

*На правах рукописи*

Крылов Николай Валерьевич



ИССЛЕДОВАНИЕ ЖЁСТКОСТИ И ПРОЧНОСТИ ВОЛНОВОЙ  
ПЕРЕДАЧИ С ТЕЛАМИ КАЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО  
СИЛОВОГО ПРИВОДА ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Специальность: 05.02.02 Машиноведение, системы приводов и  
детали машин

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва  
2014

Работа выполнена на кафедре «Системы приводов авиакосмической техники» Московского авиационного института (национального исследовательского университета)

Научный руководитель: д.т.н., профессор каф. 702 «Системы приводов авиакосмической техники» МАИ  
Самсонович Семён Львович

Официальные оппоненты: д.т.н., профессор, зав. каф. «Системы автоматического управления» ТулГУ  
Горячев Олег Владимирович

к.т.н., зам. технического директора ОАО  
Мичуринского завода «Прогресс»  
Дмитриев Андрей Владимирович

Ведущая организация: ОАО «Государственное научно-производственное предприятие «Регион», г. Москва.

Защита состоится «3» Декабря 2014 г. в 11 час. на заседании диссертационного совета Д 212.125.07 в Московском авиационном институте (национальном исследовательском 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 (национального исследовательского университета) и на сайте [www.mai.ru](http://www.mai.ru).

Автореферат разослан «  » \_\_\_\_\_ 2014 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.125.07  
кандидат технических наук



Степанов В.С.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

Одним из перспективных направлений развития приводной техники в авиации является разработка силовых электромеханических приводов вращательного действия, допускающих выполнение их в виде петлеобразных механизмов и встраивание исполнительного механизма в опорное устройство объекта управления (ОУ). Узлами летательных аппаратов (ЛА), требующих наличия силовых приводов, являются аэродинамические органы, механизация крыла, створки грузовых отсеков, механизация шасси. Во многих случаях требуется применение дешёвых, энергоэффективных и простых в управлении и обслуживании силовых приводов с высокой удельной мощностью. В таких случаях целесообразно использовать электромеханические приводы, которые более дешёвы относительно электрогидравлических приводов, имеют высокий КПД.

Применение редкоземельных материалов в современных бесколлекторных электродвигателях, силовых транзисторов, рассчитанных на большие токи, в усилителях мощности и многопарных механических передачах в редукторе позволило увеличить удельную мощность электромеханических приводов так, что по этому параметру и динамическим характеристикам они стали соизмеримы с электрогидравлическими.

Электромеханический привод включает в себя блок управления, и исполнительный механизм (ИМ). ИМ состоит из электродвигателя, редуктора и датчика обратной связи. Выходное звено ИМ может совершать вращательное или поступательное движение. В случае вращательного действия, возможна интеграция всего ИМ в шарнир ОУ, что позволяет уменьшить занимаемый приводом объём. В работах С.Л. Самсоновича показано, что волновые передачи с соосным расположением входного и выходного валов и многопарным зацеплением имеют лучшие массогабаритные показатели по сравнению с передачами других типов. Вследствие приведённых выше достоинств, разработка силовых электромеханических приводов вращательного действия на основе волновых передач с многопарным зацеплением является одним из наиболее актуальных направлений для современного авиастроения.

Разработкой редукторов ИМ силовых приводов вращательного действия занимаются многие коллективы и исследователи. В книге Б.Г. Крымова, Л.В. Рабиновича, В.Г. Стеблецова рассматриваются различные ИМ летательных аппаратов. В работе А.А. Пашина исследуются многопоточные планетарные зубчатые передачи в приводах машин. В работе Л. Паскале, М. Нагоэ, Д. Диаконеску рассматривается использование планетарно-цевочной передачи в составе приводов робота. Большой обзор вариантов схем передач с телами качения

проведён В.В. Становским. В работе С.Л. Самсоновича рассматривается применение волновых зубчатых передач и волновых передач с телами качения в составе приводов ЛА. В работе Д.П. Волкова и Ю.Н. Зубкова исследуются колебания в приводе с волновой зубчатой передачей. В работе В.А. Гавриленко, Н.А. Скворцовой, Ю.И. Семина, Е.П. Солдаткина рассмотрены волновые зубчатые передачи в составе роботов.

На сегодняшний день известны методики расчёта планетарных зубчатых передач, приведённые в работе Н.Ф. Руденко; планетарно-цевочных передач, рассмотренные в работах Б. Бориславова, В.П. Брюховецкого, Н.И. Гданского, С.О. Киреева, В.Н. Кудрявцева, В.М. Шанникова, В.А. Юдина; волновых зубчатых передач в работах Д.П. Волкова, М.Н. Иванова, В.А. Зиновьева и волновых передач с телами качения (ВПТК) в работах С.Л. Самсоновича, В.С. Степанова, В.С. Янгулова и Ю.В. Ершова. В работе М.Е. Лустенкова описаны способы минимизации потерь мощности в передачах со свободными телами качения. В работах С.И. Бакалова, Э.Н. Панкратова, рассматриваются различные конструктивные схемы ВПТК.

В работах С.Л. Самсоновича показано, что ВПТК с дисковым волнообразователем имеют малый момент инерции, обладают наименьшими массогабаритными показателями при одинаковом передаточном числе, поэтому дальнейшее развитие и применение в ЛА данных передач является актуальным. Однако проведённый обзор технической литературы свидетельствует, что вид характеристики жёсткости, влияющий на статические и динамические характеристики привода, не исследовался.

**Цель работы:** создание комплексной методики расчёта ВПТК электромеханического привода летательного аппарата, включающей расчёт на контактную прочность, жёсткость, люфт и позволяющей исследовать влияние параметров ВПТК на динамические характеристики привода.

#### **Задачи работы**

- Изучение особенностей характеристики передаваемого момента (зависимости выходного момента передачи от входного) и нагрузочной характеристики ВПТК.
- Определение влияния момента нагрузки, передаточного числа, геометрических параметров, коэффициентов трения и технологических зазоров ВПТК на вид нагрузочной характеристики.
- Определение влияния наружного диаметра, передаточного числа на длину, жёсткость и максимальное напряжение в сепараторе ВПТК.
- Рассмотрение вариантов повышения прочности ВПТК за счёт схемных и конструктивных решений.

- Исследование влияния параметров ВПТК на динамические характеристики электромеханического привода.

### **Методы решения**

Для решения поставленных задач использовались аналитические методы расчётов технической механики. Построение математических моделей для проведения математических расчётов и создания пользовательского приложения осуществлено в пакете MATLAB-Simulink. Построение твердотельных моделей и исследования напряжений и деформаций методом конечных элементов с использованием программы SolidWorks.

### **Научная новизна**

- Уточнена физическая модель ВПТК и форма её нагрузочной характеристики и характеристики передаваемого момента, которые описаны математически.

- Разработана методика силового расчёта ВПТК, контактных сил, напряжений и деформаций, характеристики передаваемого момента и нагрузочной характеристики, КПД в зависимости от геометрических параметров передачи, коэффициентов трения, отклонений размеров и момента нагрузки.

- Предложена новая конструктивная схема волновой передачи с эксцентриковыми роликами, реализующая контакт между роликом и жёстким колесом по поверхности, что позволяет значительно уменьшить массу и габариты редуктора.

- Создана математическая модель электромеханического привода, на основе ВПТК, позволяющая исследовать влияние параметров и характеристик передачи на статические и динамические характеристики привода.

### **Практическая значимость**

- Разработанная методика силового расчёта ВПТК позволяет: рассчитать наименьшие геометрические размеры передачи под заданные технические требования.

- Созданное программное обеспечение позволяет провести комплексный расчёт ВПТК по разработанной методике, существенно уменьшить время проектирования передачи, а также позволяет найти наилучшие параметры разрабатываемого редуктора с точки зрения массы и габаритов.

- Даны рекомендации по выбору типа тел качения, формы гнёзд сепаратора и числа рядов тел качения для увеличения прочности ВПТК.

- Предложены пути улучшения динамических характеристик электромеханического привода на основе ВПТК за счёт выбора геометрических параметров элементов передачи, увеличения жёсткости передачи, уменьшения зазоров между роликами, диском волнообразователя и сепаратором и применения конструкций с возможностью выбора люфта.

## **Реализация результатов**

Материалы диссертационной работы использованы в лекциях по курсу «Основы конструирования механизмов и узлов систем приводов ЛА», курсовом и дипломном проектировании на кафедре 702 «Системы приводов авиационно-космической техники» МАИ.

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

- Обоснование выбора рулевого привода для изделия 75 (2013);
- Разработка схемных и конструкторских решений по совершенствованию КСУ ЛА;
- Разработка требований к исполнительской части системы управления самолета с использованием рулевых приводов с электрическим энергопитанием (2013).

## **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.

## **Основные положения, выносимые на защиту**

- Физическая модель ВПТК, учитывающая упругость передачи, её специфические нагрузочную характеристику и характеристику передаваемого момента, и математическое описание предлагаемой физической модели.
- Комплексная методика силового расчёта ВПТК, основанная на физической модели ВПТК, позволяющая найти геометрические параметры ВПТК, удовлетворяющие условиям контактной прочности и требуемым динамическим характеристикам электромеханического привода на её основе.
- Результаты исследования влияния геометрических параметров ВПТК, её нагрузочной характеристики и характеристики передаваемого момента на статические и динамические характеристики электромеханического привода.

## **Апробация работы**

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях:

XX-й, XXI-й, XXII-й Международных научно-технических семинарах «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации». Алушта, сентябрь 2011, 2012, 2013 гг.

IX-й Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы совершенствования робототехнических и интеллектуальных систем летательных аппаратов, Москва, МАИ, 2012 г.

11-й Международной конференции «Авиация и космонавтика – 2012», Москва, 13–15 ноября 2012 г.

Научно-технической конференции «Перспективы развития авиационного оборудования и агрегатов» (26-27 января 2012 г.).

II-й Всероссийской научно-технической конференции «Системы управления беспилотными космическими и атмосферными ЛА, Москва, МОКБ «МАРС», 2012 г.

Московской молодёжной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике – 2013», Москва, 16-18 апреля 2013 г.

XX-й Международном симпозиуме «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова, Москва, 2014 г.

### **Публикации**

Материалы диссертации опубликованы в изданиях, входящих в перечень ВАК: научные статьи в журналах «Труды МАИ», «Авиационная промышленность», «Известия Тульского государственного университета», а также научные работы в трудах всероссийских и международных конференций.

На разработанные в рамках диссертационной работы конструктивные схемы редукторов получены два патента РФ.

### **Структура и объём работы**

Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения, содержит 155 страниц, включая 124 рисунка, 14 таблиц и список литературы из 53 наименований.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** дано обоснование актуальности исследования электромеханических приводов с ИМ вращательного действия; рассмотрены варианты компоновки ИМ силового привода; проведён обзор работ, посвящённых исследованию и расчёту многопарных соосных передач; показана целесообразность использования ВПТК в качестве редуктора силовых электромеханических приводов; рассмотрены работы, посвящённые расчёту ВПТК. Определена решаемая научно-техническая проблема, сформулированы цели и задачи диссертации.

**В первой главе** приведена физическая модель ВПТК и её математическое описание; на основании составленной модели определяется вид характеристики передаваемого момента и нагрузочной характеристики; описывается алгоритм методики силового расчёта ВПТК; проводится анализ распределения контактных сил и напряжений, взаимного влияния параметров ВПТК друг на друга с помощью разработанной методики; описывается разработанное программное приложение, реализующее методику.

При анализе и синтезе схем механических передач механизм представляется в виде расчётной схемы, состоящей из ряда сосредоточенных масс, которые обладают моментом инерции, и соединительных упругих связей.

В случае ВПТК имеет место многопарное зацепление, что существенно усложняет задачу нахождения эквивалентной жёсткости. Схематично ВПТК как упругий элемент можно представить, как показано на рис. 1, где  $J_в$  - момент инерции вала волнообразователя;  $C_{вх}$  - жёсткость участка вала волнообразователя от его края до первого подшипника;  $C_в$  - жёсткость участков вала между соседними подшипниками волнообразователя;  $C_n$  - жёсткость подшипников волнообразователя;  $J_n$  - момент инерции на валу от подшипника и диска волнообразователя, расположенных на эксцентрик;  $C_{сен}$  - жёсткость участков сепаратора между соседними рядами тел качения;  $C_{вых}$  - жёсткость участка сепаратора от крайнего ряда тел качения до края выходного вала;  $J_c$  - момент инерции сепаратора;  $C_p$  - блок, реализующий жёсткость в зонах контакта тел качения, находящихся в зацеплении, одного ряда с диском волнообразователя, сепаратором и жёстким колесом, а также передаточное число по моменту;  $C_K^{6-P}$  - контактная жёсткость одного тела качения с диском волнообразователя;  $C_{Ki}^{P-жк}$  - контактная жёсткость  $i$ -го тела качения и жёсткого колеса вдоль направления движения тела качения;  $C_{Ki}^{жк-P}$  - контактная жёсткость  $i$ -го тела качения и жёсткого колеса поперёк направления движения тела качения;  $C_K^{P-c}$  - контактная жёсткость одного тела качения с сепаратором;  $q_{vi}$  - коэффициент передачи от поворота эксцентрика к поступательному радиальному движению  $i$ -го тела качения;  $q_{pi}$  - коэффициент передачи от радиального к тангенциальному движению  $i$ -го тела качения;  $q_c$  - коэффициент передачи от тангенциального движения тела качения к углу поворота сепаратора.

Если принять, что передаточные числа по моменту постоянны в рассматриваемый период времени, то сложная эквивалентная схема ВПТК будет иметь линейную характеристику, как состоящая из линейных упругих элементов. Как показали экспериментальные исследования, передаточное число по моменту ВПТК не равно передаточному числу по скорости. Было установлено, что передаточное число по моменту меняет своё значение в зависимости от знака угловой скорости входного вала и знака момента на входном (выходном) валу. Это связано с тем, что при работе ВПТК часть момента тратится на преодоления сил трения.

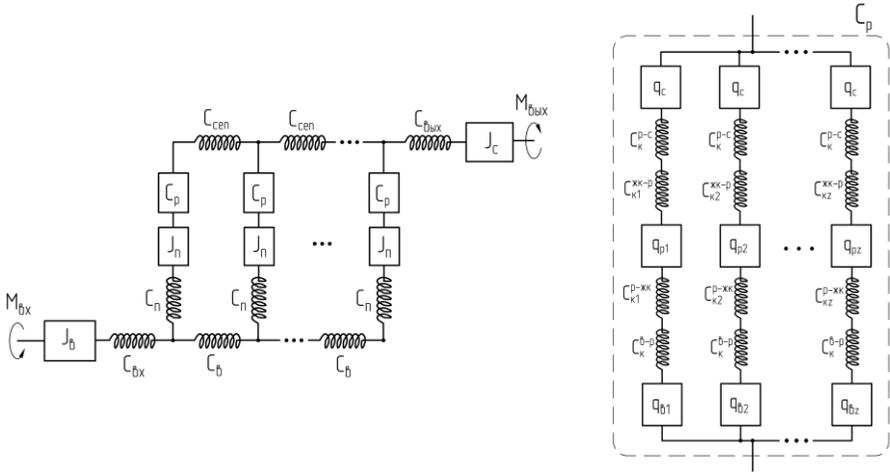


Рис. 1. Эквивалентная схема ВПТК.

Таким образом, характеристика передаваемого момента и соответствующая нагрузочная характеристика ВПТК имеют горизонтальный участок, соответствующий «залипанию» передачи, и выглядят, как показано на рис. 2.

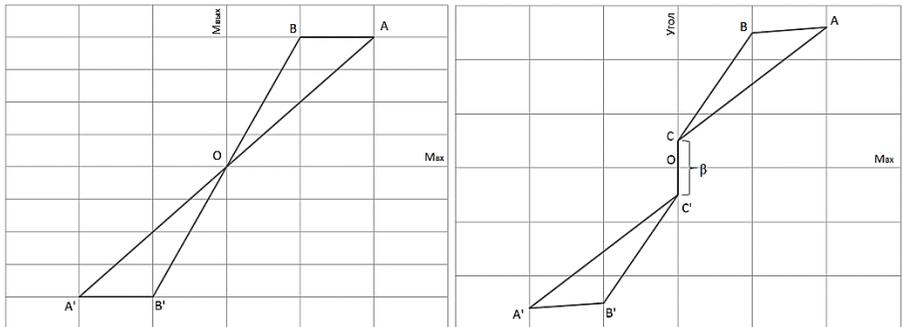


Рис. 2. Характеристика передаваемого момента и нагрузочная характеристика ВПТК.

Характеристика передаваемого момента описывается следующими выражениями:

$$\begin{aligned}
 M_{\text{вых}} &= q_{M1} \cdot M_{\text{ex}}, \text{ если } \Omega_{\text{ex}} \geq 0; M_{\text{ex}} \geq 0; \\
 M_{\text{вых}} &= \text{const}, \text{ если } \Omega_{\text{ex}} < 0; 0 < \frac{M_{\text{вых}}}{q_{M2}} < M_{\text{ex}} < \frac{M_{\text{вых}}}{q_{M1}}; \\
 M_{\text{вых}} &= q_{M2} \cdot M_{\text{ex}}, \text{ если } \Omega_{\text{ex}} < 0; M_{\text{ex}} \geq 0; \\
 M_{\text{вых}} &= q_{M1} \cdot M_{\text{ex}}, \text{ если } \Omega_{\text{ex}} < 0; M_{\text{ex}} < 0;
 \end{aligned}$$

$$M_{\text{вблх}} = \text{const}, \text{ если } \Omega_{\text{вх}} \geq 0; \quad 0 > \frac{M_{\text{вблх}}}{q_{M2}} > M_{\text{вх}} > \frac{M_{\text{вблх}}}{q_{M1}};$$

$$M_{\text{вблх}} = q_{M2} \cdot M_{\text{вх}}, \text{ если } \Omega_{\text{вх}} \geq 0; \quad M_{\text{вх}} < 0;$$

$$q_{M2} > q_{M1},$$

где  $M_{\text{вх}}$  - момент на валу волнообразователя,  $M_{\text{вблх}}$  - момент на валу сепаратора,  $\Omega_{\text{вх}}$  - скорость входного вала,  $q_{M1}$ ,  $q_{M2}$  - передаточные числа по моменту.

Нагрузочная характеристика получается из характеристики передаваемого момента с помощью следующих выражений:

Для линейных участков ОА, ВО, ОА' и ОБ':

$$\varphi = \frac{M_{\text{вх}}}{C_1} + \frac{M_{\text{вх}}}{n \sum_{i=1}^z \left( q_{ei} \frac{C_{ki}^{\sigma-p} C_{ki}^{p-\text{жкк}}}{C_{ki}^{\sigma-p} + C_{ki}^{p-\text{жкк}}} \right)} + \frac{M_{\text{вблх}}}{C_2} + \frac{M_{\text{вблх}}}{q_c n \sum_{i=1}^z \left( \frac{C_k^{p-c} C_{ki}^{\text{жкк}-p}}{C_k^{p-c} + C_{ki}^{\text{жкк}-p}} \right)}$$

для участков с «залипанием» АВ и А'В':

если нагружается входной вал:

$$\varphi = \frac{M_{\text{вх}}}{C_1} + \frac{M_{\text{вх}}^{\text{const}}}{n \sum_{i=1}^z \left( q_{ei} \frac{C_{ki}^{\sigma-p} C_{ki}^{p-\text{жкк}}}{C_{ki}^{\sigma-p} + C_{ki}^{p-\text{жкк}}} \right)} + \frac{M_{\text{вблх}}^{\text{const}}}{C_2} + \frac{M_{\text{вблх}}^{\text{const}}}{q_c n \sum_{i=1}^z \left( \frac{C_k^{p-c} C_{ki}^{\text{жкк}-p}}{C_k^{p-c} + C_{ki}^{\text{жкк}-p}} \right)},$$

если нагружается выходной вал:

$$\varphi = \frac{M_{\text{вх}}^{\text{const}}}{C_1} + \frac{M_{\text{вх}}^{\text{const}}}{n \sum_{i=1}^z \left( q_{ei} \frac{C_{ki}^{\sigma-p} C_{ki}^{p-\text{жкк}}}{C_{ki}^{\sigma-p} + C_{ki}^{p-\text{жкк}}} \right)} + \frac{M_{\text{вблх}}}{C_2} + \frac{M_{\text{вблх}}}{q_c n z C_k^{p-c}} + \frac{M_{\text{вблх}}^{\text{const}}}{q_c n \sum_{i=1}^z C_{ki}^{\text{жкк}-p}},$$

где  $C_1$  - эквивалентная жёсткость части эквивалентной схемы от края вала волнообразователя до элемента, соответствующего передаточному коэффициенту  $q_{ei}$  включительно,  $C_2$  - эквивалентная жёсткость части схемы от края вала сепаратора до элемента, соответствующего передаточному коэффициенту  $q_c$  включительно,  $n$  - число рядов тел качения,  $z$  - число тел качения одного ряда, находящихся в зацеплении,  $M_{\text{вх}}^{\text{const}}$  - постоянный во времени момент на входном валу сразу после залипания,  $M_{\text{вблх}}^{\text{const}}$  - постоянный во времени момент на выходном валу сразу после залипания.

Основой методики силового расчёта ВПТК является расчёт контактных напряжений, который служит для построения её характеристики передаваемого момента и нагрузочной характеристики, определения люфта и КПД, и расчёт потребной рабочей длины, т.е. произведения длины ролика на число рядов роликов,

который служит для определения наименьших габаритов ВПТК с точки зрения её прочности и жёсткости.

Входными параметрами для расчёта контактных напряжений приняты: радиус тела качения, радиус диска волнообразователя, эксцентриситет, число периодов жёсткого колеса, число рядов тел качения, длина роликов, если в качестве тел качения используются ролики, расстояние между рядами, максимальный выходной момент, допуски на ширину и угол гнезда под тело качения в сепараторе и допуск на радиус диска волнообразователя, коэффициенты трения между телами качения, диском волнообразователя, сепаратором и жёстким колесом.

Последовательность расчёта на контактные напряжения включает в себя определение угловых координат центров тел качения относительно оси передачи, к которым прибавляются соответствующие поправки, связанных с погрешностями изготовления в пределах заданных допусков. Далее определяются координаты точек контакта тел качения с жёстким колесом и координаты единичных векторов, лежащих на прямых, соединяющих центры тел качения с точками их контакта с жёстким колесом, диском волнообразователя и сепаратором. Рассчитываются радиусы кривизны профиля жёсткого колеса в точках его контакта с телами качения. Находятся соотношения между реакциями и сближениями в точках контактов тел качения с жёстким колесом, диском волнообразователя и сепаратором. С помощью анализа твердотельной модели жёсткого колеса методом конечных элементов определяется его жёсткость, которая учитывается при нахождении сближений тел качения с жёстким колесом. После этого определяется люфт, соответствующие силы и сближения в местах контакта тела качения при различных углах поворота эксцентрика и остановленных сепараторе и жёстком колесе. Рассчитывается момент на сепараторе и входном валу и строится нагрузочная характеристика. Находится распределение момента на сепараторе по рядам тел качения и определение сил в местах контакта в наиболее нагруженном ряду, после чего рассчитываются напряжения в местах контакта тела качения с жёстким колесом, диском волнообразователя и сепаратором. Проверяется выполнение условия прочности.

Входными параметрами для расчёта потребной рабочей длины являются передаточное число, наружный диаметр передачи, максимальный момент нагрузки и допустимое контактное напряжение. Выходными параметрами являются потребная рабочая длина ВПТК, максимальное напряжение в перемычках сепаратора и максимальный угол закручивания входного вала при заданном максимальном моменте нагрузки.

Расчёт потребной рабочей длины подобен расчёту контактных напряжений с той разницей, что в данном случае определяется максимальное контактное давление по линии, при котором выполняется условие прочности с заданным контактным

напряжением. После этого выполняется алгоритм последовательного поворота эксцентрика и расчёта соответствующих контактных сближений и давлений по линии до тех пор, пока максимальное контактное давление не станет равно величине, найденной ранее. Далее определяется необходимая рабочая длина и максимальное напряжение на срез в сепараторе.

Блок-схема алгоритма методики расчёта ВПТК приведена на рис. 3.

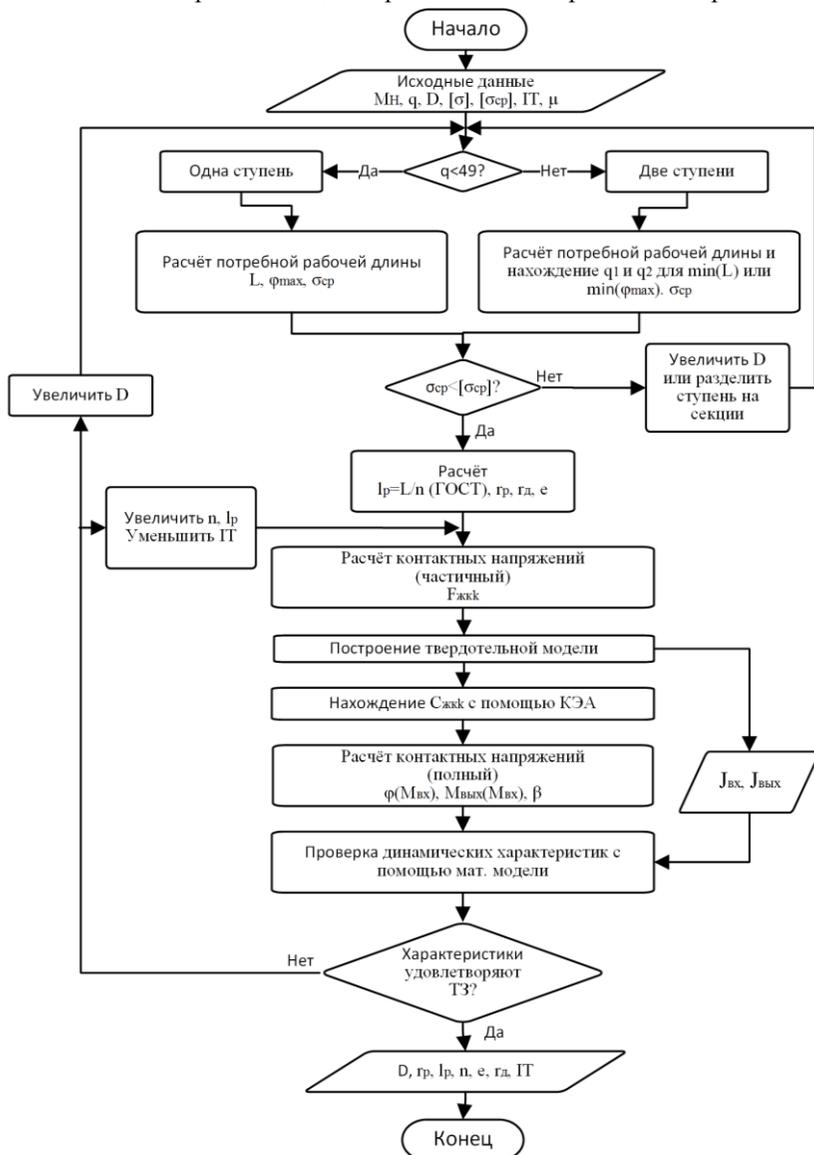


Рис. 3. Блок-схема методики силового расчёта ВПТК.

С помощью разработанной методики проведён анализ распределения контактных сил и напряжений в ВПТК, показавший незначительное влияние технологических погрешностей размеров гнёзд сепаратора и дисков волнообразователя на её прочность.

С использованием расчёта потребной рабочей длины выявлено, что для максимального расчётного выходного момента:

- с увеличением диаметра ВПТК её объём уменьшается, жёсткость не изменяется, а напряжение в перемычках сепаратора уменьшается;
- с увеличением передаточного числа объём ВПТК, её жёсткость и напряжения в перемычках сепаратора увеличиваются.
- при применении более прочного материала объём ВПТК уменьшается, напряжения в перемычках сепаратора не изменяются.

Создано программное обеспечение, позволяющее провести комплексный расчёт ВПТК по разработанной методике.

**Во второй главе** рассматривается влияние конструктивных элементов ВПТК на её прочностные характеристики.

С помощью методики силового расчёта ВПТК показано и подтверждено на практике, что использование шариков в качестве тел качения вызывает сильный износ контактных поверхностей, поэтому использование роликов предпочтительно.

Сепаратор является одним из наиболее нагруженных элементов ВПТК. Углы прямоугольных отверстий под ролики в сепараторе, работающем на кручение, являются концентраторами напряжений. В результате этого, возможно появление трещин в самых нагруженных перемычках сепаратора.

Рассмотрено несколько способов уменьшить напряжения в наиболее нагруженных местах сепаратора:

- 1) введение скругления углов гнёзд под ролики;
- 2) передача усилия с сепаратора через оба его торца;
- 3) разбиение передачи на секции;
- 4) увеличение диаметра передачи;
- 5) увеличение толщины сепаратора;
- 6) увеличение ширины перемычек;
- 7) выполнение сепаратора в виде сборочной единицы.

Анализ методом конечных элементов показал, что каждый из рассмотренных способов ведёт к существенному уменьшению напряжений в сепараторе. Наибольшую прочность имеют сепараторы с двумя рядами тел качения, закреплённые с обоих торцов и имеющие скругления в гнёздах, радиус которых равен  $1/3$  диаметра ролика, а также составные сепараторы.

Анализ количества рядов тел качения показало, что использование в ВПТК числа рядов, кратных четырём, целесообразно с точки зрения прочности, простоты

изготовления и динамической уравновешенности волнообразователя ВПТК, т.к. в таком случае поперечные силы от тел качения будут уравновешены.

Предложена новая конструктивная схема волновых передач с эксцентриковыми роликами, реализующая контакт между роликом и жёстким колесом по поверхности, что позволяет значительно уменьшить массу и габариты редуктора по сравнению с ВПТК.

В третьей главе описаны результаты исследования динамических характеристик электромеханического привода на основе ВПТК с помощью разработанной математической модели, учитывающей специфические характеристики передаваемого момента и нагрузочную характеристику передачи (см. рис. 5).

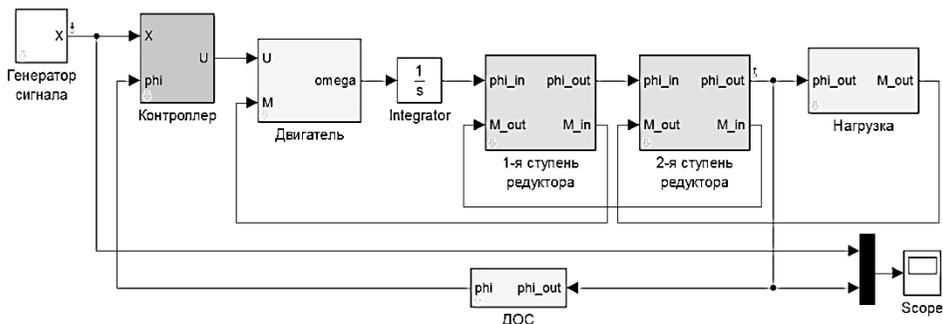


Рис. 5. Математическая модель привода, включающего ВПТК.

Математическая модель включает в себя блоки редуктора, учитывающие люфт, упругость, отношение выходного момента ко входному, момент инерции и демпфирование ВПТК (см. рис. 6).

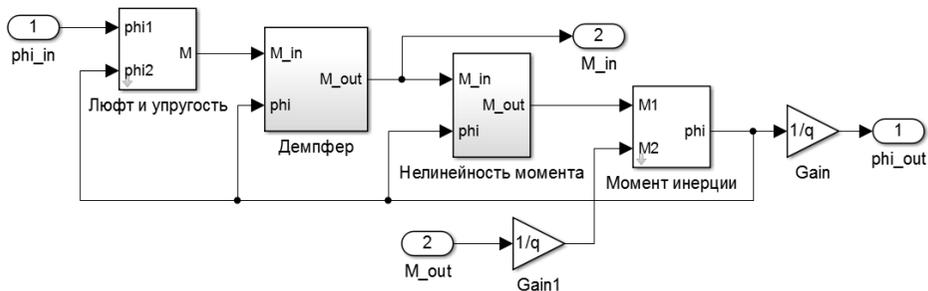


Рис. 6. Реализация блока редуктора.

Чтобы оценить влияние на динамику привода жёсткости, характеристики передаваемого момента, люфта и коэффициента демпфирования реального редуктора были заданы базовые значения этих параметров и рассмотрено влияние

каждого из них в отдельности. Оценивалось влияние параметра на форму отработки приводом синусоидального и скачкообразного сигналов при амплитуде  $0,1^\circ$ . На рис. 7 – 10 показана отработка моделью привода синусоидального сигнала при разных значениях параметров.

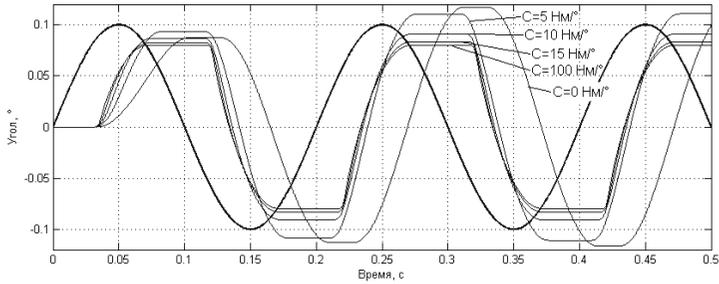


Рисунок 7. Отработка синусоиды приводом с разной жёсткостью ВПТК

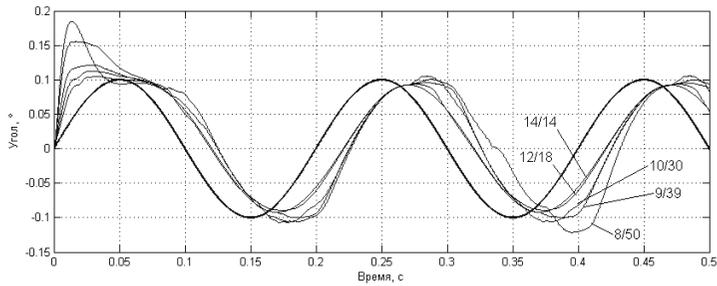


Рисунок 8. Отработка синусоиды приводом с разной характеристикой передаваемого момента ВПТК.

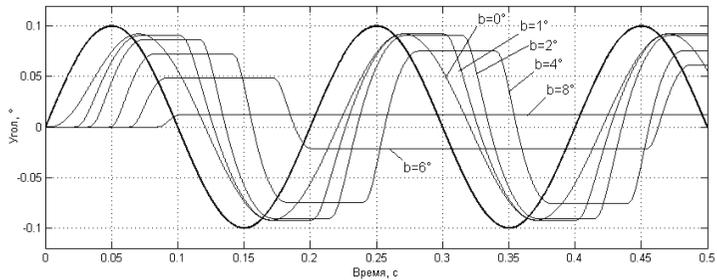


Рисунок 9. Отработка синусоиды приводом с разной величиной люфта ВПТК.

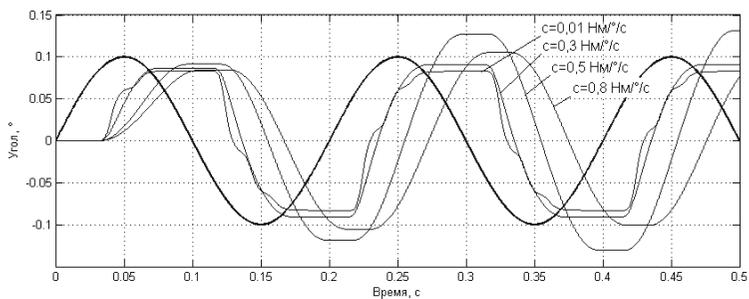


Рисунок 10. Обработка синусоиды приводом с разными коэффициентами демпфирования ВПТК.

Установлено, что уменьшение жёсткости ВПТК увеличивает амплитуду синусоидального сигнала, обрабатываемого приводом, уменьшение люфта ВПТК приводит к уменьшению запаздывания сигнала по фазе; увеличение коэффициента вязкого трения ВПТК увеличивает колебательность контура привода; влияние вида характеристики передаваемого момента на динамику привода незначительно.

Проведено сравнение ЛАФЧХ для случаев реального редуктора со значениями его жёсткости на входном валу  $2 \text{ Нм/}^\circ$  и  $4 \text{ Нм/}^\circ$  и люфтом входного вала  $10^\circ$  и  $4^\circ$  соответственно (см. рис. 11, 12). Анализ характеристик показал, что увеличение жёсткости и уменьшение люфта выходной ступени редуктора приводит к увеличению полосы пропускания с  $4 \text{ Гц}$  до  $7,4 \text{ Гц}$  и к увеличению запаса по фазе с  $60^\circ$  до  $95^\circ$ .

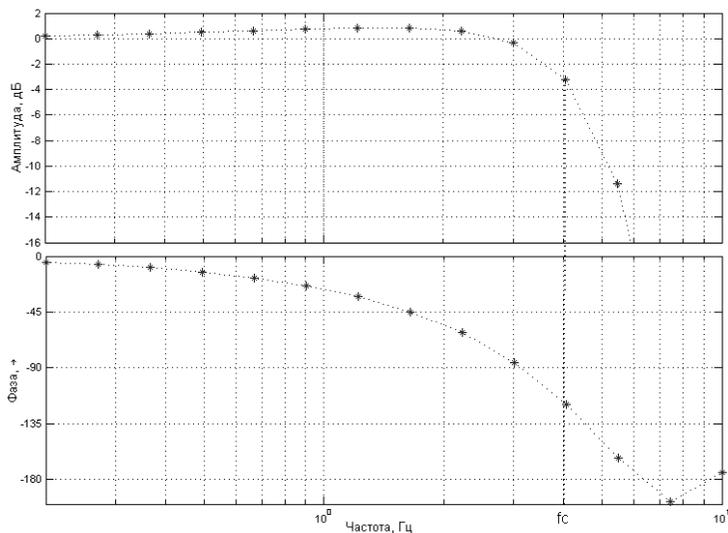


Рис. 11. ЛАФЧХ привода с жёсткостью  $2 \text{ Нм/}^\circ$  и люфтом  $10^\circ$ .

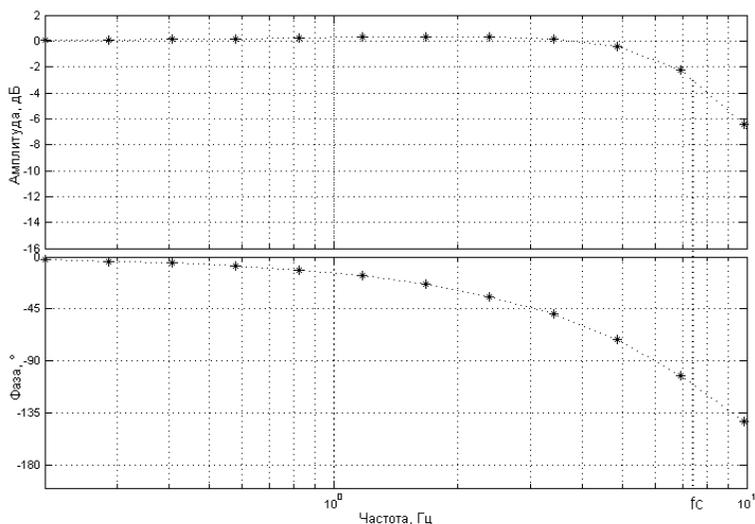


Рис. 12. ЛАФЧХ привода с жёсткостью 4 Нм/° и люфтом 4°.

Таким образом, увеличение жёсткости ВПТК за счёт утолщения жёсткого колеса, увеличения её диаметра или увеличения её длины вместе с уменьшением люфта передачи за счёт уменьшения технологических допусков или выполнения жёсткого колеса из двух повёрнутых друг относительно друга частей, приводит к улучшению динамических характеристик привода.

**В четвёртой главе** описаны результаты экспериментальных исследований, для которых исследований были использованы образцы электромеханических приводов элерона, разработанного по теме «Разработка демонстраторов рулевых приводов пассажирского самолёта с повышенной степенью электрификации энергетических систем» и привода створки грузового отсека, разработанного по теме «Разработка электромеханической системы управления створками грузоотсека» и изготовленного Мичуринским заводом «Прогресс».

Исполнительный механизм экспериментального образца привода элерона представляет собой мотор-редуктор, который состоит из бесколлекторного электродвигателя со встроенным тормозом и датчиком положения ротора и редуктора (см. рис. 13). Редуктор представляет собой двухступенчатую соосную волновую передачу с телами качения вращательного действия. Промежуточная ступень является шариково-волновой передачей, с выходным звеном – сепаратором. Выходная ступень является роликово-волновой передачей с выходным звеном – сепаратором, объединённым со шлицевым выходным валом. Сепаратор промежуточной ступени объединён со входным валом выходной ступени.

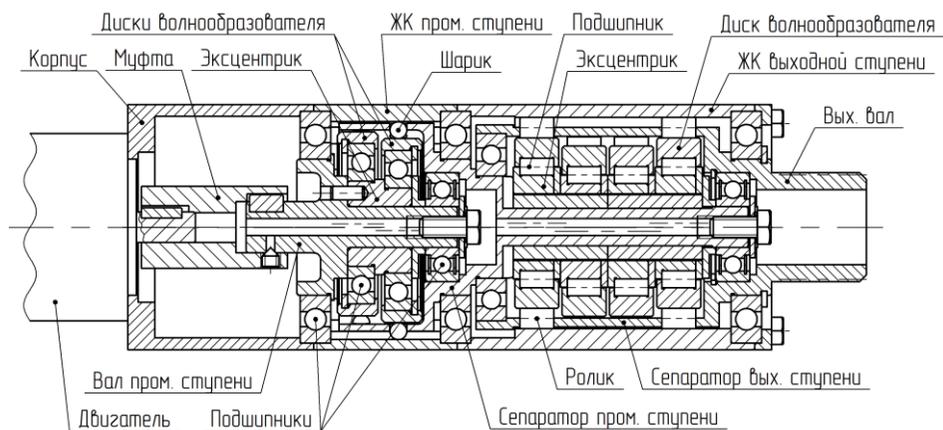


Рис. 13. Продольное сечение ИМ привода элерона.

Спроектирован и изготовлен ИМ электромеханического привода створок грузового отсека вращательного действия (см. рис. 14). Редуктор привода состоит из трёх ступеней ВПТК: две промежуточные ступени имеют одинаковые геометрические размеры и собраны в одном корпусе, а выходная ступень состоит из двух одинаковых секций с общим волнообразователем, причём каждая секция имеет собственный сепаратор и жёсткое колесо.



Рис. 14. Привод створок грузового отсека.

Для снятия характеристики передаваемого момента и нагрузочной характеристики ВПТК использовался стенд в МАИ. Для снятия статических и динамических характеристик привода элерона применялся стенд в «ОКБ им. А.И. Микояна» с пневматическим нагружателем (см. рис. 15).

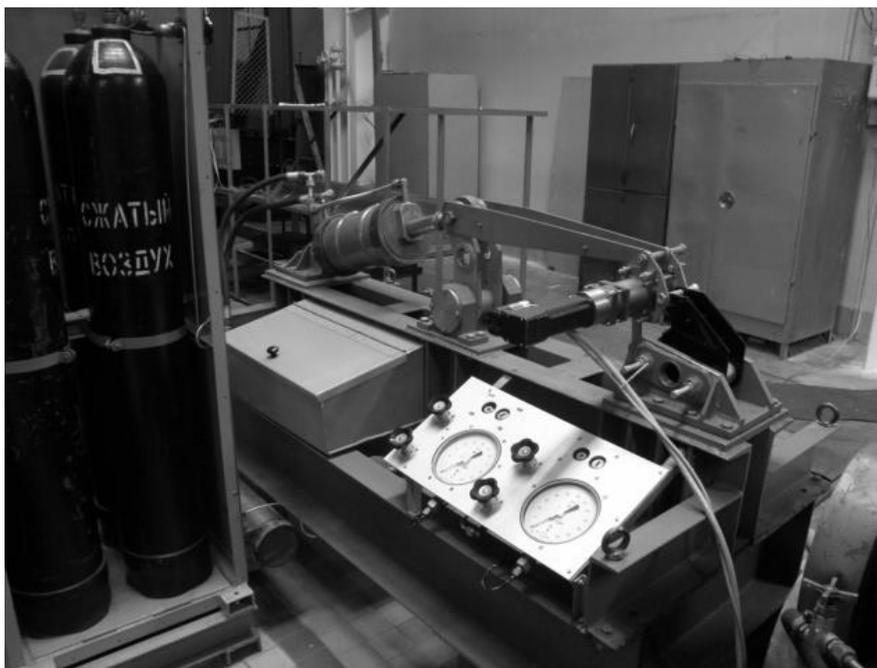


Рис. 15. Фотография испытательного стенда привода в «ОКБ им. А.И. Микояна» с пневматическим нагружателем.

Проведённые испытания:

- 1) Прямая и обратная нагрузочные характеристики выходной ступени редуктора (см. рис. 16).
- 2) Зависимость момента на выходном валу выходной ступени от момента на входном валу при нулевой скорости (см. рис. 17).
- 3) Статическая характеристика по углу.
- 4) Скоростная характеристика.
- 5) Механические характеристики.
- 6) Температурные характеристики.
- 7) Амплитудные и фазовые частотные характеристики (см. рис. 18).
- 8) Ресурсные испытания на 100 часах типовых режимов работы.

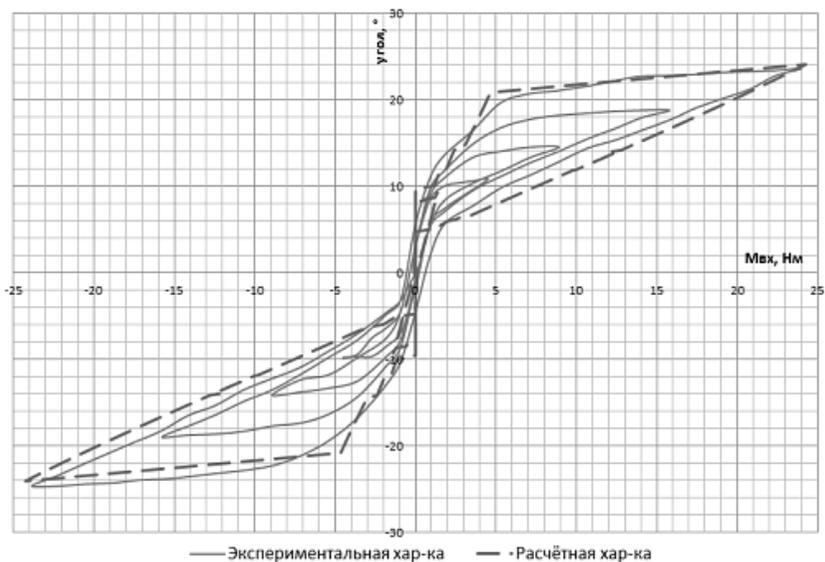


Рис. 16. Нагрузочная характеристика выходной ступени привода элерона при нагружаемом входном валу.

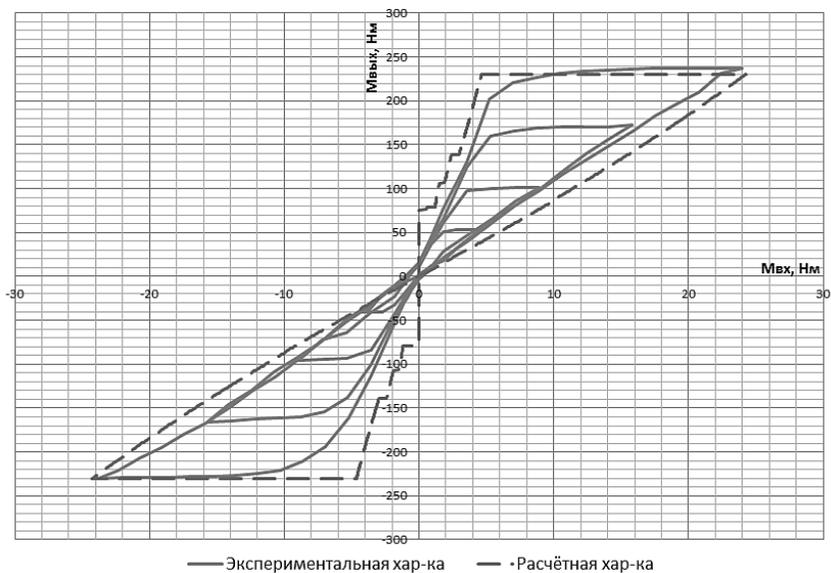


Рис. 17. Характеристика передаваемого момента выходной ступени привода элерона при нагружаемом входном валу.

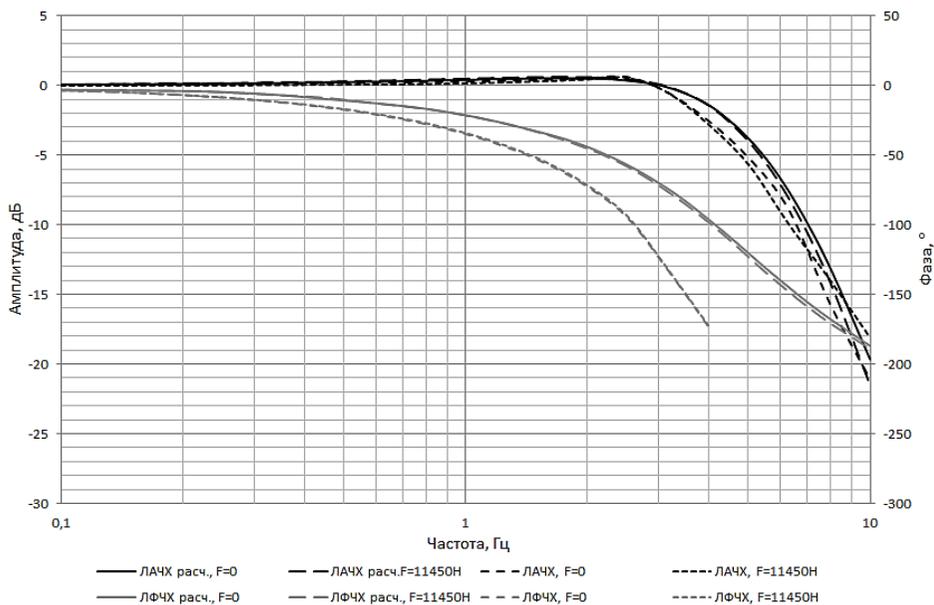


Рис. 18. ЛАФЧХ привода элерона при амплитуде 2,5°.

В результате проведённых испытаний было установлено, что экспериментальная нагрузочная характеристика и характеристика передаваемого момента близки к расчётным, что подтверждает справедливость разработанной методики силового расчёта. Статические экспериментальные характеристики привода имеют линейный вид, а семейство механических характеристик показывают отсутствие существенного влияния момента нагрузки на скорость вращения выходного вала. Экспериментальная ЛАФЧХ близка к расчётной, что показывает справедливость разработанной математической модели.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Выявлены, описаны математически и подтверждены экспериментально специфические нагрузочная характеристика и характеристика передаваемого момента ВПТК, проведены исследования динамики привода с учётом этих характеристик.
2. Разработана методика силового расчёта выходной и промежуточных ступеней ВПТК, позволяющая рассчитать прочностные параметры передачи под заданные технические требования с учётом упругости жёсткого колеса и сепаратора.

3. Уточнены формы гнёзд сепаратора, позволяющие увеличить прочность сепаратора в 2...6 раз и определено число рядов тел качения, позволяющее устранить динамическую неуравновешенность ВПТК и увеличить ресурс работы.
4. Проведены исследования по выбору формы тел качения и установлено, что для силовых приводных систем в качестве тел качения целесообразно использовать ролики.
5. Рассмотрены возможности улучшения динамических характеристик привода на основе ВПТК. Предложено улучшение динамических характеристик за счёт выбора люфта путём использования двух секций выходного редуктора с взаимным поворотом их жёстких колёс друг относительно друга.
6. Разработано программное обеспечение, позволяющее провести комплексный расчёт параметров ВПТК под заданные технические требования электромеханического привода.
7. Предложена новая схема волновой передачи с эксцентриковыми роликами, позволяющая повысить нагрузочную способность по моменту в несколько раз.

## **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Научные труды, опубликованные в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России:**

1. Крылов Н.В., Степанов В.С., Самсонович С.Л., Анализ массогабаритных показателей электромеханических рулевых приводов с различными типами механических передач. Журнал «Известия Тульского государственного университета, Технические науки», вып. 1, Тула: изд-во ТулГУ, 2012 г.
2. Крылов Н.В., Баранов М. В., Борисов М. В., Корчагин О. А., Самсонович С.Л., Степанов В.С., О выборе скорости электродвигателя и передаточного числа редуктора привода руля направления транспортного самолёта. Электронный журнал «Труды МАИ» №62, Москва 2012 г.
3. Крылов Н.В., Степанов В.С., Самсонович С.Л., Автоматизированное проектирование волновых редукторов с телами качения. Электронный журнал «Труды МАИ» №62, Москва 2012 г.
4. Крылов Н.В., Борисов М.В., Левин А.В., Степанов В.С., Самсонович С.Л., Перспективы и проблемы создания электромеханических силовых миниприводов для нового поколения ЛА. Журнал «Авиационная промышленность» №3/2013. ОАО «Национальный институт авиационных технологий».

5. Крылов Н.В. О прочностном расчёте волновых передач с телами качения с вращательным движением выходного звена // Электронный журнал «Труды МАИ». Выпуск № 65. Москва, 2013 г.

**Другие научные труды по теме диссертации:**

6. Крылов Н.В., Борисов М.В., Самсонович С.Л., Степанов В.С. Планетарно-цевочный редуктор // Патент РФ №2491454. Опубл.: 27.08.2013 Бюл. №24.
7. Крылов Н.В., Борисов М.В., Самсонович С.Л., Степанов В.С. Волновой редуктор с эксцентриковыми роликами // Патент РФ №2491455. Опубл.: 27.08.2013 Бюл. №24.
8. Крылов Н.В., Борисов М.В., Степанов В.С., Самсонович С.Л. О возможности размещения исполнительного механизма электропривода в габаритах опорного устройства рулевой поверхности беспилотных атмосферных летательных аппаратов. Тезисы докладов II Всероссийской научно-технической конференции «Системы управления беспилотными космическими и атмосферными ЛА. М.: МОКБ «МАРС» 2012.
9. Крылов Н.В., Самсонович С.Л., Степанов В.С., Исследование прочностных характеристик высоконагруженных волновых передач с телами качения, Сборник «Материалы XX международного научно-технического семинара Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации». Алушта, Пенза, изд-во ПГУ, 2011 г.
10. Крылов Н.В., О распределении сил и напряжений в элементах волновых передач с телами качения, 11-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2012». 13–15 ноября 2012 года. Москва. Тезисы докладов. – СПб.: Мастерская печати, 2012. – 385 с.
11. Крылов Н.В., Сравнительный анализ волновых передач с телами качения, имеющими различный контакт с жёстким колесом в точке, по линии или поверхности, Сборник докладов IX Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы совершенствования робототехнических и интеллектуальных систем летательных аппаратов, Москва, МАИ, 2012 г.
12. Крылов Н.В., Самсонович С.Л., Испытания электромеханического привода элерона, Московская молодёжная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике – 2013». 16-18 апреля 2013 года. Москва. Сборник тезисов докладов. – М.: ООО "Принт-салон".