

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи
УДК 621.833.16

ПАШКЕВИЧ
Александр Михайлович

**МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЛАНЕТАРНЫХ РАДИАЛЬНО-
ПЛУНЖЕРНЫХ РЕДУКТОРОВ ПЕРВОГО, ВТОРОГО И ТРЕТЬЕГО
КЛАССОВ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
РАБОТЫ ЗАЦЕПЛЕНИЙ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 05.02.02 – «Машиноведение,
системы приводов и детали машин»

Могилев, 2013

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

Научный руководитель **Минаков Анатолий Петрович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология машиностроения» ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет», г. Могилев.

Официальные оппоненты: **Довгяло Владимир Александрович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Детали машин и подъемно-транспортные механизмы» ГУ ВПО «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель,

Ежи Ярошевич, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Инженерия продукции» Политехники Белостокской, г. Белосток, Республика Польша.

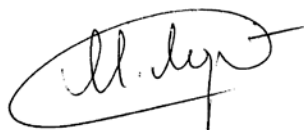
Оппонирующая организация РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства», г. Минск.

Защита состоится «26» июня 2013 г. в 15.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.18.01 при ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет» по адресу: 212000, г. Могилев, пр. Мира, 43, телефон ученого секретаря 80296875121, e-mail: lustenkov@yandex.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГУВПО «Белорусско-Российский университет».

Автореферат разослан «25» мая 2013 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций
кандидат технических наук, доцент



М.Е. Лустенков

ВВЕДЕНИЕ

В области создания новых редукторов работают специалисты многих стран, а также специалисты Беларуси, в том числе, специалисты Белорусско-Российского университета и Объединенного института машиностроения НАН Беларуси. В результате этой работы созданы прогрессивные конструкции редукторов с телами качения. Среди них радиально-плунжерные редукторы, появившиеся в середине 1970-х годов и являющиеся объектом наших исследований. Радиально-плунжерные редукторы технологичны, обладают малым весом, малыми диаметральными и осевыми размерами, большими передаточными отношениями в одной ступени и высокой нагрузочной способностью. Несмотря на свои достоинства, их исследованию не уделялось внимания много лет – с 1978 года (Брюховецкий В.П.) до 1999 года (начало наших разработок в этой области). К 1999 году вопросы методики их проектирования не были разработаны так же, как и вопросы оценки геометрии и кинематики этих редукторов, кинематической точности и плавности их работы, КПД, цикличности нагружения плунжеров, ударов в зацеплениях, износа при реверсивной работе. Не уделялось внимания повышению технологичности их конструкции и минимизации габаритов. Область их рационального применения не была определена.

После наших публикаций в 1999-2001 годах в Российских изданиях (Калининград), радиально-плунжерными передачами начали заниматься в Томске. Однако, как и в результате публикаций В.П. Брюховецкого, методики расчета и проектирования таких редукторов с высокими техническими характеристиками также не было создано. Не было предложено простых в реализации кинематических и конструктивных схем радиально-плунжерных редукторов первого, второго и третьего классов для диапазона передаточных отношений от единиц до сотен и тысяч; не предложена наиболее технологичная форма зубьев центрального колеса и не разработана рациональная методика геометрического расчета шарикового зацепления; не был решен вопрос о наличии ударов при работе редукторов и величине динамического коэффициента; не создана компьютерная методика расчета таких редукторов; не проводилось широких экспериментальных исследований кинематической точности, плавности работы, КПД и характера износа деталей зацепления.

Восполнив указанные пробелы в исследованиях радиально-плунжерных редукторов, нам удалось не только использовать их в отдельных приводах машин и механизмов, но и организовать их серийное производство, позволившее обеспечить *импортозамещение* планетарных зубчатых редукторов из России и Украины.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами, темами.

Диссертационная работа выполнялась в рамках темы фундаментальных исследований “Создание теории кулачково-плунжерного зацепления” (тема ГБ – 9903ф, № ГР 1999568), утвержденной Министром образования Республики Беларусь на 1999-2002 г.г., задания Республиканской межвузовской программы фундаментальных исследований «**Метрология и обеспечение качества**» на 1999 – 2003 г.г. по теме «*Исследование динамических характеристик механических передач, разработка методов оценки их качества и создание новых средств для сертификационных испытаний*» (тема ГБ-9923ф, № ГР 19991013), а также задания Государственной программы фундаментальных исследований «**Надежность и безопасность**», утвержденной Советом Министров РБ на 2001-2003 г.г. «*Создание основ компьютерного моделирования, расчета и проектирования малогабаритных шариковых и роликовых механизмов*» (тема ГБ-0160ф, № ГР 20011911).

Тема диссертационной работы соответствует приоритетному направлению фундаментальных научных исследований Республики Беларусь «Механика машин, обеспечение надежности и безопасности технических систем, повышение конкурентоспособности продукции машиностроения в части разработки теории проектирования на основе компьютерных методов расчета и моделирования» (пункт 2.3 Постановления Совета Министров Республики Беларусь № 512 от 17.05.2005 г.).

Цель и задачи исследования.

Цель исследования – создание новой методики проектирования планетарных радиально-плунжерных редукторов для широкого диапазона передаточных отношений на основе компьютерного моделирования работы зацеплений и автоматизации расчета.

Достижение данной цели предопределяет решение следующих *задач*:

– предложить простые в реализации кинематические и конструктивные схемы радиально-плунжерных редукторов, обеспечивающие модульный принцип их построения для диапазона передаточных отношений от единиц до тысяч, создать методику проектирования таких редукторов, отличающуюся новым подходом к оценке геометрических параметров зацеплений, учетом коэффициента динамичности и цикличности силового взаимодействия звеньев, позволяющую оценить нагрузки, приходящиеся на один плунжер в любом его положении, и рассчитать основные размеры деталей редуктора;

– выполнить компьютерное моделирование работы зацеплений, на основе которого предложить новую форму периодического профиля центрального колеса, которая обеспечивала бы устранение срезания вершин зубьев при их формообразовании, высокую технологичность и минимальные габариты редукторов;

– провести анализ изменений относительной скорости и относительного ускорения плунжеров, на основе которого дать заключение о наличии ударов в радиально-плунжерных зацеплениях и, используя теорию кулачковых механизмов, обосновать наибольшую величину динамического коэффициента, который необходимо учитывать при расчете и проектировании этих редукторов.

– провести экспериментальные исследования радиально-плунжерных редукторов для широкого диапазона передаточных отношений, результаты которых позволили бы объективно оценить их эксплуатационные характеристики, включающие кинематическую точность, плавность работы, КПД, геометрию и величину износа деталей зацепления.

– создать опытные и промышленные образцы радиально-плунжерных редукторов для приводов механизмов и машин, а также других устройств различного назначения и внедрить их в производство, обеспечивая при этом импортозамещение данных изделий машиностроения.

Объектом исследования являются планетарные радиально-плунжерные редукторы. *Предмет исследования* – характеристики их технического уровня (геометрия и кинематика зацепления, вращающие моменты и распределение сил на звеньях, кинематическая точность и плавность работы, КПД, геометрия изнашивания деталей зацепления).

Положения, выносимые на защиту:

– методика проектирования радиально-плунжерных редукторов первого, второго и третьего классов, отличающаяся модульным принципом построения редукторов, новым подходом к оценке геометрических параметров зацеплений, учетом коэффициента динамичности и цикличности силового взаимодействия звеньев, позволяющая оценить нагрузки, приходящиеся на один плунжер в любом его положении, и рассчитать основные размеры деталей редуктора;

– результаты компьютерного моделирования работы радиально-плунжерного зацепления и аппроксимации периодического профиля центрального колеса, позволившие предложить новую форму периодического профиля, отличающуюся высокой технологичностью и обеспечивающую устранение срезания вершин зубьев при их формообразовании, а также минимальные габариты редукторов;

– установленные на основе экспериментальных исследований радиально-плунжерных редукторов первого, второго и третьего классов закономерности изменения их кинематической точности, плавности работы, КПД, геометрии и величин износа деталей зацепления;

– результаты производственных и эксплуатационных испытаний новых конструкций радиально-плунжерных редукторов, охватывающих диапазон передаточных отношений от единиц до тысяч, позволяющих при практическом применении в машиностроении и агропромышленном секторе Беларуси получить экономический эффект до 200 дол. США на единицу продукции.

Личный вклад соискателя. Выбор основных направлений исследований был выполнен на основе литературного обзора совместно с научным руководителем д.т.н., профессором А.П. Минаковым.

Автором диссертации лично разработаны кинематические схемы для построения одно- и многоступенчатых радиально-плунжерных редукторов, проведен их анализ и выполнены обобщения результатов; с использованием компьютерных моделей проведены исследования геометрии радиально-плунжерных зацеплений и разработана новая методика геометрического расчета; исследованы закономерности изменения скоростей и ускорений плунжеров в радиально-плунжерных редукторах, на основе которых получено заключение о наличии ударов в зацеплениях и величине коэффициента динамичности; проведены теоретические исследования цикличности нагружения плунжеров и установлены закономерности изменения коэффициентов их нагруженности; создана на основе использования ЭВМ автоматизированная методика расчета радиально-плунжерных редукторов, дающая возможность оценить нагрузки, приходящиеся на один плунжер, учесть коэффициент динамичности и рассчитать основные размеры деталей редуктора; разработаны типовые конструкции редукторов; усовершенствована методика и проведены широкие экспериментальные исследования редукторов в сборе.

Экспериментальные исследования выполнялись совместно с научным руководителем госбюджетных НИР (ГБ – 9903ф, ГБ-9923ф, ГБ-0160ф) д.т.н., проф. М.Ф. Пашкевичем и другими исполнителями НИР (Лопуховским К.А., Пашкевичем В.М., Рязанцевым А.Н.). В этих НИР соискатель являлся ответственным исполнителем. Компьютерное моделирование работы радиально-плунжерного зацепления было выполнено совместно с доцентом А.Н. Рязанцевым.

В опубликованных работах с соавторами использованы теоретические результаты, а также результаты экспериментальных исследований, полученные

лично соискателем. Результаты научных исследований, сформулированные как положения, выносимые на защиту, получены соискателем лично.

Апробация результатов диссертации. Основные положения работы были доложены и обсуждены на республиканских и международных научно-технических конференциях: 53-я международная НТК профессоров, преподавателей, научных работников и аспирантов (БГПА, г. Минск, 1999); международная НТК «Современные направления развития производственных технологий и робототехника» (МГТУ, г. Могилев, 1999); международная НТК «Современные материалы, оборудование и технологии упрочнения и восстановления деталей машин» (ПГУ, г. Новополоцк, 1999); международная научно – практическая конференция «Современные технологии в ремонтно – обслуживающем машиностроительном производстве АПК» (БАТУ, г. Минск, 1999); международная НТК «Прогрессивные технологии, машины и механизмы в машиностроении (Балттехмаш-2000)» (КГТУ, Калининград, 2000); международная НТК «Вклад вузовской науки в развитие приоритетных направлений производственно-хозяйственной деятельности, разработку экономичных и экологически чистых технологий и прогрессивных методов обучения», посвященная 80-летию БГПА (г. Минск, 2000); международная НТК «Новые конкурентоспособные и прогрессивные технологии, машины и механизмы в условиях современного рынка» (МГТУ, г.Могилев, 2000); международная НТК «Создание и применение высокоэффективных наукоемких ресурсосберегающих технологий, машин и комплексов» (МГТУ, г.Могилев, 2001); международная НТК «Прогрессивные технологии, технологические процессы и оборудование» (МГТУ, г.Могилев, 2003); республиканская НТК аспирантов, магистрантов и студентов «Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности» (Белорусско-Российский университет, г. Могилев, 2004); международная НТК «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии» (Белорусско-Российский университет, г. Могилев, 2004), а также других ежегодно проводимых в Белорусско-Российском университете конференциях (2005-2012 г.г.).

Опубликованность результатов. Результаты диссертации опубликованы в 53 научных работах, в том числе, в 1 монографии (14 авт. л.), 7 статьях (2,9 авт.л.) в научно-технических журналах, включенных в перечень изданий для опубликования результатов диссертационных исследований, 6 статьях (2 авт.л.) в сборниках научных трудов (из них 5 статей в зарубежных сборниках), 12 статьях (1,2 авт.л.) в сборниках материалов НТК, 14 тезисах докладов (0,9 авт.л.) в сборниках тезисов по результатам участия в НТК, а также в 9 описаниях к патентам на изобретения, 4 описаниях к патентам на полезные модели и 1 депонированной статье (1,1 авт.л.). Объем публикаций,

соответствующих п.18 «Положения о присуждении ученых степеней...», – 18,9 авт.л., прочих – 10,5 авт.л.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, основной части, включающей 5 глав, заключения, списка использованных источников из 164 наименований и приложения, содержащего тексты программ для ЭВМ, которые использовались в диссертации, а также акты внедрения разработок в производство и учебный процесс.

Полный объем диссертации составляет 223 страницы и содержит 100 страниц текста, 77 рисунков, 2 таблицы, объем приложений – 49 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проведен литературный анализ исследований планетарных редукторов с телами качения. Такие редукторы разделены на четыре группы (рисунок 1): редукторы с двумя наборами неподвижных тел качения в зацеплении; фрикционные шариковые и роликовые редукторы; шаровинтовые, синусошариковые и торцовые шариковые и роликовые

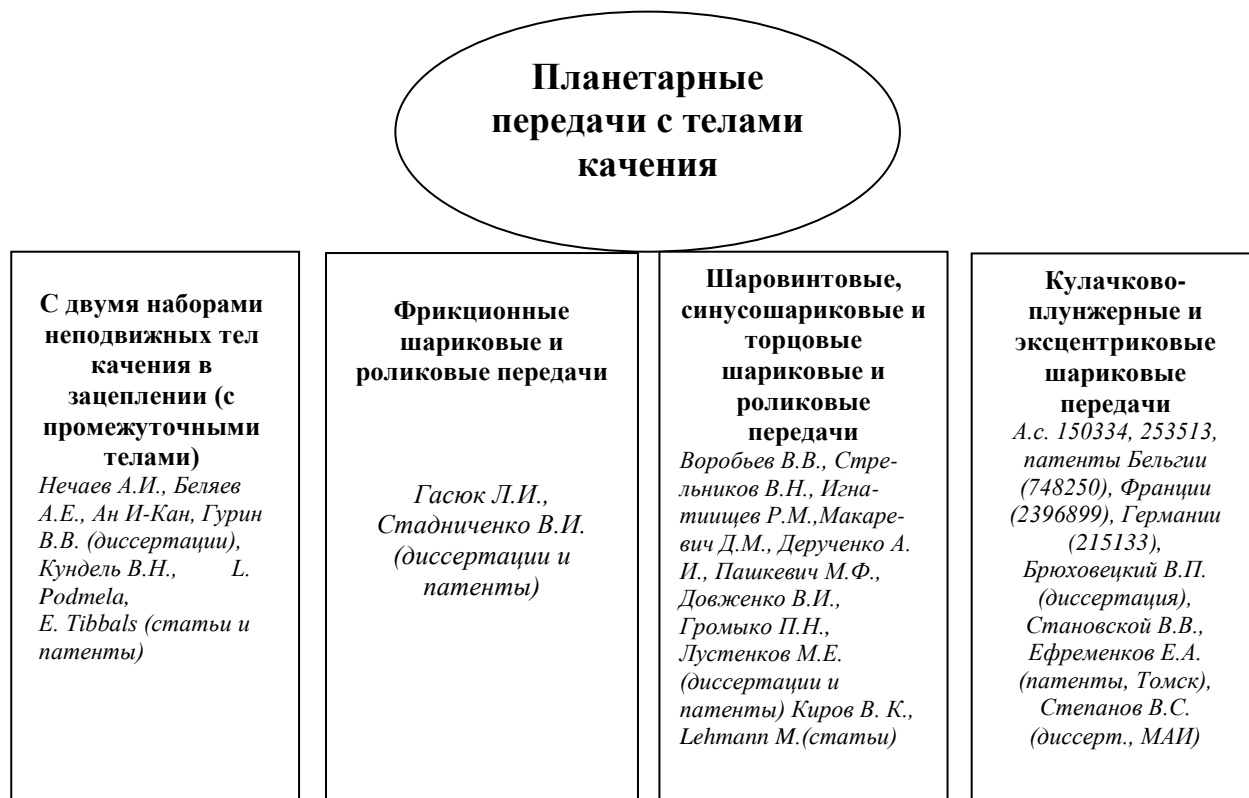


Рисунок 1 - Деление передач с телами качения на отдельные группы

Изучением редукторов четвертой группы, являющихся объектом наших исследований, занимались В.П. Брюховецкий, В.С. Степанов, В.В. Становской, Е.А. Ефременков.

В обзоре исследований показано, что вопросы геометрического расчета редукторов четвертой группы излишне усложнены. Вопросам их построения, геометрии, кинематики одно- и многоступенчатых редукторов, кинематической точности и плавности их работы, цикличности нагружения деталей зацепления, КПД для широкого диапазона передаточных отношений, геометрии износа деталей, а также оценке других эксплуатационных характеристик редукторов не уделялось внимания. Вовсе не исследовался вопрос повышения технологичности их конструкции.

В.С.Степановым исследовался миниатюрный привод, построенный на основе волновой передачи с телами качения, применительно к беспилотным летательным аппаратам. Были предложены формулы, которые, как показал анализ, не всегда являются приемлемыми для силовых редукторов. Не рассматривалась возможность построения многоступенчатых редукторов для больших передаточных отношений.

Выполненный литературный обзор позволил сформулировать цель и конкретные задачи исследований. Они приведены в общей характеристике работы.

Во второй главе представлены простейшие кинематические схемы планетарных радиально-плунжерных редукторов 1, 2 и 3 классов.

Показано, что радиально-плунжерная передача, как и большинство других передач, является приближенной. Поэтому для различных шаровых плунжеров одному и тому же углу поворота эксцентрика соответствуют различные углы поворота центрального колеса. Величины этих различий зависят от погрешностей шага зубьев центрального колеса и погрешностей профиля зубьев, которые носят случайный характер, предсказать который заранее невозможно. Сделан вывод о том, что установить теоретический закон мгновенного изменения передаточного отношения невозможно, поэтому передаточные отношения U редукторов были оценены их среднеинтегральным значением.

Для четырех редукторов первого класса

$$U_{13}^2 = (1 \pm z_2); \quad U_{12}^3 = \mp z_2; \quad U_{23}^1 = (1 + z_2) / z_2; \quad U_{32}^1 = z_2 / (z_2 - 1). \quad (1)$$

В данных формулах нижние индексы означают номера ведущего и ведомого звеньев соответственно, а верхние – номер заторможенного звена.

Для двух редукторов 2 класса передаточные отношения определяются соотношениями

$$U_{AB} = (1 \pm z_2')(1 \pm z_2''); \quad U_{AB} = (1 \pm z_2')(\mp z_2''), \quad (2)$$

в которых буквами *A* и *B* обозначены ведущий и ведомый валы соответственно.

Для редуктора 3 класса передаточное отношение имеет вид

$$U_{AB} = (1 \pm z_2')(1 \pm z_2'')(1 \pm z_2'''). \quad (3)$$

В приведенных соотношениях z_2' , z_2'' и z_2''' – это числа зубьев центральных колес в соответствующих ступенях редукторов 2 и 3 классов.

Показано, что относительная скорость в крайних положениях плунжера имеет нулевые значения, т.е. жесткие удары при работе редуктора отсутствуют. Значения относительного ускорения изменяются в соответствии с соотношением [1-А]

$$a_0 = \frac{e^2 (\omega_1 \pm \omega_3)^2}{\sqrt{R_3^2 - e^2 \sin^2 \varphi}} (e^2 \cos^2 \varphi \sin^2 \varphi / (R_3^2 - e^2 \sin^2 \varphi) - \cos 2\varphi) - e (\omega_1 \pm \omega_3)^2 \cos \varphi. \quad (4)$$

В крайних положениях функция ускорений (4) терпит разрыв. Это является признаком наличия мягких ударов. При высокой жесткости толкателей в кулачковых механизмах (шары) коэффициент динамичности, как следует из теории кулачковых механизмов, стремится к значению $K_D = 2$.

Была составлена программа для ЭВМ, позволяющая моделировать работу радиально-плунжерного зацепления. Схема результата моделирования представлена на рисунке 2. Приведены и основные размеры зацепления:

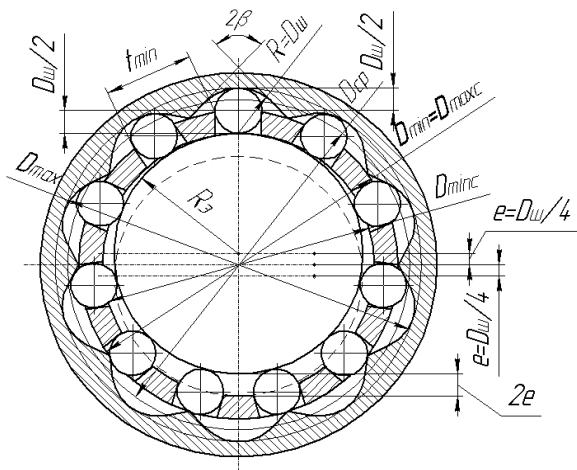


Рисунок 2 - Схема шарикового зацепления с размерами элементов деталей редуктора

$$D_{\text{э}} = 2R_{\text{э}} = 0,6366D_{III}(n - 2,3563); \quad (5)$$

$$D_{\text{min}} = D_{\text{э}} + 1,5 D_{III}; \quad (6)$$

$$D_{\text{max}} = D_{\text{э}} + 2,5 D_{III}; \quad (7)$$

$$D_{\text{cp}} = D_{\text{э}} + 2 D_{III}; \quad (8)$$

$$D_{\text{maxс}} = D_{\text{э}} + 1,5 D_{III}; \quad (9)$$

$$D_{\text{minс}} = D_{\text{э}} + 0,5 D_{III}; \quad (10)$$

$$e = D_{III} / 4; \quad (11)$$

$$R = 0,9724D_{III} + 0,1759; \quad (12)$$

$$2\beta = 0,002 z_2^3 - 0,1972 z_2^2 + 5,9557 z_2 + 45,846.. \quad (13)$$

В этих формулах приняты обозначения: $R_{\text{э}}$ – радиус эксцентрика, e – эксцентриситет, D_{III} – диаметр шарика, $n = z_2 + 1$ – количество шариков, z_2 – число зубьев центрального колеса, R – радиус

округления впадины центрального колеса, β – половина угла профиля впадины центрального колеса.

Для диаметров шаровых плунжеров от 5 до 15 мм и передаточных отношений редукторов от 5 до 50 установлены математические зависимости для величины $D_{\text{э}}$, при которой обеспечиваются минимальные габариты центрального колеса (а также редуктора) и отсутствует подрезание зубьев.

Получены зависимости для определения радиусов кривизны эксцентрика и центрального колеса в полярной системе координат r и f

$$\rho_1 = 0,25 D_{III} [\sqrt{1,621(n - 2,3563)^2 - \sin^2 \varphi} + \cos \varphi] ; \quad (14)$$

$$\rho_2 = 0,25 D_{III} [\sqrt{1,621(n - 2,3563)^2 - \sin^2 (z_2 \varphi)} + \cos (z_2 \varphi)] + 2 , \quad (15)$$

а также углы подъема профилей ведущего кулачка (эксцентрика) и центрального колеса, выраженные через полярную координату f :

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \sin \varphi / \sqrt{1,621(n - 2,3563)^2 - \sin^2 \varphi} , \quad (16)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = \sin \varphi (n \pm 1) / \sqrt{1,621(n - 2,3563)^2 - \sin^2 \varphi} \quad (17)$$

Определены наименьшие размеры деталей зацеплений в зависимости от $D_{\text{э}}$ и D_{III} при значениях последнего 5, 8, 10, 12, 15.

Третья глава посвящена оценке вращающих моментов, сил и КПД в зацеплениях, моментов, приходящихся на один плунжер, цикличности силового взаимодействия в радиально-плунжерном зацеплении, определению размеров плунжеров, дисбалансу в таких редукторах и его устранению, а также методике и программе автоматизированного расчета на ЭВМ размеров деталей редукторов при их проектировании и прочностному расчету ведомого звена в его наиболее слабом сечении.

Показано, что вращающие моменты на звеньях редукторов 1, 2 и 3 классов определяются так же, как и в зубчатых планетарных редукторах.

Направления сил, действующих на один плунжер, зависят от того, используется $z_1 - I$ или $z_1 + I$ плунжер. Схема действующих сил при количестве плунжеров $n = z_1 + I$ показана на рисунке 3. Получены математические соотношения для расчета сил. Без учета трения:

$$W = F_1 / \operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{F_1 \sin \varphi}{\sqrt{1,621(n - 2,3563)^2 - \sin^2 \varphi}} ; \quad (18)$$

$$F_2 = F_1 \operatorname{tg} \alpha_2 / \operatorname{tg} \alpha_1 = F_1 (U \pm 1); \quad (19)$$

$$F_3 = F_2 \pm F_1 = F_1 ((\operatorname{tg} \alpha_2 / \operatorname{tg} \alpha_1) \pm 1) , \quad (20)$$

где верхний и нижний знаки соответствуют количеству плунжеров $n = z_2 + I$ и $n = z_2 - I$ соответственно, а F_1 определяется при однорядном и двухрядном исполнении ступени редуктора по формулам соответственно

$$F_1 = M_1 / (0,32 n R_1); \quad F_1 = M_1 / (0,64 n R_1) \quad (21)$$

Определены моменты, приходящиеся на один плунжер, а также КПД редуктора с учетом углов трения f_1 и f_2 :

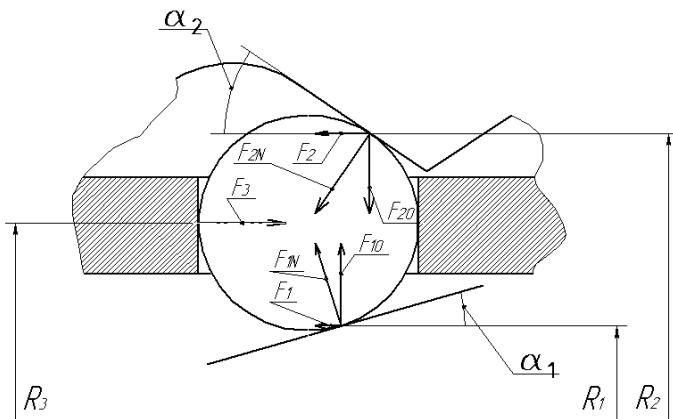


Рисунок 3 – Схема силового взаимодействия звеньев при $n = z_2 + 1$

$$\overline{M}_1 = W R_1 \operatorname{tg} \alpha_1; \quad (22)$$

$$\overline{M}_2 = W R_2 \operatorname{tg} \alpha_2; \quad (23)$$

$$\overline{M}_3 = W R_3 (\operatorname{tg} \alpha_2 \pm \operatorname{tg} \alpha_1). \quad (24)$$

$$\eta = [\operatorname{tg}(\alpha_{1cp} + \varphi) + \operatorname{tg}(\alpha_{2cp} + \varphi)] / [\operatorname{tg}(\alpha_{1cp} + \varphi)U] \quad (25)$$

Показано, что формула (25) дает заниженные значения КПД. Поэтому при выполнении расчетов таких редукторов рекомендовано использовать формулы, которые

полученные на основе экспериментальных исследований опытных образцов редукторов 1, 2 и 3 классов.

Получено наибольшее расчетное значение нормальной силы \overline{F}_{2N} , действующей на один плунжер со стороны ведомого звена:

$$\overline{F}_{2N \max} = 3,125 M_2 / (n R_{2cp} \sin \alpha_{2 \max}), \quad (26)$$

где R_{2cp} - среднее значение радиуса центрального колеса, которое определяется по формуле

$$R_{2cp} = D_{III} (0,3183 (n-2,3563) + 1) . \quad (27)$$

С использованием методики, изложенной в [1-А], доказана цикличность силового взаимодействия в радиально-плунжерном зацеплении. Получены зависимости для любого из наибольших моментов, передаваемых одним плунжером, в виде

$$\overline{M}_{\max} = M / \sum_{i=0}^{z_2} \chi_i . \quad (28)$$

Показано, что в редукторе при рабочем движении плунжеров, соответствующем половине цикла нагружения, для их различных положений коэффициент нагрузки $\chi_i > 0$. Те плунжеры, которые совершают холостой ход, характеризуются значениями $\chi_i < 0$. Значения χ_i вычисляются по формуле

$$\chi_i = \frac{\sin \varphi_i \sqrt{1,621(n - 2,3563)^2 - 1}}{\sqrt{1,621(n - 2,3563)^2 - \sin^2 \varphi_i}} . \quad (29)$$

На ЭВМ был проведен анализ изменения суммы $\sum_{i=0}^{z_2} \chi_i$ за один полный оборот ведущего вала. На рисунке 4 демонстрируется цикличность силового нагружения для редуктора, рассчитанного на $U = 10$. Анализ для диапазона передаточных отношений от 10 до 50 показал, что в любом положении системы плунжеров, сумма положительных коэффициентов нагрузки плунжеров практически одна и та же для редукторов с любыми передаточными отношениями и равна $0,32n$ (для двухрядного редуктора эта сумма равна $0,64n$). Приведенное значение обеспечивает рассеивание указанной суммы, не превышающее (5...8)% .

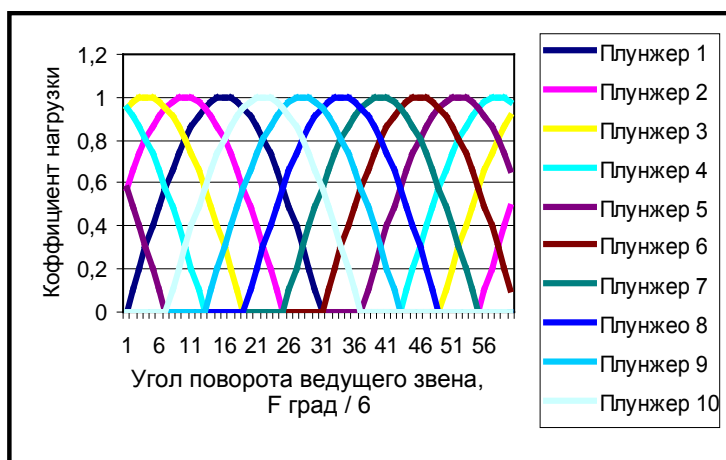


Рисунок 4 - Изменение коэффициентов нагрузки плунжеров в редукторе с $U=10$ за один оборот ведущего вала

Получена формула для определения диаметра шарового плунжера в виде

$$D_{ш} = 0,9665 \cdot 10^{11} \sqrt{\frac{2 \bar{F}_{2N \max}}{[\sigma_H]^3}} \quad (30)$$

В эту формулу при вычислениях следует подставлять значения $\bar{F}_{2N \max}$ в ньютонах, а $[\sigma_H]$ – в паскалях, и тогда значения $D_{ш}$ получим в метрах.

Также решена задача обеспечения балансировки звеньев радиально-плунжерных редукторов. Определены величины дисбаланса и уравновешивающей массы. Сделан вывод о том, что балансировку наиболее целесообразно проводить конструктивным путем, предусматривая двухрядную компоновку ступеней редуктора. В этом случае ступени редуктора выполняются с двумя эксцентриками, имеющими относительное угловое смещение 180° , а плунжеры располагаются в двух рядах. Число шаровых плунжеров в каждом ряду равно $n = z_2 \pm 1$, при этом плунжеры одного ряда должны быть смещены по отношению к плунжерам второго ряда на половину углового шага, т.е. на величину $\Delta\varphi = \pi / n$.

Разработана методика и программа компьютерного расчета планетарных радиально-плунжерных редукторов при их проектировании. Программа расчета позволяет автоматизировать определение всех размеров редуктора (поперечных и продольных). Она разработана применительно к одноступенчатому редуктору с муфтовым присоединением приводного электродвигателя.

В данной главе приведена также простая инженерная методика расчета ведомого звена-сепаратора на прочность.

В главе 4 изложена методика экспериментального исследования радиально-плунжерных редукторов, основанная на использовании автоматизированной системы испытаний механических передач [1-А], созданной с участием автора настоящей диссертации. Приведены конструкции опытных и промышленных образцов редукторов для передаточных отношений $U=50$ (1 класса); $U=64; 121$ (2 класса); $U=1000$ (3 класса).

Для проведения экспериментальных исследований и промышленных испытаний были изготовлены радиально-плунжерные редукторы, рассчитанные на передаточные отношения $U=17; 34; 45; 50; 64; 121; 1000; 4096$.

Исследования редуктора с $U=17$ проводились при различных уровнях износа деталей зацепления, а редуктора с $U=34$ – при различных количествах плунжеров в двух рядах.

На рисунке 5 приводится график кинематической погрешности и ее амплитудно-частотный спектр для редуктора с $U=50$.

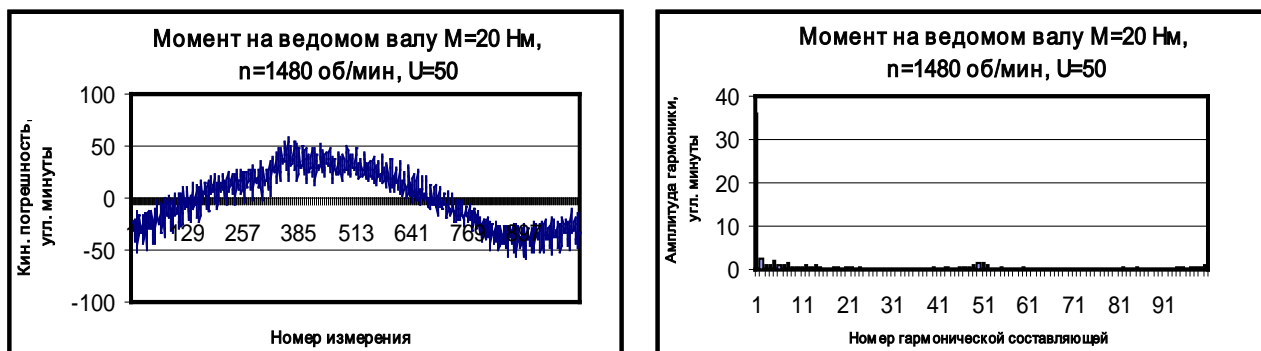


Рисунок 5 – График кинематической погрешности и ее амплитудно-частотный спектр для редуктора с $U=50$

На рисунке 6 приводится график кинематической погрешности и ее амплитудно-частотный спектр для редуктора с $U=1000$.

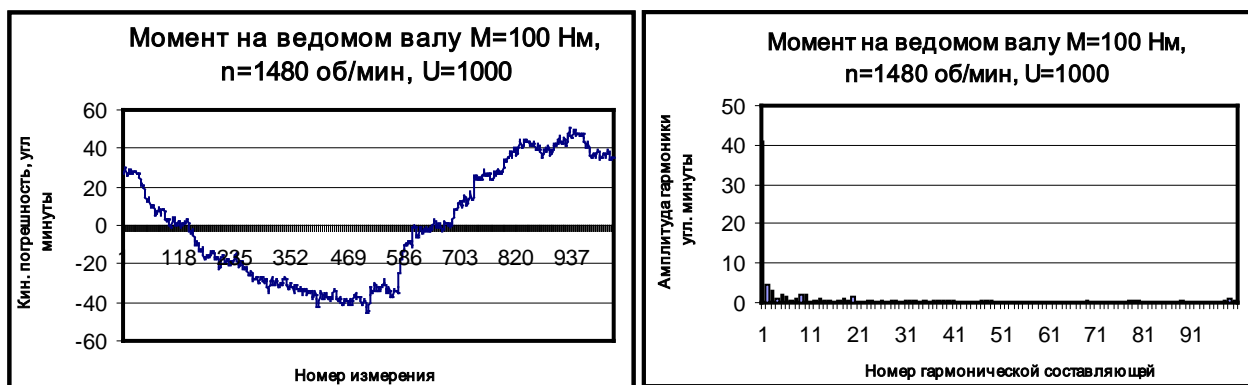


Рисунок 6 – График кинематической погрешности и ее амплитудно-частотный спектр для редуктора с $U=1000$

На основе этих графиков, а также многих других результатов, полученных при исследовании кинематической точности редукторов, сделаны обобщающие выводы, содержащиеся в заключении.

Экспериментальные исследования КПД проводились для редукторов также с различными передаточными отношениями, смазками и различных уровнях нагружения. Исследовались редукторы, детали зацепления которых были обработаны методами лезвийной обработки (без шлифования), закаленные до 58...62 HRC и обработанные шлифованием, не закаленные. Самый высокий КПД показали редукторы с закаленными рабочими поверхностями деталей зацепления до HRC = 58...62, обработанными шлифованием после закалки до шероховатости Ra = 0,63...0,32 мкм, при использовании трансмиссионного масла ТАД-17и. На основе экспериментов получены логарифмические зависимости КПД от передаваемой нагрузки для редукторов с $U = 17; 45; 64; 121; 1000$.

Исследованиями доказано, что величины износа всех деталей зацепления линейно связаны со свободным ходом ведомого вала за исключением участка приработки и участка прогрессирующего износа. Поэтому для оценки износа при эксплуатации редуктора можно использовать свободный ход ведомого вала. По значению этого параметра и уравнениям линейной аппроксимации могут быть определены величины износа всех деталей зацепления. При этом коэффициент детерминации $R^2 = 0,90...0,99$.

При проведении исследований износа оценивались: b – ширина выработки на боковой поверхности зубьев центрального колеса; L – длина выработки; s – увеличение диаметра отверстий сепаратора; e – ширина выработки на рабочей поверхности эксцентриковых подшипников; H – величина свободного хода ведомого вала на конце рычага длиной 600 мм, прикрепленного к этому валу. Были получены следующие линейные зависимости параметров износа от величины свободного хода ведомого вала:

$$D_{ш} = 9,7327 - 0,0084H. \quad (31)$$

$$b = 0,0197 H + 3,7211. \quad (32)$$

$$L = 0,0185 H + 7,2682. \quad (33)$$

$$S \cdot 10^2 = 0,5916 H + 5,8402. \quad (34)$$

$$e = 0,021 H + 2,9048. \quad (35)$$

В пятой главе рассмотрены вопросы практической реализации и применения радиально-плунжерных редукторов в машиностроении и агропромышленном секторе. На основе эксплуатационных испытаний доказано, что данные редукторы можно использовать в приводах различных машин, механизмов, технологического оборудования и оснастки, где требуются пониженные габариты, высокая надежность, соответствие требованиям плавности работы, а также высокая работоспособность при вертикальном и горизонтальном расположении валов, при жидких и пластичных смазках, при однонаправленном и реверсивном вращении ведущего вала, при непрерывном и повторно-кратковременном режимах работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

Выполненные в диссертации теоретические и экспериментальные исследования позволили получить новые результаты, на основе которых можно сформулировать следующие выводы:

1. Предложены простые в реализации кинематические и конструктивные схемы радиально-плунжерных редукторов, обеспечивающие модульный принцип их построения и охватывающие диапазон передаточных отношений от единиц до тысяч [1-А, 8-А, 11-А – 13-А, 21-А, 22-А]. На основе компьютерного моделирования работы радиально-плунжерного зацепления и анализа многочисленных моделей [1-А – 3-А, 16-А, 17-А, 23-А, 28-А, 39-А] создана методика автоматизированного расчета (программы приведены в приложениях А и Б) планетарных радиально-плунжерных редукторов [1-А, 6-А, 12-А–14-А, 18-А, 21-А, 22-А, 31-А, 32-А], отличающаяся новым подходом к оценке геометрических параметров зацеплений, позволившем предложить новую форму периодического профиля центрального колеса, повысить технологичность при его формообразовании, устранить срезание вершин зубьев, а также рассчитать основные размеры деталей редукторов [11-А, 24-А–27-А, 30-А, 34-А, 36-А, 38-А, 40-А].

2. Анализом закономерностей изменения величин относительных скоростей и ускорений плунжеров доказано, что в зацеплениях радиально-плунжерных редукторов при их работе имеют место мягкие удары, что позволило, используя теорию кулачковых механизмов, обосновать наибольшее значение коэффициента динамичности $K_D = 2$ [1-А, 6-А, 8-А]. Показано, что в отличие от шариковых редукторов с пазовыми кулачками, цикл нагружения в радиально-плунжерном зацеплении соответствует лишь половине оборота ведущего звена и подчиняется гармоническому закону [1-А]. Это дало возможность с учетом K_D определить нагрузки, приходящиеся на один

плунжер в любом его положении, и использовать их наибольшие величины в методике компьютерного расчета радиально-плунжерных редукторов.

Показано, что имеющий место дисбаланс вращающихся масс следует устранять конструктивным путем, предусматривая выполнение ведущего звена с двумя эксцентриками, смещенными на 180° , и располагая плунжеры в двух рядах [1-А].

3. На основе новой конструкции преобразователя вращающего момента [45-А], новых средств и методов оценки кинематической точности редукторов в сборе [15-А, 29-А, 48-А – 51-А, 54-А] и использования ЭВМ с соответствующим программным обеспечением для автоматизированной обработки электрических сигналов от первичных преобразователей усовершенствована методика экспериментальных исследований передач, отличающаяся от ранее применявшейся методики возможностью измерять в автоматическом режиме кинематические погрешности передач в сборе [1-А, 4-А, 7-А, 9-А, 10-А, 19-А, 20-А, 33-А, 35-А, 37-А].

Установлено, что редукторы первого класса, изготовленные без использования отделочных операций, при передаточных отношениях до $U=50$ являются наименее точными как по норме кинематической точности (11 – 12 степени точности), так и по норме плавности работы (11 степень точности); редукторы второго класса при передаточных отношениях $U=64$ и $U=121$ оказываются более точными, чем редукторы первого класса, так как по норме кинематической точности (они соответствуют 11 – 12 степеням точности), а по плавности работы – 9 – 10 степеням точности; редукторы третьего класса при передаточном отношении $U=1000$ отличаются также невысокой точностью по норме кинематической точности (12 степень точности), а по норме плавности работы они весьма точны: на уровне 900 – 1000 гармоник местные кинематические погрешности составляют 0,5 – 1,0 угловых минут и, поэтому норма плавности работы редуктора соответствует 8 – 9 степеням точности [1-А, 2-А, 9-А]. При этом наибольшие значения амплитуд гармонических составляющих кинематической погрешности соответствуют их номерам, кратным передаточному отношению, количеству зубьев центрального колеса и их произведениям. Они зависят от частоты вращения ведущего вала и являются чувствительной характеристикой нагруженности редуктора [10-А, 20-А, 34] и его состояния (изношенности и конструктивных особенностей) [19-А, 35-А].

4. Доказано, что КПД радиально-плунжерных редукторов для передаточных отношений от единиц до тысяч несколько ниже КПД планетарных зубчатых редукторов. Его величина зависит от передаточного отношения, уровня нагружения и применяемой смазки [1-А, 24-А, 25-А]. Наиболее низкие значения КПД имеют место при смазке редуктора

индустриальным маслом И-20А, более высоких значений КПД достигает при использовании смазки литол-24, а наиболее высокие – при смазке трансмиссионным маслом ТАД-17и.

5. Установлено, что величины износа всех деталей зацепления линейно связаны со свободным ходом ведомого вала за исключением участка приработки и участка прогрессирующего износа. Поэтому для оценки износа при эксплуатации редуктора можно использовать свободный ход ведомого вала. По значению этого параметра и уравнениям линейной аппроксимации могут быть определены величины износа всех деталей зацепления. При этом достоверность аппроксимации высока, так как коэффициент детерминации $R^2 = 0,90...0,99$ [1-А, 5-А].

Рекомендации по практическому использованию результатов.

1. На основе выполненных теоретических и экспериментальных исследований радиально-плунжерных редукторов создана автоматизированная методика их расчета и проектирования, создан ряд новых конструкций редукторов [41-А – 44-А, 46-А, 47-А, 52-А, 53-А], которые внедрены в производство и учебный процесс студентов, магистрантов и аспирантов и предназначены для приводов технологического оборудования: станков монтажа-демонтажа автомобильных шин; приспособлений; ручных и электрических лебедок; ленточных транспортеров; устройств-усилителей для ручного перемещения кабины лифта, для гаечных ключей и машинных тисков. Акты внедрений и испытаний к диссертации прилагаются (приложения В – К).

2. Простота конструкции и высокая технологичность радиально-плунжерных редукторов обеспечивают их низкую себестоимость. Так, согласно расчетам, себестоимость изготовления таких редукторов для передаточных отношений 34 - 50 и передаваемой мощности 1,5 – 2,0 кВт в условиях мелкосерийного производства составляет примерно 150 дол. США. Стоимость одного такого же планетарного зубчатого редуктора МЦ2С-63 (МЦ2С-80) российского производства составляет 330 (360) дол. США, а редуктора фирмы WOLF – 350 дол. США. Таким образом, экономический эффект на единицу продукции составляет приблизительно 200 дол. США.

3. Радиально-плунжерные редукторы прошли лабораторные исследования и производственные испытания, нашли практическое применение и могут в дальнейшем широко использоваться в производственных условиях вместо традиционных, серийно выпускаемых редукторов. С учетом достигнутого технического уровня таких редукторов определена область их рационального применения – приводы различных машин, механизмов, технологического оборудования и технологической оснастки.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Монография:

1-А. Пашкевич, М.Ф. Планетарные кулачково-плунжерные передачи. Проектирование контроль и диагностика / М.Ф.Пашкевич, В.М.Пашкевич, А.М. Пашкевич, С.В. Чертков – Могилев: Белорусско-Российский университет, 2003. – 221 с.

Статьи в научных журналах:

2-А. Пашкевич, М.Ф. Управление точностью планетарных роликовых передач на основе их моделирования и спектрального анализа кинематических погрешностей / М.Ф.Пашкевич, В.М.Пашкевич, А.В.Капитонов, А.М.Пашкевич // Известия Белорусской инженерной академии. – 2002. – №1(13). – С.45 – 52.

3-А. Пашкевич, М.Ф. Компьютерное моделирование погрешностей и анализ кинематической точности радиально-плунжерных передач / М.Ф.Пашкевич, А.М.Пашкевич // Вестник Могилевского государственного технического университета. – 2002. – №2(3). – С. 113 – 117.

4-А. Пашкевич, М.Ф. О связи кинематической точности с износом деталей зацепления планетарной радиально-плунжерной передачи / М.Ф.Пашкевич. В.М.Пашкевич, А.М.Пашкевич // Вестник Белорусского национального технического университета. – 2003. – №1. – С.34– 37.

5-А. Пашкевич, М.Ф. Исследование износа деталей зацепления кулачково-плунжерных передач / М.Ф.Пашкевич. В.М.Пашкевич, А.М.Пашкевич, К.А. Лопуховский // Трение и износ. – 2003. – том 24, №1. – С.98 – 103.

6-А. Пашкевич, А. М. Малогабаритные радиально-плунжерные передачи для приводов машин, механизмов и технологического оборудования / А.М.Пашкевич // Вестник Могилевского государственного технического университета. – 2006. – №1. – С.193 – 197.

7-А. Пашкевич, А.М. Кинематическая точность планетарных кулачково-плунжерных передач / А.М.Пашкевич // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2006. – № 4. – С.129– 139.

8-А. Пашкевич, М.Ф. Основы проектирования двухступенчатых шариковых радиально-плунжерных редукторов / М.Ф.Пашкевич, С.А.Жигунов, А.М.Пашкевич // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2007. – №4. – С.107 – 112.

Статьи в сборниках научных трудов:

9-А. Пашкевич, М.Ф. Исследование влияния погрешностей зацепления на кинематическую точность радиально-плунжерной передачи / М.Ф.Пашкевич, А.М.Пашкевич // Сборник научных трудов членов Международной Балтийской ассоциации машиностроителей. - Калининград, КГТУ. -2001. - №1 - С.48-54.

10-А. Пашкевич, М.Ф. Исследование влияния передаваемой нагрузки на кинематическую точность радиально-плунжерных передач / М.Ф.Пашкевич, В.М.Пашкевич, А.М.Пашкевич, С.В.Чертков // Сборник научных трудов членов Международной Балтийской ассоциации машиностроителей. - Калининград, КГТУ. – 2003. - №3 – С. 117-120.

11-А. Пашкевич, М.Ф. Перспективные кулачково-плунжерные системы для технологической оснастки в машиностроении / М.Ф.Пашкевич, В.М.Пашкевич, А.М.Пашкевич, С.В.Чертков // Сборник научных трудов «Перспективные технологии, материалы и системы» - Могилев, МГТУ.- 2003. - С. 272-276.

12-А. Пашкевич, М.Ф. Особенности проектирования многоступенчатых шариковых радиально-плунжерных передач / М.Ф.Пашкевич, В.М.Пашкевич, А.М.Пашкевич, С.В.Чертков // Сборник научных трудов членов международной Балтийской ассоциации машиностроителей. - Калининград, КГТУ. – 2007. – С.139-141.

13-А. Пашкевич, М.Ф. Уменьшение массогабаритных параметров приводов для механизмов и технологического оборудования / М.Ф.Пашкевич, С.А.Жигунов, А.М.Пашкевич // Сборник научных трудов международной научно-технической конференции «Балттехмаш-2008». – Калининград, КГТУ. – 2008. – с. 72-77.

14-А. Пашкевич, М.Ф. Совершенствование методики расчета и конструирования шариковых радиально-плунжерных редукторов / М.Ф.Пашкевич, А.М.Пашкевич // Сборник научных трудов международной Балтийской ассоциации машиностроителей. - Калининград, КГТУ. – 2009. – С.118-123.

Материалы конференций:

15-А. Пашкевич, М.Ф. Методы измерения кинематических погрешностей редукторов / М.Ф.Пашкевич, А.П.Минаков, А.М.Пашкевич // Современные материалы, оборудование и технологии упрочнения и восстановления деталей машин: материалы междунар. науч.-техн. конф.-Новополоцк, 1999.- С. 310-311.

16-А. Пашкевич, А.М. Формообразование рабочих поверхностей кулачков планетарных радиально-плунжерных передач /А.М.Пашкевич // Прогрессивные технологии, машины и механизмы в машиностроении: сб. докл. междунар. науч.-техн. конф. «Балттехмаш-2000». - Калининград, 2000.- Т. 2. - С.7-8.

17-А. Пашкевич, М.Ф. Малогабаритные шариковые механизмы-усилители / М.Ф. Пашкевич, А.М.Пашкевич, А.Л.Калечиц, В.В.Афаневич // Создание и применение высокоэффективных наукоемких ресурсосберегающих технологий, машин и комплексов: материалы междунар. науч. – техн. конф. - Могилев, 2001.- С.74-75.

- 18-А. Пашкевич, М.Ф. Методика расчета параметров шариковых механизмов-усилителей на стадии проектирования / М.Ф.Пашкевич, А.М.Пашкевич, В.В.Афаневич // Создание и применение высокоэффективных наукоемких ресурсосберегающих технологий, машин и комплексов: материалы междунар. науч.-техн. конф. - Могилев, 2001.- С. 151 -152.
- 19-А. Пашкевич, М.Ф. О влиянии конструктивных особенностей радиально-плунжерных передач на их кинематическую точность / М.Ф.Пашкевич, В.М.Пашкевич, А.М.Пашкевич, С.В.Чертков // Прогрессивные технологии, технологические процессы и оборудование: материалы междунар. науч. – техн. конф. - Могилев, 2003.- С.88-90.
- 20-А. Пашкевич, М.Ф. Особенности проектирования многоступенчатых шариковых радиально-плунжерных передач / М.Ф.Пашкевич, В.М.Пашкевич, А.М.Пашкевич, С.В.Чертков // Сборник научных статей научно-технической конференции «Балттехмаш-2004» - Калининград, КГТУ. -2004. - С.48-49.
- 21-А. Пашкевич, М.Ф. Модульный принцип проектирования шариковых радиально-плунжерных передач / М.Ф.Пашкевич, А.М.Пашкевич, С.В.Чертков // Материалы,оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.- техн. конф. – Могилев. – 2004. – С. 69-70.
- 22-А. Пашкевич, А.М. Уточнение методики расчета шариковых радиально-плунжерных редукторов / А.М.Пашкевич // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.- техн. конф. – Могилев. – 2010 г. часть 1, с. 127-128
- 23-А. Минаков, А.П. Зависимость КПД радиально-плунжерных редукторов от износа деталей зацепления / А.П.Минаков, А.М.Пашкевич // Материалы международной НТК (21-22 апреля 2011г.) «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии». – Могилев, ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет». – 2011. – часть 1, с. 121.
- 24-А. Минаков, А.П. Зависимость КПД радиально-плунжерных редукторов от вида смазки и вида обработки деталей зацепления / А.П.Минаков, А.М.Пашкевич // Материалы международной НТК (21-22 апреля 2011г.) «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии». – Могилев, ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет». – 2011. – часть 1, с. 122.
- 25-А. Пашкевич, А.М. Геометрические параметры зацеплений в радиально-плунжерном шариковом редукторе, соответствующие его минимальным габаритам / А.М.Пашкевич // Материалы международной НТК, посвященной 50-летию Белорусско-Российского университета (20-21 октября 2011г.) «Перспективные приводные системы, трансмиссии и робототехнические комплексы». – Могилев. – 2011. С. 58-61.

Тезисы докладов:

26-А. Калечиц, А.Л. Динамометрические усилители винтовых зажимов станочных и сборочных приспособлений / А.Л.Калечиц, А.М.Пашкевич // Вклад вузовской науки в развитие приоритетных направлений производственно-хозяйственной деятельности, разработку экономичных и экологически чистых технологий и прогрессивных методов обучения: материалы междунар. науч - техн. конф., посвящ. 80-летию БГПА. - Минск, 2000.-Ч. 5.- С.78.

27-А. Минаков, А.П. Устранение подрезания профиля центрального колеса радиально-плунжерной передачи / А.П.Минаков, А.М.Пашкевич // Новые конкурентоспособные и прогрессивные технологии, машины и механизмы в условиях современного рынка: материалы междунар. науч - техн. конф. – Могилев, 2000.- С.87.

28-А. Пашкевич, М.Ф. Повышение точности измерения кинематических погрешностей зубчатых передач / М.Ф.Пашкевич, А.М.Пашкевич // Материалы междунар. 53-й науч.-техн. конф. профессоров, преподавателей, научных работников и аспирантов БГПА - Минск, 1999.- ч.1.- С.175.

29-А. Пашкевич, А.М. Повышение технологичности деталей зацепления планетарной радиально - плунжерной передачи / А.М.Пашкевич // Современные направления развития производственных технологий и робототехника: материалы междунар. науч.-техн. конф.- Могилев, 1999.-С. 143.

30-А. Пашкевич, А.М. Классификация планетарных радиально - плунжерных передач / А.М.Пашкевич // Современные направления развития производственных технологий и робототехника: материалы междунар. науч. - техн. конф. - Могилев, 1999.- С. 195.

31-А. Пашкевич, А.М. Радиально – плунжерные планетарные передачи в приводах оборудования для восстановления поверхностей / А.М.Пашкевич // Современные технологии в ремонтно – обслуживающем машиностроительном производстве АПК: материалы междунар. науч - практ. конф. - Мн., БАТУ, 1999.- С. 132.

32-А. Пашкевич, А.М. Исследование технологических методов повышения кинематической точности кулачково-плунжерных передач/ А.М.Пашкевич // Вклад вузовской науки в развитие приоритетных направлений производственно-хозяйственной деятельности, разработку экономичных и экологически чистых технологий и прогрессивных методов обучения: материалы междунар. науч - техн. конф., посвящ. 80-летию БГПА. - Минск, 2000.-Ч. 5.- С.96.

33-А. Пашкевич А.М. Формообразование рабочих поверхностей кулачков планетарных радиально-плунжерных передач / Сборник докладов

международной НТК «Прогрессивные технологии, машины и механизмы в машиностроении (Балттехмаш-2000)». - Калининград, 2000 - том 2, с.7-8

34-А. Пашкевич, А.М. Влияние приработки планетарных радиально-плунжерных передач на их кинематическую точность / А.М.Пашкевич // Новые конкурентоспособные и прогрессивные технологии, машины и механизмы в условиях современного рынка: материалы между нар. науч - техн. конф. - Могилев, 2000.- С. 94.

35-А. Пашкевич, А.М. Обеспечение контролируемой затяжки резьбовых соединений на сборочных операциях / А.М.Пашкевич // Создание и применение высокоэффективных наукоемких ресурсосберегающих технологий, машин и комплексов: материалы междунар. науч -техн. конф. - Могилев, 2001.- С.72.

36-А. Пашкевич, А.М. Повышение кинематической точности и плавности работы радиально-плунжерных передач / А.М.Пашкевич // Создание и применение высокоэффективных наукоемких ресурсосберегающих технологий, машин и комплексов: материалы междунар. науч — техн. конф. - Могилев, 2001.- С.73.

37-А. Пашкевич, А.М. Малогабаритный привод / А.М. Пашкевич, С.В. Чертков // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы респ. науч - техн. конф. аспирантов, магистрантов и студентов - Могилев, 2004.- С.59.

38-А. Пашкевич, А.М. Моделирование профиля дорожки для шарикового плунжера в кулачково-плунжерной передаче / А.М.Пашкевич // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы междунар. науч - техн. конф. молодых ученых - Могилев, 2007. - С.33

39-А. Пашкевич, А.М. Устройство для перемещения грузов / А.М.Пашкевич // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы междунар. науч - техн. конф. молодых ученых - Могилев, 2007. - С.73

Патенты:

40-А. Планетарная передача: пат.4928 С1 Респ. Беларусь, МПК7 F16Н 1/28/ А.М. Пашкевич, В.М.Пашкевич, В.В.Герашенко, М.Ф.Пашкевич; заявитель Могил. машиностроит. ин-т. -№ а 19981064; заявл. 26.11.98; опубл. 30.03.03 // Вынаход. Карыс. мадэлі. Прам. узоры - 2003.-№ 1.-С. 161.

41-А. Планетарная передача: пат.5092 С1 Респ. Беларусь, МПК7 F16Н 1/00, 1/28/ А.М.Пашкевич, В.М.Пашкевич, В.В.Герашенко, М.Ф.Пашкевич; заявитель Могил. гос.техн. ун-т. - № а 19981087; заявл. 30.11.98; опубл. 30.03.03 // Вынаход. Карыс. мадэлі. Прам. узоры - 2003.- № 1 .-С. 161.

42-А. Планетарный редуктор: пат.5401 С1 Респ. Беларусь, МКИ⁷ F16Н 13/08, 25/06/ А.М. Пашкевич, М.Ф.Пашкевич; заявитель Могил. машиностроит. ин-т. -

№ а 20000025; заявл. 5.01.00; опубл. 30.09.03 // Вынаход. Карыс. мадэлі. Прам. узоры - 2003.-№3 .-С. 198-199.

43-А. Планетарная роликовая передача: пат. 4985 С1 Респ. Беларусь, МПК7 F16H 25/06, 1/32/ А.М.Пашкевич, М.Ф.Пашкевич; заявитель Могил. машиностроит. ин-т. - № а 19990482; заявл. 13.05.99; опубл. 30.03.03 // Вынаход. Карыс. мадэлі Прам. узоры - 2003.-№ 1.-С. 162.

44-А. Преобразователь крутящего момента: пат. 6710 С1 Респ. Беларусь, МПК7 G 01L 3/10/ М.Ф.Пашкевич, В.М.Пашкевич, В.В.Геращенко, А.М.Пашкевич; заявитель ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет» - № а 200100859; заявл. 16.10.2001; опубл. 30.12.2004 // Вынаход. Карыс. мадэлі. Прам. узоры - 2004.- №4.- С. 206.

45-А. Редукторный ключ: пат.454 U Респ. Беларусь, МПК7 G 01L 5/24/ М.Ф.Пашкевич, В.М.Пашкевич, А.М.Пашкевич, М.В.Соколов, А.Л.Калечиц; заявитель Могил. гос.техн. ун-т. - № и 20010107; заявл. 10.05.01; опубл. 30.03.02 // Вынаход. Карыс. мадэлі. Прам. узоры - 2002.- №1. – С.217.

46-А. Редукторный ключ: пат.455 U Респ. Беларусь, МПК7 G 01L 5/24/ М.Ф.Пашкевич, В.М.Пашкевич, А.М.Пашкевич, А.Л.Калечиц, В.В.Афаневич; заявитель Могил. гос.техн. ун-т. - № и 20010108; заявл. 10.05.01; опубл. 30.03.02 // Вынаход. Карыс. мадэлі. Прам. узоры - 2002.- № 1.-С.218.

47-А. Стенд для контроля кинематической точности передач: пат.4858 С1 Респ. Беларусь, МПК7 G01M 13/02. / М.Ф.Пашкевич, В.В.Геращенко, В.М.Пашкевич, А.М.Пашкевич, А.В.Капитонов; заявитель Могил, машиностроит. ин-т. - № а 19981066; заявл. 26.11.98; опубл. 3.12.02 // Вынаход. Карыс. мадэлі Прам. узоры - 2002.- №4.-С.157-158.

48-А. Устройство для контроля кинематической точности зубчатых передач: пат.4341 С1 Респ. Беларусь, МПК7 G01M 13/02. / М.Ф.Пашкевич, В.В.Геращенко, В.М.Пашкевич, А.В.Капитонов, А.М.Пашкевич; заявитель Могил. гос. техн. ун-т.- № а 19980949; заявл. 21.10.98; опубл.30.03.02 // Вынаход. Карыс. мадэлікі Прам. узоры - 2002.- №1.-С. 150 -151.

49-А. Устройство для контроля кинематической точности передач: пат.4358 С1 Респ. Беларусь, МПК7 G01M 13/02. / М.Ф.Пашкевич, В.М.Пашкевич, В.В.Геращенко, А.М.Пашкевич, А.В.Капитонов; заявитель Могил, машиностроит. ин-т. - № а 19990596; заявл. 14.06.99; опубл. 30.03.02 // Вынаход. Карыс. мадэлі. Прам. узоры - 2002.-№2.-С151.

50-А. Устройство для контроля кинематической точности передач: пат.4359 С1 Респ. Беларусь, МПК7 G01M 13/02. / М.Ф. Пашкевич, В.М. Пашкевич, В.В.Геращенко, А.М.Пашкевич, А.В.Капитонов; заявитель Могил. машиностроит. ин-т. - № а 19990568; заявл. 7.06.99; опубл. 30.03.02 // Вынаход. Карыс. мадэлі. Прам. узоры - 2002.-№2.-С.151-152.

51-А. Устройство для перемещения грузов: пат. 2009 У Респ. Беларусь, МПК7 В66D 1/4. / М.Ф.Пашкевич, А.С.Жилинский, А.М.Пашкевич, С.А.Жигунов; заявитель ГУ ВПО «Бел.-Рос. ун-т». - № и 20040537; заявл. 25.11.2004; опубл.30.06.2005 // Вынаход. Карыс. мадэлі. Прам. узоры - 2005.-№ 2 -С.285.

52-А. Шариковое редукторное устройство для ручного перемещения кабины лифта: пат. 3258 У Респ. Беларусь, МПК7 F16H 1/28. / П.М.Рудник, А.В.Тюков, И.Н.Балабанов, С.С.Грибов, С.В.Миронов, М.Ф.Пашкевич, В.М.Пашкевич, А.М.Пашкевич; заявитель РУП завод «Могилевлифтмаш». - № и 20060362; заявлено 5.06.2006; опубл. 30.12.2006 // Вынаход. Карыс. мадэлі. Прам. узоры - 2006. - № 6. - С. 181.

Депонированные статьи:

53-А. Пашкевич, М.Ф. Новые методы и средства измерения кинематических погрешностей передач в сборе / М.Ф. Пашкевич, В.В. Геращенко, В.М.Пашкевич, А.М.Пашкевич, А.В.Капитонов, Могилев. гос. техн. ун-т.- Могилев, 1999.-17с.- Деп. в БелИСА 22.11.1999, № 1999111 // Реф. сборник непубликуемых работ.-2000.-Выпуск 4(15).-С.100.

Пашкевіч Аляксандр Міхайлавіч

МЕТОДЫКА ПРАЕКТАВАННЯ ПЛАНЕТАРНЫХ РАДЫАЛЬНА-ПЛУНЖАРНЫХ РЭДУКТАРАЎ ПЕРШАГА, ДРУГОГА И ТРЭЦЯГА КЛАСАЎ НА АСНОВЕ КОМПУТЭРНАГА МАДЭЛЯВАННЯ ПРАЦЫ ЗАЧАПЛЕННЯЎ

Ключавыя словы: радыяльна-плунжарны рэдуктар; кінематычная схема; скорасць; ускарэнне; цэнтральнае кола; апраксімацыя; кампутэрная мадэль; кінематычная памылка; спектар; сілавы аналіз; кантактныя напружанні.

Мэта даследвання – стварэнне новай методыкі праектавання планетарных радыяльна-плунжарных рэдуктараў для шырокага дыяпазона перадаючых адносін на аснове кампутэрнага мадэлявання працы зачэпленняў і аўтаматызацыі разліку.

Метады даследвання – тэарэтычныя і эксперыментальныя.

Пры тэарэтычных даследваннях і апрацоўцы эксперыментальных вынікаў прымяняліся аналітычная геаметрыя, дыферэнцыяльнае вылічэнне, інтэгральнае вылічэнне, вектарная алгебра, гарманічны аналіз, тэорыя верагогднасцей.

Пры эксперыментальных даследваннях прымяняліся сучасныя фотаэлектрычныя пераўтваральнікі. У якасці рэгістратараў шпаркіх працэсаў прымяняліся лічбавыя асцылографы і персанальныя ЭВМ. Апрацоўка эксперыментальных вынікаў рабілася з прымяненнем ЭВМ і патрэбнага праграмнага забеспячэння.

Вынікам даследвання з'явілася распрацоўка інжынернай методыкі праектавання радыяльна-плунжарных рэдуктараў, якая прадстаўляе сабой тэорыю радыяльна-плунжарнага зачэплення, значна папаўняючую тэорыю зачэплення механічных перадач з цэламі качэння.

Прапанаваны кінематычныя схемы перадач першага, другога і трэцяга класаў і вызначаны іх кінематычныя магчымасці. На аснове кампутэрнага мадэлявання працы радыяльна-плунжарных зачэпленняў створана новая методыка разліку геаметрычных параметраў дэталей рэдуктараў. Прапанавана рацыянальная з тэхналагічнага пункту гледжання форма зубоў цэнтральнага кола. Распрацаваны асновы сілавога разліку радыяльна-плунжарных рэдуктараў, а таксама спосабы прадухілення дысбалансу круцячайся масы. Пералічаныя вынікі з'яўляюцца новымі, таму што яны атрыманы ці ўпершыню, ці на новым навукова-метадычным узроўні.

Радыяльна-плунжарныя рэдуктары прайшлі вытворчыя апрабаванні і знайшлі практычнае выкарыстоўванне ў якасці малагабарытных прывадоў машын, механізмаў, тэхналагічнага абсталявання і тэхналагічнай аснасткі.

РЕЗЮМЕ

Пашкевич Александр Михайлович

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЛАНЕТАРНЫХ РАДИАЛЬНО-ПЛУНЖЕРНЫХ РЕДУКТОРОВ ПЕРВОГО, ВТОРОГО И ТРЕТЬЕГО КЛАССОВ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ ЗАЦЕПЛЕНИЙ

Ключевые слова: радиально-плунжерный редуктор; кинематическая схема; скорость; ускорение; центральное колесо; аппроксимация; компьютерная модель; кинематическая погрешность; спектр; силовой анализ; контактные напряжения.

Цель исследования – создание новой методики проектирования планетарных радиально-плунжерных редукторов для широкого диапазона передаточных отношений на основе компьютерного моделирования работы зацеплений и автоматизации расчета.

Методы исследования – теоретические и экспериментальные.

При теоретических исследованиях и обработке экспериментальных результатов применялись аналитическая геометрия, дифференциальное исчисление, интегральное исчисление, векторная алгебра, гармонический анализ, теория вероятностей.

При экспериментальных исследованиях применялись современные фотоэлектрические преобразователи. В качестве регистраторов быстро протекающих процессов использовались цифровые осциллографы и персональная ЭВМ. Обработка экспериментальных результатов выполнялась с использованием ЭВМ и соответствующего программного обеспечения.

Результатом проведенного исследования явилась разработка усовершенствованной методики расчета и проектирования радиально-плунжерных редукторов, которая представляет собой теорию радиально-плунжерного зацепления, существенно дополняющую теорию зацепления механических передач с телами качения.

Предложены кинематические схемы передач первого, второго и третьего классов и оценены их кинематические возможности. На основе компьютерного моделирования работы радиально-плунжерного зацепления создана новая методика расчета геометрических параметров деталей редукторов. Предложена рациональная с технологической точки зрения форма зубьев центрального колеса. Разработаны основы силового расчета радиально-плунжерных редукторов, а также способы устранения дисбаланса вращающейся массы. Перечисленные результаты обладают новизной, так как они получены либо впервые, либо на новом научно-методическом уровне.

Радиально-плунжерные редукторы прошли производственные испытания и нашли практическое применение в качестве малогабаритных приводов

МАШИН, МЕХАНИЗМОВ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ.

S U M M A R Y

Pashkevich Alexander Mihajlovich

DESIGN TECHNIQUE OF PLANETARY RADIAL-PISTON MOTORS FIRST, SECOND, AND THIRD CLASSES BASED ON COMPUTER MODELING OF CATCHING

Keywords: radial-plunger reducers; the kinematic scheme; speed; acceleration; the central wheel; approximation; computer model; a kinematic error; a spectrum; the power analysis; contact pressure.

The purpose of the study is to create new methods of design of planetary reduction gear for radial plunger of a wide range of ratios based on computer modeling of catching and automate the calculation.

Research methods and theoretical and experimental.

Theoretical research and experimental results are analytical geometry, differential calculus, integral calculus, vector algebra, harmonic analysis, probability theory.

The pilot studies have applied modern photovoltaic converters. As registrars to quickly proceeding processes used digital Oscilloscopes and a personal computer. Processing of experimental results is performed with the use of computers and related software.

The result of the study was the development of improved methods of calculation and design of radial-piston motors, which is a theory of radial plunger locking significantly complement the theory of mechanical gear meshing with the bodies.

Suggested kinematic scheme of transmission of the first, second and third classes and appreciated their kinematic feature. Based on computer simulations of radial plunger snagging a new method of calculation of geometrical parameters of gear parts. A sound from the technological point of view form the Central teeth of the wheel. Developed the basics of power calculation of radial-piston motors, as well as ways to address the imbalances of rotating mass. The results of the novel, as they received either first time or new scientific and methodical level.

Radial-piston motors have passed industrial tests and found practical application as small drives of machines, mechanisms, equipment and production tooling.

ПАШКЕВИЧ Александр Михайлович

**МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЛАНЕТАРНЫХ РАДИАЛЬНО-
ПЛУНЖЕРНЫХ РЕДУКТОРОВ ПЕРВОГО, ВТОРОГО И ТРЕТЬЕГО
КЛАССОВ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
РАБОТЫ ЗАЦЕПЛЕНИЙ**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.02.02 – Машиноведение,
системы приводов и детали машин

Подписано в печать 16 мая 2013 г. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать трафаретная.
Усл. печ. л. 1,63. Уч.-изд. л. 1,79. Тираж 115 экз. Заказ № 352.

Издатель и полиграфическое исполнение
Государственное учреждение высшего профессионального образования
«Белорусско-Российский университет»
ЛИ № 02330/0548519 от 16.06.2009 г.
Проспект Мира, 43, 212000, Могилев.