

## МАШИНОВЕДЕНИЕ, СИСТЕМЫ ПРИВОДОВ И ДЕТАЛИ МАШИН

---

---

УДК 621.833

### СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ПРИВОД С ПРИМЕНЕНИЕМ ПЛАНЕТАРНОЙ РОЛИКОВИНТОВОЙ ПЕРЕДАЧИ ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТИ

**Носов А.С.**

*Центр эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры — «Конструкторское бюро “Мотор”»,  
ул. Сергея Макеева, 7, Москва, 123100, Россия  
e-mail: alekstambov@mail.ru*

---

Обозначена научная задача, для решения которой необходимо решение частных задач исследования, предлагается разработка научно-методического аппарата обоснования выбора структуры, состава и параметров электро-механического привода с применением планетарной роликвинтовой передачи (ПРВП) повышенной надежности функционирования, позволяющей повысить точность воспроизведения заданного закона движения специального монтажно-стыковочного оборудования ракетно-космического комплекса. Рассмотрена схема электро-механического привода линейного перемещения повышенной точности и надежности на базе ПРВП. Обоснованы преимущества электро-механического привода перед гидравлическим. Проведен расчет основных показателей и построена схема ПРВП. Сделаны выводы по результатам использования электро-механического привода с ПРВП и описаны его преимущества.

*Ключевые слова:* планетарная роликвинтовая передача, силовой электро-механический привод, сравнительный анализ электро-механического привода, точность.

---

#### **Введение**

В настоящее время к силовым приводам предъявляются требования по повышению нагрузочной способности, точности позиционирования, надежности, долговечности, КПД, стойкости к ударным нагрузкам и ряда других параметров. Повышаются необходимые скорости и ускорения выходного звена приводов. Приводы должны легко устанавливаться на изделие, заменяться и настраиваться, их обслуживание должно быть простым, а управление надежным и легко программируемым.

Для большинства изделий, в первую очередь космической отрасли, необходимо снижать массу приводов и обслуживающего их оборудования. Постоянно ужесточаются требования к приводам по воздействию на окружающую среду [1].

Силовые электро-механические приводы с исполнительным механизмом на базе планетарной роликвинтовой передачи повышенной точности и надежности функционирования специального агрегата монтажно-стыковочного оборудования крупногабаритных изделий большой массы с ракетным

носителем сверхтяжелого класса выбраны в качестве объекта исследования.

Задача состоит в разработке научно-методического аппарата обоснования выбора структуры, состава и параметров электромеханического привода с применением планетарной роликвинтовой передачи повышенной надежности функционирования, позволяющей повысить точность воспроизведения заданного закона движения специального монтажно-стыковочного оборудования.

Для решения научной задачи необходимо решить следующие частные задачи исследования:

1) обоснование научно-методического подхода к повышению точности воспроизведения заданного закона движения специального агрегата монтажно-стыковочного оборудования при испытаниях крупногабаритных изделий большой массы для ракетно-космических комплексов с ракетным носителем сверхтяжелого класса с применением силовых электромеханических приводов на базе планетарной роликвинтовой передачи;

2) обоснование результатов математического моделирования управляемого электромеханического привода и процесса эксплуатации управляемого силового электромеханического привода с применением планетарной роликвинтовой передачи повышенной точности и надежности функционирования;

3) разработка методики обоснования выбора структуры, состава и параметров электромеханического привода с применением планетарной роликвинтовой передачи повышенной точности и надежности функционирования;

4) обоснование результатов экспериментальных исследований управляемого электромеханического привода с применением планетарной роликвинтовой передачи повышенной точности и надежности функционирования.

Структурно методика (рис. 1) включает подготовку исходных данных и основных требований к исполнительному механизму, проектирование схемы электромеханического привода, выбор материалов и термообработки основных деталей механизма, выбор смазочного материала, расчет исполнительного механизма, предварительный расчет КПД передачи, силовой и кинематический анализ передачи, уточнение оценки потерь мощности в механизме, корректировку (при необходимости), создание модели, определение основных характеристик, проверку соответствия передачи техническим требованиям, сравнение вариантов решения и выбор рационального, создание конечной модели, проверочные прочностные расчеты, оформление технической документации.

В состав исходных данных для расчета силового электромеханического привода входят:

1) передаваемая мощность (крутящие моменты, максимальные силы);

2) кинематические параметры (частота вращения, закон движения, передаточное отношение);

3) максимальные габариты (в том числе расположение осей валов);

4) величина перемещения;

5) энергопотребление;

6) требуемая долговечность (ресурс).

Поскольку силовой электромеханический привод является ответственным устройством с высокими требованиями по точности изготовления отдельных элементов, необходимо их автоматизированное твердотельное моделирование с корректировкой конструкции на каждом этапе. Решение подобных задач затруднительно без использования сквозных систем проектирования CAD/CAM/CAE (Creo Parametric, APM WinMashine и др.). Автоматизированное проектирование силового электромеханического привода в подобных системах ранее не рассматривалось, хотя на его необходимость указывали многие авторы [3].

В основу конструкции электромеханического привода заложен целый ряд инновационных решений в области механики и электротехники. При формировании предложений по вариантам конструктивно-компоновочных схем и технических решений электромеханического привода кантователя, предназначенного для приведения в движение рабочих органов — выполнения наклона погона на определенные углы, с определенными скоростью и ускорением — следует рассматривать изделия, не имеющие аналогов в мире. Электромеханический привод кантователя состоит, как правило, из исполнительного механизма, электродвигателя, преобразовательного и управляющего устройств [6].

Выделяют три основных элемента электромеханического привода (рис. 2):

1) механическую часть привода, включающую передаточный механизм (ПМ) и исполнительный механизм (ИМ), предназначенную для передачи механической энергии к рабочему органу (РО) агрегата и для изменения вида и скорости движения и усилия (момента вращения);

2) электродвигатель (Э), предназначенный для преобразования электрической энергии в механическую;

3) систему управления (управляющее устройство), состоящую из силовой преобразовательной части, управляющего устройства (УУ), задающего устройства (ЗУ), устройства аварийного торможения (АТ), датчиков обратных связей (ДС).

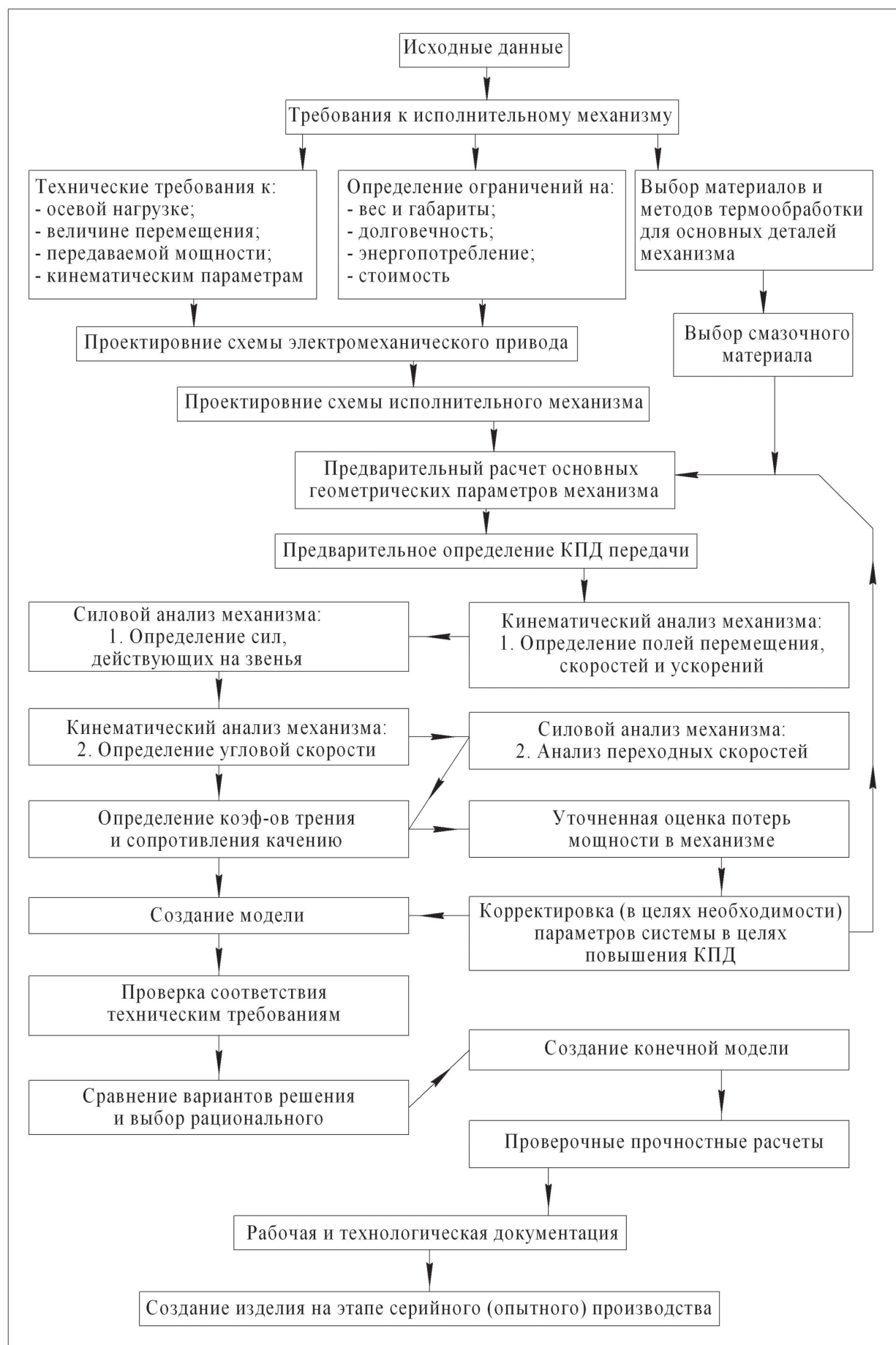


Рис. 1. Схема алгоритма методики

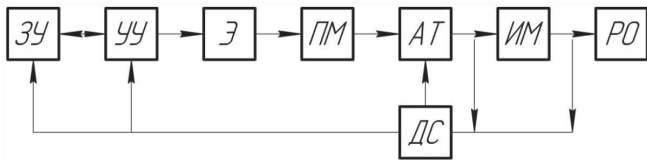


Рис. 2. Структурная схема компоновки электромеханического привода

Оптимальным решением является сочетание электродвигателя с механической передачей при правильном распределении функций между их составными частями.

Отклик электромеханического привода с планетарной роликвинтовой передачей (рис. 3) практически мгновенный при подаче электрического сигнала, в то время как гидроцилиндры требуют нарастания давления до момента движения, и движение начинается в неопределенном положении с гистерезисом [4].

Для обеспечения требуемой скорости и точности выходного перемещения электромеханического привода используем исполнительный механизм с высокими редукцией и КПД. Это планетарная роликвинтовая передача (рис. 4), которая имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными передачами:

- обладает повышенной нагрузочной способностью за счет передачи мощности несколькими потоками с распределением нагрузки между роликами и возрастания суммарной длины линий контакта в винтовых звеньях;
- позволяет повысить точность воспроизведения заданного закона движения агрегата;
- снижает массу и габариты механизма, обеспечивает высокий суммарный КПД за счет большой редукции в ступени;

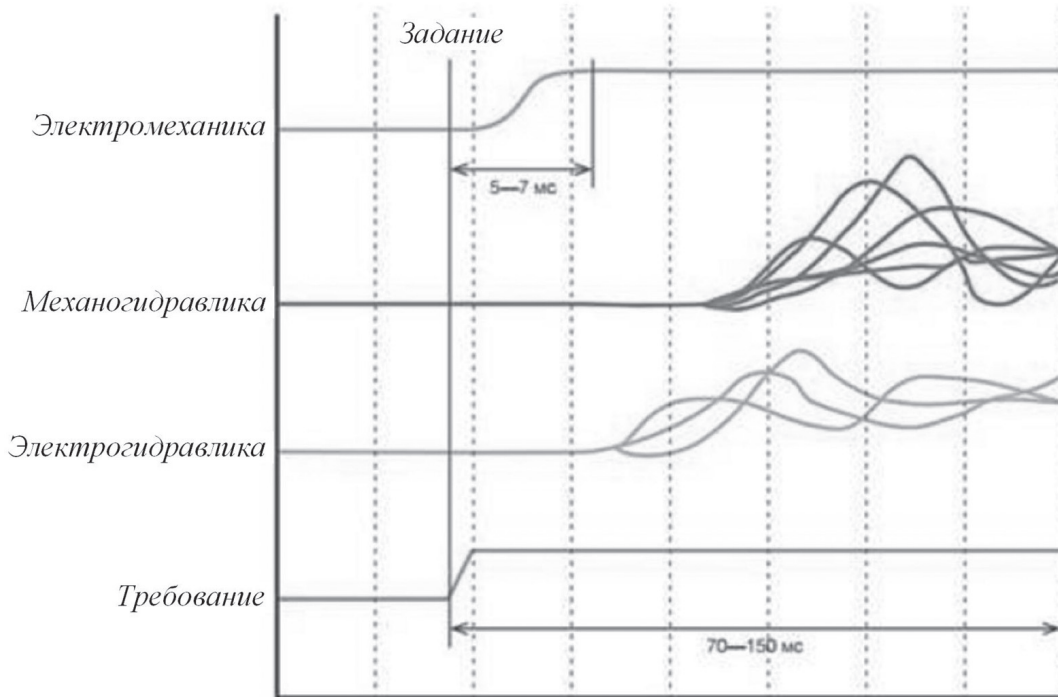


Рис. 3. Отклик электромеханического привода

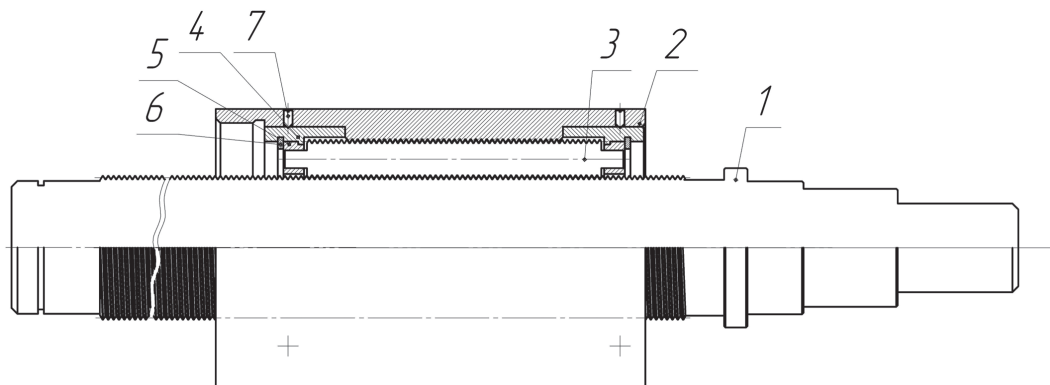


Рис. 4. Схема планетарной роликвинтовой передачи

- уменьшает нагрузку на корпус и опоры, благодаря распределению сил в планетарной передаче;
- позволяет полностью исключить зазор в передаче;
- обеспечивает высокую плавность перемещений, позволяющую с высокой точностью осуществлять заданный закон перемещений на выходе в зависимости от сигнала на входе;
- обеспечивает достаточную плавность перемещений при движении на микроскоростях;
- имеет малые потери на трение и высокую долговечность;
- может работать в широком интервале температур и в вакууме;
- работает на высоких скоростях и ускорении;
- не влияет на окружающую среду;
- компактна.

Процедура проектирования привода делится на процедуры структурного и параметрического этапа. Целью структурного этапа является определение структуры объекта — перечня типов элементов, составляющих объект, и способа связи элементов между собой в составе объекта.

Параметрический этап заключается в определении числовых значений параметров элементов с учетом структуры и условий работоспособности планетарной роликовинтовой передачи [6].

Основными элементами передачи (рис. 4, 5) являются: винт, гайка, резьбовые ролики, зубчатые венцы, сепаратор, стопорные кольца. Ведущим элементом в такой передаче может быть как винт, так и гайка. Винт 1 и гайка 2 имеют резьбу треугольного профиля с углом при вершине 90°. Ролики 3 имеют специальную резьбу, профиль которой в осевом сечении имеет форму выпуклых дуг определенного радиуса, благодаря которой обеспечивается точечный контакт в сопряжении ролика с винтом и гайкой. Конструкция такой передачи по-

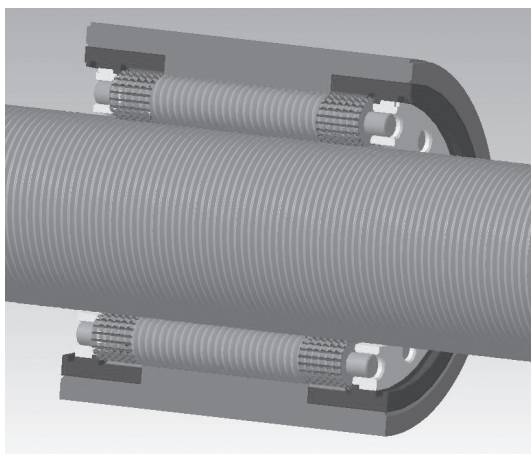


Рис. 5. Модель планетарной роликовинтовой передачи

зволяет на винте и гайке иметь различные углы подъема резьбы [3, 5, 7].

Для предотвращения перемещения роликов относительно гайки выполнено зубчатое зацепление роликов с зубчатым венцом 4, впрессованным в гайку 2 и закрепленным винтами 7. Для этого по концам роликов и в зубчатом венце режутся мелкозубчатые зубья. Для обеспечения равномерного распределения роликов по поверхности винта и гайки ролики помещены в сепараторы 5, которые установлены в зубчатом венце 4 с помощью стопорных колец 6 [7].

Осевое перемещение ролика относительно гайки за один оборот винта определяется следующим образом [6]:

$$H_1 = \frac{1}{2} \frac{k}{k+1} n_r t \pm \frac{1}{2} k \frac{k+2}{k+1} t = \frac{1}{2} k t \left( \frac{n_r}{k+1} \pm \frac{k+2}{k+1} \right), \quad (1)$$

где  $t$  — шаг резьбы;  $n_r$  — число заходов резьбы гайки;  $H$  — ход гайки за оборот винта;  $k$  — параметр передачи  $2 < k < 5$  (при  $k > 5$  — увеличение число заходов резьбы на винте; при  $k < 2$  — возрастают габариты передачи),

$$k = \frac{d_b}{d_p}, \quad (2)$$

где  $d_b$  — основной диаметр резьбы винта;  $d_p$  — основной диаметр резьбы ролика.

Чтобы ролики не выкатывались из гайки, необходимо, чтобы угол подъема резьбы гайки на основном диаметре был равен углу подъема резьбы ролика на соответствующем основном диаметре.

Осевое перемещение роликов относительно винта за один оборот винта определяется по формуле [7]

$$H_2 = \frac{t}{2} \cdot \frac{k(k+2)}{k+1} \mp \frac{k n_b t}{2 \cdot (k+1)} \pm n_b t = \frac{1}{2} \cdot \frac{k+2}{k+1} (k \pm n_b) t, \quad (3)$$

где  $n_b$  — число заходов резьбы винта.

Верхние знаки соответствуют одинаковому направлению резьбы винта и гайки, а нижнее — различному.

Перемещение гайки за один оборот винта равно [7]

$$H = H_1 + H_2. \quad (4)$$

При различных сочетаниях резьб винта, гайки и роликов можно создавать механизмы с микроперемещением или наоборот — высокоскоростные.

Оценки перемещений, скоростей, ускорений и их погрешностей показывают, что предлагаемые электромеханические приводы с планетарной роликвинтовой передачей улучшают работу кантователя в части повышения его точности и КПД по сравнению с традиционным гидравлическим приводом (см. таблицу).

необходимого количества задействованных специалистов;

1.3) разработка обоснованных рекомендаций по созданию усовершенствованных силовых электромеханических приводов с применением планетарной роликвинтовой передачи для специальных агрегатов монтажно-стыковочного оборудования

**Характеристики приводов кантователя [4, 7]**

Параметры	Наименование силового привода	
	Гидравлический (традиционный)	Электромеханический с ПРВП (предлагаемый)
Погрешность перемещения, мкм	50...200	0,05...20
Скорость наклона погона, рад/с	0,0034...72,08	0,0034...350
Погрешность скорости наклона погона, рад/с	0,09	0,02
Ускорение, рад/с <sup>2</sup>	До 150	До 7000
Погрешность ускорения перемещения, мм/с <sup>2</sup>	±0,3	±0,025

**Выводы**

Обоснование и разработка научно-методического аппарата и создание с его применением электромеханического привода с планетарной роликвинтовой передачей для кантователей космических головных частей ракетно-космического носителя сверхтяжелого класса позволяет улучшить процесс подготовки ракетно-космического носителя к пуску. Улучшение процесса подготовки ракетно-космического носителя к пуску состоит в повышении точности воспроизведения программы наземных испытаний в части реализации законов движения космической головной части и позволяет снизить вероятность возникновения нештатных ситуаций по причине некорректной работы установленной аппаратуры и оборудования космической головной части на активном участке траектории.

Кроме того, следует отметить предполагаемый вклад разработанных результатов в развитие теории и практики.

**1. Практическая значимость результатов:**

1.1) значительное повышение точности воспроизведения заданного закона движения агрегата монтажно-стыковочного оборудования при испытаниях крупногабаритных изделий большой массы ракетно-космических комплексов с ракетным носителем сверхтяжелого класса с применением электромеханического привода на базе планетарной роликвинтовой передачи повышенной надежности;

1.2) существенное сокращение расходов на техническое обслуживание и эксплуатацию электромеханического привода на базе планетарной роликвинтовой передачи в целом в части уменьшения

для испытания крупногабаритных изделий большой массы для ракетно-космических комплексов с ракетным носителем сверхтяжелого класса.

**2. Теоретическая значимость результатов:**

2.1) разработка математических моделей и методики, позволяющих учесть при оценке точности и надежности функционирования силовых электромеханических приводов с планетарной роликвинтовой передачей в заданных программой и методикой испытаний условиях влияние структуры, состава и параметров планетарной роликвинтовой передачи;

2.2) разработка физических моделей планетарной роликвинтовой передачи, экспериментального стенда для исследования силовых электромеханических приводов на базе планетарной роликвинтовой передачи повышенной точности и надежности функционирования.

Таким образом, обоснование и разработка предложенного научно-методического аппарата позволяет создавать управляемый электромеханический привод с планетарной роликвинтовой передачей с улучшенными техническими и эксплуатационными характеристиками для кантователя космической головной части ракетно-космического носителя сверхтяжелого класса, что может позволить уменьшить вероятность возникновения нештатных ситуаций при выполнении государственных и коммерческих космических программ.

*Выражаю благодарность руководителям  
А.Г. Варочко, А.В. Сизанову, А.Н. Сова.*

**Библиографический список**

1. Бирюков Г.П., Манаенков Е.Н., Фадеев А.С. Технологическое оборудование отечественных ракетно-космических комплексов. — М.: Рестарт, 2012. — 599 с.
2. Блинов Д.С., Крылов С.И. Планетарные роликвинтовые механизмы. Конструкции, методы расчетов / Под ред. проф. О.А. Ряховского. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. — 222 с.
3. Жданов А.В., Дуери Х. Прикладные задачи механики и теплообмена в авиационной // Материалы научно-технической конференции научной школы молодых ученых и специалистов. Воронеж: ВОРГТУ, 2001. 242 с.
4. Exlar. Электроцилиндры серии GSX: каталог продукции. — М.: ООО «Прогрессивные технологии», 2009. — 36 с.
5. Козырев В.В. Конструкции роликвинтовых передач и методика их проектирования. — Владимир: ВлГУ, 2004. — 102 с.
6. Фролов К.В. Машиностроение: Энциклопедия. — М.: Машиностроение, 2012. — Т. IV-2, книга 1 — 520 с., книга 2 — 304 с.
7. Петренко А.М. Специальные винтовые механизмы в силовых приводах. — М.: МАДИ, 1997. — 86 с.

## POWER ELECTROMECHANICAL DRIVE BASED ON PLANETARY ROLLER-SCREW GEAR OF IMPROVED ACCURACY

Nosov A.S.

*Center for exploitation of space ground-based infrastructure - Design Bureau «Motor»,  
7, Sergey Makeev str., Moscow, 123100, Russia  
e-mail: alekstambov@mail.ru*

**Abstract**

The author chose power electromechanical actuator drives based on planetary roller-screw gear (PRSG) of improved accuracy and reliability of operation of the special equipment for integration installation of large-sized with and large mass products with a rocket carrier of a super-heavy class as the object of study.

The technique includes the preparation of the initial data and the basic requirements to the actuator, an electromechanical drive circuit design. It also considers selection of materials and heat treatment of the main parts of the mechanism, the selection of lubricant, the design of the actuator, a preliminary calculation of the transmission efficiency, as well as power and kinematic analysis of the transmission. It allows calculate power losses in the mechanism, and adjust the calculation (if necessary), creation of a model to determine the main characteristics, checking compliance of transmission with specifications, comparison of the options and selection of the optimal one, the creation of the final model, test strength calculations, preparation of design and technical documentation.

As long as power electromechanical drive is a vital unit with high requirements to accuracy of manufacturing of certain elements, the solid-state modeling with adjustment at each stage is necessary. The solution of such problems is made difficult without the use of through-design CAD / CAM / CAE systems.

To ensure the required speed and accuracy of the output displacement of the electromechanical actuator

we use the actuator with high reduction and efficiency. This is planetary roller-screw with a number of advantages over conventional transmissions:

- increased load capacity due to power transfer by several streams with load distribution between rollers and increase of contact lines in helical links total length;
- allows improve reproduction accuracy of a given law of motion of the mechanism;
- reduces weight and size of the mechanism and provides a high overall efficiency due to the large reduction of the stage;
- performs frame and supports load reduction, due to the distribution of forces in the planetary gear;
- allows complete elimination of the gap in the transmission;
- provides high smoothness of motion, allowing high accuracy to perform a given output displacement law depending on the input signal;
- provides high smoothness of movement when moving at micro speed;
- exhibits small friction losses and high durability;
- operation capability in a wide range of temperatures and in vacuum;
- operates at high speeds and acceleration;
- has no impact on the environment;
- compactness.

The basic elements of the transmission are as follows: screw nut, threaded rollers, toothed crowns, separator, locking rings. Both screw and nut can be the key element

in this transmission. Screws and nuts have a thread of triangular shape with an apex angle of 90°. Rollers have a special thread which profile in axial section has the shape of convex arcs of a certain radius, due to which a point contact is provided in conjunction with the roller screw and nut. The design of such transmission allows for different angles of helix of screws and nuts.

Justification and development of scientific and methodological apparatus, and creation with its application of electromechanical drive with planetary roller-screw transmission for space nosecone tilters of a space-rocket carrier of super-heavy class allows improving the process of preparing a space-rocket carrier for launch. Improving the process of space-rocket carrier preparation for launch means increasing accuracy in reproduction of the ground tests program with regard to the laws of nosecone motion and allows reduce the possibility of emergency situations due to incorrect operation of the installed equipment and machinery of a space nosecone at the boost phase.

**Keywords:** roller-screw transmission, power electromechanical actuator, comparative analysis of electromechanical drive, reliability.

## References

1. Biryukov G.P., Manaenkov E.N., Fadeev A.S. *Tekhnologicheskoe oborudovanie otechestvennykh raketno-kosmicheskikh kompleksov* (Technological equipment of domestic space-rocket complexes), Moscow, Restart, 2012, 599 p.
2. Blinov D.S., Krylov S.I. *Planetarnye rolikovintovyye mekhanizmy. Konstruktsii, metody raschetov* (Planetary roller screw mechanisms. Designs, calculation methods), Moscow, MGTU imeni N.E. Bauman, 2006, pp. 66-78 (222 p.)
3. Zhdanov A.V., Dueri Kh. *Materialy nauchno-tekhnicheskoi konferentsii nauchnoi shkoly molodykh uchennykh i spetsialistov*, Voronezh, VorGTU, 2001, pp. 144-146.
4. *Exlar. Elektrosilindry serii GSX: katalog produktsii* (Exlar. Electric cylinder series GSX product catalog), Moscow, Progressivnye tekhnologii, 2009, 36 p.
5. Kozyrev V.V. *Konstruktsii rolikovintovykh peredach i metodika ikh proektirovaniia* (Rollerscrew gear designs and their designing methodology), Vladimir, VIGU, 2004, pp. 8-14 (102 p.).
6. Frolov K.V. *Mashinostroenie. Entsiklopediya* (Engineering. Encyclopedia), 2012, vol. IV-2, book 1 - 520 p., book 2 - 304 p.
7. Petrenko A.M. *Spetsial'nye vintovyye mekhanizmy v silovykh privodakh* (Special screw mechanism for power drives), Moscow, MADI, 1997, 86 p.