УДК 62-231.22

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИАЛЬНОГО БИЕНИЯ ШТОКА АКТУАТОРА ДЛЯ РАДИОТЕЛЕСКОПА

Мамаев И.М., Кириллов А.В., Федотов О.В., Филимонов В.Н.

ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», Владимир, e-mail: vano_33reg@mail.ru

Сравнительные экспериментальные исследования радиального биения штока актуатора и анализ его влияния на точность линейного перемещения штока были проведены в ходе ресурсных испытаний двух макетных образцов актуаторов на базе планетарных роликовинтовых исполнительных механизмов в соответствии с техническим заданием. Первый макетный образец актуатора имеет исполнительный механизм с зубчатыми венцами, изготовленными лезвийным способом обработки. Зубчатые венцы второго макетного образца получены электроэрозионным способом. Экспериментальные исследования проводились на стенде, разработанном на базе программно-аппаратного комплекса LabVIEW, позволяющего в автоматизированном режиме управлять электромеханическим приводом актуатора, снимать, обрабатывать и визуализировать данные, поступающие с датчиков положения штока. Анализ полученных экспериментальных данных позволяет предложить технико-технологические решения, направленные на уменьшение радиального биения штока и повышение точности его линейного положения.

Ключевые слова: актуатор, ролико-винтовой механизм, экспериментальные исследования, радиальное биение, точность

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE RADIAL RUNOUT OF AN ACRUATOR ROD FOR A RADIO TELESCOPE

Mamaev I.M., Kirillov A.V., Fedotov O.V., Filimonov V.N.

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, e-mail: vano_33reg@mail.ru

Comparative experimental studies of the radial runout of the actuator rod and an analysis of its influence on the accuracy of the rod linear motion were carried out in the course of resource tests of two prototype actuator models based on planetary roller-screw actuators in accordance with the technical specification. The first mockup sample of the actuator has an actuator with serrated crowns made by the blade method of processing. The gear rims of the second prototype are obtained by an EDM. Experimental studies were carried out on a stand developed on the basis of the LabVIEW software and hardware complex, which allows to control the electromechanical drive of the actuator in an automated mode, to remove, process and visualize data coming from the rod position sensors. The analysis of the obtained experimental data makes it possible to propose technical and technological solutions aimed at reducing the radial runout of the rod and increasing the accuracy of its linear position.

Keywords: actuator, roller screw, experimental research, radial runout, accuracy

Назначение и описание конструкции

Для подстройки отражающей поверхности рефлектора радиотелескопа необходимы прецизионные приводы линейного перемещения (домкраты-актуаторы). Разработка и исследование актуатора для радиотелескопа дальней космической связи проводились в рамках НИОКР по заказу ФИАН им. П.Н. Лебедева (г. Москва).

Актуатор выполнен в виде компактного электромеханического привода на базе шагового двигателя с полым ротором и самотормозящегося планетарного роликовинтового исполнительного механизма ПРВМ, который преобразует угловое перемещение вала двигателя в соответствующее по точности прямолинейное перемещение штока актуатора [1].

Конструкция актуатора (рис. 1) построена по схеме ходового цилиндра. Исполнительный ПРВМ состоит из винта 1, резьбовых роликов-сателлитов 2 равной длины с винтом, опорной 3 и ходовой 4 гаек, каждая из которых выполнена в виде полугаек для создания предварительного натяга в резьбовых сопряжениях. Для предотвращения проскальзывания резьб на концах резьбовых роликов нарезаны зубчатые венцы 5, входящие в зацепление с зубчатыми венцами 6 на концах винта и с неподвижным зубчатым венцом (эпициклом) 7 опорной гайки.

Полый магнитный ротор 8 шагового двигателя закреплен на коническом хвостовике винта ПРВМ и находится внутри статора 9 с обмотками. Статор зажат между двумя крышками 10 и 11 корпуса с помощью болтовых соединений. В верхней крышке имеется направляющий цилиндр 12 для прямолинейного перемещения штока 13 актуатора вместе с ходовой гайкой ПРВМ.

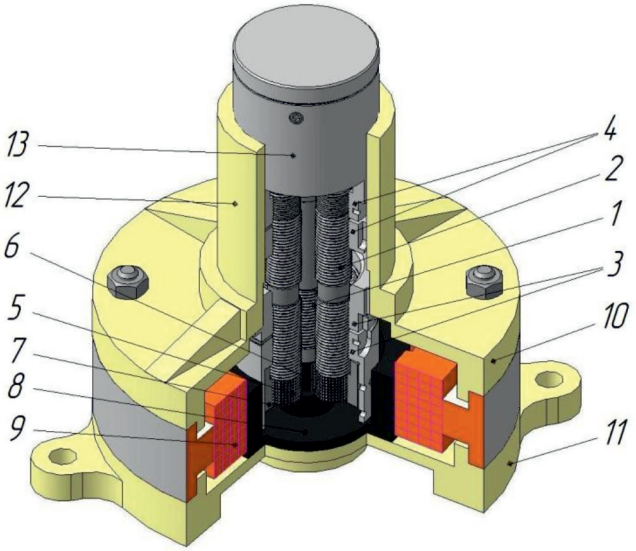

Рис. 1. Конструкция актуатора: 1 – винт, 2 – резьбовые ролики-сателлиты, 3 – опорная гайка, 4 – ходовая гайка, 5 – зубчатые венцы роликов, 6 – зубчатые венцы винта, 7 – эпицикл опорной гайки, 8 – ротор шагового двигателя, 9 – статор шагового двигателя, 10 и 11 – крышки корпуса актуатора, 12 – направляющий цилиндр, 13 – шток актуатора

Цели и задачи исследования

Качество электромеханического привода в основном определяется оптимальной структурой и точностью кинематической цепи исполнительного механизма. Зубчатые венцы ПРВМ имеют малый модуль m = 0,3–0,4 мм и работают при малых скоростях и нагрузках, синхронизируя планетарное движение роликов. По своему функциональному назначению ПРВМ относятся к отчетным механизмам. Поэтому из установленных стандартами норм точности определяющей для ПРВМ является кинематическая точность, которая одновременно служит основным эксплуатационным показателем исполнительного ПРВМ и прецизионного электромеханического привода в целом.

В ходе ресурсных испытаний различных макетных образцов актуаторов наряду с периодическими измерениями кинематической точности, КПД, жесткости [1], в соответствии с техническим заданием, были проведены экспериментальные исследования радиального биения штока актуатора и анализ его влияния на точность линейного перемещения штока.

Материалы и методы исследования

Для сравнительных испытаний выбраны два макетных образца актуаторов на базе ПРВМ 30x0,25x10. Оба испытуемых образца имеют средние диаметры резьб ходовой и опорной гаек 30 мм и при рабочем ходе штока 10 мм позволяют получить за один оборот винта линейное перемещение штока равное четверти шага резьбы (0,25 мм). Вместе с тем каждый из испытуемых образцов имеет конструктивные отличия, определяющие его достоинства и недостатки. Первый – один из ранних образцов с тремя резьбовыми роликами в конструкции. Как и винт, резьбовые ролики имеют разные числа заходов резьб на ходовом и опорном участках (двухвенцовые ролики). Второй – модернизированный образец актуатора содержит в конструкции четыре резьбовых ролика с однозаходной резьбой на обоих участках и винт, у которого отсутствует резьба на ходовом участке.

Необходимость при сборке одновременно размещать длинные резьбовые ролики в ходовой и опорной гайках накладывает ограничение на конструктивные параметры механизмов с высокой редукцией, в которых перемещение ходовой гайки меньше шага резьбы. Так, в модифицированном образце актуатора собираемость конструкции обеспечивается за счет смещения резьбы на опорном участке соответствующего ролика относительно ходового в осевом направлении на величину

$$\Delta P = P(z_{3O} - z_3)\,(i - 1)/n_р,$$

где P – шаг резьбы; z_{3O} – число заходов резьбы опорной гайки; z_3 – число заходов резьбы ходовой гайки; $n_р$ – число роликов; i = 1,2… $n_р$ – порядковый номер ролика. Числам заходов правых резьб в формуле присваивается положительный знак, левых – отрицательный [2].

Для обоих образцов резьбы винтов и роликов изготавливались на резьбошлифовальных станках без ЧПУ. Следует заметить, что для модифицированного образца с однозаходными резьбами на роликах этот процесс менее трудоемкий и не требует повышенной квалификации станочника.

Рис. 2. Испытательный стенд: 1 – актуатор, 2 – планшайба, 3 – платформа, 4 – блок управления шаговым двигателем, 5 – датчик линейного положения, 6 – шток актуатора, 7 – система первичной обработки данных, 8 – ЭВМ, 9 – оголовок штока актуатора, 10 – линейная направляющая, 11 – кронштейн

Измерения радиального биения штока модифицированного актуатора осуществлялись на испытательном стенде (рис. 2), разработанном на базе программно-аппаратного комплекса LabVIEW [3]. Актуатор 1 установлен на планшайбе 2 массивной жесткой платформы 3. Стенд оснащен блоком управления 4 шагового двигателя, датчиком углового положения винта ПРВМ (на рис. 2 не показан), датчиком линейного положения 5 для измерения радиального биения штока 6 актуатора, системой первичной обработки данных 7 и ЭВМ 8.

Измерительный плунжер датчика линейного положения контактирует с наружной цилиндрической поверхностью оголовка 9 штока в одной точке. Датчик закреплен на подвижной каретке шариковой линейной направляющей 10, рельс которой установлен на неподвижной стойке параллельно продольной оси актуатора. Каретка линейной направляющей вместе с датчиком линейного положения приводится в движение от оголовка штока через кронштейн 11.

Управление работой стенда осуществляется виртуальным прибором, разработанным в среде графического программирования LabVIEW 2013. Блок-схема виртуального прибора состоит из трех взаимосвязанных ветвей графического кода. Первая ветвь кода отвечает за работу шагового двигателя, генерируя управляющие сигналы в соответствии с заданными начальными условиями работы шагового двигателя. Управляющие сигналы поступают в модуль NI 9401 (National Instruments, США), установленный в шасси NI cDAQ-9178. Модуль генерирует цифровой сигнал уровня TTL, поступающий в блок управления шаговым двигателям SMD-42 (ООО «НПФ Электропривод», Санкт-Петербург) и приводящий в движение шаговый двигатель ДШР-110-0,4-1,8 (ОАО «Микмар», Санкт-Петербург). Вторая ветвь кода отвечает за сбор и обработку сигналов с датчиков линейного положения MT-2571 (Heindenhain, Германия) и углового положения ЛИР119А (СКБ «Измерительные системы», Санкт-Петербург), а также визуализацию полученных данных. В третьей ветви кода производится запись данных в файл.

Измерение радиального биения штока актуатора выполнялось во всем диапазоне рабочего хода ПРВМ (10 мм) без нагрузки на штоке последовательно в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, проходящих через продольную ось актуатора. После снятия экспериментальных данных в одной из плоскостей, актуатор поворачивался на планшайбе на 90 градусов и эксперимент повторялся.

Линейное положение штока актуатора рассчитывалось по показаниям датчика углового положения винта ПРВМ. Для экономии ресурсов ЭВМ цикл генерации и сбора данных, поступающих на счетчики шасси, повторялся через каждые 50 мс, что при линейной скорости штока актуатора 10 мм/мин позволило получить на всем диапазоне хода массив данных из 1200 точек.

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 3 видно, что радиальное биение штока модифицированного актуатора при рабочем ходе не превышает 0,014 мм. Ранее было установлено, что радиальное биение штока первого актуатора составляет 0,070…0,080 мм [1].

Повышенное радиальное биение штока первого актуатора можно объяснить, во-первых, технологической сложностью изготовления резьб двухвенцовых роликов на станке без ЧПУ по сравнению с одновенцовыми роликами модифицированного образца. Это повлекло за собой повышенные погрешности геометрических размеров резьбовых поверхностей двухвенцовых роликов. Во-вторых, за счет совершенствования технологии зубчатые венцы сопряжен-

ных деталей модифицированного актуатора изготовлены на электроэрозионном станке с более высокой степенью точности, чем при лезвийной обработке.

Радиальные биения зубчатых венцов приводят к отклонениям осей роликов в радиальном направлении δS_1, что является причиной осевого смещения ходовой гайки δS_2 относительно номинального положения (рис. 4). В данной конструкции ПРВМ ходовая гайка 1 заодно со штоком перемещается вдоль блока винта 2 с роликами 3, представляющего, по сути, условный винт. Один конец условного винта установлен в упорном подшипнике, функции которого выполняет опорная гайка. Радиальные смещения осей роликов приводят к изменению среднего диаметра резьбы условного винта. В свою очередь, это вызывает дополнительное осевое перемещение как блока винта с роликами относительно опорной гайки, так и ходовой гайки вместе со штоком относительно блока винта с роликами. В совокупности эти перемещения определяют погрешность осевого перемещения штока актуатора, обусловленную радиальным биением роликов. Исследованиями установлено, что эта погрешность может составлять основную долю суммарной кинематической погрешности ПРВМ без предварительного натяга в гайках. Если зазор в резьбовых сопряжениях ПРВМ выбран за счет предварительного натяга в гайках, то радиальное биение роликов оказывает значительно меньшее влияние на точность линейного перемещения штока актуатора [4–6].

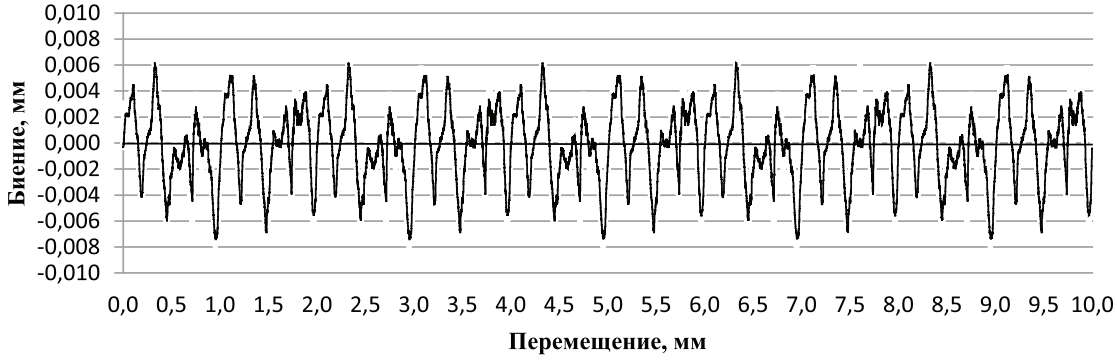

Рис. 3. График радиального биения штока актуатора

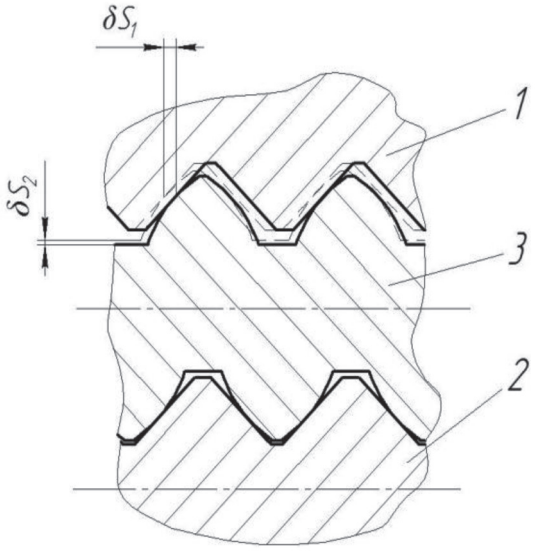

Рис. 4. Схема осевого смещения ходовой гайки при радиальном биении роликов: 1 – ходовая гайка, 2 – винт, 3 – ролики, δS_1 – отклонение осей роликов в радиальном направлении, δS_2 – осевое смещение ходовой гайки

Радиальному биению штока актуатора способствует также зазор между штоком и направляющим цилиндром. Однако при минимизации этого зазора возникают технологические сложности, связанные с изготовлением внутренней цилиндрической поверхности направляющего цилиндра большой длины с малыми допусками на отклонение размеров и форм. Кроме того, увеличиваются потери на трение в направляющей скольжения штока, то есть снижается КПД актуатора. С другой стороны, при выборке повышенного зазора между штоком и направляющим цилиндром под действием радиальной силы 650 Н, возникающей на штоке в эксплуатационных условиях, происходит изгиб блока винта с роликами, что также повышает потери на трение в сопряженных резьбах ПРВМ и может привести даже к его заклиниванию. Поэтому целесообразно не минимизировать зазор между штоком и направляющим цилиндром, а изготавливать их с оптимальными допусками, гарантирующими такой зазор в направляющей скольжения штока, при котором радиальная сила на штоке полностью уравновешивается реакциями только со стороны корпуса и направляющего цилиндра.

Заключение

Совершенствование технологии изготовления резьб и зубчатых венцов ПРВМ, а также изготовление направляющей скольжения штока с оптимальными допусками позволили в 4 раза снизить радиальное биение штока модифицированного актуатора. При этом погрешность его линейного перемещения соответствует 3 классу точности согласно стандарту Part 3 ISO 3408-3, DIN.690151, вместо 5–7 классов точности, достигнутых при изготовлении более ранних образцов актуаторов [1, 4].

Перспективным техническим решением указанной проблемы может быть установка во внутренней полости направляющего цилиндра шариковой втулки, снабженной каналом рециркуляции шариков [7]. Шариковая втулка имеет большое число точек контакта выстроенных в линию шариков с наружной цилиндрической поверхностью штока актуатора и, по сути, представляет собой линейный подшипник качения большой жесткости. Замена направляющей скольжений штока на направляющую качения обеспечивает достаточную жесткость конструкции, которая позволяет передавать радиальную силу, действующую на шток, через направляющий цилиндр на корпус актуатора без снижения КПД исполнительного механизма даже при минимальном зазоре в направляющей.

Список литературы

1. Рябов К.В. Разработка и исследование актуатора для радиотелескопа с активным рефлектором / К.В. Рябов, О.В. Федотов, В.Н. Филимонов // Вестник машиностроения. – 2014. – № 6. – С. 14–20.

2. Патент 2339332 Российская Федерация, МПК A 61 B 17/66, F 16 H 25/22, 1/34. Ортопедический аппарат остеосинтеза / Козырев В.В.; заявитель и патентообладатель Козырев Вячеслав Васильевич. – № 2006103056/14; заявл. 02.02.2006; опубл. 27.11.2008, Бюл. № 33 (П.ч.). – 2 с.

3. Трэвис Дж., Кринг Дж. LadVIEW для всех. 4-е изд., перераб. и доп. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 904 с.

4. Козырев В.В. Конструкции роликовинтовых передач и методика их проектирования: учеб. пособие. – Владимир: Редакционно-издательский комплекс ВлГУ, 2004. – 102 с.

5. Козырев В.В. Исследование влияния геометрических погрешностей зубчатых венцов на кинематическую погрешность передачи с длинными резьбовыми роликами / В.В. Козырев, С.О. Худяков // Вестник машиностроения. – М.: Машиностроение, 2005. – № 8. – С. 15–19.

6. Морозов В.В. Кинематическая точность ролико-винтовых механизмов / В.В. Морозов, А.В. Жданов // Вестник машиностроения. – М.: Машиностроение, 2015. – № 3. – С. 19–25.

7. Патент на полезную модель 154534 Российская Федерация, МПК F 16 H 1/00. Электромеханический привод поступательного перемещения / Мамаев И.М., Крылов А.В., Рябов К.В., Филимонов В.Н.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Владим. гос. ун-т им. А.Г. и Н.Г. Столетовых. – № 2014146824/11; заявл. 20.11.14; опубл. 27.08.15, Бюл. № 24 (II ч.). – 2 с.