

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ**

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО  
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

УДК 621.(06)

**ЖИГУНОВ  
СЕРГЕЙ АНАТОЛЬЕВИЧ**

**НОРМИРОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ШАРИКОВОЙ РАДИАЛЬНО-  
ПЛУНЖЕРНОЙ ПЕРЕДАЧИ И ЕЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ НА ЭТАПАХ  
КОНСТРУКТОРСКОЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ  
ПРОИЗВОДСТВА**

Специальность 05.02.08  
«Технология машиностроения»

**Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

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

Научный руководитель

- доктор технических наук,  
профессор Михаил Федорович  
Пашкевич, ГУВПО  
«Белорусско-Российский  
университет», г. Могилев

Официальные оппоненты

- доктор технических наук,  
профессор Лев Михайлович  
Кожуро, ГУВПО  
«Белорусский аграрный  
технический университет»,  
г. Минск  
- кандидат технических наук,  
доцент Александр Михайлович  
Довгалев, ГУВПО  
«Белорусско-Российский  
университет», г. Могилев

Оппонирующая организация

- Государственное учреждение  
высшего профессионального  
образования «Новополоцкий  
государственный технический  
университет», г. Новополоцк

Защита состоится « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2006 г.

В \_\_\_\_\_  
на заседании совета по защите диссертаций К 02.18.01 при  
Государственном учреждении высшего профессионального образования  
«Белорусско-Российский университет» по адресу: 212005, г. Могилев, пр-т  
Мира, 43.

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

Автореферат разослан « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2006 г.

Ученый секретарь

Совета по защите диссертаций  
доктор физико-математических наук

В.И. Борисов

**ЖИГУНОВ Сергей Анатольевич**

**НОРМИРОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ШАРИКОВОЙ РАДИАЛЬНО-  
ПЛУНЖЕРНОЙ ПЕРЕДАЧИ И ЕЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ НА ЭТАПАХ  
КОНСТРУКТОРСКОЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ  
ПРОИЗВОДСТВА**

05.02.08 – Технология машиностроения

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Электронная библиотека  
Белорусско-Российского университета

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** Повышение качества и технического уровня механических передач, особенно их новых типов всегда являлось актуальной проблемой. На основе решения этой проблемы может быть в значительной мере обеспечена конкурентоспособность многих видов машиностроительной продукции за счет создания более совершенного и дешевого привода. В настоящее время есть тенденция использования в приводах общего машиностроения малогабаритных передач, к которым относится и шариковая радиально-плунжерная передача.

Для внедрения радиально-плунжерных передач в машиностроительную практику необходимо обеспечить оптимальную для заданных условий их конструкцию. Решению этой задачи посвящено много работ. Однако все еще нерешенной остается задача нормирования и обеспечения точности шариковой радиально-плунжерной передачи. Ее решение должно начинаться еще на этапе конструкторской и технологической подготовки производства, то есть задолго до изготовления изделия. При этом сроки подготовки производства оказываются тем короче, чем совершеннее сама система этой подготовки, то есть насколько она отвечает современному уровню автоматизации на основе использования современных компьютерных технологий. В этой связи тема диссертации, посвященной нормированию точности шариковой радиально-плунжерной передачи и ее обеспечению на этапах конструкторской и технологической подготовки производства, является актуальной.

Тема диссертационной работы соответствует приоритетным направлениям фундаментальных научных исследований Республики Беларусь в части разработки теории проектирования на основе компьютерных методов расчета и моделирования (пункт 2.3 Постановления Совета Министров Республики Беларусь №111 от 29.01.2002г.).

**Связь работы с крупными научными программами, темами.** Диссертационная работа выполнялась в рамках задания 13 Республиканской программы ориентированных фундаментальных исследований «Надежность и безопасность» (тема ГБ-0160 «Создание основ компьютерного моделирования, расчета и проектирования малогабаритных шариковых и роликовых механизмов», № ГР 20011911 от

11.06.2001 г.), а также темы ГБ-049ф «Повышение качества и технического уровня шариковой радиально-плунжерной передачи на основе автоматизации ее конструкторского и технологического проектирования», №20042156 от 11.08.2004 г., финансируемой в рамках гранта Министерства образования Республики Беларусь.

**Цель и задачи исследования.** Целью работы является создание системы нормирования и обеспечения точности шариковых радиально-плунжерных передач на этапе подготовки их производства, то есть при их конструкторском и технологическом проектировании.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие задачи.

1. Исследовать влияние погрешностей изготовления деталей шариковых радиально-плунжерных передач на их кинематическую точность и плавность работы.

2. Оценить и обеспечить соответствие кинематических погрешностей шариковых радиально-плунжерных передач нормам кинематической точности и плавности работы зубчатых передач.

3. Разработать по аналогии с зубчатыми передачами систему нормирования кинематической точности и плавности работы исследуемых передач, а также назначить показатели кинематической точности и плавности и определить допуски на эти показатели.

4. Разработать комплексы и средства производственного контроля нормируемых погрешностей, определяющих кинематическую точность и плавность работы.

5. Разработать технологические процессы изготовления деталей передачи, обеспечивающие заданную степень кинематической точности и плавности работы.

6. Обеспечить достижение требуемой кинематической точности и плавности работы при подготовке производства шариковых радиально-плунжерных передач путем автоматизированного выбора параметров точности на основе создания автоматизированной системы ее конструкторского и технологического проектирования.

**Объект и предмет исследования.** Объектом исследования является шариковая радиально-плунжерная передача. Предмет исследования – погрешности изготовления деталей шариковой радиально-плунжерной передачи, кинематическая точность и плавность ее работы, а также влияние на кинематическую точность и плавность работы элементарных погрешностей изготовления деталей передачи.

**Методология и методы проведенного исследования.** Методология исследования в работе основана на применении вычислительной техники и математического моделирования, а также экспериментальной оценки

кинематической точности и плавности работы шариковой радиально-плунжерной передачи.

При проведении исследований использовались методы математического моделирования кинематических погрешностей; гармонического анализа результатов математического моделирования и экспериментальной оценки кинематической погрешности шариковой радиально-плунжерной передачи на основе разложения функции погрешности в ряд Фурье; экспериментальной оценки кинематической погрешности передачи в сборе на специальном автоматизированном стенде; оптимизации геометрических и конструктивных параметров передачи.

**Научная новизна и значимость полученных результатов.** Научная новизна и значимость работы заключается в следующем.

1. На основе математического моделирования работы шариковой радиально-плунжерной передачи, учитывающего погрешности изготовления ее деталей, впервые получены новые математические соотношения, определяющие кинематическую погрешность передачи, которая вызвана погрешностями изготовления периодического профиля центрального колеса, шариков, эксцентрика, сепаратора, ведущего и ведомого валов. Дана оценка влияния этих погрешностей изготовления деталей передачи на составляющие амплитудно-частотного спектра ее кинематической погрешности.

2. Впервые установлено, что на основе нормирования погрешностей изготовления только профиля центрального колеса, диаметра эксцентрика, углового шага отверстий сепаратора, расположения несущих ступеней ведущего и ведомого валов может быть обеспечена требуемая степень кинематической точности и плавности работы шариковой радиально-плунжерной передачи.

3. На основе моделирования и экспериментальных исследований кинематических погрешностей радиально-плунжерных передач, а также анализа их спектров и сравнения с погрешностями зубчатых передач впервые показано, что кинематические погрешности шариковых радиально-плунжерных передач могут быть приведены в соответствие с нормами кинематической точности и плавности работы зубчатых передач.

4. На основе разработанной системы нормирования точности, включающей степени, нормы точности и коэффициенты перехода между степенями, установлены комплексы контроля нормируемых показателей, позволяющие обеспечить требуемую степень кинематической точности и плавности работы шариковой радиально-плунжерной передачи в зависимости от точности изготовления ее деталей.

5. Показано, что достижение требуемой кинематической точности и плавности работы шариковой радиально-плунжерной передачи возможно на основе выбора рекомендованных технологических процессов изготовления деталей передачи, которые обеспечивают получение тех значений нормируемых показателей точности, которые предусмотрены установленными нормами.

**Практическая и экономическая значимость полученных результатов.** Практическая значимость представленных в работе исследований состоит в следующем.

1. Разработаны системы нормирования точности, конструкторского и технологического проектирования исследуемых передач, обеспечивающие возможность их производства с заданной степенью кинематической точности и плавности работы. Эти системы обеспечивают соответствие точности шариковых радиально-плунжерных передач нормам кинематической точности и плавности работы зубчатых передач.

2. Разработаны рекомендации по выбору технологических процессов изготовления деталей шариковых радиально-плунжерных передач, которые обеспечивают достижение 8-12 степеней кинематической точности и плавности их работы.

3. Разработано универсально-наладочное контрольное приспособление для оценки погрешностей изготовления деталей передачи, обеспечивающее автоматизацию контроля и выдачу обобщающей информации о качестве контролируемой детали.

4. Выполненные в диссертации разработки нашли применение в производстве (РУП «Завод «Могилевлифтмаш», МГКУП СК «Центральный», НПК «Наука», частное предприятие индивидуального предпринимателя Ореховского В.В.), а также в учебном процессе Белорусско-Российского университета.

Экономическая значимость представленных в работе исследований определяется следующими показателями, подтвержденными соответствующими актами.

1. Использование шарикового радиально-плунжерного редуктора с передаточным отношением  $u=50$  в приводе станка монтажа-демонтажа шин автомобильных колес взамен импортного зубчатого редуктора обеспечило экономический эффект в размере 440 000 белорусских рублей.

2. Использование поливочного комплекса, в приводе которого установлен шариковый радиально-плунжерный редуктор с передаточным отношением  $u=34$ , позволило отказаться от приобретения импортного оборудования, обеспечив при этом сокращение затрат в размере 3 307 960 белорусских рублей.

**Основные положения выносимые на защиту.**

1. Новые математические соотношения, определяющие связь кинематической точности и плавности работы шариковой радиально-плунжерной передачи с погрешностями формы и расположения поверхностей центрального колеса, шариков, эксцентрика, сепаратора, ведущего и ведомого валов, полученные на основе математического и компьютерного моделирования.

2. Система нормирования точности шариковой радиально-плунжерной передачи, обеспечивающая требуемую кинематическую точность и плавность ее работы, результаты проверки корректности этой системы, а также комплексы и средства производственного контроля нормируемых погрешностей.

3. Рекомендуемые технологические процессы изготовления деталей шариковой радиально-плунжерной передачи, обеспечивающие 8-12 степени кинематической точности и плавности работы передачи в соответствии с разработанной системой нормирования ее точности.

4. Система автоматизации конструкторского и технологического проектирования шариковой радиально-плунжерной передачи с заданной кинематической точностью и плавностью работы, обеспечивающая оптимизацию ее конструкции и проектирование рациональных технологических процессов изготовления ее деталей.

**Личный вклад соискателя.** Опубликованные по теме диссертации работы выполнены автором лично и в соавторстве. Научному руководителю принадлежит основная идея работы. Основными соавторами по опубликованным работам являются профессор Пашкевич М.Ф., доцент Пашкевич В.М., доцент Рязанцев А.Н., ассистент Пашкевич А.М. В опубликованных работах автор осуществлял постановку задач, предлагал направления решения научных проблем, участвовал в теоретических и экспериментальных исследованиях, формулировке общих подходов к проблеме нормирования и обеспечения точности шариковых радиально-плунжерных передач и выводов по результатам диссертационной работы.

Таким образом, автором лично разработаны модели кинематической погрешности передачи, позволившие получить новые математические соотношения; дана оценка соответствия кинематических погрешностей шариковых радиально-плунжерных передач нормам кинематической точности зубчатых передач; разработана система нормирования точности и плавности работы шариковой радиально-плунжерной передачи; разработаны рекомендации по выбору технологических процессов изготовления деталей шариковых радиально-плунжерных передач; разработана автоматизированная система конструкторского и технологического проектирования шариковой радиально-плунжерной передачи с заданной кинематической точностью и плавностью работы.



Результаты научных исследований, приведенные в диссертации, получены соискателем лично.

**Апробация результатов диссертации.** Основные положения диссертационной работы представлены на республиканских и международных научно-технических конференциях: «Современные технологии, материалы, машины и оборудование» (г.Могилев, 2002г.), «Прогрессивные технологии, машины и механизмы в машиностроении» (г.Калининград, 2002г.), «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии» (г.Минск, 2002г.), «Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях» (г.Гомель, 2003г.), «Прогрессивные технологии, технологические процессы и оборудование» (г.Могилев, 2003г.), «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии» (г.Минск, 2003г.), «Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности» (г.Могилев, 2004г.).

**Опубликованность результатов.** Результаты настоящей работы опубликованы в 15 работах, в том числе, в описаниях к 2 патентам на полезные модели, 7 статьях в научно-технических журналах, включенных в перечень изданий для опубликования результатов диссертационных исследований, 2 статьях в сборниках научных статей и 4 тезисах докладов в сборниках тезисов по результатам участия в научно-технических конференциях. Общий объем опубликованных материалов составляет 55 страниц.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, основной части, состоящей из 5 глав, заключения, списка использованных источников из 116 наименований и 6 приложений. Полный объем диссертации 159 страниц. Диссертация содержит 143 страницы текста, 42 рисунка, 17 таблиц, объем приложений 16 страниц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цель и задачи исследования, сформулированы научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Приводятся положения, выносимые на защиту, и краткая аннотация работы.

**В первой главе** приведен обзор исследований, посвященных развитию знаний о различных видах шариковых и роликовых передач, их геометрии, конструкциях, свойствах, преимуществах и недостатках. На основе проведенного литературного анализа из многообразия передач, использующих тела качения, выделена шариковая радиально-плунжерная передача, отличающаяся рядом положительных качеств, отвечающая тенденциям использования малогабаритных передач в приводах общего

назначения и являющаяся новым и экономичным объектом для внедрения в машиностроительную практику.

Показано, что, несмотря на перспективность использования шариковых радиально-плунжерных передач, вопрос нормирования их точности и ее обеспечения на этапе подготовки производства не рассматривался. Не исследовано влияние погрешностей обработки деталей зацепления на кинематическую погрешность передачи и ее составляющие. Не уделялось внимание нормированию точности передачи и оценке соответствия ее кинематических погрешностей нормам точности других типов передач. Технологическое проектирование осуществлялось вне связи с требованиями по кинематической точности и плавности работы передачи. Не были разработаны комплексы контролируемых погрешностей, способы и средства контроля погрешностей изготовления деталей передачи.

Показано, что на основе разработанной системы нормирования точности, а также системы автоматизации конструкторского и технологического проектирования, может быть обеспечен высокий технический уровень шариковой радиально-плунжерной передачи.

Создание системы нормирования и обеспечения точности шариковых радиально-плунжерных передач на этапе подготовки их производства, то есть при их конструкторском и технологическом проектировании, направлено на сокращение затрат на проектирование и производство приводов машин, механизмов и технологического оборудования, использующих такие передачи.

**Во второй главе** приведены теоретические и экспериментальные исследования кинематической погрешности шариковых радиально-плунжерных передач, позволившие получить новые результаты и выводы.

Неравномерность вращения выходного звена передачи определяется погрешностями изготовления ее деталей. К деталям зацепления рассматриваемой передачи относятся эксцентрик 1, центральное колесо с периодическим профилем 2, шарики 3, ведущий вал 4, а также ведомый вал 5, выполненный заодно целое с сепаратором (рис.1).

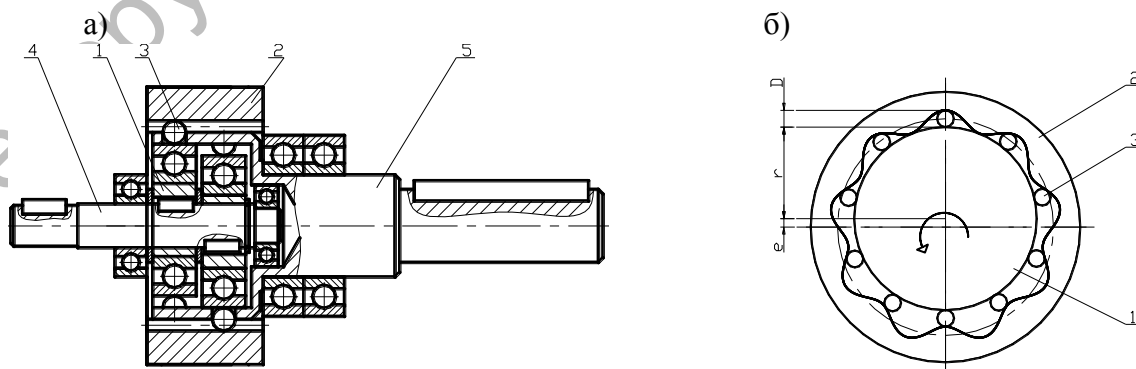


Рис.1. Шариковая радиально-плунжерная передача:

а - конструктивная схема; б - схема зацепления

В идеальной передаче (без погрешностей изготовления деталей) кинематическая погрешность передачи отсутствует, а радиусы-векторы точек соприкосновения шариков с периодическим профилем определяются уравнениями смещенной окружности  $\rho_{1и}$  и соответствующей ей периодической кривой  $\rho_{2н}$ .

Погрешности изготовления деталей зацепления вызывают изменение угловых параметров и радиусов-векторов точек касания шариков с периодическим профилем  $\rho_{1и0}$ , что определяет неравномерность вращения ведомого звена (кинематическую погрешность). Математическая модель реальной передачи, выполненной с погрешностями поверхностей деталей, представлена уравнениями:

$$\rho_{1и0} = \sqrt{(r + \delta_1)^2 - e^2 \sin^2 \varphi_{1и}} + e \cos \varphi_{1и} + D, \quad (1)$$

$$\rho_{1и0} = \sqrt{r^2 - e^2 \sin^2 \varphi_{1и}} + e \cos \varphi_{1и} + D - \delta_2, \quad (2)$$

$$\rho_{1и0} = \sqrt{r^2 - (e \pm \delta_3)^2 \sin^2 \varphi_{1и}} + (e \pm \delta_3) \cos \varphi_{1и} + D, \quad (3)$$

$$\rho_{1и0} = \sqrt{(\rho_{1иH} + \delta_4 \cos \varphi_{1иH})^2 + \delta_4^2 \sin^2 \varphi_{1иH}}, \quad (4)$$

$$\rho_{1и0} = \sqrt{r^2 - e^2 \sin^2 \varphi_{1и}} + e \cos \varphi_{1и} + D + \delta_7. \quad (5)$$

В этих уравнениях обозначены:  $r$  – радиус средней окружности;  $e$  – величина эксцентриситета эксцентрика;  $\varphi_{1и}$  – номинальный угол поворота ведущего звена;  $D$  – диаметр шарика;  $\delta_1$  – погрешность радиуса эксцентрика;  $\delta_2$  – погрешность диаметра шарика;  $\delta_3$  – погрешность эксцентриситета эксцентрика;  $\delta_4$  – радиальное биение ведущего вала;  $\delta_7$  – погрешность положения шарика.

Радиальное биение ведомого вала  $\delta_5$  также вызывает кинематическую погрешность  $\Delta\varphi_{2и}$ , определяемую по формуле

$$\Delta\varphi_{2и} = \delta_5 \sin \varphi_{2иH} / R_c. \quad (6)$$

где  $\varphi_{2иH}$  – номинальный угол поворота ведомого звена;  $R_c$  – радиус сепаратора.

Кинематическая погрешность шариковой радиально-плунжерной передачи, обусловленная погрешностями расположения отверстий в сепараторе  $\delta_6$  и погрешностью шага центрального колеса  $f_p$ , вызвана

угловыми смещениями шариков, определяющих дополнительные повороты ведомого звена.

Кинематическая погрешность передачи, вызванная радиальным биением периодического профиля центрального колеса  $F_r$ , определяется суммированием кинематических погрешностей, вызванных смещением осей ведомого и ведущего валов относительно оси центрального колеса, определяемых по формулам (4) и (6).

При теоретическом определении кинематической погрешности по математической модели осуществлялась оценка колебания угла поворота ведомого вала  $\Delta\varphi_2$  при последовательных поворотах ведущего звена на угол  $\varphi$  в пределах полного оборота ведомого вала. По найденным значениям  $\Delta\varphi_2$  строился график, а также производился спектральный анализ полученной функции кинематической погрешности (рис.2). При этом функция кинематической погрешности  $\Delta\varphi_2$  в зависимости от угла поворота  $\varphi$  представлялась в виде ряда Фурье с конечным числом членов  $k = n$ :

$$\Delta\varphi_2 = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n (a_k \cos k\varphi + b_k \sin k\varphi), \quad (7)$$

$$\text{где } a_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \Delta\varphi_2 d\varphi; \quad a_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \Delta\varphi_2 \cos k\varphi d\varphi; \quad b_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \Delta\varphi_2 \sin k\varphi d\varphi.$$

Было установлено, что некоторые погрешности деталей передачи вызывают появление циклических составляющих кинематической погрешности передачи, определяя плавность работы передачи и наличие в амплитудно-частотном спектре кинематической погрешности гармонических составляющих с частотами, равными или кратными передаточному отношению передачи  $U$ , количеству зубьев центрального колеса  $U-1$  и числу шариков в сепараторе.

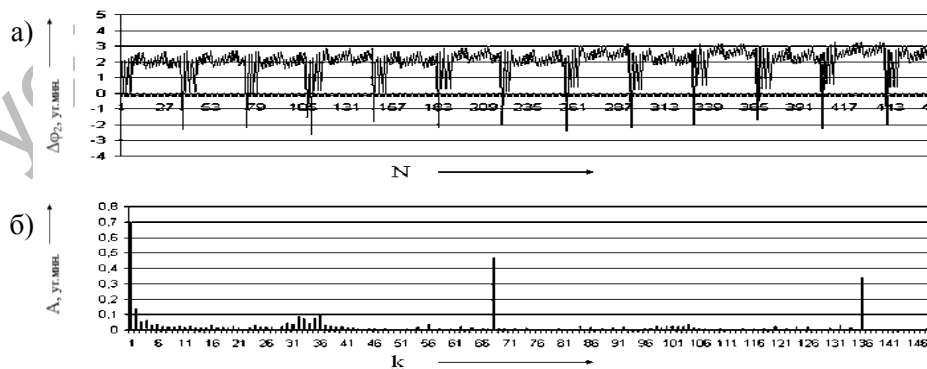


Рис.2. Кинематическая погрешность шариковой радиально-плунжерной передачи ( $U=34$ ), вызванная радиальным биением профиля центрального колеса  $F_r = 0,071$  мм: а – график кинематической погрешности; б – дискретный амплитудно-частотный спектр

Радиальное биение ведомого вала и радиальное биение средней окружности центрального колеса, определяют появление первой гармонической составляющей кинематической погрешности, определяя кинематическую точность передачи.

Результаты математического моделирования и анализа кинематических погрешностей были подтверждены экспериментальными исследованиями опытных образцов редукторов. Для экспериментальной оценки кинематической погрешности передачи была использована автоматизированная система, включающая испытательный стенд, преобразователь угловых перемещений и регистратор сигналов от преобразователя в виде персональной ЭВМ с устройством расширения ее функциональных возможностей (рис.3).

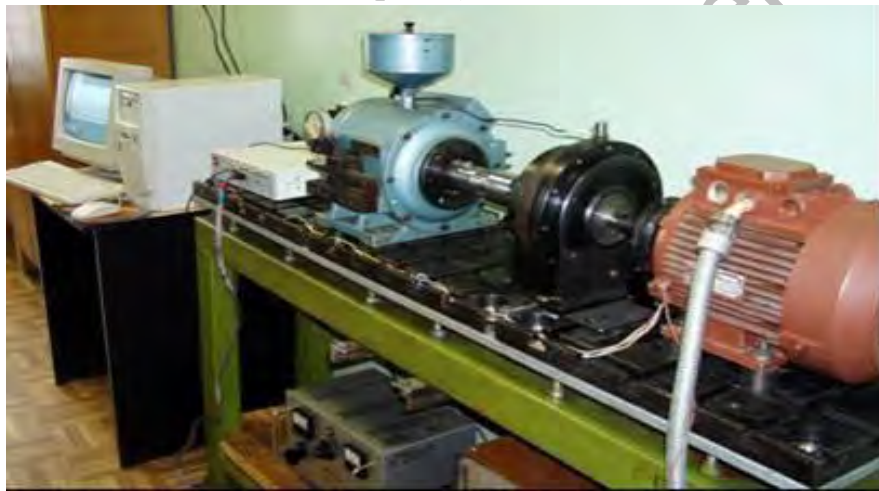


Рис.3. Фотография автоматизированной системы для измерения кинематической погрешности передачи

Были проведены экспериментальные исследования шариковых радиально-плунжерных передач с передаточными отношениями  $U=17,34,45,50$ . В результате экспериментов были получены графики и амплитудно-частотные спектры кинематической погрешности опытных редукторов. Как и при теоретических исследованиях, в ходе экспериментов было установлено, что наибольшие значения амплитуд гармонических составляющих, определяющих плавность работы передачи, соответствуют номерам, равным и кратным передаточному отношению, количеству шариков в сепараторе, количеству периодов профиля центрального колеса и их произведениям (рис.4). Была установлена связь между амплитудами разных частот и конкретными погрешностями изготовления деталей передачи.

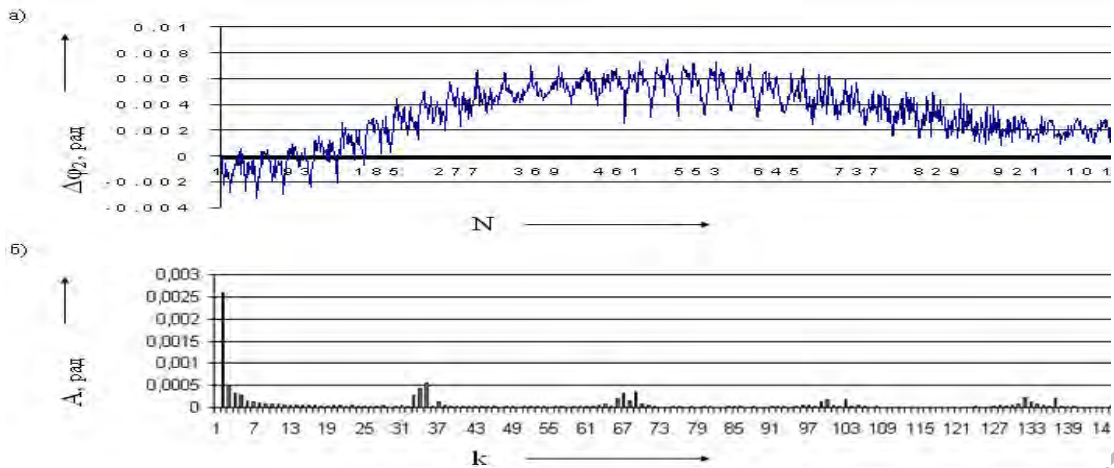


Рис.4. Кинематическая погрешность опытного образца шариковой радиально-плунжерной передачи ( $U=34$ ) при нагрузке на ведомом валу 55 Нм: а – график кинематической погрешности; б – дискретный амплитудно-частотный спектр

Таким образом, выполненные теоретические и экспериментальные исследования кинематических погрешностей передач позволили создать основу для разработки системы нормирования кинематической точности и плавности работы шариковых радиально-плунжерных передач.

**Третья глава** посвящена разработке системы нормирования кинематической точности и плавности работы шариковой радиально-плунжерной передачи.

Было показано, что для нормирования кинематической точности и плавности работы шариковой радиально-плунжерной передачи целесообразно использовать тот же подход, что и при нормировании точности зубчатых передач. По аналогии с зубчатыми передачами, для шариковой радиально-плунжерной передачи установлено 7 степеней кинематической точности и плавности работы (с 6 по 12). Для каждой степени точности назначены нормируемые показатели кинематической точности и плавности работы, величины которых определены на основе моделирования и экспериментальной оценки кинематической погрешности опытных образцов передач.

Для обеспечения кинематической точности предусмотрен комплексный показатель – наибольшая кинематическая погрешность передачи  $F'_{ior}$ . Допуск на ее величину  $F'_{io}$  установлен в соответствии с допуском аналогичного показателя точности зубчатой цилиндрической передачи, благодаря чему обеспечивается соответствие степеней кинематической точности рассматриваемой передачи степеням кинематической точности зубчатых цилиндрических передач.

Наряду с комплексным показателем кинематической точности  $F'_{ior}$  были приняты другие показатели кинематической точности, обусловленные погрешностями центрального колеса и ведомого звена

передачи: наибольшая кинематическая погрешность центрального колеса  $F_i$ , накопленная погрешность шага центрального колеса  $F_p$ , радиальное биение периодического профиля центрального колеса  $F_r$  и радиальное биение ведомого вала  $\delta_5$ .

Для обеспечения плавности работы передачи также предусмотрен комплексный показатель – местная кинематическая погрешность передачи  $f'_{ior}$ , допуск на который соответствует допуску на аналогичный показатель плавности работы зубчатой цилиндрической передачи. Таким образом, обеспечивается соответствие степеней плавности работы рассматриваемой передачи степеням плавности работы зубчатых цилиндрических передач.

Для шариковой радиально-плунжерной передачи приняты следующие показатели плавности работы: местная кинематическая погрешность центрального колеса  $f_i$ , погрешность шага центрального колеса  $f_p$ , погрешность профиля зуба центрального колеса  $f_f$ , погрешность шага сепаратора  $\delta_6$ , погрешность диаметра шарика  $\delta_2$ , погрешности радиуса  $\delta_1$  и эксцентриситета эксцентрика  $\delta_3$ , а также радиальное биение ведущего вала  $\delta_4$ .

Для каждой степени точности и плавности работы шариковых радиально-плунжерных передач назначены комплексы контролируемых показателей (табл.1), которые могут быть использованы при производственном контроле. Все комплексы являются равнозначными, обеспечивают достаточный контроль по заданной степени и находятся в тесной связи с другими показателями и комплексами контроля.

Таблица 1

Комплексы контроля по степеням кинематической точности и плавности работы шариковой радиально-плунжерной передачи

Контролируемый объект	Показатель точности	Степень точности						
		6	7	8	9	10	11	12
Комплексы контроля по степеням кинематической точности								
Передача в сборе	$F'_{ior}$	x	x	x	-	-	-	-
Центральное колесо	$F_i$	x	x	x	-	-	-	-
	$F_p$	x	x	x	-	-	-	-
	$F_r$	x	x	x	x	x	x	x
Выходной вал	$\delta_5$	x	x	x	x	x	x	x
Комплексы контроля по степеням плавности работы								
Передача в сборе	$f'_{ior}$	x	x	x	-	-	-	-
Ведущее звено	$\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$	x	x	x	x	x	x	x
Центральное колесо	$f_i$	x	x	x	-	-	-	-

	$f_p$	-	-	x	x	x	x	x
	$f_p$ и $f_f$	x	x	-	-	-	-	-
Сепаратор	$\delta_6$	x	x	-	-	-	-	-

Для нормируемых показателей точности разработан подход к определению допусков на основании разработанных моделей кинематической погрешности передачи. В соответствии с этим подходом произведен расчет допусков на геометрические параметры деталей опытного образца редуктора по 8 степени кинематической точности и плавности работы. Нормируемые показатели для других степеней кинематической точности и плавности работы определяются с помощью коэффициентов перехода на основе норм, рассчитанных для 8 степени. Проведенный проверочный расчет подтвердил соответствие допусков на нормируемые показатели нормам наибольшей кинематической погрешности и местной кинематической погрешности передачи по 8 степени точности.

Для контроля показателей кинематической точности и плавности работы деталей исследуемой передачи можно применять универсальные и специальные измерительные средства, а для контроля кинематической погрешности передачи в сборе – специальные стенды (рис.3). Для контроля нормируемых погрешностей центрального колеса ( $F'_i, f'_i, f'_f$ ) разработано автоматизированное универсально-наладочное контрольное приспособление (рис.5).

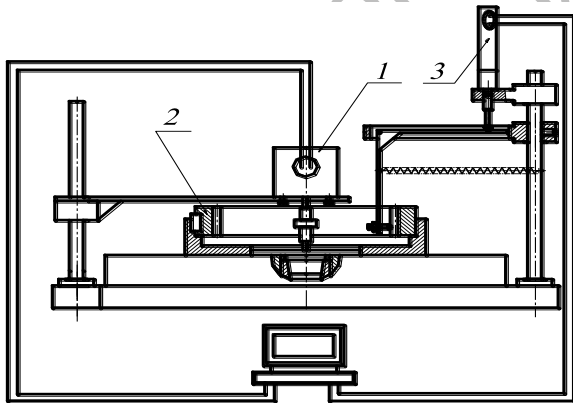


Рис.5. Автоматизированное универсально-наладочное контрольное приспособление

Приспособление содержит преобразователь угловых перемещений 1, генерирующий последовательность импульсов, каждый из которых является сигналом для записи в память ЭВМ результата измерения профиля детали 2 зафиксированного преобразователем линейных перемещений 3. В управляющей программе предусмотрена возможность анализа и сохранения

графического представления и сравнения с идеальным профилем для наглядного представления и высокоточной оценки отклонений формы, расположения и размеров реального профиля.

Таким образом, для шариковой радиально-плунжерной передачи разработана система нормирования кинематической точности и плавности работы, включающая нормируемые погрешности деталей передачи,



порядок назначения допусков на их размеры, комплексы контроля, а также способы и средства этого контроля.

**В четвертой главе** приведены результаты исследований, направленные на обеспечение кинематической точности и плавности работы шариковой радиально-плунжерной передачи на стадиях ее конструкторского и технологического проектирования.

Для типовых конструкций одноступенчатой шариковой радиально-плунжерной передачи создана система автоматизации конструкторской подготовки производства, позволяющая в автоматизированном режиме обеспечить требуемые геометрические, прочностные и точностные параметры. Эта система также позволяет решать задачу оптимизации конструкции передачи по минимуму ее массогабаритных параметров с обеспечением контактной прочности и правильной геометрии профиля. Целевая функция задачи оптимизации конструкции имеет следующий вид

$$M = f(i, r, D) \rightarrow \min, \quad (8)$$

где  $i$  – количество рядов шариков.

На базе предложенной системы нормирования точности и разработанных в соответствии с ее требованиями типовых технологических процессов изготовления деталей зацепления создана система автоматизации технологической подготовки производства одноступенчатых и многоступенчатых передач (рис.6, 7).

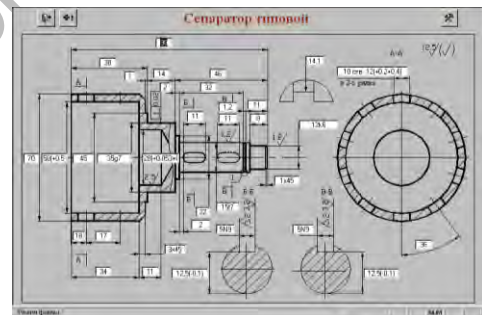


Рис.6. Диалоговое окно системы автоматизации технологической подготовки производства

Рис.7. Форма для ввода размеров оригинальной детали системы автоматизации технологической подготовки производства

Она позволяет автоматизировать проектирование технологических процессов механической обработки всех деталей зацепления шариковой радиально-плунжерной передачи. Использование этой системы надежно обеспечивает получение 8-12 степени кинематической точности и плавности работы передачи при многократном снижении продолжительности технологической подготовки производства.

Таким образом, в результате проведенных исследований создана автоматизированная система подготовки производства шариковых радиально-плунжерных передач, включающая этапы конструкторского и технологического проектирования, на которых обеспечиваются заданная кинематическая точность и плавность работы передачи.

**В пятой главе** представлены примеры практического применения шариковых радиально-плунжерных передач, демонстрирующие эффективность их использования в приводах технологического оборудования, в различных тяговых устройствах и лебедках, а также в механизмах усилителей моментов, обеспечивая снижение в 2-3 раза материальных затрат и высокую конкурентоспособность продукции.

За счет использования шариковой радиально-плунжерной передачи в станке монтажа-демонтажа автомобильных шин вместо планетарных зубчатых редукторов производства России и США обеспечен экономический эффект в размере 440 000 рублей. Использование разработанного поливочного устройства, в приводе которого применена шариковая радиально-плунжерная передача, позволило отказаться от приобретения импортного аналога, обеспечив экономию в размере 3 307 960 рублей.

**В приложении** приведены иллюстрации и копии актов принятия к практическому использованию шариковых радиально-плунжерных передач с копиями документов, подтверждающих экономический эффект внедрения. Здесь же приведены копии актов об использовании систем нормирования точности и автоматизации конструкторского и технологического проектирования в РУП «Завод «Могилевлифтмаш» и в учебном процессе подготовки магистрантов и аспирантов кафедры «Технология машиностроения» Белорусско-Российского университета.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили получить новые результаты и сделать следующие выводы.

1. На основе математического и компьютерного моделирования работы шариковой радиально-плунжерной передачи, получены новые математические соотношения, определяющие связь кинематической погрешности передачи с погрешностями поверхностей центрального колеса, шариков, эксцентрика, сепаратора, ведущего и ведомого валов [4, 8].

2. Дана оценка влияния погрешностей формы и расположения поверхностей деталей передачи на составляющие амплитудно-частотного спектра ее кинематической погрешности [4, 8].

3. На основе моделирования и экспериментальных исследований кинематических погрешностей радиально-плунжерных передач установлено, что нормированием погрешностей изготовления центрального колеса, диаметра эксцентрика, сепаратора, ведущего и ведомого валов может быть обеспечена требуемая степень кинематической точности и плавности работы шариковой радиально-плунжерной передачи. Показано, что точность шариковых радиально-плунжерных передач может быть приведена в соответствие с нормами кинематической точности и плавности работы зубчатых передач [5, 9].

4. Разработана система нормирования кинематической точности и плавности работы шариковой радиально-плунжерной передачи, включающая степени, нормы точности и коэффициенты перехода между степенями [5].

5. На основе разработанной системы нормирования точности установлены комплексы контроля нормируемых показателей и рекомендованы технологические процессы изготовления деталей шариковых радиально-плунжерных передач, которые обеспечивают достижение 8-12 степеней кинематической точности и плавности их работы [5, 6].

6. Разработано универсально-наладочное контрольное приспособления для оценки погрешностей деталей передачи, обеспечивающее автоматизацию контроля и выдачу заключительной информации о качестве контролируемой детали [15].

7. Разработана автоматизированная система конструкторского и технологического проектирования шариковой радиально-плунжерной передачи с заданной кинематической точностью и плавностью работы, обеспечивающая проектирование оптимальной конструкции шариковой радиально-плунжерной передачи и проектирование рациональных технологических процессов изготовления ее деталей [1,3,6-8,10-14].

Разработанные рекомендации по нормированию, контролю, изготовлению и автоматизации проектирования шариковой радиально-плунжерной передачи приняты к использованию на производстве (РУП «Завод «Могилевлифтмаш») и в учебном процессе (Белорусско-Российский университет). Шариковые радиально-плунжерные передачи 8 и 10 степени точности приняты к использованию в производстве (МГКУП СК «Центральный», НПК «Наука»), прошли эксплуатационные испытания и используются в частном предприятии индивидуального предпринимателя Ореховского В.В.

1. Пашкевич М.Ф., Жигунов С.А. Основы автоматизации конструкторского и технологического проектирования шариковых радиально-плунжерных передач // Вестник МГТУ № 1 (2) 2002. – Могилев: УО МГТУ. – 2002. – С. 96-100.

2. Пашкевич М.Ф., Жигунов С.А. Нелинейная оптимизация, как метод описания и решения задач конструкторского проектирования // Вестник МГТУ № 2 (3) 2002. – Могилев: УО МГТУ. – 2002. – С. 123-127.

3. Жигунов С.А. Применение шариковых радиально-плунжерных редукторов в приводах технологического оборудования // Вестник МГТУ № 1 (6) 2004. – Могилев: ГУВПО «Белорусско-Российский университет». – 2004. – С. 42-45.

4. Жигунов С.А. Влияние погрешностей изготовления периодического профиля центрального колеса на кинематическую погрешность шариковой радиально-плунжерной передачи // Вестник МГТУ №1(10) 2006. – Могилев: ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет». – 2006. – С. 64-68.

5. Пашкевич М.Ф., Жигунов С.А. Основы нормирования кинематической точности и плавности работы шариковых радиально-плунжерной передач // Вестник МГТУ № 1 (10) 2006. – Могилев: ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет». – 2006. – С. 216-220.

6. Рязанцев А.Н., Жигунов С.А. Автоматизация проектирования технологических процессов изготовления деталей шариковых радиально-плунжерных передач // Вестник МГТУ № 1 (10) 2006. – Могилев: ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет». – 2006. – С. 238-242.

7. Пашкевич М.Ф., Жигунов С.А. Основы автоматизации конструкторского и технологического проектирования шариковых радиально-плунжерных передач // Межд. науч.-техн. конф. «БалтТехмаш-2002». Сборник науч. статей. – Калининград. – 2002. – С. 55-58.

8. Исследование кинематической погрешности планетарной радиально-плунжерной передачи // Пашкевич М.Ф., Пашкевич В.М., Пашкевич А.М., Жигунов С.А. - Международная научно-техническая конференция «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии». Республиканский межведомственный сборник научных трудов. Выпуск 18. Машиностроение. – Минск: УП «Технопринт» . – 2002. – С. 445-450.

9. Кинематическая точность и КПД реверсивной РПП // Пашкевич М.Ф., Жигунов С.А. – Материалы международной научно-технической конференции «Современные технологии, материалы, машины и оборудование», Могилев, МГТУ, 16-17 мая, 2002 г. – Могилев: МГТУ. – 2002. – С. 98-99.

10. Компьютерное моделирование кулачково-плунжерного зацепления при проектировании передач / Жигунов С.А. // Материалы VI

Республиканской научно конференция студентов и аспирантов «Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях». – Гомель: УО «Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины». - 2003. – С. 22-23.

11. Повышение нагрузочной способности и снижение массогабаритных параметров приводов технологического оборудования / Пашкевич М.Ф., Жигунов С.А. // Международная научно-техническая конференция «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии в машиностроении». Республиканский межведомственный сборник научных трудов. Выпуск 19. Машиностроение. – Минск: УП «Технопринт». - 2003. – С. 516-519.

12. Автоматизация проектирования кулачково-плунжерного зацепления / Жигунов С.А. // Материалы междунар. науч.-техн. конф. «Прогрессивные технологии, технологические процессы и оборудование», Могилев, МГТУ, 15-16 мая, 2003 г. – Могилев: МГТУ. – 2003. – С. 38-39.

13. Жигунов С.А. Обоснование предпочтительности применения шариковых радиально-плунжерных передач // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: Материалы респ. науч.-техн. конф. – Могилев: ГУВПО «Белорусско-Российский университет», 2004 – с. 32.

14. Пат. 20040537 Беларусь, В 66 D 1/04. Устройство для перемещения грузов/ М.Ф. Пашкевич, А.С. Жилинский, А.М. Пашкевич, С.А. Жигунов (РБ). - №2009; Заявл. 25.11.04; Оpubл. 30.06.05 // Афіцыйны бюлетэнь / Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь. – 2005. - № 2. – 3 с.

15. Пат. 20050154 Беларусь, G 01 B 7/00. Универсально-наладочное контрольное приспособление / М.Ф. Пашкевич, В.М. Пашкевич, С.А. Жигунов. - №2225; Заявл. 24.03.05; Оpubл. 30.09.05 // Афіцыйны бюлетэнь / Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь. – 2005. - № 3. – 3 с.

## РЕЗЮМЕ

Жигунов Сергей Анатольевич

**Нормирование точности шариковой радиально-плунжерной передачи и ее обеспечение на этапах конструкторской и технологической подготовки производства**

**Ключевые слова:** кинематическая погрешность, кинематическая точность, плавность работы, нормирование точности, технологическое

проектирование, конструкторское проектирование, автоматизация, ресурсосбережение.

Объектом исследования является шариковая радиально-плунжерная передача. Предмет исследования – погрешности изготовления деталей зацепления шариковой радиально-плунжерной передачи, кинематическая точность и плавность ее работы, а также влияние на кинематическую точность и плавность работы элементарных погрешностей зацепления.

Целью работы является создание системы нормирования и обеспечения точности шариковых радиально-плунжерных передач на этапе подготовки их производства, то есть при их конструкторском и технологическом проектировании.

Научная новизна работы заключается в следующем: впервые на основе математического моделирования работы шариковой радиально-плунжерной передачи, учитывающего погрешности изготовления ее деталей, получены соотношения, определяющие кинематическую погрешность передачи, вызванную погрешностями периодического профиля центрального колеса, шариков, эксцентрика, сепаратора, ведущего и ведомого валов; дана оценка влияния погрешностей изготовления деталей передачи на составляющие амплитудно-частотного спектра ее кинематической погрешности; установлено, что на основе нормирования погрешностей изготовления деталей шариковой радиально-плунжерной передачи может быть обеспечена требуемая степень кинематической точности и плавности ее работы; показано, что кинематические погрешности шариковых радиально-плунжерных передач могут быть приведены в соответствие с нормами кинематической точности и плавности работы зубчатых передач; на основе разработанной системы нормирования точности шариковой радиально-плунжерной передачи установлены комплексы контроля нормируемых показателей в зависимости от степени кинематической точности и плавности работы; показано, что достижение требуемой кинематической точности и плавности работы шариковой радиально-плунжерной передачи возможно путем выбора рекомендованных технологических процессов изготовления ее деталей, которые обеспечивают получение тех значений нормируемых показателей точности, которые предусмотрены установленными нормами.

РЭЗЮМЭ

Жыгуноў Сяргей Анатолевіч

**Нарміраванне дакладнасці шарыкавай радыяльна-плунжарнай  
перадачы і яе забеспячэнне на этапах канструктарскай і тэхналагічнай  
падрыхтоўкі вытворчасці**

**Ключавыя словы:** кінематычная памылка, кінематычная дакладнасць, плаўнасць работы, нарміраванне дакладнасці, тэхналагічнае праектаванне, канструктарскае праектаванне, аўтаматызацыя, рэсурсазберажэнне.

Аб'ектам даследвання з'яўляецца шарыкавая радыяльна-плунжарная перадача. Прадмет даследвання – памылкі вырабу дэталяў зацаплення шарыкавай радыяльна-плунжарнай перадачы, кінематычная дакладнасць і плаўнасць яе работы, а таксама ўплыў на кінематычную дакладнасць і плаўнасць работы памылак дэталяў перадачы.

Мэтай працы з'яўляецца стварэнне сістэмы нарміравання і забеспячэння дакладнасці шарыкавых радыяльна-плунжарных перадач на этапе падрыхтоўкі іх вытворчасці, гэта значыць пры іх канструктарскім і тэхналагічным праектаванні.

Навуковая навізна працы заключаецца ў наступным: у першыню на аснове матэматычнага мадэліравання працы шарыкавай радыяльна-плунжарнай перадачы, улічваючага памылкі вырабу яе дэталяў, атрыманы суадносіны, якія вызначаюць кінематычную памылку перадачы, обумоўленную памылкамі перыядычнага профілю цэнтральнага колеса, шарыкаў, эксцэнтрыка, сепаратара, вядучага і вядомага валуў; дана адзнака ўплыву памылак вырабу дэталяў перадачы на састаўляючыя амплітудна-частотнага спектра яе кінематычнай памылкі; устаноўлена, што на аснове нарміравання памылак вырабу дэталяў перадачы магчыма забяспечыць патрэбную ступень кінематычнай дакладнасці і плаўнасці яе працы; паказана, што кінематычныя памылкі шарыкавых радыяльна-плунжарных перадач магчыма прывесці ў адпаведнасць з нормаў кінематычнай дакладнасці і плаўнасці працы зубчатых перадач; на аснове сістэмы нарміравання дакладнасці шарыкавай радыяльна-плунжарнай перадачы устаноўлены комплексы кантролю нарміраваных паказчыкаў шарыкавых радыяльна-плунжарных перадач у залежнасці ад ступені кінематычнай дакладнасці і плаўнасці працы; паказана, што дасягненне патрэбнай кінематычнай дакладнасці і плаўнасці працы шарыкавай радыяльна-плунжарнай перадачы магчыма праз выбар рэкамендаваных тэхналагічных працэсаў вырабу яе дэталяў, якія забяспечваюць атрыманне тых значэнняў нарміраваных паказчыкаў дакладнасці, якія прадугледжаны ўстаноўленымі нормаў.

## SUMMARY

Zhigunou Sergei Anatoljevich

**Accuracy normalizing of a ball radial-plunger gear and its ensuring on the design and development stages of production**

Key words: kinematical error, kinematical accuracy, smooth operation, accuracy normalizing, technological design, structural design, automation, resource saving.

Subject of the research is a ball radial-plunger gear. Objectives of the research are errors in making meshing elements of the ball radial-plunger gear, kinematical accuracy and smooth operation, as well as the influence of elementary mesh errors on the kinematical accuracy and smooth operation of the gear.

Purpose of the research is to develop the system of normalizing and to ensure the accuracy of ball radial-plunger gears on the stage of preparing for their production, i.e. during their structural and technological design.

Scientific novelty of the research is in the development of a mathematical model of the kinematical gear error considering elementary errors in making the periodic profile of the central wheel, balls, shafts and other gearing elements, in the evaluation of the influence of elementary errors on the components of the amplitude-frequency spectra of the kinematical gear error.

It has been shown that accuracy normalizing provide any degree of the kinematical accuracy and smooth operation of the ball radial-plunger gear.

It has been shown that kinematical errors of ball radial-plunger gears can be put into correspondence with the norms of the kinematical accuracy and smooth gear operation. It has also been developed the system of sets of normalized factors to control ball radial-plunger gears depending on the degree of the kinematical accuracy and smooth operation.

There have been developed typical technological processes of making gear mesh elements, which base on normalizing system and securely provide any degree of the kinematical accuracy and smooth operation of the ball radial-plunger gear.