

## МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ ВЫБОРА СТРУКТУРЫ, СОСТАВА И ПАРАМЕТРОВ ПРИВОДА С ПРИМЕНЕНИЕМ ПЛАНЕТАРНОЙ РОЛИКОВИНТОВОЙ ПЕРЕДАЧИ ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

Носов А.С.

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

Излагаются теоретические и экспериментальные основы создания привода с исполнительным механизмом на базе планетарной роликвинтовой передачи для повышения точности воспроизведения заданного закона движения исполнительных элементов технологического оборудования и технических систем ракетных и ракетно-космических комплексов.

*Ключевые слова:* привод, планетарная роликвинтовая передача, повышение точности, методика проектирования, потери на трение.

В настоящее время к силовым приводам предъявляются требования по повышению нагрузочной способности, точности позиционирования, надежности, долговечности, КПД, стойкости к ударным нагрузкам и ряду других параметров. Повышаются необходимые скорости и ускорения выходных звеньев приводов. Приводы должны легко устанавливаться на изделие, заменяться и обслуживаться; 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.

Анализ требований, предъявляемых к приводам специальных агрегатов, показывает, что они должны обеспечивать:

- высокое быстродействие и точность отработки заданного закона движения;
- высокую точность перемещения;
- синхронную работу двух и более приводов;
- большую глубину (диапазон) регулирования скорости выходного звена;
- высокую плавность движения на малых (микро) скоростях перемещения изделий большой массы;
- минимальные и стабильные по величине энергопотери.

Помимо указанного, силовой привод должен иметь простую технологичную конструкцию, малую массу и габариты, высокую надежность в эксплуатации.

В последнее время в нашей стране существенно повысился спрос на приводы на базе планетарной роликвинтовой передачи (ПРВП) как исполнительного механизма (ИМ), особенно для военной и авиационной техники. Целый ряд предприятий пытается освоить серийное производство ПРВП, для чего необходимо решать вопросы обоснования расчета и проектирования ПРВП, технологии изготовления деталей передач и их сборки, а также высокоточного метрологического контроля ответственных размеров деталей ПРВП с использованием соответствующей оснастки.

ПРВП (рис. 1) состоит из ходового винта 1, гайки 2, резьбовых роликов 3, на концах которых нарезаны зубчатые венцы 4, двух сепараторов 5, в которых размещены цилиндрические цапфы роликов. Сепараторы установлены по обоим концам гайки и свободно вращаются, не касаясь гайки и винта. На обоих торцах гайки расположены кольца с внутренними зубчатыми венцами 6, с которыми зацепляются зубчатые венцы 4 на роликах. При необходимости выбора боковых зазоров между витками резьбы винта, роликов и гайки выполняют

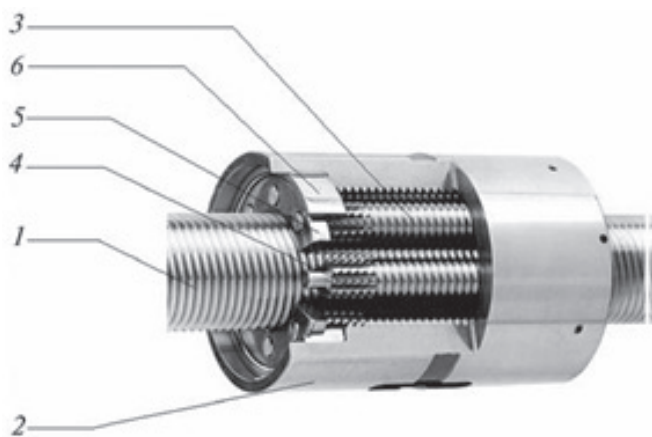


Рис. 1. Планетарная роликовинтовая передача

гайки составными из двух частей с возможностью их взаимного осевого перемещения [2].

ПРВП имеет целый ряд преимуществ:

- высокую нагрузочную способность;
- возможность получить малые подачи при высокой нагрузке;
- высокую надежность;
- малую чувствительность к колебаниям температуры;
- удобство монтажа и демонтажа передачи;
- возможность работы с большими скоростями вращения;
- высокий КПД;
- малую металлоемкость.

В отечественной литературе имеются лишь краткие упоминания об этих передачах, в основном в ряде информационных и методических разработок Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых и Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана.

Повысить точность позиционирования привода можно путем предварительного определения кинематической погрешности ходового винта, а также зазоров и упругих деформаций механической системы. Для определения кинематической погрешности ПРВП можно использовать математическое моделирование, установив функциональную связь между подводимым к винту крутящим моментом и линейным перемещением гайки. При построении математической модели ПРВП примем следующие допущения: трение в подшипниках опор винта и в паре винт-гайка является линейным, не учитываются гироскопические и инерционные силы в ПРВП; жесткость винта и гайки по длине неизменна. При определении инерции механизма пренебрежем массой роликов; возможные погрешности изготовления элементов не учитываются [5, 6].

Если винт вращается с угловой скоростью  $\omega$ , то угловая скорость радиус-вектора оси ролика будет равна

$$\omega_1 = \frac{\omega d_B}{2d} = \frac{\omega d_B}{2d_B + d_p} = \frac{\omega k}{2k + 2}, \tag{1}$$

где  $d$  — диаметр окружности центров роликов (рис. 2);

$d_B$  — основной диаметр резьбы винта;

$d_p$  — основной диаметр резьбы ролика;

$$k = \frac{d_B}{d_p}. \tag{2}$$

Угловая скорость вращения ролика вокруг своей оси

$$\omega = \frac{\omega d_B d_r}{2dd_p} = \frac{\omega d_B (d_B + 2d_p)}{2d_p (d_B + d_p)} = \frac{\omega k + 2}{2k + 1}. \tag{3}$$

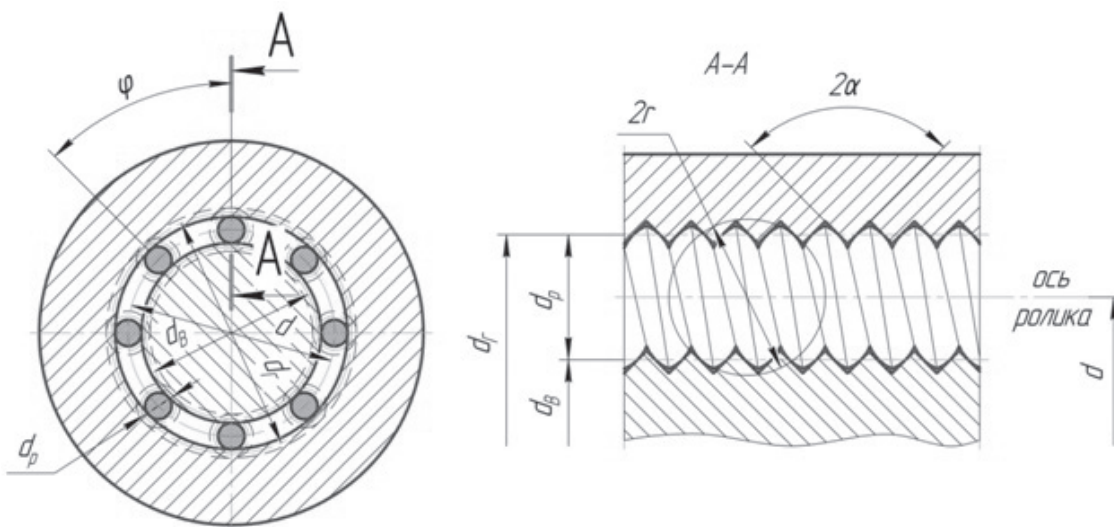


Рис. 2. Поперечный разрез передачи

Осевое перемещение ролика относительно гайки за один оборот винта определяется следующим образом [5, 6]:

$$H_1 = \frac{1}{2} \frac{k}{k+1} n_1 t \pm \frac{1}{2} k \frac{k+2}{k+1} t = \frac{1}{2} k t \left( \frac{n_1}{k+1} \pm \frac{k+2}{k+1} \right), \quad (4)$$

где  $t$  — шаг резьбы;  $n$  — число заходов резьбы;  $k$  — параметр передачи  $2 < k < 5$  (при  $k > 5$  — увеличение число заходов резьбы на винте; при  $k < 2$  — возрастают габариты передачи);  $n_1$  — число заходов резьбы гайки.

Для того 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

$$H_2 = \frac{t}{2} \frac{k(k+2)}{k+1} \mp \frac{k n_b t}{2(k+1)} \pm n_b t = \frac{1}{2} \frac{k+2}{k+1} (k \pm n_b) t, \quad (5)$$

где  $n_b$  — число заходов резьбы винта; сложение соответствует одинаковому направлению резьбы винта и гайки, а вычитание — различному.

Перемещение гайки за один оборот винта равно

$$H = H_1 + H_2. \quad (6)$$

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

Представленные в табл. 1 данные переработаны из рекомендаций для требуемой кинематики ПРВП [6].

На основе результатов анализа известных научных работ [1–3], а также выполненных автором статьи исследований и расчетов [6] разработана

Таблица 1

Результаты кинематического анализа параметров ПРВП

$d_b$ , мм	$d_p$ , мм	$d_r$ , мм	$n_r$	$n_b$	$t$ , мм	$H$ , мм
24	8	40	5	5	0,5	2,5
24	8	40	5	5	1	5
24	8	40	5	5	2	10
32	8	48	6	6	0,5	3
32	8	48	6	6	1	6
32	8	48	6	6	2	12
92	23	138	6	6	0,5	3
92	23	138	6	6	1	6

схема привода для монтажно-стыковочного кантователя (рис. 3).

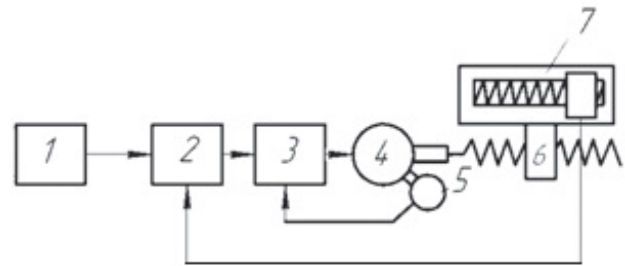


Рис. 3. Структурная схема следящего привода с исполнительным механизмом ПРВП: 1 — управляющее устройство; 2 — регулятор положения; 3 — регулятор скорости; 4 — двигатель; 5 — тахогенератор; 6 — ПРВП; 7 — линейный измерительный преобразователь

Выполнение привода по данной схеме на базе ПРВП с шаговым электродвигателем и датчиками обратной связи позволит значительно сократить габариты, уменьшить массу, повысить точность перемещения и позиционирование привода на различных режимах. Поэтому весьма актуальной является задача по созданию методов проектирования этих устройств с заданными динамическими характеристиками, надежностью и долговечностью. В ряде случаев необходимо постоянное взаимодействие между электрической и механической частями: подстраивание под направление меняющейся во времени нагрузки, компенсация накопленных погрешностей, генерирование закона движения в реальном времени с помощью систем управления. Поэтому необходимо использовать электромеханический привод (ЭМП), выполненный по новой схеме, объединяющий механическую и электрическую части в одном узле [1].

На основе проведенных исследований математических моделей и известных методик [3, 4, 6] была разработана методика (рис. 4) обоснования структуры и параметров перспективного привода с ИМ ПРВП.

Разработанная методика включает семь этапов — от получения технического задания до сборки и испытаний привода с ПРВП.

Для решения подобных проблем специалистами филиала ФГУП «ЦЭНКИ» — «КБ «Мотор», МАДИ и МГТУ им. Н. Э. Баумана предложено использование планетарной роликовинтовой передачи как исполнительного механизма привода.

Проводятся теоретические и экспериментальные исследования изготовленной фрикционной планетарной роликовинтовой передачи  $48 \times 12$  (рис. 5), и подготовлена система управления на спе-

<b>Предварительный этап</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• анализ параметров технического задания</li> <li>• определение схемы привода</li> <li>• определение методики проектирования</li> <li>• разработка математической модели</li> <li>• моделирование начального варианта</li> </ul>
<b>Этап проектирования</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• кинематический анализ ИМ</li> <li>• силовой расчет ИМ</li> <li>• силовой расчет составных частей</li> <li>• определение параметров системы управления</li> <li>• моделирование привода</li> <li>• кинематический и динамический анализ привода</li> </ul>
<b>Оптимизация по заданным критериям</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• оптимизация конструкции</li> <li>• итоговый расчет геометрических, кинематических и статистических характеристик передачи</li> <li>• оптимизация системы управления</li> </ul>
<b>Анализ разработки</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• анализ конструкции ИМ методом конечных элементов</li> <li>• анализ динамических характеристик</li> <li>• анализ системы управления ЭМП</li> </ul>
<b>Оформление документации</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• разработка технологии изготовления</li> <li>• подготовка конструкторской и технической документации</li> </ul>
<b>Изготовление</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• подготовка программ для ЧПУ</li> <li>• изготовление ИМ</li> <li>• изготовление составных частей</li> <li>• подготовка вспомогательных элементов</li> </ul>
<b>Сборка и испытания</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• сборка ИМ</li> <li>• приработка и смазка ИМ</li> <li>• обкатка ИМ</li> <li>• проверка кинематики ИМ</li> <li>• сборка ЭМП</li> <li>• сборка системы управления</li> <li>• настройка системы управления</li> <li>• отработка заданного закона движения</li> <li>• проверка на соответствие с ТЗ</li> </ul>

Рис. 4. Блок-схема алгоритма методики обоснования выбора структуры, состава и параметров привода с ПРВП

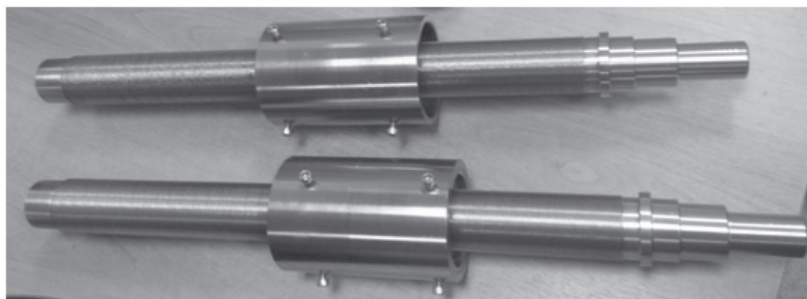


Рис. 5. Планетарная роликовинтовая передача 48 × 12

циализированном стенде для обкатки передачи (рис. 6).

Научные исследования ведутся в филиале ФГУП «Центр эксплуатации объектов наземной

космической инфраструктуры» — «Конструкторское бюро «Мотор» на фрезерном станке ЧПУ Hardinge Bridgeport GX1000. Средство измерения выбирается исходя из требуемой точности переда-

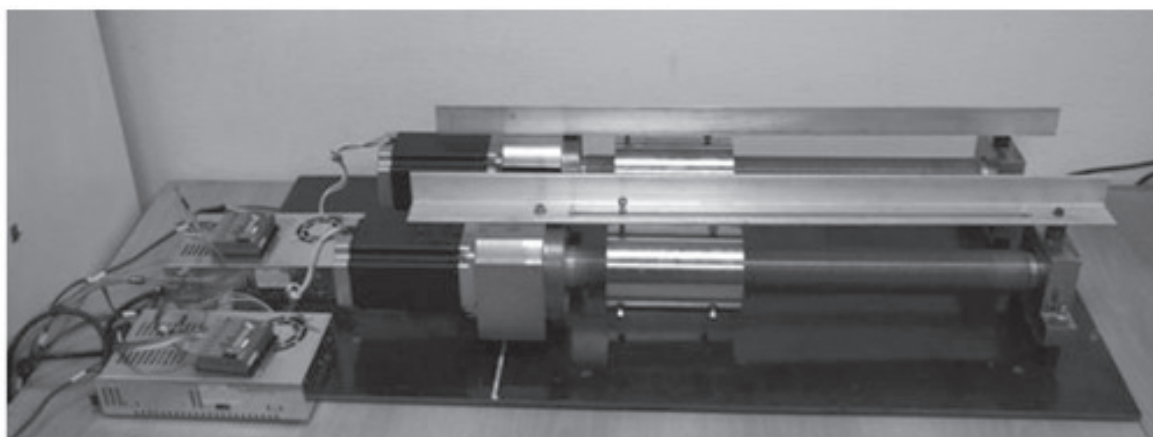


Рис. 6. Общий вид стенда обкатки ПРВП и системы управления

Таблица 2

Результаты испытаний кинематической точности передачи для точности изготовления, соответствующей 8 классу

		Перемещение, оборотов, мм					$\sigma_{\Delta}$ , мкм	
		1/3 (4мм)	2/3 (8 мм)	1 (12мм)	$1\frac{1}{3}$ (16мм)	$1\frac{2}{3}$ (20мм)		2 (24 мм)
На холостом ходу	1 передача	0,0077	0,0088	0,0094	0,0106	0,0110	0,0108	0,0097
		0,0070	0,0090	0,0098	0,0104	0,0090	0,0110	0,0094
		0,0075	0,0076	0,0084	0,0098	0,0100	0,0100	0,0089
Под действием нагрузки 0,98кН	1 передача	0,0062	0,0064	0,0065	0,0065	0,0066	0,0067	0,0065
		0,0061	0,0062	0,0064	0,0066	0,0065	0,0067	0,0064
		0,0052	0,0060	0,0058	0,0062	0,0063	0,0060	0,0060
На холостом ходу	2 передача	0,0070	0,0074	0,0080	0,0094	0,0082	0,0110	0,0085
		0,0066	0,0068	0,0082	0,0078	0,0112	0,0102	0,0085
		0,0068	0,0076	0,0080	0,0090	0,0085	0,0104	0,0084
Под действием нагрузки 0,98кН	2 передача	0,0062	0,0064	0,0060	0,0066	0,0065	0,0062	0,0063
		0,0058	0,0060	0,0058	0,0068	0,0062	0,0064	0,0062
		0,0056	0,0059	0,0061	0,0058	0,0066	0,0062	0,0060

чи. Для исследований применялась цифровая измерительная головка Mahr Extramess 2000 с допускаемой погрешностью  $G = 0.6$  мкм.

В табл. 2 приведены результаты испытаний кинематической точности передачи для точности изготовления, соответствующей 8 классу.

Перед каждым следующим циклом измерения проводилась обкатка передач на стенде (рис. 6).

**Выводы**

Использование научно-методического подхода и результатов проведенных исследований позволяет:

- учитывать запасы долговечности для контактно-усталостных разрушений, эксплуатационного износа и качества смазочного слоя;

- определять оптимальное значение массы привода для обеспечения заданного быстродействия без перерегулирования;

- снизить отклонение результатов экспериментальных исследований от теоретических исследований;

- разработать научно-методический аппарат сопровождения результатов автоматизированного проектирования привода с высокими динамическими характеристиками, заданной надежностью и долговечностью, реализованный в CAD/CAM/CAE-системе.

Планетарные роликовинтовые передачи являются в настоящее время наиболее перспективными устройствами, преобразующими вращательное движение в поступательное.

Автор выражает благодарность научным руководителям:

А.Г. Варочко, Д.С. Блинову, А.В. Сизанову, А.Н. Сове.

**Библиографический список**

1. Ехлар. Электроцилиндры серии GSX: каталог продукции. — М.: ООО «Прогрессивные технологии», 2009. — 36 с.
2. Козырев В.В. Конструкции роликвинтовых передач и методика их проектирования. — Владимир: ВлГУ, 2004. С. 8-14.
3. Жданов А.В., Дуери Х. Автоматизированное проектирование мехатронных приводов систем управления полетов в CAD/CAM/CAE- системах // Материалы научно-технической конференции научной школы молодых ученых и специалистов «Прикладные задачи механики и теплообмена в авиационной». Воронеж: ВорГТУ, 2001. 242 с.
4. Фролов К.В. Машиностроение. Энциклопедия. — М.: Машиностроение, 2012. Т. IV-2. Кн. 1. — 520 с.
5. Петренко А.М. Специальные винтовые механизмы в силовых приводах. — М.: МАДИ, 1997. — 86 с.
6. Носов А.С. Силовой электромеханический привод с применением планетарной роликвинтовой передачи повышенной точности // Вестник Московского авиационного института. 2015. Т.22. №4. С. 100-107.

## JUSTIFICATION TECHNIQUES FOR THE STRUCTURE, CONFIGURATION AND PARAMETERS OF A DRIVEGEAR WITH ROLLER DRIVE OF INCREASED ACCURACY AND OPERATIONAL RELIABILITY SELECTION

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**

At present, the requirements placed on power actuators include increase of load capacity, positioning accuracy, reliability, durability, efficiency, impact resistance, and a number of other parameters. The required speeds and accelerations of the output element of the drives are increasing as well. Drives should be easily mounted on the object, replaceable and adjustable. Their servicing should be simple, and their control should be reliable and easily programmable. For most products, especially of the space industry, it is necessary to reduce the weight of the drives and maintenance facilities. The environmental requirements placed on the drives are constantly toughening.

The analysis of the requirements placed on the drives for special aggregates reveals that they should provide:

- Fast response and playback accuracy of a desired motion law;
- High precision of moving;
- Synchronous operation of two or more drives;
- Greater amount (range) of the output element speed control;
- Higher soft ride of large mass products at low (micro) speeds;
- Minimal and stable energy losses values.

In addition to the abovementioned, a power actuator should have a simple technological design, low weight and size, and high operating reliability. Recently, the

demand for the planetary roller-type actuators (PRTA) as the actuating mechanism (AM), especially for the military and aviation equipment, increased significantly in our country. A number of companies are trying to master serial production of PRTA, which requires to address the issues of PRTA analysis validation and design, production technology of the actuator parts and their assembly, as well as high-precision metrological control of PRTA parts critical dimensions, using the appropriate equipment.

PRTA has a number of advantages:

- High load capacity;
- The possibility to provide light feed at high load;
- High reliability;
- Low sensitivity to temperature variations;
- Ease of mantling and dismantling of the transmission;
- Ability to work with high rotation speeds;
- High efficiency;
- Low metal consumption.

Based on the conducted studies of mathematical models and well-known techniques [3, 4], a technique for a prospective PRTA AM structure and parameters justification was developed.

To solve such problems, the experts of FSUE “CENKI” - “DB “Motor”, MADI and N. E. Bauman MSTU proposed to use the planetary roller-type transmission as the actuating mechanism.

Theoretical and experimental studies under the scientific supervision of Professor A.N. Sova and candidate of technical sciences A.V. Sizanov are conducted on the manufactured friction planetary roller-type transmission  $48 \times 12$ , and the control system on a specialized workbench for transmission running test is prepared.

Research is conducted at the branch office of FSUE “Center for exploitation of space ground-based infrastructure”, - “Design Bureau “Motor” using the CNC milling machine Hardinge Bridgeport GX1000. A measuring device is selected based on the desired accuracy of transmission. Digital measuring head Mahr Extramess 2000 with permissible error  $G = 0.6 \mu\text{m}$  was used in the study.

### Conclusion

Thus, implementation of scientific and methodological approach and the conducted research allow us:

— Take into account the longevity reserves of contact fatigue damage, in-service wear, and quality of the lubricating layer;

— Determine the optimal value of the actuator mass to ensure a pre-set speed without overshoot;

— Reduce deviation of the experimental results from theoretical results;

— Develop scientific and methodological support of the results of the machine-aided design of the actuator with high dynamic performance, reliability and durability implemented with CAD/CAM/CAE system.

At present, planetary roller-type transmission is the most promising device that converts rotational motion into linear.

**Keywords:** drive, roller drive, accuracy increase, design technique, frictional losses, efficiency.

### References

1. *Exlar. Elektrosilindry serii GSX: katalog produktsii* (Exlar. Electric cylinder GSX series product catalog), Moscow, Progressivnye tekhnologii, 2009. 36 p.
2. Kozyrev V.V. *Konstruktsii rolikovintovykh peredach i metodika ikh proektirovaniia* (Rollerscrew gear structures and design techniques), Vladimir, VIGU, 2004, pp. 8-14 (102 p.).
3. Zhdanov A.V., Dueri Kh. *Materialy nauchno-tekhnicheskoi konferentsii nauchnoi shkoly molodykh uchenykh i spetsialistov*, Voronezh, VorGTU, 2001, pp. 144-146 (242 p.).
4. Frolov K.V. *Mashinostroenie. Entsiklopediya* (Engineering. Encyclopedia), 2012, vol. IV-2, book 1, 520 p.
5. Petrenko A.M. *Spetsial'nye vintovye mekhanizmy v silovykh privodakh* (Special screw mechanisms in the power drives), Moscow, MADI, 1997, 86 p.
6. Nosov F.S. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2015, vol. 22, no. 4, pp. 100-107.