

Рис. 7. Динамика СКО при разных методах настройке формы рефлектора

Наклон рефлектора вокруг осей OY и OZ легко убирается посредством изменения усилий в радиальных лентах формообразующей структуры. Характерным всплеском СКО на рис. 7 является 10 и 13-я итерации.

Если же настраивать рефлектор базирясь только на его фланце, то перераспределяющиеся усилия в формообразующей структуре не позволяют снизить СКО до требований КД (рис. 7).

Таким образом:

1. Разработана методика настройки крупногабаритного трансформируемого рефлектора зонтичного типа в динамической системе координат, отслеживающей поведение всего силового каркаса рефлектора и подстраивающейся под его геометрию.

2. Данная методика позволяет получить радиотражающую поверхность и конфигурацию силового каркаса наиболее приближенных к номиналу.

© Климов А. Н., 2013

УДК 62.83

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВЫСОКОТОЧНЫХ ЛИНЕЙНЫХ ПРИВОДОВ ДЛЯ ШЕСТИСТЕПЕННОГО МЕХАНИЗМА ТИПА «ГЕКСАПОД» КОСМИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

С. О. Бойко, С. А. Комаров, С. Г. Харитонов, Е. А. Улыбушев, А. В. Леканов

ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»
Россия, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52. E-mail: boyko@iss-reshetnev.ru

Рассматривается задача создания конструкций высокоточных линейных приводов, которые могут быть использованы в шестистепенных приводах типа «гексапод». Тема заключается в изучении точностных характеристик линейных приводов в зависимости от типа примененной линейной передачи. Представлены конструкции, основанные на следующих типах линейных передач: на передаче винт-гайка, роликвинтовой передаче, шариковинтовой передаче, волновой винтовой передаче, упругой системе перемещений. Получены некоторые результаты, которые позволяют говорить о достоинствах и недостатках перечисленных конструкций, и представлены основные характеристики как изготовленных, так и проектных линейных приводов. Получены

результаты, позволяющие говорить о возможности создания линейного привода на основе роликовинтовой передачи, обеспечивающего минимальный шаг перемещения до 0,002 мм. Прототип данной передачи был создан и испытан в ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». Результаты могут быть применены в области механизмов юстировки антенно-фидерных устройств космических аппаратов.

Ключевые слова: привод, линейный, гексапод.

DEVELOPMENT OF HIGH-PRECISION LINEAR ACTUATORS FOR SIX-AXIS MECHANISM OF "HEXAPOD" TYPE

S. O. Boyko, S. A. Komarov, S. G. Haritonov, E. A. Ulybushev, A. V. Lekanov

JSC "Academician M. F. Reshetnev "Information Satellite Systems"
52 Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russia E-mail: boyko@iss-reshetnev.ru

This article considers the problem of development of a high-precision linear actuator, which can be used in six-axis mechanisms of "hexapod" type. The main goal is to study the accuracy characteristics of the linear actuators depending on a linear drive applied. Design configurations based on such drive types, as: nut screw, roller screw, ball screw, wave screw drive, flexible displacement system, are presented. The results obtained demonstrate advantages and disadvantages of the above mentioned design configurations and show basic characteristics of both manufactured and prospective linear actuators. The results obtained demonstrate the possibility of development of a linear actuator based on roller screw, which provides for minimal step width up to 0,002 mm. A prototype of this linear actuator was created and tested in the Joint-stock Company "Academician M.F. Reshetnev "Information Satellite Systems". The results can be applied in the sphere of adjusting mechanisms of antenna-feeder devices of spacecrafts.

Keywords: actuator, linear, hexapod.

В современной космической технике имеется большое количество задач, в которых требуется применение высокоточных линейных приводов. Подобные устройства должны обеспечивать:

- высокую точность обработки заданного закона движения;
- высокую жесткость;
- высокую дискретность перемещения.

В настоящее время всё большее предпочтение отдается электромеханическим приводам. Это вызвано следующими его достоинствами:

- универсальность;
- простота устройства;
- легкость;
- возможность работы в экстремальных внешних условиях.

Одной из важнейших составляющих механической части является линейная передача, которая обеспечивает преобразование вращательного движения вала двигателя в поступательное движение выходного звена. На сегодняшний день запатентовано много различных линейных передач, каждая из которых имеет определённые достоинства и недостатки. Наиболее известными являются:

- передача винт-гайка;
- роликовинтовая передача (РВП) [1];
- шариковинтовая передача (ШВП) [2];
- волновая винтовая передача (ВВП) [3];
- упругая система перемещения (УСП) [4].

Типовые конструкции передач типа винт-гайка, РВП, ШВП достаточно подробно рассмотрены в работах [5; 6]. В данных работах представлены чёткая

классификация линейных механических передач, методики расчёта, рассмотрены их достоинства и недостатки. Следует отметить, что во Владимирском государственном университете, представителем которого являлся В. В. Козырев, существует достаточно большое количество наработок в части высокоточных линейных передач и приводов. В частности, в качестве разработок владимирского государственного университета указывается привода на основе РВП с длинными резьбовыми роликами, обеспечивающими погрешность перемещения выходного звена 0,002 мм на один виток резьбы винта при теоретической дискретности 0,1 мкм. Однако, в составе КА более предпочтительно применение планетарной или рециркуляционной РВП чем РВП с длинными резьбовыми роликами, так как это ведёт к упрощению конструкции, снижению массы и габаритов линейного привода.

Разработкой теории проектирования и расчета и обзором существующих конструкций ВВП достаточно плотно занимались в 70–80-х гг. научные работники Красноярского политехнического института во главе с В. А. Турышевым. Полученные результаты представлены в работе [7]. В данной работе представлены классификация ВВП, методика расчёта, рассмотрены их достоинства и недостатки. Представленные данные позволяют говорить о перспективности применения подобных передач, так как они могут обеспечить осевое перемещение винта равное 0,001...0,01 мм за один оборот генератора волн при высокой нагрузочной способности. Еще одним достоинством ВВП является возможность уменьшения осевых габаритов линейного привода. Главным недос-

татком ВВП является необходимость обеспечения комплекса мер для снижения износа в сопрягаемых резьбовых поверхностях (выбор формы профиля резьбы, подбор смазочного материала, ограничение осевой нагрузки, упрочнение поверхностей трения).

Прототип линейной передачи на основе УСП был применен в составе устройства шестистепенного позиционирования космического телескопа «Джеймс Вебб», запуск которого планируется на 2018 г. Главным достоинством УСП является возможность обеспечения высокой дискретности и малой погрешности перемещения. Недостатками данной передачи являются: низкое развиваемое усилие, сложность конструкции, сложность системы управления приводом, однако, для целевой задачи данные недостатки не являются столь существенными.

При создании макета шестистепенного привода типа «гексапод» в ОАО «ИСС» был сконструирован и изготовлен линейный привод (см. рис. 1), в состав которого входили:

- бесколлекторный электродвигатель Махон ЕС-32 с датчиком поворота ротора;
- промежуточный цилиндрический редуктор с передаточным отношением 36,68;
- передача типа винт-гайка скольжения с перемещением за один оборот винта 1 мм.
- выходной шток;
- корпус.

Ввиду того, что к макету «гексапода» не предъявлялись высокие требования в части дискретности и погрешности перемещения, в составе его линейных приводов была применена классическая передача винт-гайка скольжения. Для сравнения технических характеристик линейных приводов в случае применения иной линейной передачи были проведены экспериментальные исследования изготовленного привода. В процессе проведения испытаний были получены следующие характеристики:

- развиваемое осевое усилие: 100 кгс;

- диапазон линейного перемещения выходного штока: 200 мм;
- теоретическая дискретность перемещения выходного штока: 0,002 мкм;
- погрешность линейного перемещения выходного штока: $\pm 0,3$ мм;
- масса привода: 1200 г;
- габаритные размеры: внешний диаметр – 60 мм, длина – 485 мм.

Как видно из экспериментальных данных, при достаточно высокой теоретической дискретности, применение привода на основе классической передачи винт-гайка скольжения в составе высокоточных механизмов оказалось невозможным из-за высокой погрешности перемещения, которая определялась, главным образом, большим люфтом в зацеплении резьб винт-гайка скольжения. Кроме того, малое число точек контакта в данной передаче ведет к низкой жёсткости, что неприемлемо для высокоточных механизмов.

На основе полученных результатов, можно сделать вывод, что для создания высокоточного линейного привода необходимо использовать в его составе линейную передачу с большим количеством точек контакта и с возможностью выборки люфта в сопряжении резьб винта и гайки. Данному требованию полностью удовлетворяет безлюфтовая роликвинтовая передача с разрезной гайкой, на основе которой был сконструирован и изготовлен высокоточный линейный привод (рис. 2, 3), включающий в себя:

- бесколлекторный электродвигатель Махон ЕС-32 с датчиком поворота ротора;
- промежуточный планетарный редуктор, выполненный по схеме 3К с передаточным отношением 37,46 (см. рис. 4);
- рециркуляционную РВП SKF PVK 8x1R 243/347 с перемещением за один оборот винта 1 мм.
- выходной шток;
- корпус.

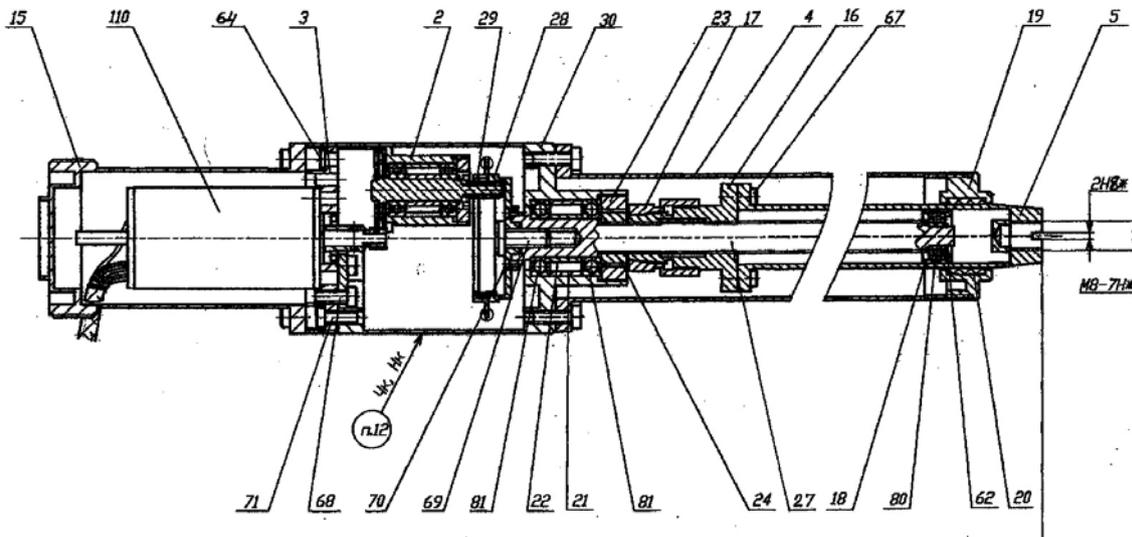


Рис. 1. Общий вид линейного привода для макета шестистепенного привода типа «гексапод»

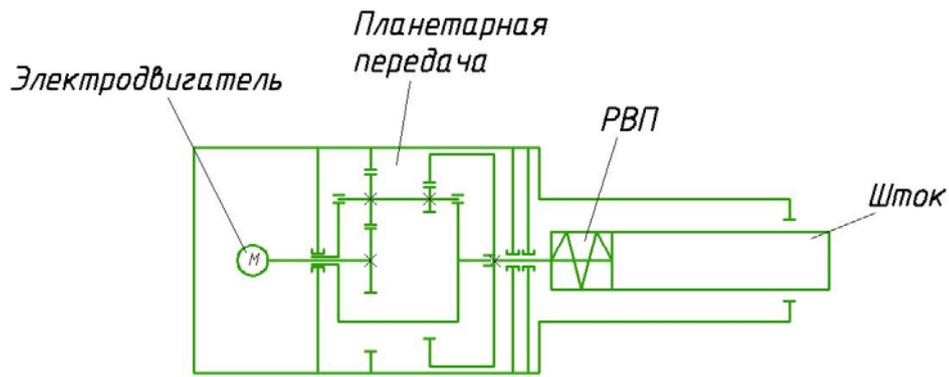


Рис. 2. Кинематическая схема высокоточного линейного привода на основе РВП

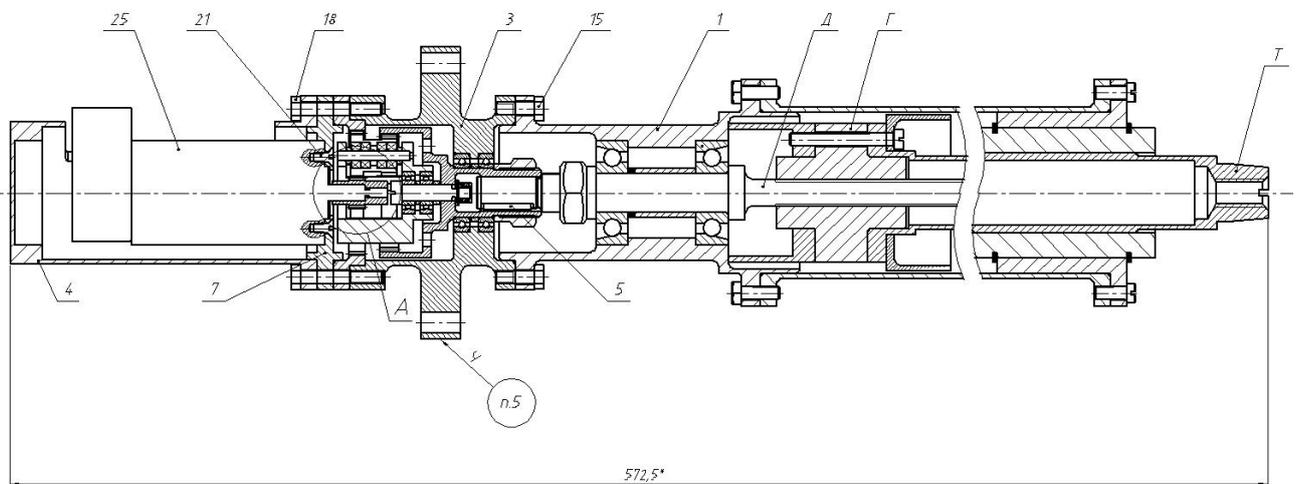


Рис. 3. Общий вид высокоточного линейного привода на основе РВП

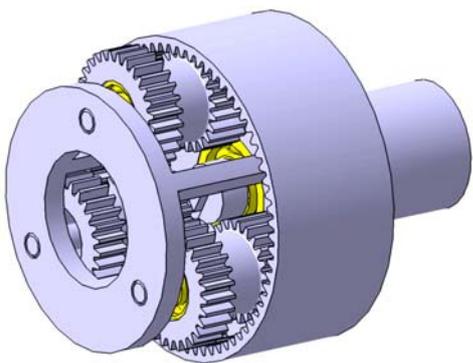


Рис. 4. Планетарный редуктор, выполненный по схеме 3К

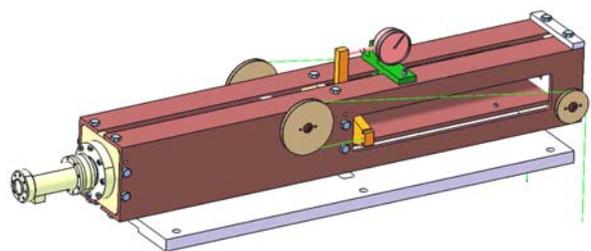


Рис. 5. Измерительный стенд для проверки параметров высокоточного линейного привода

Для обеспечения проведения всего цикла проверок полученного линейного привода был изготовлен измерительный стенд (рис. 5). Данный стенд позволяет прикладывать осевую нагрузку на растяжение и на сжатие и проводить измерения, как с помощью микронного индикатора, так и с помощью интерферометра (рис. 6).

В процессе проведения испытаний были получены следующие характеристики привода:

- развиваемое осевое усилие: 60 кгс;
- диапазон линейного перемещения выходного штока: 197 мм;
- дискретность перемещения выходного штока: 0,002 мм;
- люфт: 0 мм;
- жесткость: 2 Н/мкм;
- масса: 1500 г;

– габаритные размеры: внешний диаметр – 80 мм, длина – 573 мм.

На рис. 7 представлен график зависимости относительной погрешности перемещения выходного штока привода от теоретического перемещения. На участке от 0 до 80 мм погрешность составила $\pm 0,01$ мм, однако на участке от 80 мм до 197 мм погрешность резко увеличивается до $\pm 0,04$ мм, что можно объяснить погрешностью нарезки резьбы винта. На рис. 8 представлен график зависимости накопленной погрешности перемещения на участке рабочего хода 0–197 мм. Из графика видно, что накопленная погрешность составила 0,35 мм. Исключить

данные погрешности можно путём учёта полученного закона изменения накопленной погрешности в блоке управления приводом и установкой датчика угла на винте РВП.

По результатам проверки параметров линейного привода на основе РВП можно сделать вывод о том, что использование РВП с разрезной гайкой вместо винта-гайки скольжения позволяет создать линейный привод с погрешностью перемещения $\pm 0,002$ мм, высокими осевой жёсткостью и нагрузочной способностью при условии учёта погрешностей нарезки резьбы в блоке управления приводом и установки датчика угла поворота винта РВП.

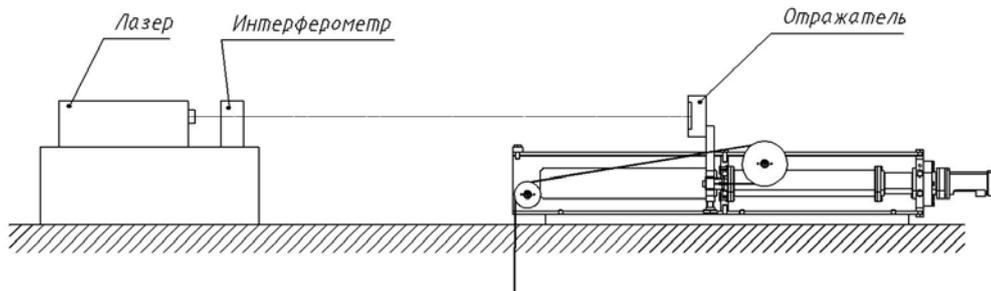


Рис. 6. Схема проведения измерений характеристик линейного привода с помощью интерферометра

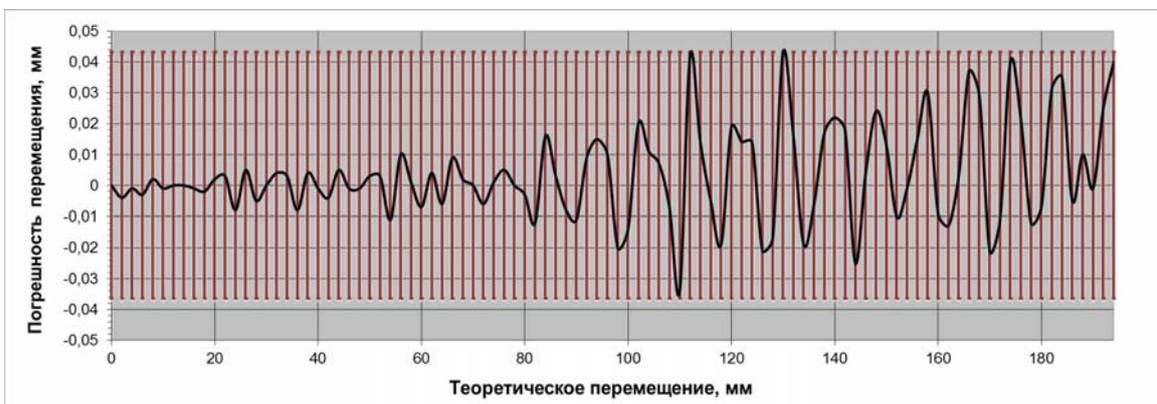


Рис. 7. Зависимость относительной погрешности перемещения выходного штока привода от теоретического перемещения



Рис. 8. Зависимость накопленной погрешности перемещения выходного штока привода от теоретического перемещения

В связи с постановкой задачи создания высокоточного привода для космического телескопа «Миллиметр», имеющего возможность перемещения выходного звена в пределах 20 мм с точностью $\pm 0,00025$ мм, возникает требование к дальнейшему увеличению дискретности и снижению погрешности перемещения линейного привода. Для решения данной задачи использование РВП не представляется возможным из-за невозможности нарезки резьбы такой точности. Для решения данной проблемы предлагается разделить механизм на две части: грубую и точную. Грубая передача будет обеспечивать перемещение на большие расстояния с невысокой точностью, а точная будет использоваться для точной подстройки выходного звена и, как следствие, компенсации неточностей в первой передаче. Взяв за прототип линейную передачу на основе УСП, применённую в составе космического телескопа «Джеймс Вебб», в ОАО «ИСС» в рамках эскизного проектирования высокоточного устройства авторами была разработана линейная передача на основе УСП (рис. 9), а также проведено теоретическое исследование ее характеристик. В результате было выяснено, что применение линейной передачи на основе УСП позволит обеспечить дискретность привода до 0,0005 мм при погрешности перемещения 0,00025 мм. В процессе разработки встают следующие задачи:

- обеспечение необходимой жёсткости привода;
- обеспечение высокого развиваемого усилия;
- исключение мертвого хода привода.

Функционально разработанный линейный привод состоит из:

- электродвигателя;
- шариковинтовой передачи SKF с погрешностью перемещения 0,02 мм;
- точного линейного привода, принцип действия которого основан на упругих свойствах материала;
- штока;
- корпуса.

Точный линейный привод в свою очередь состоит из:

- электродвигателя;
- цилиндрического редуктора;
- УСП.

На этапе проектирования привода возникает ряд проблем, которые связаны с конструкцией точной части привода:

- отсутствие опыта проектирования передач подобного рода;
- выбор схемы упругой части точного привода и ее теоретический силовой расчет;
- обеспечение одновременно высокой точности перемещения, достаточной жесткости и высокого осевого усилия;
- сложность обеспечения обратной связи, в связи с отсутствием линейных датчиков достаточной точности.

Для задач управления линейным приводом подходят либо шаговые, либо бесколлекторные электродвигатели, оснащенные датчиками углового положения ротора. Для грубой части привода возможно использовать либо ШВП, либо РВП, так как они обеспечи-

вают необходимую жесткость, высокую точность перемещения, а также имеют возможность выборки люфта. В составе сконструированного линейного привода используются:

- шаговый электродвигатель грубой передачи Phytron VSH-UNVC;
- шаговый электродвигатель точной передачи Phytron VSH-UNVC;
- шариковинтовая передача SKF грубой передачи с перемещением за один оборот винта 2,5 мм;
- упругая система с перемещением выходного звена на 0,02 мм при повороте входного (кулачка) на угол 50°.

В результате привод будет обладать следующими проектными характеристиками:

- развиваемое усилие – 6 кгс;
- рабочий ход – 20 мм;
- погрешность выдвижения – не более 0,00025 мм;
- дискретность выдвижения – 0,0005 мм;
- вес привода – 850 г.

Таким образом, замена РВП УСП позволяет значительно увеличить дискретность и снизить погрешность перемещения, однако, осевое усилие и осевая жёсткость будут резко снижены ввиду высокой податливости УСП.

В случае необходимости увеличения передаточного числа, а также уменьшения осевых размеров линейной передачи возможна замена РВП на ВВП. На основе методик расчёта, разработанных под руководством В. А. Турышева, была спроектирована высокоточная ВВП (рис. 10) с возможностью выборки зазора в сопряжении резьб винта и гайки, а также проведено теоретическое исследование её характеристик. В состав разработанной ВВП входят:

- бесколлекторный электродвигатель Maxon EC45 Flat, с моментом на выходном валу 1140 гс·см при скорости 5000 об/мин;
- планетарный редуктор, выполненный по схеме 3К с передаточным отношением 37,46;
- волновая винтовая передача (ВВП) с расчётным линейным перемещением гайки относительно винта за один оборот волнового генератора 0,03 мм.

ВВП включает в себя следующие элементы:

- гибкий винт со средним диаметром резьбы в недеформированном состоянии 49 мм;
- жесткую гайку со средним диаметром резьбы 50 мм;
- трехволновой кулачковый генератор, конструкция которого позволяет выбирать зазор в зацеплении резьб винта и гайки. По результатам проведенных проектных работ линейный привод будет обладать следующими характеристиками:

- осевое усилие: 65 кгс;
- диапазон линейного перемещения: 20 мм;
- дискретность перемещения гайки: 0,0008 мм (на 1 оборот выходного вала двигателя);
- жесткость: 2 Н/мкм;
- погрешность линейного перемещения: $\pm 0,003$ мм;
- масса привода: 850 г;
- габаритные размеры: внешний диаметр – 66 мм, длина – 123 мм.

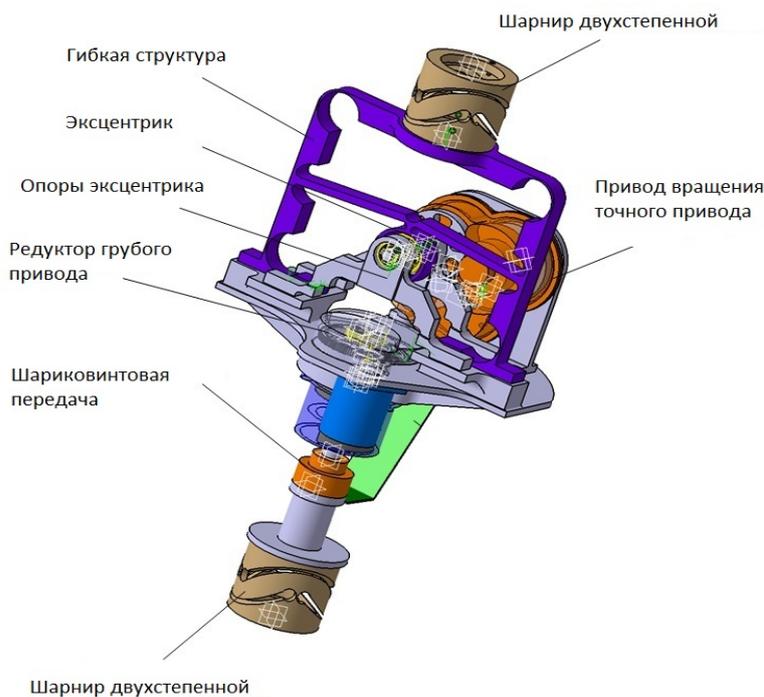


Рис. 9. Общий вид высокоточного линейного гибридного привода

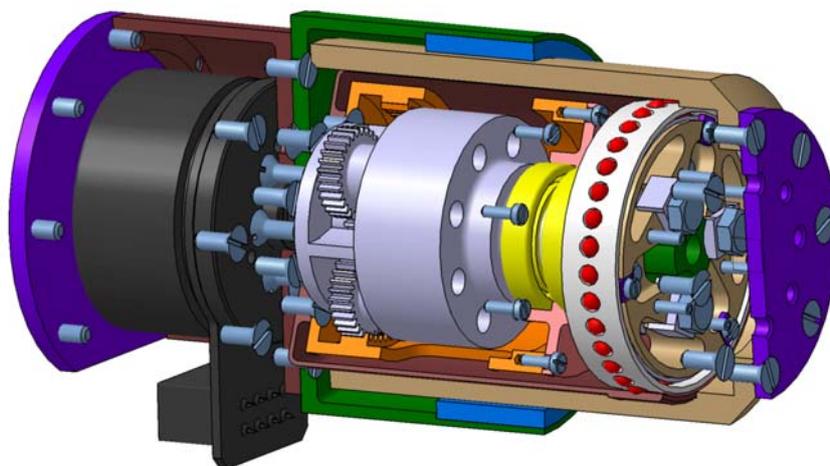


Рис. 10. Общий вид высокоточного линейного привода на основе ВВП

Исходя из полученных данных, можно сделать вывод о том, что дискретность перемещения выходного звена меньше погрешности перемещения в 10 раз, а, следовательно, дальнейшее увеличение дискретности не приведёт к повышению точности линейного перемещения. Как видно из приведенных выше характеристик, основную роль в погрешности линейного позиционирования играют люфты в планетарном редукторе и погрешность шага при нарезке резьб винта и гайки, однако при проведении анализа планетарного редуктора было выяснено, что его вклад в погреш-

ность незначителен. Таким образом, для создания высокоточного линейного привода требуется минимизация погрешности нарезки резьбы.

Рассмотрев весь перечень представленных механизмов, можно сделать вывод о несомненной перспективности дальнейшего использования в прецизионных линейных приводах передач типа РВП, ШВП, ВВП и УСП. Дальнейшее увеличение точности РВП, ШВП и ВВП возможно только за счет увеличения точности нарезки сопрягаемых резьб. Кроме того, существует настоятельная необходимость в разработ-

ке методик расчёта линейных передач на основе УСП, так как применение данных передач позволит существенно увеличить дискретность и точность позиционирования по сравнению с РВП, ВВП и ШВП.

Библиографические ссылки

1. Пат. РФ № 2451220. F16H 25/22//F16B 33/02. Планетарная роликовинтовая передача с модифицированной резьбой роликов / Д. А. Блинов, В. И. Мафтер, А. Я. Ляпунов и др. Оpubл. 20.05.2012, Бюл. № 14.
2. Пат. США № 1831080. Шариковинтовая передача / Б. Ф. Шмидт. Оpubл. 10.11.1931.
3. Пат. США № 29779964. Прецизионный линейный привод / К. В. Массер. Оpubл. 18.04.1961.
4. Пат. США № 5969892. G02B 7/182. Редуктор с гибкой структурой / Р. Б. Слашер. Оpubл. 19.10.1999.
5. Козырев В. В. Конструкции роликовинтовых передач и методика их проектирования : учеб. пособие / Владимирский гос. ун-т. Владимир, 2004. 100 с.
6. Блинов Д. С. Разработка научно-методических основ расчета и проектирования планетарных роликовинтовых механизмов, имеющих многочисленные избыточные связи : дис. ... д-ра техн. наук. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007.
7. Турышев В. А., Василенко Н. В. Волновые передачи в линейном приводе и приводе повышенной точности для работы в специальных условиях (вакууме) : отчет о науч.-исслед. Работе / Красноярский политех. ин-т, 1980.

References

1. Blinov D. A., Mafter V. I., Ljapunov A. Ja., Frolov A. V., Starkov Ju. A., Laptev I. A., Kulish A. V. Patent № 2451220 Russian Federation, F16H 25/22//F16B 33/02. Planetary roller screw with modified roller thread. Pub. 20.05.2012. Bull. №14.
2. Schmidt B. F. Patent № 1831080 USA. Ball bearing screw and nut. Pub. 10.11.1931.
3. Musser C. W. Patent № 2979964 USA. Microlinear actuator. Pub. 18.04.1961.
4. Slusher R. B. Patent № 5969892 USA, G02B 7/182. Motion reducing flexure structure. Pub. 19.10.1999.
5. Kozyrev V. V. *Konstrukcii rolikovintovykh peredach i metodika ih proektirovaniya* (Roller screw design and development methods). Tutorial. Vladimir State University, Vladimir, 2004. 100 p.
6. Blinov D. S. *Razrabotka nauchno-metodicheskikh osnov raschjota i proektirovaniya planetarnykh rolikovintovykh mehanizmov, imejushhih mnogochislennye izbytochnye svyazi* (Calculation and design methodology of planetary roller screws with numerous redundant constraints development). Doctoral thesis, MGTU named after N. E. Bauman, Moscow, 2007.
7. Turyshev V. A., Vasilenko N. V. *Volnovye peredachi v linejnom privode i privode povyshennoj tochnosti dlja raboty v special'nykh uslovijah* (vacuume) (Harmonic drives in linear actuator and precision actuator for special terms application (vacuum)). Research record, Krasnoyarsk Polytechnic Institute, Krasnoyarsk, 1980.

© Бойко С. О., Комаров С. А., Харитонов С. Г., Улыбушев Е. А., Леканов А. В., 2013

УДК 629.735.33.015.4: 534

КОНТРОЛЬ ЗАЗОРОВ В ПОДВИЖНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РЕЗОНАНСНЫХ ИСПЫТАНИЙ

В. А. Бернс, А. В. Долгополов

Новосибирский государственный технический университет
Россия, 630073, Новосибирск, просп. К. Маркса, 20. E-mail: v.berns@yandex.ru

Зазоры в подвижных соединениях механизмов и систем передачи усилий или перемещений приводят к рас- согласованию между управляющим сигналом и реакцией объекта управления на этот сигнал. Поэтому повышенные зазоры являются дефектами этих конструкций. В настоящей работе решается задача контроля таких зазоров по результатам резонансных испытаний механизмов и систем. Это позволяет осуществлять выявление дефектов без разборки конструкции и последующего инструментального контроля размеров ее деталей. Для выявления дефектов в местах соединений устанавливаются датчики ускорений. В окрестности частоты фазового резонанса объекта контроля по сигналам датчиков строятся фигуры Лиссажу, которые для идеальной системы являются эллипсами. Наличие зазоров в соединениях определяется по отклонениям фигур Лиссажу от эллиптической формы. Дефектным соединениям соответствуют максимальные отклонения фигур Лиссажу. Получены формулы для оценки величин зазоров по характерным значениям резонансных частот. Эффективность разработанной методики иллюстрируется на примере контроля люфтов в механической проводке управления самолетом Су-34. Эта методика может использоваться в контроле трансмиссий вертолетов и автомобилей, механических проводок управления летательными аппаратами.

Ключевые слова: подвижные соединения, зазор, резонансные испытания, контроль.