

Инновационное развитие теории и практики спироидных передач и редукторов

В статье представлена краткая историческая информация о развитии исследований и освоении производства спироидных передач и редукторов в Институте механики Ижевского государственного технического университета. Описаны результаты и перспективные направления развития теории и практики проектирования спироидных передач и редукторов, этапы становления и развития научно-производственного инновационного предприятия «Механик», ставшего отечественным и мировым эксклюзивным производителем спироидных редукторов приводов трубопроводной арматуры и основной производственной базой для практического использования научных разработок, выполняемых в Институте механики.

Ключевые слова: спироидные передачи и редукторы, инновационное развитие, теория проектирования, освоение производства.

Введение

История существования зубчатых передач насчитывает тысячелетия и наполнена большим количеством замечательных событий и выдающихся инженеров и ученых, благодаря которым этот вид техники стал незаменимым. За многие годы появились сотни видов и разновидностей передач, создана стройная теория зубчатых зацепления ([1–3] и др.), разработаны эффективные технологии производства передач, оборудование и инструмент для их реализации. Этот процесс, получивший активное развитие в XIX и XX столетиях, продолжается с не меньшей интенсивностью в настоящее время, находя новые формы и направления развития.

Одним из таких событий, обративших на себя внимание специалистов, стало изобретение талантливым инженером Oliver Saari в 1954 г. спироидной передачи [4] (рис. 1), которая благодаря особенностям геометрии и кинематики зацепления и, как следствие, высокой нагрузочной способности, износостойкости, стойкости против ударных и вибрационных нагрузок, технологичности изготовления и монтажа и ряду других достоинств [6], заняла достойное место среди



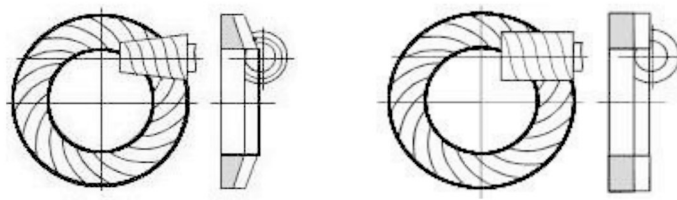
В. И. Гольдфарб,
д. т. н., профессор, Институт механики,
Ижевский государственный технический
университет им. М. Т. Калашникова
veniamingoldfarb@yahoo.com

других передач с перекрещивающимися осями. Первое и достаточно подробное описание передачи и метода ее проектирования было дано в работах W. Nelson [7], а пионером в организации производства спироидных передач и редукторов и широком ее внедрении в различные области техники стала корпорация Illinois Tool Works (США), которая в 1960–1970-е гг. издала обстоятельные каталоги, рекламирующие успешное применение передач в станкостроении, подъемно-транспортной и военной технике, в точных приборах и других областях и демонстрирующие их большие возможности, в том числе возможность получения в одной паре передаточных отношений от 8 до 360.

В СССР первыми изучением спироидных передач стали заниматься в Ижевском механическом институте (с 1993 г. Ижевский государственный технический университет) молодые ученые Б. Д. Зотов и Н. С. Голубков. Были изготовлены и испытаны первые образцы спироидных редукторов, один из которых долгое время эксплуатировался на Ижевской ТЭЦ, и сделана попытка разработать методику их расчета. Более серьезное развитие эти работы получили в трудах А. К. Георгиева [8, 9], организовавшего в 1965 г. лабораторию спироидных передач. Исследования и разработки велись в



а



б

в

Рис. 1. Oliver Saari (1924–2003) (а)
и изобретенные им разновидности спироидной передачи с коническим (б)
и цилиндрическим (в) червяками

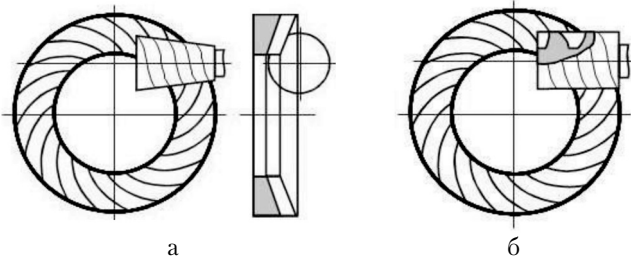


Рис. 2. Разновидности спироидных передач, изобретенные А. К. Георгиевым (а) и запатентованные в СССР, США, Германии, и А. К. Георгиевым и В.И. Гольдфарбом (б), запатентованные в СССР, США, Германии, Англии, Франции, Японии, Италии, Швеции, Канаде

различных направлениях: создание геометрической теории спироидных передач и метода их инженерного расчета, разработка новых разновидностей, две из которых запатентованы в ряде стран [10, 11] (рис. 2), разработка конструкции редукторов общемашиностроительного и специального применения, проведение стендовых испытаний, разработка терминологического [12] и ряда отраслевых стандартов.

С 1980-х гг. центр тяжести работ в области разработки и исследования спироидных передач стал смещаться в СКБ передач, организованное В. И. Гольдфарбом и преобразованное в 1994 г. в Институт механики (ИМ) ИжГТУ, ставший основным научным центром в этой области. О работах по развитию теории проектирования спироидных передач и редукторов, выполнению аналитических, численных и экспериментальных исследований, разработке технологии изготовления и практическому освоению их производства, выполненным в ИМ и созданном на его основе инновационном предприятии ООО «Механик», пойдет изложение в настоящей работе.

1. Развитие теории и практики проектирования спироидных передач и редукторов

Указанная проблема, определившая основное направление деятельности ИМ, имеет выраженные фундаментальную (развитие теории проектирования) и прикладную (синтез новых разновидностей передач,

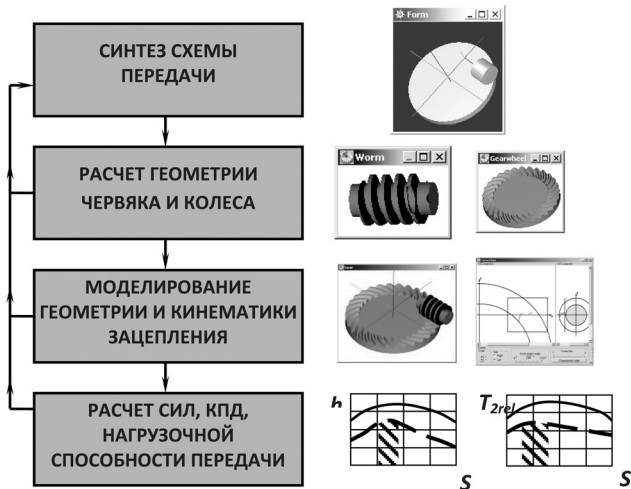


Рис. 3. Структура проектирования идеального зацепления

проектирование и конструкторская разработка передач и редукторов, технологическое проектирование, освоение инновационного наукоемкого промышленного производства) составляющие. Работы по реализации этой проблемы выполнялись и выполняются в следующих направлениях.

1. Развитие теории сопряженного (идеального) зацепления спироидной передачи в общем (неортогональном) случае расположения осей звеньев, разработка принципов, структуры (рис. 3), математического обеспечения и средств автоматизированного проектирования и исследования передачи. Результаты этих работ легли в основу докторской диссертации В. И. Гольдфарба [13] (первая из известных четырех докторских диссертаций, посвященных спироидным передачам; остальные три [14–16] также выполнены в ИМ) и диалоговой САПР «SPDIAL» [17], которая была основным инструментом проектирования передач и исследования геометрии, кинематики их зацепления, расчета их силовых показателей.

Фрагментами этого направления стали исследования:

- по анализу и синтезу схем передач [18, 19], результатом которых явилось патентование их ряда новых разновидностей ([20–22] и др., рис. 4);
- неортогональных спироидных передач [23];
- спироидных передач с червяками, имеющими переменный шаг витков [24];
- комбинированных двухступенчатых передач и редукторов [25];
- точности спироидных передач [26, 27].

На основе созданной методологии были разработаны и освоены в серийном производстве редукторы и мотор-редукторы общемашиностроительного применения, передачи станков, автоматических линий, ряда точных устройств (рис. 5).

2. Разработка теории реального спироидного зацепления с учетом возможных погрешностей изготовления, монтажа и деформаций, как элементов передач, так и узлов содержащих их редукторов. Начало работ этого направления было положено докторской диссертацией Е. С. Трубочева [16]. На рис. 6 показана структура процесса проектирования реального спироидного зацепления. В настоящее время работы этого направления являются основным научным багажом ИМ, позволяя (с помощью воссозданной на основе разработанной методологии САПР «SPDIAL+» [28]) решать, в частности, следующие фундаментальные и имеющие большое практическое значение задачи:

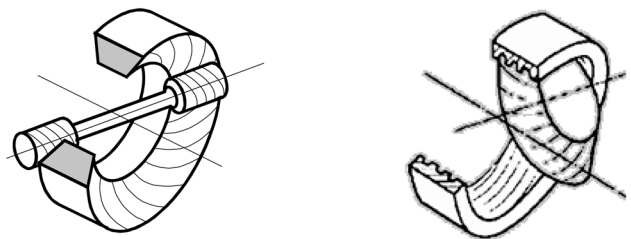


Рис. 4. Синтезированные и запатентованные схемы новых нетрадиционных разновидностей передач

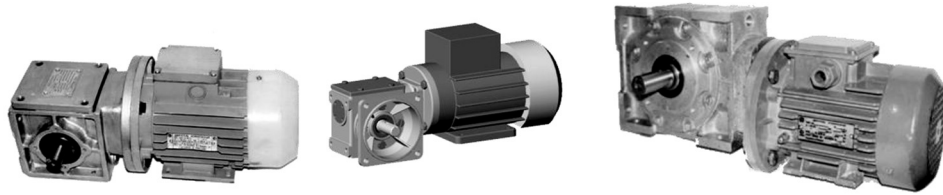


Рис. 5. Спироидные мотор-редукторы общемашиностроительного применения

- развитие принципов, структуры (рис. 6) и методологии проектирования реальных спироидных передач и редукторов;
- определять точку касания зацепляющихся поверхностей при наличии факторов, нарушающих сопряженный (идеальный) контакт (решение обратной задачи теории зацепления), что в свою очередь открывает широкие возможности для решения целого класса задач, связанных с исследованием влияния практически любых погрешностей, в том числе искусственно вводимых при модификации зубьев для достижения необходимой локализации контакта, на качество зацепления и точность передачи, в том числе построения системы нормирования точности;
- находить положение, размеры, форму мгновенных площадок касания и суммарного пятна контакта в реальном зацеплении;
- управлять положением пятна контакта путем изменения параметров установки и геометрии инструмента при нарезании колеса и червяка; данная задача имеет большое практическое значение для снижения чувствительности передачи к различного рода погрешностям.

Замечу, что разработанные методология, математическое обеспечение, система «SPDIAL+» (рис. 7) являются:

- а) основным инструментом решения проектных и большинства исследовательских задач в ИМ;
 - б) универсальным средством исследования и проектирования не только спироидных, но и червячных цилиндрических передач, что неоднократно проверено на практике.
3. Опираясь на предыдущие работы, активно развивается направление, связанное с оценкой нагруженности, деформативности, прочности передач на основе предложенных моделей нагруженности

[29], распределения сил в реальном зацеплении, с использованием МКЭ и опираясь на результаты многочисленных экспериментальных исследований (рис. 8).

Одной из важных научных и практических целей этого направления является адекватная оценка прочности спироидной передачи при различных режимах и условиях нагружения. Непосредственно к этому направлению примыкают работы по оценке износостойкости передач [15], начатые В. Н. Анферовым в Свердловском машиностроительном институте [30] и активно развиваемые в НГУПС (Новосибирск) в сотрудничестве с ИМ.

4. Технологическое проектирование также представляет собой активно развиваемое научно-практическое направление выполняемых в ИМ работ, без которого невозможно создание эффективного производства.

Помимо решения типовых задач технологического проектирования разработан принципиально новый подход, согласно которому проектирование передачи подчинено двум условиям:

- применение для зубообработки колеса одной из фрез заранее известного весьма ограниченного ряда;
- обеспечение необходимой степени локализации контакта, делающей передачу малочувствительной к погрешностям и деформациям.

Решение первой из этих задач позволяет резко сократить номенклатуру инструмента для нарезания колес достаточно широкой номенклатуры, что в свою очередь ведет к заметной экономии средств, затрачиваемых на изготовление фрез. На основе разработанного подхода решается задача унификации фрез для нарезания зубьев колес. Указанный подход инвариантен по отношению к виду передачи червячно-го типа. Перспективой развития данного направления

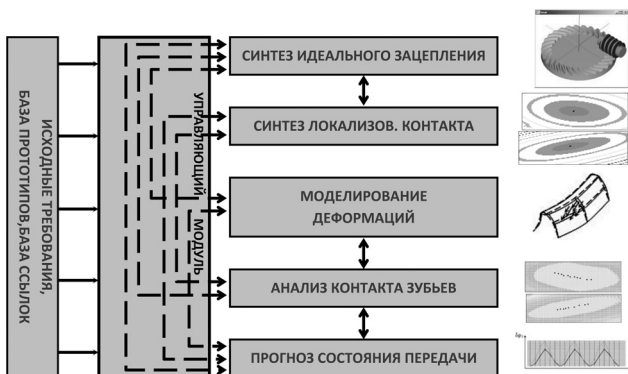


Рис. 6. Структура проектирования реальной спироидной передачи

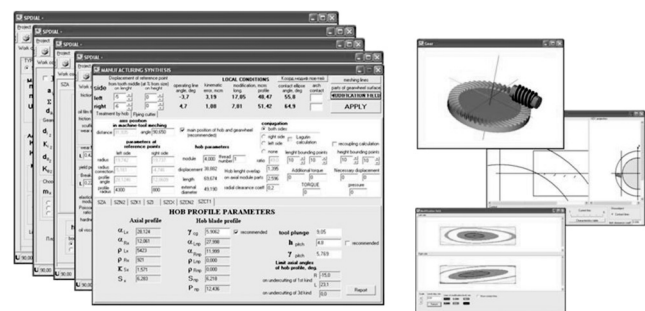


Рис. 7. Фрагменты функционирования САПР «SPDIAL+»

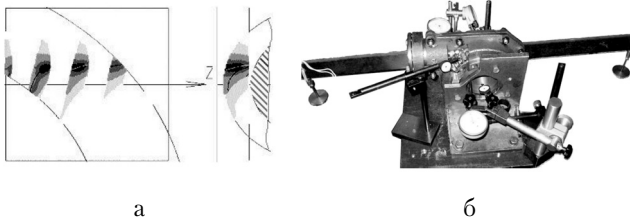


Рис. 8. Результаты исследования (а) и экспериментальная установка (б) распределения нагрузки по полю зацепления

является разработка новых производительных схем и оборудования для формообразования зубьев колес и витков червяков.

5. Разработка принципиально новой методологии процесса конструирования редукторов, которая позволит максимально автоматизировать этот процесс. Это новое направление, которое находится в стадии формирования.
6. Применение полимерных материалов для изготовления спироидных колес. Первые работы этого направления [31] показали его перспективу. Развитие работ здесь представляется связанным с применением порошковых материалов и нанотехнологий.
7. Исследование и разработка методов проектирования новых разновидностей передач, а также передач, имеющих нетрадиционное сочетание параметров, например, передач с малым передаточным отношением (меньше 10).
8. Экспериментальные исследования передач и редукторов (рис. 9), развитие методов контроля, разработка методологии и оборудования для проведения испытаний. Работы этого направления чрезвычайно важны для проверки адекватности разработанного математического и программного обеспечений, накопления данных о состоянии передач и редукторов и их возможностях при различных сочетаниях параметров и условиях нагружения, проверки работоспособности разработанных и изготовленных редукторов. Отвечая на указанные вопросы, результаты испытаний одновременно являются базой для построения на их основе расчетно-экспериментальных моделей оценки важнейших показателей передач и редукторов.

Помимо указанных направлений в ИМ получили развитие работы, связанные:

- с разработкой нового подхода проектирования эвольвентных цилиндрических передач на основе метода блокирующих контуров [32, 33], позволяющего прогнозировать качество передачи на ранних

этапах проектирования и решать проектную задачу в оптимизационной постановке;

- созданием теории построения систем автоматизированного синтеза объектов и процессов на основе метода характеристики (руководитель работ О. В. Малина [34]).

Выполняя НИР по указанным направлениям, сотрудники ИМ ведут большую работу по разработке конструкции спироидных редукторов и мотор-редукторов для дальнейшего освоения их производства и внедрения в различные отрасли промышленности, технологическую подготовку и сопровождение этого производства на базе научно-производственного инновационного предприятия ООО «Механик».

2. Освоение производства спироидных передач и редукторов

Внедрение разработанных передач и редукторов в промышленность всегда было и остается одной из главных задач. Начиная с первых работ, было сделано большое количество опытных, опытно-промышленных образцов и мелких серий спироидных редукторов. Первое серийное производство разработанных в СКБ спироидных мотор-редукторов транспортных модулей ГАП, механизмов стружкоуборки металлорежущих станков, поворотных устройств вакуумных установок было организовано в начале 1980-х гг. на заводе точного машиностроения (г. Чайковский). Справедливости ради отметим, что в эти годы на заводе Электростальтяжмаш были спроектированы С. А. Лагутиным и серийно освоены в производстве спироидные редукторы для металлургического оборудования.

В начале 1990-х гг. в связи с известными политическими и экономическими преобразованиями в России многие производства были закрыты и для поддержки вузовских научных школ, основным источником финансирования которых была промышленность, Министерство высшего образования РФ организовало инновационные программы, обязательным условием участия в которых было внедрение разработок в производство.

Особо подчеркну, что это ответственное государственное решение, значение которого трудно переоценить, сыграло решающую роль не только для сохранения вузовского научного потенциала, но и инновационного развития многих научных школ, в том числе в Институте механики ИжГТУ.

Начав участвовать в этих программах с 1991 г., Институт механики добился при непосредственной поддержке Министерства образования в 1994 г. открытия Федеральной целевой программы «Прогрессивные

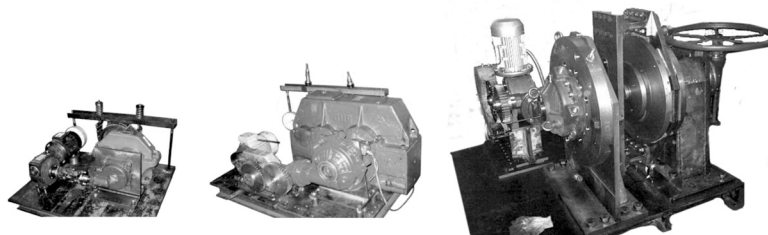


Рис. 9. Стенды для испытаний спироидных редукторов

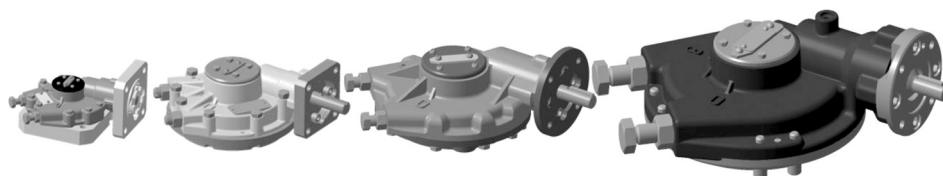


Рис. 10. Четвертьоборотные спироидные редукторы третьего поколения

зубчатые передачи», став ее главным исполнителем и объединив многие научные школы в области зубчатых передач вузов России. Тогда и возникла и благодаря бюджетной поддержке Минобра была быстро реализована идея создания самостоятельного производства наукоемких спироидных редукторов и мотор-редукторов на базе имеющегося оборудования в виде научно-производственного инновационного предприятия «Механик». На предприятии сначала было освоено производство спироидных мотор-редукторов малых типоразмеров (нагрузочный момент до 100 Нм), а с середины 1990-х гг. по заказу ООО «Самараволгомаш», производящего шаровые краны для трубопроводов, начато специализированное производство редукторов трубопроводной арматуры.

Становление и развитие этого производства сопровождалось:

- разработкой новых методов расчета передач и редукторов, работающих в условиях эксплуатации приводов трубопроводной арматуры — низкие скорости вращения, высокие нагрузочные и, в особенности, перегрузочные моменты, возникающие главным образом при открытии/закрытии арматуры, широкий диапазон рабочих температур (от -60°C до $+50^{\circ}\text{C}$ и выше), высокие требования в отношении надежности и долговечности;
- созданием унифицированных конструкций редукторов, освоением современных методов и средств автоматизированного проектирования изделий;
- масштабными экспериментальными исследованиями для проверки адекватности созданных расчетных моделей, определения реальных технических характеристик и возможных причин выхода из строя разработанных редукторов, решения многих задач, связанных с оценкой их прочности, надежности, долговечности;
- созданием и освоением технологии изготовления, гарантирующей необходимое высокое качество изделий и рентабельность производства в условиях жесткой конкуренции и экспансии зарубежных производителей на отечественном рынке.

За прошедшие с начала этих работ (1995 г.) годы создано 3 поколения спироидных редукторов для управления арматурой поворотного действия (шаровые краны, затворы) — четвертьоборотные редукторы (рис. 10) и арматурой прямоходного действия (затворы, заслонки) — многооборотные редукторы (рис. 11).

В настоящее время освоенная в серийном производстве номенклатура для четвертьоборотных редукторов насчитывает 10 наименований (нагрузочные моменты от 500 Нм до 64000 Нм и передаточных отношениях от 6 до 80 в одноступенчатом исполнении

и от 100 до 4000 и более — в двухступенчатом) и 3 типоразмера для многооборотных.

Особенности конструкции и производства этих редукторов описаны в [35, 36], их потребителями являются арматуростроительные предприятия и конечные потребители трубопроводной арматуры — предприятия нефтегазовой, энергетической, в том числе атомной, химической и других отраслей промышленности. Интересно отметить, что созданное уникальное («Механик» является эксклюзивным в мире производителем спироидных редукторов приводов трубопроводной арматуры) производство стало в России одним из первых специализированных самостоятельных редукторных производств в арматуростроении, а разработанные, освоенные в производстве и серийно производимые спироидные редукторы ТПА по своим технико-экономическим показателям превосходят многие лучшие зарубежные образцы, создавая благоприятные предпосылки для решения актуальной задачи импортозамещения [37].

Заключение

В статье кратко описаны некоторые исторические аспекты и современное состояние развития научных исследований инновационного производства спироидных передач и редукторов в Институте механики ИжГТУ и на предприятии «Механик». Одним из важных итоговых результатов выполненного обзора является свидетельство важности инновационной государственной поддержки выполнения фундаментальных и прикладных исследований, благодаря которой удалось довести указанные исследования до практически важнейшего результата — освоения серийного производства прогрессивных изделий. Описанные работы по совершенствованию знаний о спироидных передачах, методе их проектирования, разработке новых их видов, конструкций, технологий изготовления, поиску новых материалов, смазок, новых перспективных областей их применения — постоянно в центре

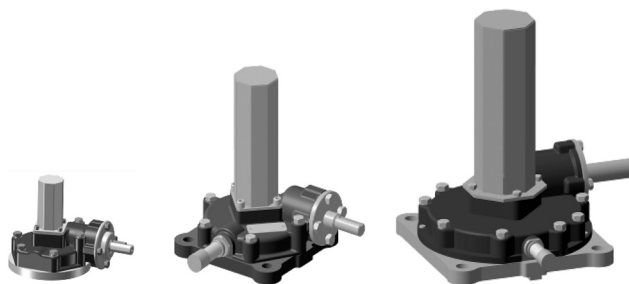


Рис. 11. Многооборотные спироидные редукторы третьего поколения

внимания коллектива ИМ и предприятия «Механик». Благодаря выполненным работам и судя по известным публикациям, ИМ является мировым лидером в этой области. Активное участие ИМ и ООО «Механик» в подготовке рабочих, инженерных и научных кадров обеспечивает постоянное участие молодежи в их научной и производственной деятельности и является своеобразным гарантом прочности и долговечности избранного пути.

Список использованных источников

1. Ф. Л. Литвин. Теория зубчатых зацеплений. М.: Наука, 1968.
2. F. L. Litvin. Gear geometry and applied theory. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1994.
3. F. L. Litvin. Development of Gear Technology and Theory of Gearing. NASA Reference Publication 1406, ARL-TR-150, 1997.
4. O. Saari. Speed reduction gearing. Pat. USA №26996125, 1954.
5. O. Saari. Pat. USA №29547046 1961.
6. V. I. Goldfarb. What we know about spiroid gearing//Proceedings of the International Conference on Mechanical Transmissions. China, Vol. 1, Science Press, 2006.
7. W. D. Nelson. Spiroid gearing//Machine Design, № 3–5, 1961.
8. А.К. Георгиев. Элементы геометрической теории и некоторые вопросы проектирования и производства гипоидно-червячных передач: дисс... канд. техн. наук, Ижевск, 1965.
9. А. К. Георгиев, В. И. Гольдфарб. Аспекты геометрической теории и результаты исследования спироидных передач с цилиндрическими червяками//Механика машин, вып. 31. М.: Наука, 1972.
10. А. К. Георгиев. Ортогональная червячно-коническая передача. Авторское свидетельство СССР №201864, опубл. в Б. И. № 18, 1967, запатентовано в США и ФРГ.
11. А. К. Георгиев, В. И. Гольдфарб. Зубчатая передача с перекрещивающимися осями. Авторское свидетельство СССР № 208396, опубл. в Б.И. №3, 1968, запатентовано в США, Германии, Англии, Канаде, Франции, Италии, Японии, Швеции.
12. ГОСТ 22850-77. Передачи спироидные. Термины, определения и обозначения. Введ. 01.01.79. М.: Изд-во стандартов, 1978.
13. В. И. Гольдфарб. Основы теории автоматизированного геометрического анализа и синтеза червячных передач общего вида: дис. ... докт. техн. наук, Ижевск, 1985.
14. А. С. Кунивер. Теоретические основы синтеза зацеплений модифицированных спироидных цилиндрических передач: дисс... докт. техн. наук, Ижевск, 2001.
15. В. Н. Анферов. Создание приводов подъемно-транспортных машин на основе спироидных передач: дисс... докт. техн. наук. Новосибирск, 2002.
16. Е. С. Трубочев. Основы анализа и синтеза зацепления реальных спироидных передач: дисс... докт. техн. наук. Ижевск, 2004.
17. В. И. Гольдфарб. Опыт проектирования спироидных передач с использованием диалоговой САПР. Сб.: Разработка и внедрение систем автоматизированного проектирования в машиностроении. Ижевск, 1983.
18. V. I. Goldfarb. The synthesis of nontraditional kind of skew axis gearing. Proceedings of the International Gearing Conference, BGA transmission technology. Newcastle, MEP, London, 1994.
19. А. Г. Русских. Автоматизированный синтез схем передач с перекрещивающимися осями: дисс...канд. техн. наук, Ижевск, 1977.
20. А. с. СССР № 806935. Неортогональная зубчатая передача с перекрещивающимися осями. В. И. Гольдфарб, И. П. Несмелов. Оpubл. в Б. И. № 7, 1981.
21. А. с. СССР № 875133. Двухступенчатый зубчатый редуктор. В. И. Гольдфарб, А. С. Никитин, И. П. Несмелов. Оpubл. в БИ № 39, 1981.
22. А. с. СССР № 1059325. Двухвенцовая неортогональная зубчатая передача с перекрещивающимися осями. В. И. Гольдфарб, И. П. Несмелов, А. Н. Тетерин. Оpubл. в Б. И. № 45, 1983.
23. Е. С. Трубочев. Исследование пространства параметров неортогональных спироидных передач: дисс. ... канд. техн. наук. Ижевск, 1999.
24. Н. В. Исакова. Разработка и исследование спироидной передачи с идеальным винтовым параметром витков: дисс... канд. техн. наук. Ижевск, 1999.
25. Н. А. Бармина. Структурный и параметрический синтез двухступенчатых редукторов со спироидной и цилиндрической передачами: дисс. ... канд. техн. наук. Ижевск, 2002.
26. А. И. Абрамов. Теоретическое и экспериментальное исследование кинематической точности и виброактивности спироидных передач: дисс. ... канд. техн. наук. Ижевск, 1996.
27. Д. В. Кошкин. Исследование влияния погрешностей и геометрическое моделирование локализованного контакта в спироидной передаче: дисс... канд. техн. наук. Ижевск, 1999.
28. Е. С. Трубочев, А. В. Орешин. САПР спироидных передач//Информационная математика, № 1. М.: Изд. физико-математической литературы, 2003.
29. А. С. Кузнецов. Теоретическое и экспериментальное исследование статической нагруженности спироидных передач: дисс... канд. техн. наук. Ижевск, 2005.
30. В. Н. Анферов. Исследование износостойкости спироидных передач: дисс... канд. техн. наук. Курган, 1982.
31. Е. И. Попова. Разработка инструментов и технологии формообразования металлополимерных колес спироидных передач: дисс. ... канд. техн. наук. Ижевск, 2004.
32. А. А. Ткачев. Разработка системы диалогового проектирования эвольвентных цилиндрических зубчатых передач: дисс. ... канд. техн. наук. Ижевск, 2001.
33. В. И. Гольдфарб, А. А. Ткачев. Проектирование эвольвентных цилиндрических передач. Новый подход. Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2004.
34. О. В. Малина. Теория и практика автоматизации структурного синтеза объектов и процессов с использованием методов характеристизационного анализа: дисс... докт. техн. наук. Ижевск, 2002.
35. В. И. Гольдфарб, Д. В. Главатских, Е. С. Трубочев, А. С. Кузнецов, В. М. Лукин, Д. Е. Иванов, В. Ю. Пузанов. Спироидные редукторы трубопроводной арматуры. М.: Вече, 2011.
36. В. И. Гольдфарб, Е. С. Трубочев, А. С. Кузнецов. Сопоставительный анализ поколений спироидных редукторов трубопроводной арматуры//Арматуростроение, № 1, 2015.
37. В. И. Гольдфарб, Е. С. Трубочев, А. С. Кузнецов. Возможности и проблемы импортозамещения на рынке редукторов ТПА// Арматуростроение, № 2, 2015.

Innovative development of the theory and practice spiroidnyh gears and gearboxes

V. I. Goldfarb, Doctor of Technical Sciences, professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University.

The paper presents a short historical information about the development of research and innovative implementation of spiroid gears and gearboxes in the Institute of Mechanics of Izhevsk State Technical University. Some results and perspective directions of the theory and practice of spiroid gears design, steps of foundation and development of their product in the scientific-manufacturing innovative enterprise «Mechanic» are given in the paper.

Keywords: spiroid gears and gearboxes, innovative development, the theory of design, implementation of production.