На правах рукописи

Степанов Вилен Степанович

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРИВОДА НА ОСНОВЕ ВОЛНОВОЙ ПЕРЕДАЧИ С ТЕЛАМИ КАЧЕНИЯ

Специальность: 05.02.02 Машиноведение, системы приводов и детали машин

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

> Москва 2009

Работа выполнена на кафедре «Системы приводов авиационнокосмической техники» Московского авиационного института (государственного технического университета)

Научный руководитель:	д.т.н., профессор
	Самсонович Семен Львович

Официальные оппоненты: д.т.н., профессор Ватолин Валентин Владимирович

> к.т.н., доцент Постников Валерий Александрович

Ведущая организация: РСК «МиГ» (г. Москва)

Защита состоится «_____ 2009 г. в _____ час. на заседании диссертационного совета Д 212.125.07 в Московском авиационном институте (государственном техническом университете) по адресу: 125993, А80, г.Москва, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4, главный административный корпус, зал заседаний ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского авиационного института (государственного технического университета).

Ваш отзыв на автореферат в количестве двух экземпляров, заверенных печатью, просьба направлять по указанному адресу.

Автореферат разослан «___» ____ 2009 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.125.07 кандидат технических наук, доцент

Кондратьев А.Б.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы.

Современное состояние и перспективы развития авиационной и ракетной техники характеризуются повышенными требованиями к массогабаритным характеристикам исполнительных механизмов (ИМ) приводов ЛА. Кроме того, при разработке пассажирских, транспортных и боевых самолетов перспективно использование силовых систем с единым электрическим источником энергопитания вместо централизованных гидравлических силовых систем. Преимуществом электрических силовых систем является отсутствие в летательном аппарате системы трубопроводов централизованной системы гидропитания, что снижает вес ЛА, облегчает его эксплуатацию и повышает боевую живучесть.

Электрические силовые системы обеспечивают питание как автономных гидроприводов с дроссельным или объемным регулированием, так и электрогидростатических и электромеханических приводов. Созданные в последнее время новые механические передачи, электрические двигатели высокой удельной мощности и силовая электроника для них позволяет создать высокоэффективные электромеханические приводы управления рулевыми поверхностями ЛА различного назначения.

Применение электромеханических приводов обуславливает проблемы, значительная часть которых связана с требованиями к механической передаче. Механическая передача, используемая в ИМ привода, должна иметь:

- высокие характеристики удельной мощности (удельного момента);
- высокую надежность и большой ресурс;
- возможность реализации резервированного электромеханического привода с суммированием моментов;
- совместно с электродвигателем лучшие показатели энергопотребления по сравнению с существующими и перспективными электрогидравлическими приводами;
- характеристики точности, обеспечивающие выполнение требуемых законов движения привода, механическая передача не должна являться причиной автоколебаний;
- технологическую простоту при производстве и обслуживании, сравнительно низкую стоимость жизненного цикла.

Одним из факторов, приводящих к появлению автоколебаний, является люфт в механической передаче. Исследованию динамики электроприводов с учетом люфта посвящены работы Полковникова В.А., Рабиновича Л.В., Романцова В.П., Сергеева Б.Г., Слюденкова М.Н., Стеблецова В.Г., Терскова В.Г. Устранение люфта в механической передаче может быть осуществлено за счет использования в качестве выходной ступени редуктора передач с многопарным зацеплением, как то: шариковинтовые, роликовинтовые и волновые, над использованием которых в рулевых приводах ЛА работают ведущие отечественные и зарубежные компании (МиГ, Boeing). Вопросам проектирования этих передач посвящены работы Волкова Д.П., Иванова М.Н., Крайнева А.Ф., Самсоновича С.Л., Становского В.В., Шувалова С.А.

Зубчатые волновые передачи широко применяются в технике из-за таких свойств, как возможность получения большого передаточного числа в одной паре

(60..300); существенно меньшие габариты и масса относительно других типов передач при том же передаточном числе; высокая кинематическая точность и малый люфт за счет многопарности зацепления; меньший шум при работе по сравнению с планетарной передачей; возможность передачи движения с разделением двух сред; меньшая стоимость по сравнению с планетарной передачей при массовом производстве.

В последнее время в технической и патентной литературе появились описания волновых передач, в которых гибкое колесо выполнено в виде тел качения, расположенных в сепараторе. В этих конструкциях шарики или ролики, выполняющие функцию гибкого колеса, одновременно с передачей крутящего момента воспринимают и радиальную нагрузку, как в радиальных подшипниках, что позволяют совмещать функцию редуктора и опорного устройства. Такое совмещение свойств редуктора и опорного устройства в ИМ рулевого привода позволяет сократить массогабаритные показатели и является новым и перспективным направлением в разработке рулевых приводов ЛА.

Таким образом, создание методики проектирования электромеханических приводов ЛА на основе волновых передач шариковых (роликовых) (ВПШ(Р)) и методик проектирования самих этих передач являются актуальными задачами.

Несмотря на актуальность разработки методик проектирования и расчета волновых передач с телами качения и применения их в ИМ приводов ЛА, данные вопросы в технической литературе отсутствуют или рассмотрены недостаточно полно.

Цель работы: создание методики проектирования электромеханических приводов ЛА на основе волновых передач с телами качения и методик проектирования самих этих передач для ИМ приводов ЛА.

Задачи работы:

- Определение рациональных конструктивных параметров волновой передачи с телами качения, в зависимости от статических и динамических требований и заданных габаритных размеров ИМ привода;
- Определение безлюфтовых профилей рабочей поверхности жесткого колеса и волнообразователя волновой передачи с телами качения;
- Обоснование схем и рациональных компоновок ИМ приводов на основе ВПШ(Р), в т.ч. резервированного привода, реализация общего передаточного числа редуктора при помощи ступеней волновой передачи;
- Анализ напряжений и деформаций в ВПШ(Р);
- Исследование статических и динамических характеристик привода ЛА на основе ВПШ(Р).

Методы решения

Для решения поставленных задач использованы аналитические методы расчетов технической механики, для исследования динамических характеристик использован пакет MATLAB 7.6 – SIMULINK 7.1, при создании твердотельной модели ВПШ(Р) и ИМ привода использован пакет SolidWorks 2007, программа построения профиля

деталей создана в среде VisualBasic for Applications, для исследования напряжений и деформаций методом конечных элементов использован пакет COSMOSWorks 2007. Экспериментальное исследование натурного образца проведено на стенде кафедры «Машиноведение и детали машин» МАИ.

Научная новизна

- Разработана методика проектирования ИМ привода ЛА на основе волновой передачи с телами качения для вращательного и поступательного движения выходного звена;
- Разработана концепция построения исполнительных механизмов приводов по принципу, получившему название «силового минипривода», при которой элементы ИМ (электрический, гидравлический или пневматический двигатель, редуктор и опорное устройство объекта управления) скомпонованы в габаритах этого опорного устройства, что существенно сокращает габариты привода;
- Разработан ряд волновых механизмов на основе стандартных тел качения, при этом конструкция элементов ряда позволяет осуществить параллельное и последовательное их соединение с целью реализации требуемых значений крутящего момента и передаточного числа;
- Создана математическая модель привода с волновой передачей с телами качения, позволяющая исследовать статические и динамические характеристики привода;
- Выявлено и исследовано влияние специфической нелинейности электромеханического привода, расположенного внутри элерона, на его динамические характеристики;
- Разработана методика расчета профилей рабочих поверхностей жесткого колеса и волнообразователя волновой передачи с телами качения, исключающая люфт;
- Создана математическая модель волновой передачи с телами качения, позволяющая проводить анализ напряжений и деформаций звеньев передачи.

Практическая значимость

- Разработана методика расчета конструктивных параметров волновой передачи с телами качения по заданному моменту нагрузки, передаточному числу, габаритным размерам;
- Разработана программа, необходимая для изготовления жесткого колеса волновой передачи с телами качения на станках с ЧПУ;
- Спроектирована конструкция резервированного электромеханического привода элерона самолета на основе волновой передачи с телами качения, ИМ которого размещены внутри элерона;
- 4. Спроектирована конструкция ИМ рулевого привода беспилотного ЛА, размещенного в объеме опорного устройства аэродинамического руля;
- 5. Предложена методика проектирования ИМ привода на основе элементов ряда волновых передач с телами качения, обеспечивающая требуемый момент нагрузки, передаточное число и габаритные размеры ИМ.

Реализация результатов

Материалы диссертационной работы использованы в лекциях по курсу «Основы конструирования механизмов и узлов систем приводов ЛА», курсовом и дипломном проектировании на кафедре «Системы приводов авиационно-космической техники» МАИ.

Положения диссертационной работы использовались ГосМКБ «Вымпел» при рассмотрении возможных вариантов реализации исполнительных механизмов беспилотных летательных аппаратов малой, средней и большой дальности.

Результаты диссертационной работы использовались в научно-исследовательских темах кафедры 702:

- 1.35.04 Развитие теории и построение приводов с регулированием направления действия потока рабочего тела на основе многоплунжерных исполнительных механизмов (2004–2005);
- 1.22.06 Развитие теории, методов расчета и проектирования электрических, гидромеханических и пневмомеханических исполнительных механизмов приводов, построенных на основе шариковолнового принципа действия (2006 – 2008);
- 25270-07009 Исследование по обоснованию обликовых характеристик перспективных изделий класса "воздух-воздух" и их рулевых приводов (ГосМКБ «Вымпел», 2003 – 2006);
- 33300-07020 Исследование возможностей создания автоматизированной системы управления для многоканального электрогидравлического привода поступательного движения проходческой щитовой установки (ОАО ПМЗ «Восход», шифр «Кант-М», 2006-2007)
- 34710-03100 Применение явлений сверхпроводимости в электроприводах разгонного блока кислородно-водородного тяжелого класса (ГКНПЦ имени М.В.Хруничева, шифр «Двина КВТК», 2007).

Достоверность полученных результатов

Результаты работы получены с помощью апробированных современных методов расчета, компьютерного моделирования, а также подтверждены сравнением теоретических исследований и результатов моделирования с экспериментальными данными.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях:

- VII-й Всероссийской юбилейной научно-технической конференции "Проблемы совершенствования робототехнических и интеллектуальных систем летательных аппаратов", Москва, МАИ, 25-27 мая 2005 г.;
- XIV-й, XV-й, XVI-й и XVII-й Международных научно-технических семинарах "Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации", Алушта, сентябрь 2005, 2006, 2007, 2008 гг.;
- Всероссийской научно-технической конференции "Мехатронные системы", Тульский Государственный Университет, декабрь 2006 г.;

- XXXIV-й Всероссийской конференции «Управление движением морскими судами и специальными аппаратами» РАН, п. Новомихайловский, 2007 г.;
- Седьмой международной выставке и научно-технической конференции по гидроавиации «Студенты и аспиранты аэрокосмическому комплексу России», Геленджик, 2008 г.
- Российской конференции с международным участием «Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения» (УКИ'08), Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2008 г.

Публикации

Материалы диссертации опубликованы в изданиях, входящих в перечень ВАК: научные статьи в журналах «Авиакосмическое приборостроение» [1] и «Известия Тульского государственного университета» [2], а также десять научных работ в трудах всероссийских и международных конференций [3 – 12].

На разработанные в рамках диссертационной работы схемы ИМ приводов ЛА получены три патента РФ [13 – 15].

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и приложения, содержит 162 страницы, включая 62 рисунка, 6 таблиц и список литературы из 37 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показаны тенденции развития исполнительных механизмов приводов на основе проведенного патентного поиска и анализа технической литературы. Приведены основные проблемы, побуждающие использовать электромеханические привода с современными механическими передачами в ЛА различного назначения, показано состояние вопроса по созданию исполнительных механизмов на основе волновых передач с телами качения. Обоснована актуальность темы, определена решаемая научно-техническая проблема, сформулированы цель и основные задачи диссертации.

В первой главе рассмотрены основные вопросы теории волновой передачи шариковой (роликовой): кинематические схемы ВПШ(Р), определение передаточного числа, соотношения конструктивных параметров, профили жесткого колеса для различных схем ВПШ(Р), обеспечивающие практически безлюфтовое зацепление, и силовой расчет. Также приведено сравнение габаритов ВПШ(Р) с другими типами механических передач и вопросы оптимизации по внешнему диаметру и длине передачи. Показана зависимость коэффициента полезного действия передачи от коэффициента трения в различных деталях.

Волновая передача шариковая (роликовая) содержит четыре основных элемента: волнообразователь, сепаратор, тела качения и жесткое колесо. Волнообразователь является ведущим звеном передачи, в то время как ведомым может выступать жесткое колесо (при остановленном сепараторе) или сепаратор (при остановленном жестком колесе). Жесткое колесо располагается снаружи сепаратора (рис. 1а) или внутри него (рис. 1б).





Передаточное число этих передач, при остановленном сепараторе, определяется аналогично зубчатым волновым передачам при остановленном гибком колесе:

$$q_{\mathrm{B-}\mathrm{K}}^{\mathrm{c}} = \frac{T_{\mathrm{K}}}{T_{\mathrm{B}}} = \frac{z_{\mathrm{K}}}{u} \,,$$

где $q_{\text{B-}\text{K}}^{\text{c}}$ – передаточное число волновой передачи от волнообразователя к жесткому колесу при остановленном сепараторе, z_{K} – число впадин или выступов профиля жесткого колеса, u – число волн, создаваемых волнообразователем, T_{K} – число периодов впадин или выступов жесткого колеса ($T_{\text{K}} = z_{\text{K}}$), T_{B} – число периодов профиля волнообразователя ($T_{\text{B}} = u$).

Основные геометрические соотношения волновых передач с телами качения выражаются через диаметр шарика (ролика) (см. рис. 2): $R_{\rm H} - R_{\rm BH} = 2e$, $d_{\rm III(p)} = (R_{\rm H} - R_{\rm BH}) + h_{\rm c} + 2\Delta$, $e = 0, 2d_{\rm III(p)}$, $h_{\rm c} = 2, 2e$, $\Delta = 0, 4e = 0, 08d_{\rm III(p)}$, где $R_{\rm H}$ и $R_{\rm BH}$ – наружный и внутренний радиусы окружностей по впадинам жесткого колеса, e – эксцентриситет, $h_{\rm c}$ – толщина сепаратора, $d_{\rm III(p)}$ – диаметр шарика (ролика), Δ – зазор между сепаратором и выступами жесткого колеса и между сепаратором и диском волнообразователя.

Средний $R_{c_{cp}}$, внутренний $R_{c_{BH}}$ и наружный $R_{c_{H}}$ радиусы сепаратора определяются зависимостями:



Рис. 2. К определению геометрических размеров жесткого колеса и сепаратора

$$\begin{aligned} R_{\rm c_{cp}} &= r_{\rm A} + 0.5 d_{\rm III(p)} \,, \\ R_{\rm c_{\rm H}} &= R_{\rm c_{cp}} + 0.5 h_{\rm c} \,, \\ R_{\rm c_{\rm BH}} &= R_{\rm c_{cp}} - 0.5 h_{\rm c} \,, \end{aligned}$$

где *r*_д – радиус диска волнообразователя, выражается зависимостью:

$$r_{\rm d} = R_{\rm BH} + e - d_{\rm III(p)}$$

При неподвижном сепараторе и вращении диска волнообразователя, шарик совершает возвратно-поступательное движение с амплитудой $\pm e$.

Необходимый профиль жесткого колеса получен из условия непрерывного контакта каждого тела качения как с диском волнообразователя, так и с жестким колесом, что исключает люфт и обеспечивает постоянное значение передаточного числа [1]. При вращении диска волнообразователя центр диска совершает движение по окружности, радиус которого равен эксцентриситету *e*.

Траектория движения шариков (роликов) определяется из условия их постоянного контакта с волнообразователем при остановленном жестком колесе (см. рис. 3). Форма рабочей поверхности жесткого колеса выражается в параметрической форме, где в качестве параметра выступает угол ϑ , т.е. точка (x, y) – это точка, принадлежащая рабочей поверхности жесткого колеса, при касании которой шарик (ролик) имеет следующие координаты своего центра: (x_T, y_T) , что соответствует полярному аргументу ϑ (см. рис. 4).

Формулы профиля жесткого колеса можно записать в следующем виде:

$$x = l(\vartheta) \cdot \sin \vartheta + r_{\mathrm{III}(\mathrm{p})} \cdot \sin(\vartheta + \chi),$$

$$y = l(\vartheta) \cdot \cos \vartheta + r_{\mathrm{III}(\mathrm{p})} \cdot \cos(\vartheta + \chi),$$

rge
$$l(\vartheta) = e \cdot \cos(z_{\mathrm{g}} \cdot \vartheta) + S(\vartheta), \qquad S(\vartheta) = \sqrt{\left(r_{\mathrm{III}(\mathrm{p})} + r_{\mathrm{g}}\right)^{2} - e^{2} \cdot \sin^{2}(z_{\mathrm{g}} \cdot \vartheta)}$$

$$\chi(\vartheta) = \operatorname{arctg}\left(\frac{e \cdot z_{\mathrm{g}} \cdot \sin(z_{\mathrm{g}} \cdot \vartheta)}{S(\vartheta)}\right).$$





Рис. 3. К определению траектории движения тел качения



Для существования непрерывного контакта всех тел качения с волнообразователем и жестким колесом передачи между хордой впадины жесткого колеса и диаметром тела качения должно соблюдаться соотношение $AE \ge (2 \div 2, 06) \cdot d_{\text{III}(p)}$, из которого получено условие (см. рис. 2):

$$R_{\rm BH} \geq \frac{1,03 \cdot d_{\rm III(p)}}{\sin\left(\pi / z_{\rm W}\right)}.$$

При невыполнении данного условия профиль жесткого колеса, построенный по полученным математическим зависимостям, на границах между впадинами будет иметь т.н. «усы», которые в металле не могут быть выполнены и профиль будет иметь разрыв производной, а тела качения, находящиеся у этих зон, будут иметь некоторый свободный ход, т.е. не смогут одновременно контактировать и с волнообразователем, и с жестким колесом.

Для построения формы профиля жесткого колеса для программ AutoCAD и SolidWorks написаны программы, при помощи которых созданы твердотельные модели и опытные образцы ВПШ(Р) (см. рис. 5).

В волновых передачах шариковых (роликовых) в качестве основного параметра, который определяет нагрузочную способность и через который определяются все геометрические размеры передачи, принят диаметр тела качения *d*_{ш(p)}.

Число тел качения $z_{\rm u(p)}$ (в одном ряду) выбирается исходя из передаточного числа. В схемах с остановленным сепаратором число тел качения на единицу меньше числа впадин жесткого колеса:

$$z_{\rm III(p)} = q - 1$$
.

Применив ряд допущений, минимальный диаметр тела качения определяется по формуле:



Рис. 5. Волновые передачи с телами качения: а) твердотельная модель, б) опытный образец волновой передачи шариковой, в) опытный образец волновой передачи роликовой.

$$d_{\mathrm{III}(\mathrm{p})} \ge \sqrt[3]{\frac{241 \cdot M_{\mathrm{H}} \cdot \sin\left(\pi / z_{\mathrm{III}(\mathrm{p})}\right)}{n \cdot k_{\mathrm{p}} \cdot z_{\mathrm{III}(\mathrm{p})}}}$$

где $M_{\rm H}$ – максимальный момент нагрузки; n – число рядов тел качения; $k_{\rm p}$ – коэффициент, характеризующий увеличение допустимого момента при использовании роликов. При длине роликов $l_{\rm p} = d_{\rm p}$ принято $k_{\rm p} = 2$, для шариков $k_{\rm p} = 1$.

Зависимость для наружного диаметра D и длины L передачи:

$$D = \left(\frac{2,06}{\sin(\pi/q)} + 1,8\right) \cdot d_{\mathrm{III}(\mathrm{p})}, \qquad L = (1,2n+1,8) \cdot d_{\mathrm{III}(\mathrm{p})}.$$

Графики зависимостей D(q), L(q), $d_{III}(q)$ при $M_{H} = 100$ Нм для n = 1, 2, 3, 4, 6, 8 показаны на рис. 6.



Рис. 6. Графики зависимостей D(q), L(q) при $M_{\rm H} = 100 \, {\rm Hm}$ для n = 1, 2, 3, 4, 6, 8

Полученные формулы позволили создать алгоритм расчета передачи по трем параметрам – моменту нагрузки, передаточному числу и наружному диаметру передачи. Полученные зависимости позволили сравнить габариты ВПШ(Р) с другими типами передач [4]. Графики зависимости объемов передач, отнесенных к моменту нагрузки, от передаточного числа для волновой передачи с телами качения – шари-ками при числе рядов тел качения 1, 2, 3, 4, а также для других типов механических передач приведены на рис. 7/ Графики показывают, что при передаточном числе, большим 20, объем ВПШ(Р) будет меньше, чем объем других типов передач при одинаковых значениях передаточного числа и момента нагрузки.



Рис. 7. Зависимости объемов различных типов механических передач от передаточного числа. ЦП – зубчатая цилиндрическая передача, ЧП – червячная передача, П1, П2, П3, П4 – планетарные передачи, ВП – зубчатая волновая передача, ШВП+РМ –

шариковинтовая передача с рычажным механизмом, Орб.-план –

орбитально-плантарная передача, ВПШ – волновая передача шариковая.

Во второй главе сформулирована концепция силового минипривода.

Силовыми миниприводами принято называть исполнительные механизмы, особенности которых заключаются в [2, 10, 11, 12]:

- Использовании волновой шариковой передачи, позволяющей получить высокий КПД, малые габариты, низкую стоимость, высокий ресурс и надежность, высокую крутильную жесткость, малый момент инерции и люфт. ВПШ(Р) может иметь либо механический волнообразователь, закрепленный на валу исполнительного двигателя, либо гидро-, пневмо- или электромеханический волнообразователь, а также может выполнять функцию опорного устройства.
- Коаксиальном расположении основных элементов, т.е. расположении элементов на одной оси, так что одни элементы располагаются внутри других. Кроме уплотнения компоновки использование одних и тех же деталей, выполняющих разные функции, позволяет получить жесткую безлюфтовую связь между элементами.
- 3. Использовании бескорпусных двигателей.

Силовой минипривод может иметь вращательный или поступательный характер движения выходного звена. Функциональная схема включает в зависимости от технических требований к приводу различный набор элементов – электрический двигатель, одну или более ступеней ВПШ(Р), датчики (положения выходного звена, положения ротора электродвигателя, тахогенераторы), электромагнитные муфты (арретирное устройство, механизмы автоматики резервированного привода). Высокий коэффициент заполнения конструкции привода обусловлен способностью ВПШ(Р) подстраиваться под требуемый наружный, внутренний диаметр и длину.

На рис. 8 показан силовой минипривод, состоящий из высокоскоростного электродвигателя и двухкаскадной ВПШ(Р) [14]. Каждый каскад содержит двухдисковый волнообразователь, сепаратор, тела качения – шарики и профилированное жесткое колесо.



Рис. 8. Электромеханический силовой минипривод Выходная ступень ВПШ(Р): 1 – жесткое колесо, 2 – шарики, 3 – диски волнообразователя, 4 – сепаратор. Промежуточная ступень ВПШ(Р): 5 – жесткое колесо, 6 – шарики, 7 – диски волнообразователя, 8 – сепаратор. Электродвигатель: 9 – статор, 10 – ротор.

Схема резервированного электромеханического привода для применения на ответственных органах управления пилотируемых ЛА показана на рис. 9. Данная схема позволяет разместить привод элерона самолета внутри самого элерона, и, следовательно, не занимает место в крыле. Схема реализует принцип суммирования моментов.

При отказе системы управления или непосредственно электродвигателя одного из приводов этот привод должен отключаться и не нагружать исправный привод. Для этих целей в кинематическую цепь каждого исполнительного механизма привода между валом двигателя и входным валом редуктора введена электромеханическая муфта. Конструкция исполнительного механизма приведена на рис. 9а. Электромеханическая муфта при включенном приводе жестко соединяет вал электродвигателя с входным валом редуктора. При отказе привода муфта обесточивается и расцепляет вал двигателя с входным валом редуктора.

В режиме отказа одного из приводов исправный привод должен отклонять элерон, вместе с которым будет вращаться и выходной вал отказавшего привода, т.е. редуктор отказавшего привода работает в режиме мультипликатора.



Рис. 9. Резервированный силовой минипривод а) конструкция ИМ, б) расположение в элероне ИМ привода, в) конструктивная схема рычажного механизма привода

Схема силового минипривода для беспилотного ЛА показана на рис. 10 [15]. Данный силовой минипривод, обладающий высокой удельной мощностью и моментом, сверхплотной компоновкой, позволяет совместить в себе арретирное устройство и опорное устройство руля ЛА, при этом габариты силового минипривода совпадут с габаритами опорного устройства.

Разработаны рекомендации для разбиения общего передаточного числа волновой передачи на ступени с точки зрения оптимизации габаритов и компоновки (встраивания одних элементов силового минипривода в другие).

Обосновано построение ряда ВПШ(Р) на основе стандартизованных тел качения ($d_{\text{III}} = 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10 \text{ мм}$ согласно ГОСТ 3722-81), что позволяет унифицировать передаточные числа ступеней (q = 8; 10; 12; 14; 16; 18; 20) и момент нагрузки.



Рис. 10. Конструкция силового минипривода беспилотного ЛА

В третьей главе рассмотрено влияние характеристик ВПШ(Р) на частотные характеристики привода. Исследования показали, что конструктивные параметры передачи не оказывают влияние на динамические характеристики привода.

Исследована динамика резервированного силового минипривода, расположенного внутри элерона (рис. 9). Выявлена специфическая нелинейность, обусловленная размещением электромеханического привода с ВПШ(Р) внутри элерона. Определены зависимости угла поворота элерона φ_c и передаточного числа рычажного механизма $q_{\rm pM}$ от угла поворота выходного звена ВПШ(Р) привода $\varphi_{\rm uM}$. На рис. 11. показаны графики точной, упрощенной и линейной зависимостей $\varphi_c(\varphi_{\rm uM})$ и $q_{\rm DM}(\varphi_{\rm uM})$.

Составлены математические модели для анализа влияния нелинейности рычажного механизма на динамику привода элерона: M1 с реальной зависимостью передаточного числа и M2 с постоянным значением передаточного числа. Модель M1 привода в среде MATLAB – Simulink показана на рис. 12. Моделирование различных ступенчатых и гармонических задающих сигналов показало, что значение координаты $\varphi_c(t)$ моделей M1 и M2 отличаются не более чем на 22 угловые минуты. Отсюда можно сделать вывод, что при рассмотрении влияния привода на динамические характеристики системы автоматического управления ЛА модель привода может рассматриваться как имеющая постоянное передаточное число (т.е. модель M2). Однако, при построении систем контроля состояния привода, основанных на соответствии измеряемых фазовых координат (таких, как $u_{\rm дB}(t)$, $i_{\rm g}(t)$, $M_{\rm дB}(t)$) моделируемым в режиме реального времени, на некоторых режимах имеет место существенное отличие значений вышеназванных фазовых координат между моделями M1 и M2. Следовательно, для систем контроля состояния привода целесообразно применнить модель M1.



Рис. 11. График зависимостей $\phi_{c}(\phi_{\rm MM})$ и $q_{\rm pm}(\phi_{\rm MM})$

Моделирование показало, что при удержании элерона в положениях, соответствующих ф_с >10° и при отработке гармонического сигнала малой амплитуды относительно подобным образом отклоненного положения, у привода, расположенного внутри элерона, имеет место сокращение напряжения И тока до 19%, средней потребляемой энергии до 34% по сравнению с приводом, имеющим постоянное значение передаточного числа, что делает эту схему перспективной для управления элевонами и флаперонами ЛА.



Рис. 12. Модель M1 привода в среде MATLAB – Simulink

В четвертой главе при помощи программных средств САЕ проведено исследование напряженно-деформированного состояния ВПШ(Р). Для этого в программном пакете SolidWorks создана модель-сборка передачи и при помощи пакета конечноэлементного анализа COSMOSWorks получено распределение напряжения (рис. 13а) и перемещения (рис. 13б) по конструкции передачи.

Полученные результаты моделирования позволили:

- подтвердить нагрузочную способность передачи посредством анализа напряжений в конструкции при нагружении ее максимальным расчетным крутящим моментом;
- подтвердить линейность нагрузочной характеристики передачи, выразившуюся в независимости значения жесткости от момента нагрузки, а также высокое значение жесткости передачи.



Рис. 13. Результаты моделирования напряженно-деформированного состояния ВПШ(Р) при моменте нагрузки на жестком колесе $M_{\rm H} = 220\,{\rm Hm}$: а) распределение напряжения (в МПа), б) распределение перемещения (в мм)

В четвертой главе также приведены результаты экспериментальных исследований КПД макетного образца волновой передачи шариковой, для чего использован стенд, показанный на рис. 14. При помощи стенда были получены значения КПД для некоторых значений момента нагрузки, что позволило, пользуясь статистическими методами, экстраполировать результаты на всю область моментов исследуемой передачи и получить зависимость КПД от момента на выходном звене:

$$\eta(M_{\text{3MM}}) = 0,92 \cdot (1 - e^{-0.57 \cdot M_{\text{3MM}}}),$$

График этой зависимости показан на рис. 15 (сплошная синяя линия). Точками обозначены экспериментальные данные. Из графика видно, что ВПШ(Р) имеет КПД, близкий $\eta_{max} = 0.92$, при $M_{_{ЭММ}}$ от 20 до 200 Нм, т.е. от 0,1 до 1,0 от своего максимального момента нагрузки. Таким образом, экспериментальное значении КПД $\eta = 0.92$ отличается от расчетного $\eta = 0.95$ на 3%.





Рис. 14. Стенд для исследования КПД редукторов

Рис. 15. График зависимости КПД ВПШ(Р) от момента нагрузки

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

- Разработана методика расчета основных конструктивных параметров различных схем ВПШ(Р) для ИМ приводов ЛА. Выведенная математическая зависимость профиля жесткого колеса для безлюфтового зацепления реализована в виде программы для изготовления профиля жесткого колеса на станках с ЧПУ и инженерного анализа передачи.
- Получены зависимости объема ВПШ(Р) от передаточного числа. Показано, что ВПШ(Р) при передаточных числах более 20 имеет меньший объем по сравнению с другими типами существующих передач, что свидетельствует о перспективности применения ВПШ(Р) в приводах ЛА.
- 3. Определено значение передаточного числа, при котором наружный диаметр ВПШ(Р) имеет наименьшее значение.
- 4. Проведен анализ потерь в ВПШ(Р) и влияния коэффициентов трения между различными деталями ВПШ(Р) на КПД.
- 5. Разработана концепция построения «силового минипривода» для рулевых приводов ЛА различного назначения, реализация которой позволила вписать рулевой привод беспилотного ЛА в габариты опорного устройства руля, а резервированный привод элерона пилотируемого маневренного ЛА разместить внутри элерона, т.е. без использования пространства крыла.

- 6. Дано обоснование разбиения общего передаточного числа редуктора на ступени. Разработан ряд ВПШ(Р) на основе стандартных шариков. Конструкция элементов ряда позволяет параллельное и последовательное их соединение: при параллельном соединение элементов реализуется требуемый крутящий момент редуктора, при последовательном соединении – требуемое передаточное число.
- 7. Моделирование динамических режимов показало, что характеристики ВПШ(Р) практически не оказывают влияния на динамические характеристики привода.
- Исследование динамики привода элерона выявило наличие специфической нелинейности, обусловленной размещением ИМ привода внутри элерона. Установлено, что такая компоновка позволяет сократить энергопотребление привода в режимах интенсивного маневрирования.
- Проведенные экспериментальные исследования и моделирование подтвердили достоверность полученных математических зависимостей, характеризующих нагрузочную способность и КПД ВПШ(Р).

Основные результаты диссертации изложены в следующих публикациях

- 1. Самсонович С.Л., Константинов С.А., Степанов В.С. Шариковолновая передача. Основы расчета. // Авиакосмическое приборостроение № 5/2005 г.
- Самсонович С.Л., Степанов В.С. Принципы построения силовых миниприводов // Известия ТулГУ. Серия. Вычислительная техника. Информационные технологии. Вып. 3. Системы управления. Том 2. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2006.
- Самсонович С.Л., Степанов В.С. Разработка исполнительного механизма рулевого привода на основе шариковолновой передачи // Создание перспективной авиационной техники. / Под ред. проф. Ю.Ю.Комарова, В.А.Мхитаряна – М.: Изд-во МАИ, 2004.
- 4. Самсонович С.Л., Степанов В.С. Сравнительный анализ габаритов различных типов механических передач в зависимости от передаточного числа // Сборник докладов VII-й Всероссийской юбилейной научно-технической конференции «Проблемы совершенствования робототехнических и интеллектуальных систем летательных аппаратов» Москва, МАИ, 25-27 мая 2005 г. / Редкол.: В.А.Полковников (пред.). – М.: Изд-во МАИ, 2005.
- 5. Самсонович С.Л., Степанов В.С. Шариковолновая передача с профилем штока в виде усеченных конусов с общими основаниями // Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации: Труды XIV Международного научно-технического семинара. Сентябрь 2005 г., Алушта. – Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет, 2005.
- Самсонович С.Л., Степанов В.С. Шариковолновая передача с внутренним расположением жесткого колеса // Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации: Труды XV Международного научно-технического семинара. Сентябрь 2006 г., Алушта. – М.: МИФИ, 2006.
- Панина М.Н., Самсонович С.Л., Степанов В.С., Чубиков В.Н. О построении ряда волновых передач шариковых и роликовых // Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации: Труды XVI Международного научно-технического семинара. Сентябрь 2007 г., Алушта. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2007.

- Баранов М.В., Гурский Б.Г., Самсонович С.Л., Степанов В.С. О выборе конструктивной схемы исполнительного механизма рулевого привода на основе волновой передачи шариковой или роликовой и бескорпусного двигателя с моментным (токовым) управлением // Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации: Труды XVII Международного научно-технического семинара. Сентябрь 2008 г., Алушта – СПб.: ГУАП, 2008.
- 9. Степанов B.C. Исследование влияния кинематической связи электромеханического привода элерона с крылом на динамические и энергетические характеристики // Современные технологии в задачах **управления**. автоматики обработки информации: Труды XVII И Международного научно-технического семинара. Сентябрь 2008 г., Алушта -СПб.: ГУАП. 2008.
- Самсонович С.Л., Степанов В.С. Новые электрические, гидравлические и пневматические механизмы – силовые миниприводы // Тезисы докладов научнотехнической конференции студентов и аспирантов аэрокосмических вузов. Геленджик – Самара: Изд-во "АСТ", 2008.
- 11. Самсонович С.Л., Макаренко М.Н., Степанов В.С. О развитии теории и новых возможностях пневматических, гидравлических и электрических исполнительных механизмов приводов на основе волнового принципа действия // Материалы российской конференции с международным участием (10-12 ноября 2008 г., Москва, Россия) «Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения» (УКИ'08). Учреждение Российской академии наук Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова. РАН, 2008.
- 12. Самсонович С.Л., Макаренко М.Н., Степанов В.С. О развитии теории и новых возможностях пневматических, гидравлических и электрических исполнительных механизмов приводов на основе волнового принципа действия // Доклады российской конференции с международным участием (10-12 ноября 2008 г., Москва, Россия) «Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения» (УКИ'08). Учреждение Российской академии наук Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова. Электронное издание, РАН, 2008.
- 13. Самсонович С.Л., Степанов В.С. Исполнительный механизм рулевого привода. Патент РФ №2265553. Опубл. Бюлл. №34 за 2005г.
- 14. Константинов С.А., Самсонович С.Л., Стеблецов В.Г., Степанов В.С. Силовой минипривод. Патент РФ № 2281597. Опубл. Бюлл. №22 за 2006г.
- 15. Самсонович С.Л., Степанов В.С., Урсу В.Е., Шендрик С.В. Силовой минипривод. Патент РФ № 2321138. Опубл. Бюлл. №9 за 2008г.