Предмет исследований – параметры прецессионной передачи со сферическими зубьями, ее компьютерные модели и эксплуатационные свойства.

Научная новизна.

- в разработке аналитических зависимостей оценки кинематической точности и КПД прецессионной передачи со сферическими зубьями при наличии погрешности пространственного расположения выходного вала, позволивших обосновать эксплуатационные свойства при реализации ее функции компенсирующей муфты;

- в создании расчета прецессионной передачи со сферическими зубьями, учитывающего погрешности пространственного расположения выходного вала, на основе которой возможна разработка конструкции мотор-редуктора, обеспечивающей компактность, структурную простоту и малогабаритность приводе ковшового элеватора зерносушильного комплекса;

- в разработке компьютерных моделей различных вариантов прецессионной передачи, отличающихся возможностью при определении ее эксплуатационных свойств учитывать погрешность расположения выходного вала, исследование которых позволило обосновать преимущества по основным эксплуатационным свойствам (кинематической точности вращения выходного вала и КПД) прецессионной передачи со сферическими зубьями центрального колеса по сравнению с прецессионной передачей, имеющей в зацеплении коническую форму зуба центрального колеса.

Положения, выносимые на защиту:

- аналитические зависимости кинематической точности и КПД прецессионной передачи со сферическими зубьями от погрешности расположения выходного вала, возникающей при ее монтаже и эксплуатации в конструкции приводного устройства (обобщенной погрешности), позволяющие прогнозировать возможность ее применения в приводе с заданной обобщенной погрешностью;

- расчет прецессионной передачи со сферическими зубьями, позволяющий определять геометрические параметры мотор-редуктора с функцией компенсирующей муфты, гарантирующие обеспечение необходимых эксплуатационных свойств при заданной обобщенной погрешности и обеспечивающие приводу компактность, простоту и малогабаритность;

- результаты исследований компьютерных моделей прецессионной передачи, отличающихся возможностью учитывать обобщенную погрешность, позволившие установить, что использование в зацеплении зубьев центрального колеса сферической формы придает передаче функцию компенсирующей муфты;

- результаты экспериментальных исследований привода ковшового элеватора на базе прецессионного мотор-редуктора со сферическими зубьями центрального колеса, позволившие установить, что его технико-экономические показатели выше, чем у серийно выпускаемого привода на базе червячного мотор-редуктора (SITI MU 110 15/1, производства Италия).

Личный вклад соискателя

При выполнении работы исполнителем лично: установлены аналитические зависимости кинематической точности и КПД прецессионной передачи со сферическими зубьями от погрешности расположения выходного вала, возникающей при ее монтаже и эксплуатации в конструкции приводного устройства; созданы алгоритм расчета передачи, позволяющий определить ее основные геометрические параметры и спроектировать прецессионный редуктор, компьютерные модели прецессионной передачи со сферическими зубьями центрального колеса, осуществлен расчет параметров прецессионного редуктора для привода ковшового элеватора зерносушильного комплекса, спроектирована конструкция, изготовлены экспериментальные образцы и проведены стендовые и эксплуатационные испытания.

Научный руководитель соискателя д.т.н., профессор П.Н. Громыко участвовал в определении цели и задач исследований, в обсуждении их результатов, в написании статей и заявок на патенты. Совместно с научным руководителем была предложена новое компоновочное решение передачи со сферическими зубьями, а также выдвинута идея о возможности компенсации погрешности монтажа предлагаемого варианта передачи в конструкции привода.

В процессе исследований соискатель являлся ответственным исполнителем одной госбюджетной НИР, тематика которой соответствует тематике диссертационных исследований.

Апробация результатов диссертации

Основные положения диссертации доложены и обсуждены на республиканских научно-технических и научно-практических конференциях: Научно-практической конференции аспирантов, магистрантов и студентов приграничных областей России и Беларуси "Развитие приграничных регионов Беларуси и России на современном этапе: проблемы и перспективы", Могилев, 2006 г.; Международных конференциях молодых ученых «Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности», Могилев, 2007–2008 гг., 2013–2014 гг.; Международных научно-технических конференциях «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии», Могилев, 2006–2010 гг., 2013–2014 гг.; XII Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления», Гомель, 2012 г.

Опубликование результатов диссертации. По теме диссертации опубликовано 23 печатные работы, в том числе монография – 1, статей в рецензируемых журналах, включенных в список научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований – 6, материалов или тезисов докладов научных конференций – 12, Получено 2 патента на изобретение, 1 положительное решение о выдаче патента на изобретение и 1 положительное решение о выдаче патента на полезную модель.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, списка литературных источников (118 наименований), приложений. Полный объем диссертации составляет 173 страницы, включает 93 рисунка, 6 таблиц, 9 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Во **введении и общей характеристике работы** обоснована актуальность задачи создания мотор-редуктора на основе прецессионной передачи со сферическими зубьями центрального колеса, реализующего функции компенсирующей муфты. Сформулированы цель и задачи исследований, научная новизна, практическая значимость полученных результатов, представлена общая характеристика работы и положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** обозначена проблема, возникающая при разработке электромеханических приводов, монтируемых на установках при невозможности обеспечения необходимой жесткости элементов их опорных конструкций, осуществлен анализ способов компенсации несоосности валов при установке электромеханического привода на корпусе рабочего органа, сделан обзор механических передач, имеющих возможность компенсировать погрешностей изготовления и монтажа, предложено конструктивное решение планетарной прецессионной передачи со сферическими зубьями, на основе которого стало возможно создание редуктора с функцией компенсирующей муфты.

Несмотря на возросшую роль безредукторного привода в современной технике, редукторы по-прежнему находят широкое применение там, где необходимо передавать значительные крутящие моменты при относительно низких габаритах и массе приводного устройства.

При монтаже редуктора существует проблема соединения его выходного вала с валом рабочего органа привода. Ее решением не без ущерба для массогабаритных и качественных показателей привода является использование различных типов компенсирующих муфт. Однако при монтаже электропривода на корпусе нежестких конструкций применение массивной рамы, опорных элементов и компенсирующих муфт нерационально. Например, при эксплуатации электропривода в конструкции ковшового элеватора зерносушильного комплекса на высоте более 60 метров из-за возникновения значительных деформаций опорных элементов привода, вызванных ветровыми и температурными воздействиями, появляются значительные несоосности между вращающимися валами электродвигателя, редуктора и рабочего органа. Поэтому в данном случае оправдано применение в приводе мотор-редуктора, который крепится фланцем на корпусе рабочего органа установки. Данный редуктор должен кроме функций редуцирования вращения дополнительно выполнять функции компенсирующей муфты. То есть, компенсировать несоосность, возникающую между его выходным валом и валом рабочего органа, так как размещение компенсирующей муфты при указанной компоновке привода конструктивно невозможно.

Анализ технических решений в направлении исследований по расширению функций редукторов различных типов позволил сделать вывод, что создание мотор-редуктора с реализацией функции компенсирующей муфты возможно на основе прецессионной передачи со сферическими зубьями.

Отличительной особенностью прецессионных передач различных типов является наличие наклонного сателлита, совершающего сферическое движение. Следует отметить, что в развитие прецессионных передач существенный вклад внесли следующие ученые: И.А. Бостан, В.Е. Дулгеру, А.Т. Скойбеда, Б.А. Лопатин, В.И. Безруков и др.

Обзор технической литературы по прецессионным передачам показал, что исследований в направлении придания им функции компенсирующей муфты не проводилось.

На рисунке 1 показано компоновочное решение предложенного в работе для исследований варианта прецессионной передачи со сферическими зубьями центрального колеса.

Прецессионная передача со сферическими зубьями содержит корпус 1, входной вал 2, расположенную на нем косую втулку 3. На косой втулке 3 посредством сферического подшипника 5 размещен сателлит 4. На внутренней поверхности корпуса 1 имеется неподвижное центральное колесо, внутренний зубчатый венец которого выполнен в виде радиальных роликов 6. Контактующая с наружными зубьями сателлита 4 поверхность радиальных роликов 6 выполнена в виде полусфер. Сателлит 4 жестко соединен с кольцом 8

и имеет на внутренней поверхности зубчатый венец, который выполнен в виде радиально расположенных по его периметру роликов 7. Радиальные ролики 7

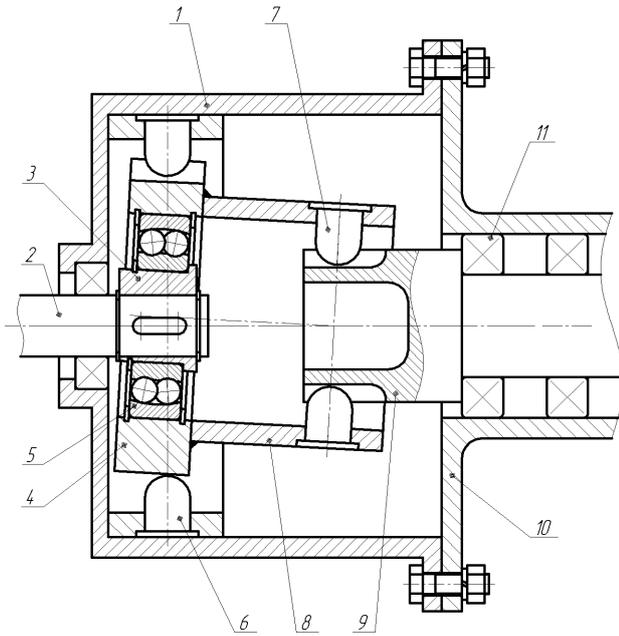


Рисунок 1. – Компоновочное решение прецессионной передачи со сферическими зубьями

имеют поверхности в виде полусфер, которые контактируют с наружным зубчатым венцом, выполненным на выходном валу 9. Выходной вал 9 составляет вращательную пару посредством подшипников 11 с корпусом привода 10. При контакте зубьев сателлита 4 со сферической поверхностью роликов 6 происходит редуцирование вращения от входного вала 2 с передаточным отношением, равным числу зубьев сателлита 4. Вращение с сателлита 4 на выходной вал передается с помощью радиальных роликов 7, которые в совокупности с зубчатым венцом выходного вала 9 представляют собой конструкцию угловой муфты.

В предлагаемой передаче допускается не только угловое, но и радиальное смещение оси выходного вала 9 относительно оси вращения входного вала 2. Указанное смещение будет компенсироваться при работе передачи благодаря наличию в контакте сферических поверхностей зубьев 6 центрального колеса, а также благодаря наличию в конструкции передачи указанной муфты.

Однако при возникновении указанных выше смещений осей нарушается геометрия зацепления сферических зубьев 6 с зубьями сателлита 4, что влияет на значения эксплуатационных свойств прецессионной передачи.

Теоретические, компьютерные и экспериментальные исследования, которые представлены в данной работе, направлены на определения влияния погрешностей, возникающих при монтаже и эксплуатации мотор-редуктора, разработанного на основе прецессионной передачи со сферическими зубьями, на его основные эксплуатационные свойства, а именно кинематическую точность и КПД прецессионной передачи.

Вторая глава диссертации посвящена теоретическому обоснованию возможности обеспечения прецессионной передачей со сферическими зубьями заданных эксплуатационных свойств при реализации ею функции компенсирующей муфты.

На основе компоновочного решения прецессионной передачи со сферическими зубьями, показанного на рисунке 1, было предложена конструкция приводного устройства, общий вид которого показан на рисунке 2.

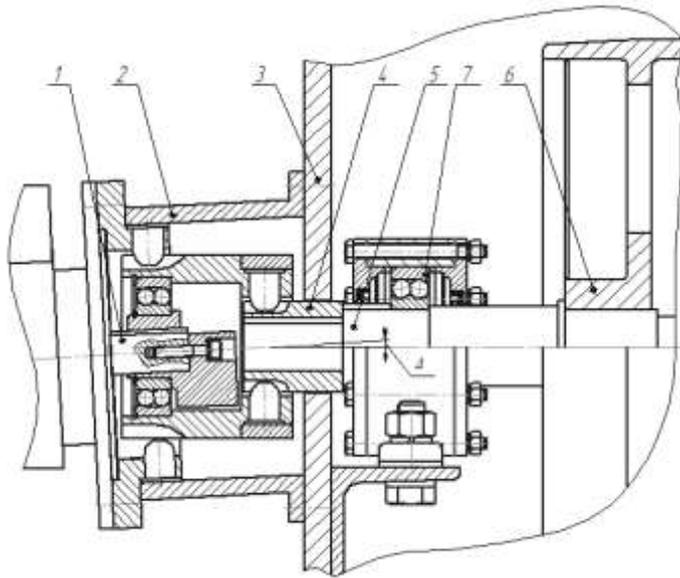


Рисунок 2 – Общий вид приводного устройства на базе планетарной прецессионной передачи с полым выходным валом

подшипниковых опорных узлах 7, не расположенных в корпусе передачи 2, который, в свою очередь, может крепиться непосредственно к корпусу рабочего органа 3 приводного устройства.

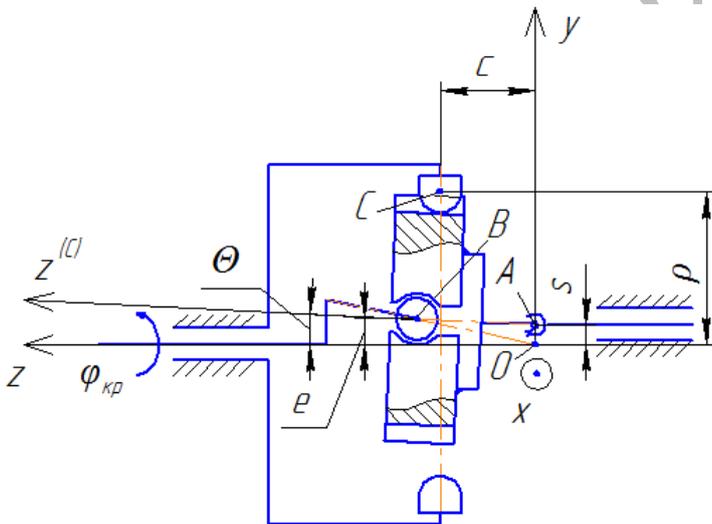


Рисунок 3– Структурная схема планетарной прецессионной передачи со сферическими зубьями при наличии обобщенной погрешности s монтажа

определяется отклонением точки прецессии прецессионной передачи (точки O) от оси вращения ее входного вала (рисунок 3).

Для оценки влияния обобщенной погрешности в приводе прецессионной передачи на ее основные эксплуатационные свойства (кинематическая точность, КПД) были получены аналитические зависимости. В их основу был положен расчет точек траектории движения центра C сферической поверхности зуба относительно сателлита (рисунок 3) при отсутствии обобщенной

Учитывая то, что выходной вал 9 (рисунок 1) прецессионной передачи может располагаться с определенной погрешностью относительно ее входного вала 2 (рисунок 1), то в предложенном варианте выходной вал редуцирующего устройства 4 может быть полым, выполненным в виде втулки (рисунок 2). Это означает, что выходной вал 4 приводного устройства в соединении с валом рабочего органа 5 можно разместить в

Малая жесткость опорной конструкции приводит к возникновению погрешности монтажа и эксплуатации Δ , выраженной в виде несоосности входного вала передачи 1 и вала рабочего органа 5 (рисунок 2). Неоспоримо ее влияние на эксплуатационные свойства прецессионной передачи, а следовательно, и на ее работоспособность.

Анализ позволил установить, что возникающие погрешности могут быть сведены к одной *обобщенной погрешности* s , которая

погрешности, а также центра сферической поверхности зуба C' при наличии обобщенной погрешности s .

Координаты точки C' ($x_{C'}^{(c)}$, $y_{C'}^{(c)}$ и $z_{C'}^{(c)}$) могут быть определены численным методом, исходя из системы уравнений

$$\begin{cases} r_C - r = \sqrt{(x_D - x_{C'}^{(c)})^2 + (y_D - y_{C'}^{(c)})^2} \\ M_{C'}^{(c)} = \begin{bmatrix} x_{C'}^{(c)} \\ y_{C'}^{(c)} \\ z_{C'}^{(c)} \\ 1 \end{bmatrix} = T_4' \times T_3 \times T_2 \times T_1 \times M_C \end{cases}, \quad (1)$$

где r – радиус сферы; r_C – радиус впадины сателлита; x_a, y_a – координаты центра впадины сателлита; M_C – матрица координат точки C центра сферы; T_1, T_2, T_3, T_4' – матрицы преобразования координат.

Проекция единичного вектора \vec{d} направления оси сателлита АВ (рисунок 3) с учетом обобщенной погрешности в системе координат $Oxyz$ будут определены по формулам:

$$\begin{aligned} d_x &= \frac{-e \cdot \sin(\varphi_{кр}) \cdot \operatorname{tg}(\theta)}{\sqrt{[e^2 + s^2 - 2 \cdot e \cdot \cos(\varphi_{кр})] \cdot \operatorname{tg}^2(\theta) + e^2}}; \\ d_y &= \frac{(e \cdot \cos(\varphi_{кр}) - s) \cdot \operatorname{tg}(\theta)}{\sqrt{[e^2 + s^2 - 2 \cdot e \cdot \cos(\varphi_{кр})] \cdot \operatorname{tg}^2(\theta) + e^2}}; \\ d_z &= \frac{e}{\sqrt{[e^2 + s^2 - 2 \cdot e \cdot \cos(\varphi_{кр})] \cdot \operatorname{tg}^2(\theta) + e^2}}. \end{aligned} \quad (2)$$

Тогда

$$\cos(\gamma) = d_z; \quad \sin(\gamma) = \sqrt{1 - d_z^2}; \quad \cos(\delta) = \frac{d_y}{\sqrt{1 - d_z^2}}; \quad \sin(\delta) = -\frac{d_x}{\sqrt{1 - d_z^2}}. \quad (3)$$

Угол поворота сателлита относительно кривошипа определится по следующей формуле

$$\varphi_C = -\frac{z_k}{z_s} \cdot \varphi_{кр}, \quad (4)$$

где $\varphi_{кр}$ – угол поворота кривошипа; z_k – число зубьев центрального колеса; z_s – число зубьев сателлита.

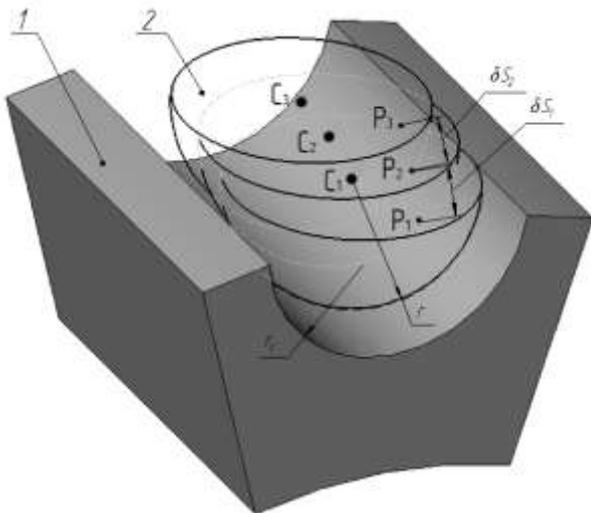
Значение кинематической погрешности вращения выходного вала может быть получено на основе расчета по зависимостям (1-4) разности углов поворота сателлита относительно кривошипа при отсутствии и при наличии обобщенной погрешности, т. е. $F_i' = \varphi_C - \varphi_C'$.

Одним из наиболее важных эксплуатационных показателей механической передачи является КПД.

Для его расчета была использована формула

$$\eta = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n A_i(F)}{\sum_{i=1}^n A_i(F) + A(M)}, \quad (5)$$

где $A_i(F)$ - работа силы трения, возникающая при взаимодействии сферического зуба с впадиной зуба сателлита на элементарном участке перемещения точки контакта δS_i (рисунок 4); $A(M)$ - работа момента силы M , приложенного к выходному валу передачи; n - количество элементарных участков, на которые разбита линия контакта сферического



1 – сателлит; 2 – сферический палец

Рисунок 4 – Элементарные

перемещения δS_i точки контакта сферического зуба центрального колеса и зуба сателлита

зуба с впадиной зуба сателлита.

Работа сил трения находится по формуле

$$A_i(F) = N_i \cdot f \cdot \delta S_i, \quad (6)$$

где N_i - нормальная сила в контакте; f - коэффициент трения скольжения; δS_i - элементарный участок длины контактной линии.

Координаты точки контакта P могут быть определены из подобия треугольников $\Delta DBC'_i$ и $\Delta DKP'_i$ (рисунок 5):

$$x_{P_i} = \frac{x_{C_i} \cdot r_C}{r_C - r}; y_{P_i} = y_A - \frac{(y_A - y_{C_i}) \cdot r_C}{r_C - r}; z_{P_i} = z_{C_i}. \quad (7)$$

Элементарные перемещения dS_i точки контакта определяются по следующей формуле

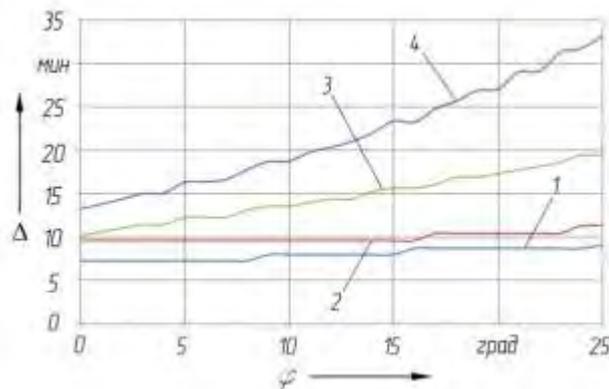
$$dS_i = \sqrt{(x_{P_i} - x_{P_{i-1}})^2 + (y_{P_i} - y_{P_{i-1}})^2 + (z_{P_i} - z_{P_{i-1}})^2}. \quad (8)$$

Значения КПД прецессионной передачи со сферическими зубьями рассчитываются путем подстановки в выражение (5) величин, определяемых в формулах (6-8).

В работе были установлены зависимости для расчета основных параметров зацепления предлагаемой передачи. Его отличие от ранее известных расчетов передач данного типа связано как с особенностями используемого прецессионного зацепления, так и с возможностью проектировать прецессионную передачу с функцией компенсирующей муфты, позволяющей

гарантировать обеспечение требуемых эксплуатационных свойств при заданной обобщенной погрешности.

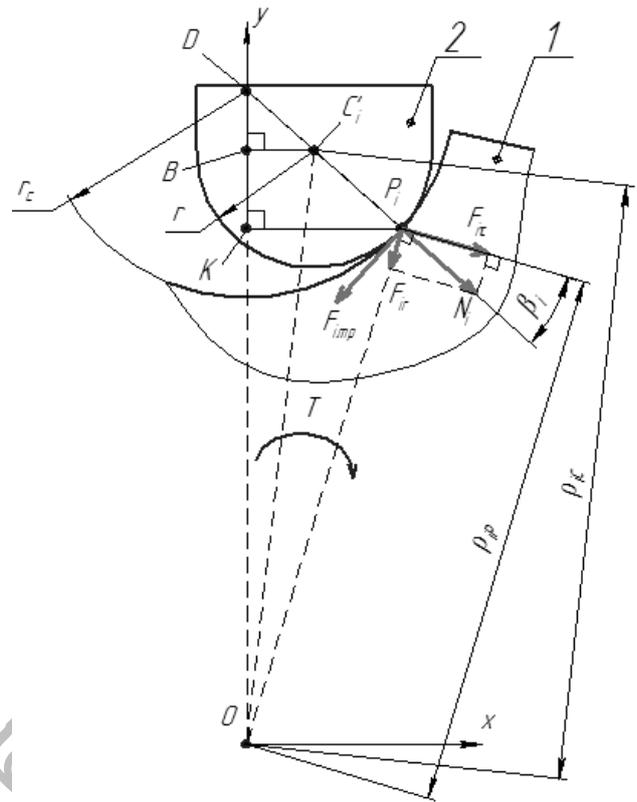
На основе аналитических зависимостей, связывающих кинематическую погрешность вращения выходного вала прецессионного редуцирующего механизма с обобщенной погрешностью, был разработан алгоритм расчета и создана программа. С ее помощью по заданным параметрам зацепления прецессионной передачи, разработанной для привода ковшового элеватора, была определена кинематическая погрешность вращения выходного вала при различной обобщенной погрешности s (рисунок 6). Анализ графиков (рисунок 6) показывает, что при повороте входного вала φ и увеличении обобщенной погрешности s кинематическая погрешность Δ возрастает. Учитывая, что для привода



1 – $s = 0$; 2 – $s = 3$ мм; 3 – $s = 5$ мм; 4 – $s = 7$ мм.

Рисунок 6. – Графики зависимости кинематической погрешности от угла поворота входного вала при различной обобщенной погрешности s

при различной обобщенной погрешности s . Их анализ позволил установить, что номинальные значения КПД (92-94%) с точки зрения эффективной работы прецессионной передачи в приводе обеспечиваются при значениях обобщенной погрешности 3 мм. При обобщенной погрешности s равной 5 мм происходит снижение КПД до 85%, а при 7 мм - до 76%.



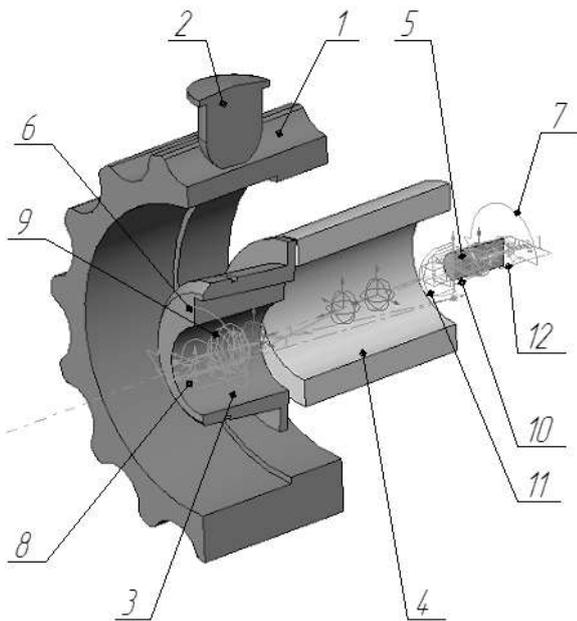
1 – сателлит; 2 – сферический палец

Рисунок 5. – Анализ сил контактного взаимодействия в зацеплении прецессионной передачи

ковшового элеватора допускаемое значение кинематической погрешности равно 25 угловым минутам, результаты исследований дают основания предполагать, что максимальное значение обобщенной погрешности, гарантирующее нормальную работу прецессионной передачи в приводе, не должно быть 5 мм. Следующим основным показателем, определяющим работу прецессионной передачи в приводе, является КПД. На графиках (рисунок 7) показаны зависимости КПД от угла поворота кривошипа

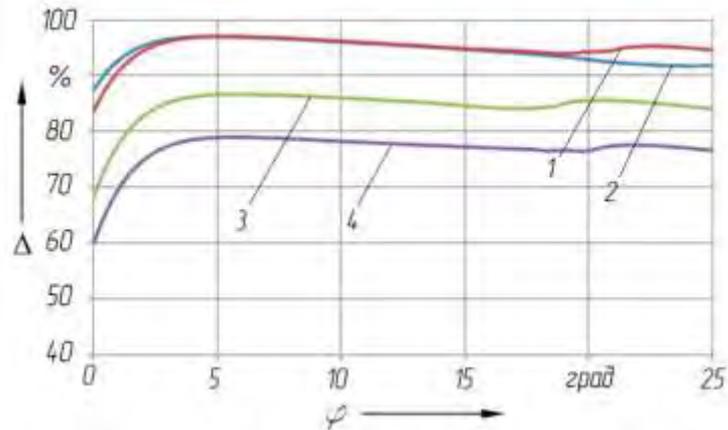
В третьей главе проведены компьютерные исследования, позволившие подтвердить теоретические результаты второй главы, дать сравнительную оценку основных эксплуатационных свойств зацепления предлагаемого варианта прецессионной передачи и передачи-аналога, а также определить значения кинематической погрешности и КПД мотор-редуктора, разработанного на основе прецессионной передачи со сферическими зубьями с учетом наличия обобщенной погрешности.

Вначале третьей главы методами компьютерного моделирования подтверждена адекватность аналитических зависимостей, моделирующих прецессионного зацепление. А именно, с достаточной высокой точностью показано совпадение траектории относительного движения центра сферы зуба центрального колеса, полученной на основе математических зависимостей и траектории, определенной путем компьютерного моделирования движения звеньев в прецессионном зацеплении. Сравнение траекторий осуществлялась как при отсутствии, так и при наличии обобщенной погрешности.



1 – сателлит; 2 – сферический палец; 3 – кривошип; 4 – направляющая втулка; 5 – выходной вал; 6 – крутящий момент; 7 – нагружающий момент; 8 – цилиндрический шарнир входного вала; 9 – сферический шарнир; 10 – центрирующая втулка; 11 – универсальный шарнир; 12 – цилиндрический шарнир выходного вала

Рисунок 8. – Компьютерная модель однопарного зацепления прецессионной передачи со сферическим зубом



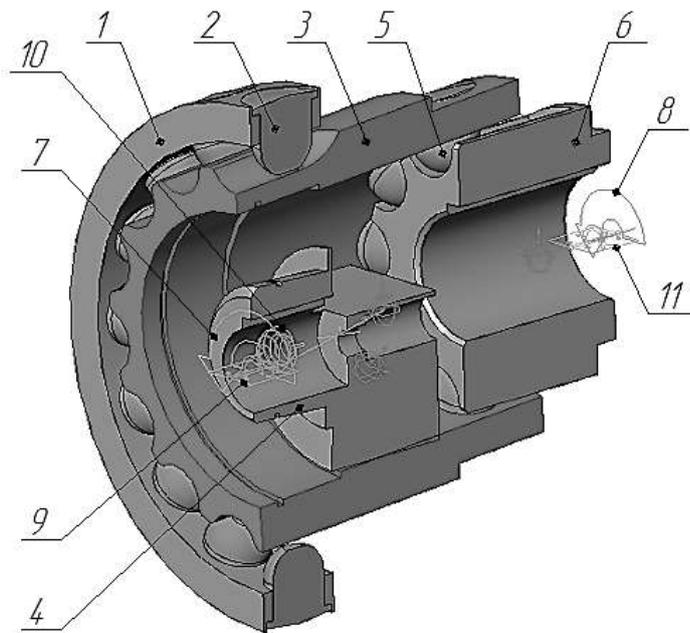
1 – $s = 0$; 2 – $s = 3 \text{ мм}$; 3 – $s = 5 \text{ мм}$; 4 – $s = 7 \text{ мм}$.

Рисунок 7 – Графики зависимости КПД от угла поворота входного вала однопарного зацепления прецессионной передачи при различной обобщенной погрешности s

Для подтверждения достоверности полученных теоретических результатов по определению плавности вращения выходного вала и оценки КПД в однопарном зацеплении прецессионной передачи была разработана ее трехмерная твердотельная компьютерная модель, которая состоит из сателлита 1 с зубьями, имеющими цилиндрические впадины, и зубчатого венца центрального колеса, образованного сферическими радиальными пальцами 2, и представлена на рисунке 8.

Анализ результатов по исследованию кинематической точности и КПД однопарного зацепления прецессионной передачи средствами компьютерного моделирования показал, что при увеличении обобщенной погрешности происходила потеря кинематической точности вращения выходного вала и снижение КПД в зацеплении прецессионной передачи, что подтвердило адекватность, полученных во второй главе аналитических зависимостей.

С целью получения сравнительной оценки выходных показателей предлагаемой прецессионной передачи со сферической и передачи-аналога с конической формами зубьев центрального колеса были проведены компьютерные исследования. Их результаты позволили установить основные эксплуатационные свойства прецессионных передач при наличии обобщенной погрешности в конструкции приводных устройств. В предложенном варианте зацепления прецессионной передачи со сферическими зубьями центрального колеса при обобщенной погрешности равной 5 мм кинематическая погрешность вращения выходного вала в 5 раза ниже, а КПД на 28% выше, чем в варианте прецессионной передачи с конической формой зуба.



- 1 – корпус; 2,5 – сферический палец; 3 – сателлит;
 4 – кривошип; 6 – угловая муфта; 7 – крутящий момент;
 8 – нагружающий момент;
 9 – цилиндрический шарнир входного вала;
 10 – сферический шарнир; 11 – цилиндрический шарнир выходного вала

Рисунок 9. – Компьютерная модель прецессионного редуктора

показаны графики, отражающие зависимость кинематической погрешности вращения выходного вала от угла поворота входного вала при различной обобщенной погрешности. Их анализ показывает, что при обобщенной погрешности равной 5 мм максимальное значение кинематической погрешности достигает 11 угловых минут. При этом видно, что амплитуда

В третьей главе работы также проведены результаты компьютерных исследований редуктора, спроектированного на основе предлагаемого варианта прецессионной передачи со сферическими зубьями.

В отличие от ранее описанных компьютерных моделей, модель прецессионного редуктора включает в себя не только элементы зацепления, но и элементы угловой муфты (рисунок 9).

Обработка результатов компьютерных исследований моделей позволила получить графические зависимости кинематической погрешности и КПД прецессионного редуктора от угла поворота кривошипа (рисунок 10). На рисунке 10,а

колебаний кинематической погрешности зависит от углового положения входного вала. При обобщенной погрешности равной 7 мм происходит увеличение кинематической погрешности до 48 угловых минут.

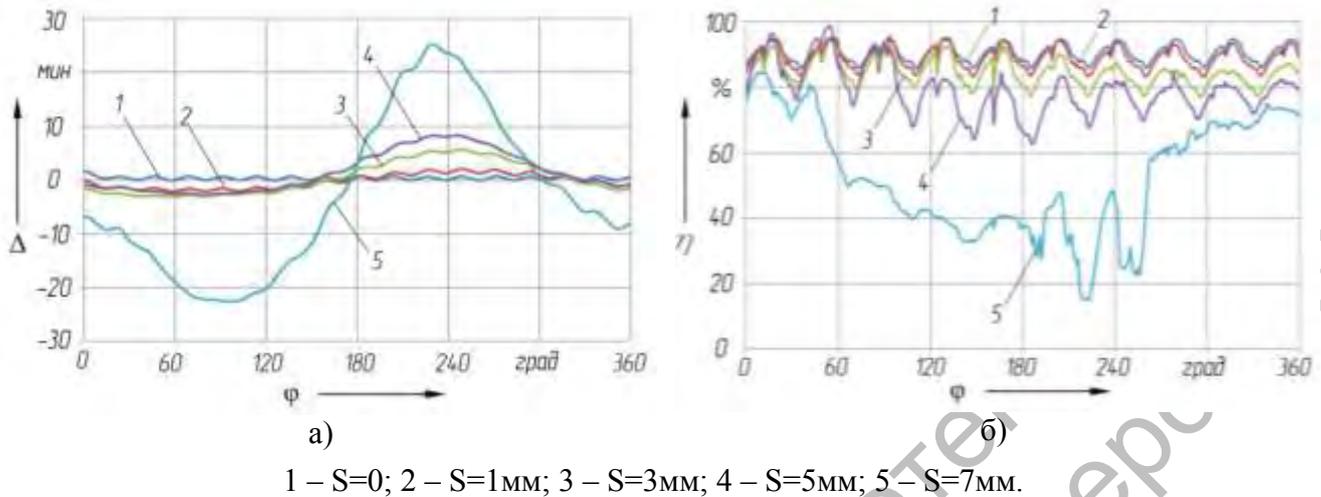


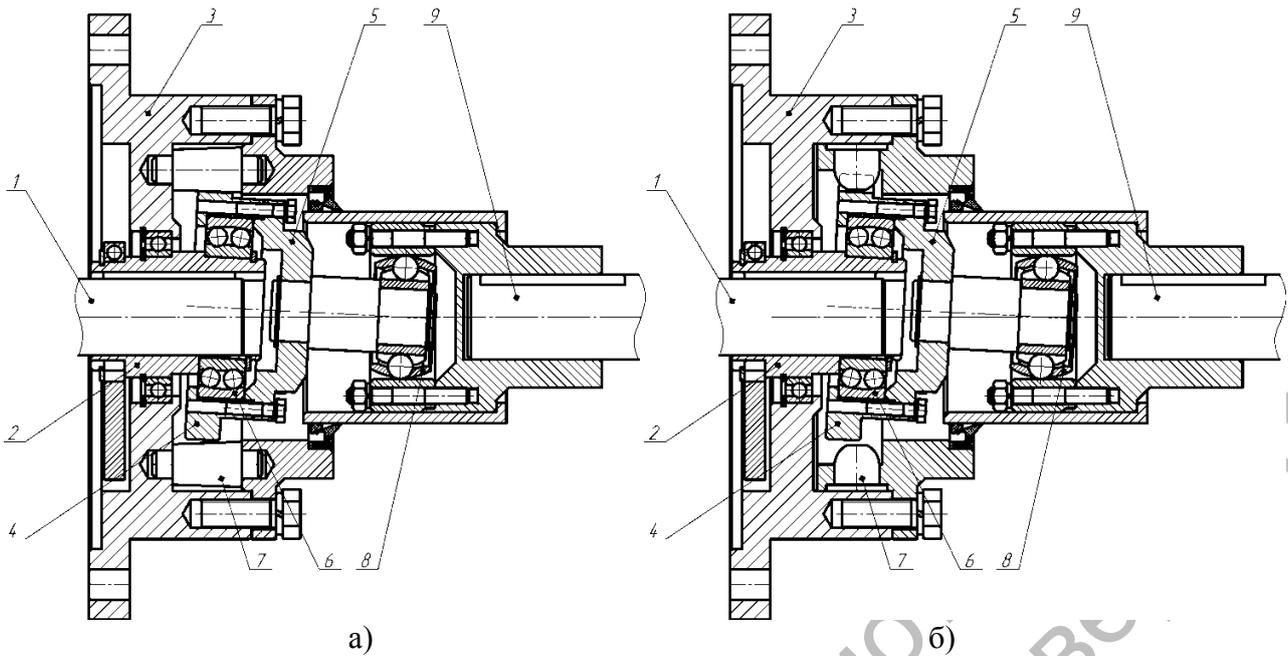
Рисунок 10. – Графики зависимостей эксплуатационных свойств прецессионного редуктора от угла поворота кривошипа при различной обобщенной погрешности S : а) кинематической погрешности; б) КПД

Анализ графиков зависимости КПД от угла поворота входного вала при различной обобщенной погрешности (рисунок 10,б) позволил сделать выводы, что при обобщенной погрешности до 5 мм происходит незначительное уменьшение среднего значения КПД (на 4%). При этом амплитуда колебания КПД не превышает значения 5%. Дальнейшее увеличение обобщенной погрешности до 7 мм вызывает рост амплитуды колебания КПД до 20% и снижение среднего значения КПД передачи до 80%.

Анализ контактных напряжений в зацеплении прецессионного редуктора, проведенный на основе исследований с использованием компьютерных моделей, позволил сделать выводы, что при значении обобщенной погрешности равной 5 мм, контактные напряжения увеличиваются незначительно (в 1,1 раза) и не превышают допустимого значения контактных напряжений. При обобщенной погрешности равной 7 мм контактные напряжения в 3 раза выше, чем в случае, когда обобщенная погрешность равна нулю.

Четвертая глава работы посвящена проектированию мотор-редуктора для привода ковшового элеватора зерносушильного комплекса, на основе созданного расчета параметров прецессионной передачи со сферическими зубьями с функцией компенсирующей муфты. Приведены результаты стендовых и эксплуатационных испытаний прецессионных мотор-редукторов со сферическими зубьями и дано технико-экономическое обоснование эффективности их внедрения в привод ковшового элеватора.

С целью проведения сравнительных стендовых испытаний зацеплений прецессионного мотор-редуктора со сферическими зубьями центрального колеса и прецессионного мотор-редуктора с конической формой зуба были изготовлены их экспериментальные конструкции, общие виды которых показаны на рисунке 11.

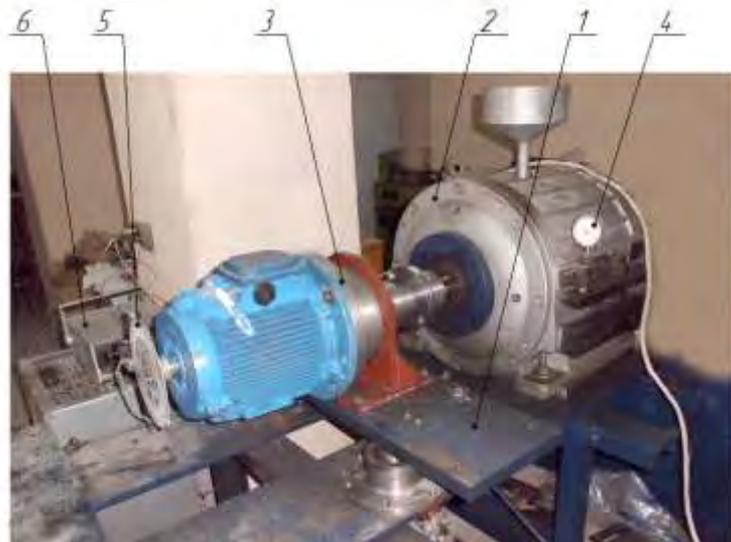


1 – вал электродвигателя; 2 – эксцентриковая втулка; 3 – корпус; 4 – спутник; 5 – хвостовик; 6 – сферический подшипник; 7 – зуб центрального колеса, 8 – шарнир равных угловых скоростей; 9 – приводной вал

Рисунок 11. – Общий вид экспериментальных конструкций прецессионных мотор-редукторов: а) с зубьями центрального колеса, выполненными в виде конических роликов (передача-аналог); б) со сферическими зубьями центрального колеса (предлагаемая передача)

Для устранения влияния угловой муфты, состоящей из сферических пальцев (поз. 6, рисунок 9), на исследуемые показатели зацепления, в конструкции рассматриваемых экспериментальных образцов мотор-редуктора было предложено использовать стандартный шарнир равных угловых скоростей. Его применение обусловлено высокими показателями по плавности вращения и КПД. Поэтому, полученные при стендовых испытаниях результаты, могут характеризовать именно само зацепление сравниваемых прецессионных мотор-редукторов.

Испытания экспериментальных образцов проводились на специализированном стенде, общий вид которого показан на рисунке 12. Для моделирования условий



1 – рама испытательного стенда, 2 – электромагнитный порошковый тормоз, 3 – испытываемый мотор-редуктор, 4 – индикатор часового типа, 5 – датчик угловых перемещений, 6 – выпрямитель .

Рисунок 12. – Общий вид стенда с размещенным на нем экспериментальным образцом прецессионного мотор-редуктора

работы прецессионного мотор-редуктора 3 при наличии обобщенной погрешности s , возникающей между осями входного вала мотор-редуктора 3 и вала порошкового тормоза 2, соединенных между собой угловой муфтой, в качестве которой используется ШРУС, применялся комплект металлических пластин и индикатор часового типа на магнитной стойке.

Стендовые испытания представляли собой серии экспериментов для двух редукторов с обобщенной погрешностью s , равной 0, 1, 3, 5 и 7 мм, при нагружающем моменте на валу тормоза равным 500 Н·м. Было установлено, что в конструкции прецессионного редуктора со сферической формой зубьев центрального колеса при наличии обобщенной погрешности, равной 5 мм, наблюдалось увеличение кинематической погрешности до 15 угловых минут и снижение КПД до 89%. В конструкции мотор-редуктора с конической формой зубьев наблюдается увеличение кинематической погрешности до 45 угловых минут и снижение КПД до 80% при обобщенной погрешности, равной 3 мм.

Прецессионный мотор-редуктор был подвергнут ресурсным испытаниям на стенде, конструкция которого показана на рисунке 12. Указанный мотор-редуктор проработал в течение 250 часов, что превышает заявленный гарантийный срок эксплуатации мотор-редуктора в приводе ковшового элеватора.

После проведения ресурсных испытаний прецессионный мотор-редуктор был установлен в привод ковшового элеватора зерноочистительно-сушильного комплекса КЗСК-30 на КСУП «Экспериментальная база «Дашковка» для эксплуатационных испытаний.

На рисунке 13 показан прецессионный мотор-редуктор 2 закрепленный при помощи рамы 3 на голове нории 1 для перемещения зерновых с низшего уровня к разгрузочному патрубку 4.

Прецессионный мотор-редуктор проработал 3 сезона без поломок в составе привода ковшового элеватора зерносушильного комплекса. За указанный период было транспортировано более 14 000 тонн зерновых. Мотор-редуктор обеспечивал плавную (без рывков и заеданий) работу привода.

Периодически в процессе эксплуатационных испытаний осуществлялся контроль за техническим состоянием прецессионного мотор-редуктора путем его разборки и визуального осмотра, в ходе которого не



1 – голова нории, 2 – мотор-редуктор, 3 – рама привода, 4 – разгрузочный патрубок

Рисунок 13. – Общий вид привода ковшового элеватора

было выявлено поломок и повреждений, влияющих на его работоспособность.

С целью оценки перспективности использования мотор-редуктора на основе планетарного прецессионного зацепления в приводе ковшового элеватора был осуществлен ее сравнительный технико-экономический анализ с используемым серийно в настоящее время в приводе ковшового элеватора итальянским червячным мотор-редуктором SITI MU 110 15/1.

Результаты технико-экономического анализа сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Результаты технико-экономического анализа сравниваемых мотор-редукторов

Редуктор	ППР 15/5,5	SITI MU110
Передаваемая мощность, кВт	5,5	5,5
Номинальная частота вращения входного вала, мин-1	1410	
Передаточное отношение	15	
Коэффициент полезного действия, %	90	86,3
Габаритные размеры, мм	252×300×300	280×300×390
Масса редуктора, кг	30,6	35
Свободная отпускная цена, тыс. бел. руб.	5 218	7 175

На основе сравнительных результатов технико-экономического анализа разработанного прецессионного редуктора и серийно применяемого в приводе шнекового конвейера червячного мотор-редуктором SITI MU 110 15/1 установлено, что прецессионный мотор-редуктор имеет преимущество по массогабаритным показателям и отпускной цене. Рассчитанная экономическая эффективность от использования прецессионного редуктора в приводе ковшового элеватора зерносушильного комплекса составляет более ста пятидесяти пяти миллионов белорусских рублей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Аналитические зависимости оценки кинематической точности [7, 14] и КПД [5] в зацеплении прецессионной передачи со сферическими зубьями, отличающиеся возможностью определять указанные эксплуатационные свойства с учетом погрешности расположения выходного вала, возникающей при ее монтаже и эксплуатации в конструкции приводного устройства, позволившие установить, что при погрешности до 5 мм кинематическая погрешность вращения выходного вала предлагаемого варианта прецессионной передачи не превышает 20 угловых минут, а КПД не опускается ниже 85%, что соответствует требованиям технических условий для приводных устройств ковшовых элеваторов зерносушильного комплекса;

2. Расчет прецессионной передачи со сферическими зубьями, позволяющий определять геометрические параметры мотор-редуктора с функцией компенсирующей муфты [3, 6, 15, 17, 18, 21-23], гарантирующие обеспечение необходимых эксплуатационных свойств при заданной обобщенной погрешности и обеспечивающие приводу компактность, простоту и малогабаритность;

3. Результаты исследований компьютерных моделей различных вариантов прецессионной передачи [2, 12-13], отличающихся возможностью при определении ее основных эксплуатационных свойств учитывать обобщенную погрешность, исследование которых позволило установить, что в предложенном варианте зацепления прецессионной передачи со сферическими зубьями центрального колеса при значении обобщенной погрешности порядка 5 мм кинематическая погрешность вращения выходного вала в 5 раз ниже, а КПД на 28% выше по сравнению с вариантом зацепления прецессионной передачи, имеющим коническую форму зуба центрального колеса;

4. Результаты сравнительных экспериментальных исследований изготовленных образцов прецессионных мотор-редукторов [1, 8, 9, 16, 20], позволившие установить, что при наличии обобщенной погрешности, равной 5 мм в конструкции прецессионного редуктора со сферическими зубьями центрального колеса кинематическая погрешность в 4,5 раз ниже, а КПД на 40% выше, чем в конструкции прецессионного редуктора с конической формой зубьев центрального колеса, что подтвердило адекватность результатов теоретических и компьютерных исследований;

5. Результаты стендовых испытаний экспериментального образца прецессионного мотор-редуктора со сферической формой зубьев центрального колеса [4, 11], позволившие доказать, что при наличии погрешности монтажа до 5 мм отклонения его выходных показателей (кинематической погрешности и КПД) от их значений, полученных при отсутствии погрешности монтажа, не превышают 3%, что позволяет говорить о низкой чувствительности предлагаемого варианта прецессионной передачи к указанной погрешности;

6. Ресурсные и эксплуатационные испытания прецессионного редуктора в составе привода ковшового элеватора [10, 19], подтвердили его работоспособность в составе указанного привода, а результаты технико-экономического анализа, позволили выявить преимущества привода с прецессионным редуктором по сравнению с применяемым в настоящее время червячным редуктором (SITI MU 110 15/1, производства Италия) по массе (в 1,15 раза), габаритным размерам (в 1,4 раза), что обосновало целесообразность применения предложенного прецессионного редуктора в конструкции привода ковшового элеватора с годовым экономическим эффектом, составляющим сто пятьдесят пять миллионов белорусских рублей.

Рекомендации по практическому использованию результатов

Положительные результаты эксплуатационных испытаний экспериментальных образцов прецессионного редуктора, разработанного на основе варианта прецессионной передачи со сферическими зубьями, в конструкции привода ковшового элеватора зерносушильного комплекса позволили заключить между ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет» и ОАО «Казимировский опытно-экспериментальный завод» лицензионное соглашения, предметом которого является «ноу-хау» – конструкция и

технология изготовления и сборки прецессионного мотор-редуктора для привода ковшового элеватора (нории).

Эффект от внедрения прецессионного редуктора в конструкцию привода ковшового элеватора заключается в снижении массогабаритных показателей и повышении технологичности изготовления, а следовательно, в создании ее более конкурентоспособной конструкции.

Разработанный расчет параметров прецессионного редуктора со сферическими зубьями может быть использован различными проектными организациями и предприятиями, занимающимися проектированием и изготовлением приводных устройств различного назначения.

Результаты проведенных исследований внедрены в учебный процесс ГУВ ПО «Белорусско-Российский университет»

Список опубликованных работ по теме диссертации**Монография**

1. Прецессионные редуцирующие механизмы для приводных устройств различного назначения: монография / П.Н. Громько [и др.]. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2013. – 273 с.: ил.

Статьи в научных изданиях, включенных в перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований, рекомендуемых ВАК.

2. Громько, П. Н. Разработка методики исследования плавности работы планетарной прецессионной передачи на основе использования методов компьютерного моделирования / П. Н. Громько, Д. С. Галюжин, Л. Г. Доконов, И. В. Трусов // Вестн. БРУ. - 2007. - №1. – С. 82-89.

3. Громько, П. Н. Анализ распределения полей скоростей скольжения контактирующих зубьев планетарной прецессионной передачи / П. Н. Громько, С. Н. Хатетовский, И. В. Трусов // Материалы технологии инструменты. - 2008. - №2. – С. 25-29.

4. Громько, П. Н. Создание специализированного стенда для комплексного исследования технических характеристик мотор-редукторов / П. Н. Громько, Д. С. Галюжин, Л. Г. Доконов, И. В. Трусов // Горная механика. – 2008. - №4. – С. 75-80.

5. Громько, П. Н. Методика расчета механических потерь в зацеплении прецессионной передачи со сферическими зубьями при наличии погрешностей монтажа / П. Н. Громько, С. Н. Хатетовский, И. В. Трусов, В. Л. Юркова // Материалы технологии инструменты. - 2015. - №1. – С. 25-28.

6. Трусов И. В. Разработка прецессионного редуцирующего механизма с радиальными сферическими пальцами для привода ковшового элеватора зерносушильного комплекса // И. В. Трусов // Вестн. БРУ. - 2015. - № 1. – С. 62-71.

7. Громько, П. Н. Методика определения кинематической точности прецессионной передачи со сферическими зубьями при наличии погрешностей ее монтажа / П. Н. Громько, С. Н. Хатетовский, И. В. Трусов, Р. А. Калентионюк // Вестник БарГУ. Серия: Технические науки. - 2015. - Вып. 3. - С. 28-34.

Статьи и доклады в сборниках научных трудов и в материалах научно-технических конференций

8. Громько, П. Н. К вопросу об областях применения планетарной прецессионной передачи / П. Н. Громько, Д. С. Галюжин, И. В. Трусов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 20-21 апреля 2006 г.: в 3 ч. / М-во

образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, Могилев. обл. исполн. Ком., Нац. Акад. Наук Респ. Беларусь, Бел.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев: Бел.-Рос. ун-т, 2006. – Ч.1. - С. 132-133.

9. Трусов, И. В. Автоматическое обеспечение беззазорного зацепления в планетарной прецессионной передаче // Развитие приграничных регионов Беларуси и России на современном этапе: проблемы и перспективы : материалы науч.-практ. конф. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, Федеральное агентство по образованию, Бел.-Рос. ун-т ; редкол.: И.С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев: Бел.-Рос. ун-т, 2006. – С. 25.

10. Трусов, И. В. Прогнозирование надежности редуцирующих механизмов, разработанных на базе планетарной прецессионной передачи / И.В. Трусов, А.А. Сидорский // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы междунар. науч.-техн. конф. молод. ученых / М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, Федеральное агентство по образованию, Бел.-Рос. ун-т ; редкол.: И.С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев: Бел.-Рос. ун-т, 2007. – С. 40.

11. Трусов, И. В. Разработка стенда для испытания соосных мотор-редукторов / И. В. Трусов, Д. С. Галюжин, Л. Г. Доконов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф.: в 3 ч. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, Могилев. обл. исполн. Ком., Нац. Акад. Наук Респ. Беларусь, Бел.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев: Бел.-Рос. ун-т, 2007. – Ч.1. - С. 151-152.

12. Громько, П.Н. К вопросу сознания инженерной методики прочного расчета планетарных прецессионных передач / П.Н. Громько, И.В. Трусов, С.Д. Макаревич // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф.: в 3 ч. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, Могилев. обл. исполн. ком., Нац. акад. наук Респ. Беларусь, Бел.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев: Бел.-Рос. ун-т, 2008. – Ч.1. - С. 81-82.

13. Трусов, И. В. Разработка метода оценки контактных напряжений в зацеплении планетарной прецессионной передачи на основе использования методов компьютерного моделирования / И.В. Трусов // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы междунар. науч.-техн. конф. молод. ученых / М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, Федеральное агентство по образованию, Белорус.-Рос. ун-т ; редкол.: И.С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2008. – С. 62.

14. Громько, П.Н. Угловая муфта с телами качения для планетарной прецессионной передачи типа К-Н-V / П.Н. Громько, И.В. Трусов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф.: в 3 ч. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, Могилев. обл. исполн. ком., Нац. акад.

наук Респ. Беларусь, Бел.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев: Бел.-Рос. ун-т, 2009. – Ч.1. - С. 123.

15. Трусов, И.В. Разработка конструкции прецессионного мотор-редуктора для привода шнекового конвейера установки норрии FPK-50 / И.В. Трусов // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XII Междунар. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов и молодых ученых, Гомель, 26–27 апр. 2012 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2012.- С. 52-55.

16. Громыко, П.Н. Внедрение планетарных прецессионных передач в приводные механизмы различного назначения / П.Н. Громыко, И.В. Трусов, В.И. Лябик, В.Л. Юркова, Ю.А. Дементус // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф.: в 2 ч. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, Могилев. обл. исполн. ком., Нац. акад. наук Респ. Беларусь, Бел.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев: Бел.-Рос. ун-т, 2013. – Ч.1. - С. 78-79.

17. Трусов, И.В. Бескорпусная редукторная вставка к электродвигателю, разработанная на базе прецессионной передачи типа К-Н-V / И.В. Трусов, П.С. Гончаров // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы междунар. науч.-техн. конф. молод. ученых / М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев: Бел.-Рос. ун-т, 2013. - С. 48.

18. Громыко, П.Н. Конструкция планетарного прецессионного редуктора с радиальными сферическими пальцами / П.Н. Громыко, И.В. Трусов, П.С. Гончаров, Ю.А. Дементус // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф.: в 2 ч. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, Могилев. обл. исполн. ком., Нац. акад. наук Респ. Беларусь, Бел.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев: Бел.-Рос. ун-т, 2014. С. 71-72.

19. Трусов, И.В. Применение прецессионных редукторов в приводе ковшового элеватора зерносушильного комплекса. / И.В. Трусов // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы междунар. науч.-техн. конф. молод. ученых / М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев: Бел.-Рос. ун-т, 2014. - С. 51.

Патенты

20. Пат. 11070 Беларусь, МПК 7 F 16 Н 1/32 Планетарная прецессионная передача / П. Н. Громыко, Д. С. Галюжин, И. В. Трусов: заявитель и патентообладатель Государственное учреждение высшего профессионального

образования «Белорусско-Российский университет». – № а20060412; заявл. 28.04.2006; опубл. 30.08.2008. – 3 с.

21. Пат. 14938 ВУ, МПК F 16 Н 1/32 Планетарная прецессионная передача / П. Н. Громько, И. В. Трусов, П. С. Гончаров; заявитель и патентообладатель Государственное учреждение высшего профессионального образования «Белорусско-Российский университет». – № а20091553; заявл. 11.02.2009; опубл. 30.06.2011. – 4 с.

22. Планетарная прецессионная передача: заявка на выдачу патента на полезную модель, МПК (2006.01) F 16Н 1/32 / П. Н. Громько, И.В. Трусов, Ю.В. Юркова, А.В. Бернадский; заявитель Государственное учреждение высшего профессионального образования «Белорусско-Российский университет». – № и 20140454; заявл. 12.15.2014.

23. Планетарная прецессионная передача: заявка на выдачу патента на изобретение, МПК (2006.01) F 16Н 1/32 / П. Н. Громько, С.Н. Хатетовский, И.В. Трусов, П.С. Гончаров; заявитель Государственное учреждение высшего профессионального образования «Белорусско-Российский университет». – № а 20140686; заявл. 05.12.2014.

РЭЗІЮМЭ
Трусаў Ігар Валер'евіч

АБГРУНТАВАННЕ ЭКСПЛУАТАЦЫЙНЫХ ЎЛАСЦІВАСЦЯЎ ПРЭЦЭСІЙНАЙ ПЕРАДАЧЫ СА СФЕРЫЧНЫМІ ЗУБ'ЯМІ І ФУНКЦЫЯЙ КАМПЕНСАВАЛЬНАЙ МУФТЫ

Ключавыя словы: прэцэсійная перадача, сферычныя зуб'і, кампенсавальная муфта, прывад каўшовага элеватара, абагульненая хібнасць.

Мэта працы: абгрунтаванне эксплуатацыйных уласцівасцяў і разлік параметраў прэцэсійнай перадачы са сферычнымі зуб'ямі цэнтральнага кола пры рэалізацыі ёю функцыі кампенсавальнай муфты.

Метады даследавання: разлікова-эксперыментальныя метады тэорыі верагоднасці, планавання эксперыменту, тэарэтычнай механікі і матэматычнага аналізу, мадэляванне метадам канчатковых элементаў з выкарыстаннем ЭВМ.

Апаратура. Шматканальны аналага-лічбавы пераўтваральнік В-480, датчыкі крутняга становішча ВЕ178АБ.5В-ТТЛ, парашковы электрамагнітны тормаз ПТ-250М, выпрамнік электрычнага току ВУ-42/70А, індыкатар гадзіннага тыпу ИЧ10 кл.0.

Атрыманыя вынікі і іх навізна. Атрыманы аналітычныя залежнасці ацэнкі кінематычнай дакладнасці і ККД прэцэсійнай перадачы са сферычнымі зуб'ямі пры наяўнасці хібнасці прасторавага размяшчэння выходнага вала, што дазволілі абгрунтаваць эксплуатацыйныя ўласцівасці пры рэалізацыі ёю функцыі кампенсавальнай муфты; створаны разлік прэцэсійнай перадачы са сферычнымі зуб'ямі, які ўлічвае хібнасці прасторавага размяшчэння выходнага вала, на аснове якой магчыма распрацоўка канструкцыі матор-рэдуктара, якая забяспечвае кампактнасць, структурную прастату і малагабарытнасць прываду каўшовага элеватара збожжасушыльнага комплексу; распрацаваны кампутарныя мадэлі прэцэсійнай перадачы, што адрозніваюцца магчымасцю ўлічваць абагульненую хібнасць і дазволілі ўсталяваць, што выкарыстанне ў зачэпленні зуб'яў цэнтральнага кола сферычнай формы дазваляе надаць перадачы функцыю кампенсавальнай муфты.

Ступень выкарыстання.

Матор-рэдуктар на аснове прэцэсійнай перадачы са сферычнымі зуб'ямі ўкаранёны ў прывад каўшовага элеватара зернеачышчальна-сушыльнага комплексу КЗСК-30 на КСУП «Эксперыментальная база «Дашкаўка». Вынікі даследаванняў выкарыстоўваюцца ў навучальным працэсе ГУ ВПО «Беларуска-Расійскі ўніверсітэт».

Галіна ужывання: электрамеханічныя прыводы для прамысловасці і сельскай гаспадаркі.

РЕЗЮМЕ

Трусов Игорь Валерьевич

**ОБОСНОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ
ПРЕЦЕССИОННОЙ ПЕРЕДАЧИ СО СФЕРИЧЕСКИМИ ЗУБЬЯМИ И
ФУНКЦИЕЙ КОМПЕНСИРУЮЩЕЙ МУФТЫ**

Ключевые слова: прецессионная передача, сферические зубья, компенсирующая муфта, привод ковшового элеватора, обобщенная погрешность.

Цель работы: обоснование эксплуатационных свойств и расчет параметров прецессионной передачи со сферическими зубьями центрального колеса при реализации ею функции компенсирующей муфты.

Методы исследования: расчетно-экспериментальные методы теории вероятности, планирования эксперимента, теоретической механики и математического анализа, моделирование методом конечных элементов с использованием ЭВМ.

Аппаратура. Многоканальный аналого-цифровой преобразователь В-480, датчики углового положения ВЕ178АБ.5В-ТТЛ, порошковый электромагнитный тормоз ПТ-250М, выпрямитель электрического тока ВУ-42/70А, индикатор часового типа ИЧ10 кл. 0.

Полученные результаты и их новизна. Получены аналитические зависимости оценки кинематической точности и КПД прецессионной передачи со сферическими зубьями при наличии погрешности пространственного расположения выходного вала, позволившие обосновать эксплуатационные свойства при реализации ею функции компенсирующей муфты; создан расчет прецессионной передачи со сферическими зубьями, учитывающий погрешности пространственного расположения выходного вала, на основе которой возможна разработка конструкции мотор-редуктора, обеспечивающей компактность, структурную простоту и малогабаритность приводе ковшового элеватора зерносушильного комплекса; разработаны компьютерные модели прецессионной передачи, отличающиеся возможностью учитывать обобщенную погрешность и позволившие установить, что использование в зацеплении зубьев центрального колеса сферической формы позволяет придать передаче функцию компенсирующей муфты.

Степень использования.

Мотор-редуктор на основе прецессионной передачи со сферическими зубьями внедрен в привод ковшового элеватора зерноочистительно-сушильного комплекса КЗСК-30 на КСУП «Экспериментальная база «Дашковка». Результаты исследований используются в учебном процессе ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет».

Область применения: электромеханические приводы для промышленности и сельского хозяйства.

SYMMARY

Trusov Igor Valerjevich

SUBSTANTIATION OF PERFORMANCE PROPERTIES OF PRECESSIONAL REDUCING MECHANISM WITH SPHERICAL TOOTH AND SLIP COUPLING FUNCTION

Key words: precessional reducing mechanism, spherical tooth, slip coupling, bucket elevator drive, generalized measure of inaccuracy.

The object: operational characteristics substantiation and calculation of precessional reducing mechanism with spherical tooth in centre wheel while implementation of the slip coupling function.

Research methods: calculation and experiment methods of the theory of probability, experiment planning, theory of mechanics and mathematical analysis, modeling with finite element method using computer.

Equipment: The multichannel analog-to-digital converter B-480, angular position sensor BE178AB.5B-TTL, electromagnetic powder brake PT-250M, electric current eliminator BY-42/70/A, dial gauge ICh10kl.0.

The results obtain and their novelty. Were received analytical dependences of the kinematic accuracy evaluation, analytical dependences of efficiency of precessional reducing mechanism with spherical tooth in presence of errors of spatial relationship of the output shaft. That allowed to substantiate performance properties while implementation of the slip coupling function. Was established a valuation of precessional reducing mechanism with spherical tooth, that considers errors of spatial relationship of the output shaft. On the basis of above mentioned reducing mechanism it became possible to develop a design of gear-motor, providing compactness, structural simplicity and light size to bucket elevator drive of grain drying complex. Computer models of precessional reducing mechanism were developed, they tare notable for the possibility to take into account the generalized error and gave the possibility to settle that adoption of spherical form in gear mesh makes possible to give to a transmission a slip coupling function.

Extent of application.

Gear-motor based on of precessional reducing mechanism with spherical tooth was implemented into bucket elevator drive of grain drying complex. KZSK-30 on KSUP "Experimental complex "Dashkovka". The results of the research are being used in the educational process of SIHPE "Belarusian-Russian University"

The sphere of implementation: electro-mechanical drives for industry and agriculture.