

Расчет и конструирование машин

УДК 621.833

DOI 10.18698/0536-1044-2017-8-3-7


Планетарный роликвинтовой механизм преобразования вращательного движения в поступательное с фасонными роликами

О.А. Ряховский, А.Н. Воробьев, А.С. Марохин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

A Planetary Roller Screw Mechanism with Shaped Rollers for Converting Rotational Motion to Linear Motion

O.A. Ryakhovskiy, A.N. Vorobyev, A.S. Marokhin

BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1 e-mail: rolgan@mail.ru

i Рассмотрены конструктивные особенности и кинематика планетарного роликвинтового преобразователя вращательного движения гайки в поступательное движение винта. Ролики выполнены фасонными с резьбой на наружном диаметре. Конструкция механизма упрощает процесс шлифования резьбы на роликах после термообработки. Основным недостатком конструкции «перевернутого» планетарного роликвинтового механизма является необходимость шлифования внутренней резьбы длинной гайки после закаливания резьбы. Применение фасонных роликов и гайки позволило существенно упростить их соединение в осевом направлении. Благодаря зубчатым зацеплениям ролик и гайка вращаются в одном направлении с практически равной тангенциальной скоростью на контактирующих поверхностях. Так как применение высокоэффективных линейных актуаторов на основе планетарных роликвинтовых механизмов ограничено существенной стоимостью производства этих конструкций, снижение их себестоимости является актуальной задачей. Этого можно достигнуть с помощью конструкций механизмов, производство которых не подразумевает использования такой дорогостоящей операции, как внутреннее шлифование резьбовых поверхностей.

Ключевые слова: фасонные ролики, кольца с внутренними зубьями, ведущая гайка, фасонная гайка

i This paper describes design features and kinematics of a planetary roller-screw converter of the rotational motion of the nut to the linear motion of the screw. The rollers are shaped and have threads on the outer diameter. The mechanism design simplifies the process of thread grinding on the rollers after heat treatment. The main disadvantage of the «inverted» planetary roller-screw mechanism is the necessity to grind the internal thread in a long nut after thread hardening. The use of shaped rollers and nut made it possible to considerably simplify assembly in the axial direction. Due to gearing, the rollers and the nut rotate in one

direction with almost the same tangential velocity on the contact surfaces. As the application of highly efficient linear actuators based on planetary roller-screw mechanisms is limited by production cost, reducing the cost becomes an important task. This can be achieved by using designs that do not involve expensive operations such as grinding internal threads, as part of their manufacturing process.

Keywords: «inverted» planetary roller screw mechanism, shaped rollers, gears with internal teeth, driving nut, shaped nut

Планетарные роликовинтовые механизмы (ПРВМ), преобразующие вращательное движение в поступательное, в которых трение скольжения, реализуемое в обычной паре винт-гайка, в основном заменено трением качения резбовых роликов, расположенных между винтом и гайкой, нашли широкое применение в современном машиностроении благодаря малым потерям на трение, компактными габаритными размерам, высокой точности и плавности перемещения винта (гайки) [1–3].

Однако эти механизмы, имеющие сложную конструкцию, требуют высокой точности изготовления деталей. Особую трудность представляет изготовление «перевернутого» ПРВМ с ведущей гайкой вследствие необходимости шлифования внутренней резьбы длинных гаек.

Цель работы — создание ПРВМ, конструкция которого позволила бы упростить технологию производства механизма путем отказа от шлифования внутренней резьбы.

ПРВМ с фасонными роликами, частично лишенный этих недостатков, показан на рисунке. Ведущая фасонная гайка 6 с конусными кольцевыми канавками установлена в неподвижном корпусе 4 на радиально-упорных шариковых подшипниках качения 5 и таким образом может вращаться, но зафиксирована от осевых перемещений. Гайка, жестко связанная с ротором (на рисунке, *a* не показан) электродвигателя, является ведущим звеном механизма. Фасонные ролики 8 имеют конусные кольцевые канавки, в которые входят кольцевые конусные выступы фасонной гайки. На наружном диаметре роликов нарезана резьба, сопряженная с резьбой на ходовом винте 10. Винт удерживается от вращения и имеет свободу перемещения вдоль оси *Z*. На концах роликов установлены сепараторы 1 по посадке с зазором, удерживаемые кольцами 9. На концах ролика нарезаны зубчатые венцы 2, которыми ролики зацепляются с внутренними зубьями колец 7, прочно соединенных с ведущей гайкой.

Для упрощения точной сборки кольца 7 предварительно устанавливаются в отверстия гай-

ки с небольшим зазором. Для соединения кольца 7 с гайкой на их сопрягаемые поверхности предварительно наносят анаэробный материал (например, анаэробный клей LOCTITE 648 или Done Deal DD6692; время полимеризации — 3...5 ч), обеспечивающий прочное соединение колец 7 с гайкой после полимеризации клея.

Отверстия 3, выполненные на торцах колец 7, позволяют поворотом последних вокруг оси обеспечить совпадение зубьев и впадин в зацеплении гайки с роликами. Число зубьев во внутренних кольцах 7 должно быть кратно числу роликов в механизме.

Зубчатые венцы при нарезании на концах ролика могут сместиться в окружном направлении один относительно другого. Применение колец 7 с внутренними зубьями позволяет упростить процесс изготовления и сборки зацепления роликов с гайкой.

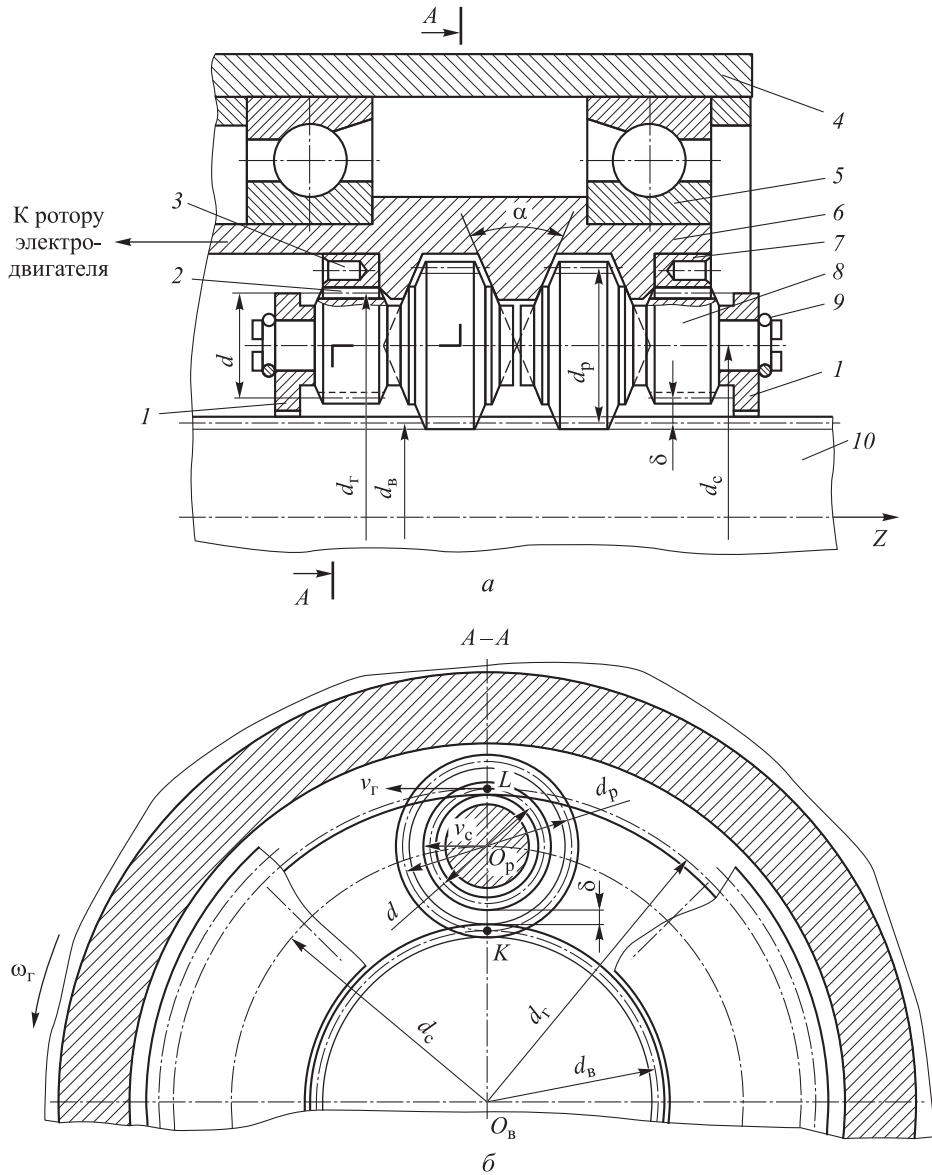
Таким образом, представлен механизм, превращающий вращательное движение ведущей гайки в поступательное движение ходового винта, удерживаемого от вращения.

Резьбу на ходовом винте и внешнем диаметре фасонных роликов можно просто шлифовать после закалки резьбы на этих роликах и винте. Центральный угол α (см. рисунок, *a*) следует принять равным примерно 40° [4].

Фасонная гайка имеет на внутреннем диаметре кольцевые конические выступы, которые входят в ответные кольцевые конические впадины на фасонных роликах. Последние сопрягаются с гайкой коническими кольцевыми выступами и приводятся во вращение зацеплениями зубчатых венцов и колец 7, расположенными на концах роликов и гайки соответственно.

Осевая сила с винта на ролики передается резьбой и далее с роликов на гайку — кольцевыми коническими поверхностями на гайке и роликах. Конические контактирующие поверхности гайки и ролика вращаются в одном направлении благодаря внутреннему зацеплению зубчатых венцов и колец 7.

Чтобы минимизировать проскальзывание контактирующих конических поверхностей



ПРВМ с фасонными роликами

гайки и роликов, необходимо выдержать равенство начального диаметра зубчатого зацепления и среднего диаметра рабочих конических поверхностей.

Анализ кинематики механизма [3] позволяет установить связь между линейной скоростью перемещения ходового винта v_b с частотой вращения ведущей гайки n_r . За один оборот гайки ролик, соединенный с ней зубчатой передачей, сделает n_p оборотов:

$$n_p = \frac{d_r}{d} = \frac{z_r}{z_p},$$

где d_r — делительный диаметр колеса с внутренними зубьями, нарезанными на кольцах 7

(диаметр гайки), $d_r = m z_r$ (m — модуль зубчатого зацепления; z_r — число зубьев на гайке); d — делительный диаметр зубчатых венцов, нарезанных на концах ролика, $d = m z_p$ (z_p — число зубьев на ролике).

Резьба на наружном диаметре ролика совмещается с резьбой винта. Резьбу на роликах и винте можно получать нарезанием или накатыванием. В последнем случае рабочие поверхности резьбы оказываются нагартованными, и необходимость в их закалке и последующем шлифовании может отпасть.

При работе механизма ролики совершают планетарное движение — вращаются как вокруг своей оси с частотой n_p , так и вместе с сепаратором вокруг оси винта с частотой

вращения сепаратора n_c , определяемой по формуле [5]

$$n_c = \frac{v_c}{\pi d_c}.$$

Здесь v_c — окружная скорость сепаратора; d_c — диаметр окружности расположения осей роликов (диаметр сепаратора), $d_c = d + 2(m + \delta)$, где δ — радиальный зазор (см. рисунок, а) [6–8].

Сепаратор вместе с роликами вращается вокруг винта, при этом точка контакта K (см. рисунок, б) резьбы ролика с резьбой винта является мгновенным центром скоростей, и взаимные перемещения резьбы ролика относительно резьбы винта отсутствуют.

Таким образом, ролики, установленные в сепараторе, вращаются вокруг оси винта с окружной скоростью сепаратора [5]

$$v_c = \pi d_c n_c.$$

Из подобия треугольников KLv_Γ и $KO_P v_c$ (см. рисунок, б) окружные скорости v_Γ и v_c (соответственно на делительном диаметре гайки d_Γ и диаметре сепаратора d_c) связаны отношением

$$v_c = v_\Gamma \frac{KO_P}{KL} = v_\Gamma \frac{d_p}{d_p + d},$$

где d_p — средний диаметр резьбы ролика.

Определим скорость перемещения винта вдоль оси [9]. При частоте вращения гайки n_Γ сепаратор вращается с частотой

$$n_c = n_\Gamma \frac{d_\Gamma}{d_c} \frac{d_p}{d_p + d}.$$

При этом винт перемещается относительно ролика со скоростью

$$v_B = P i_B n_c = P i_B n_\Gamma \frac{d_\Gamma}{d_c} \frac{d_p}{d_p + d},$$

где P — шаг резьбы; i_B — заходность резьбы винта [10].

Вывод

Рассмотренный механизм, потенциально обладающий более низкой себестоимостью, чем механизмы классических конструкций, можно применить в линейных актуаторах, ненагруженных значительными осевыми силами из-за наличия скольжения в местах контакта роликов и гайки.

Литература

- [1] Бушенин Д.В. *Несоосные винтовые механизмы*. Москва, Машиностроение, 1985. 112 с.
- [2] Козырев В.В. *Конструкции, теория и методика проектирования и исследования планетарных передач винт-гайка с резьбовыми роликами и мехатронных модулей на их базе*. Владимир, Изд-во Владим. гос. ун-та, 2011. 238 с.
- [3] Блинов Д.С., Ряховский О.А., ред. *Планетарные роликовинтовые механизмы. Конструкции, методы расчета*. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 222 с.
- [4] Блинов Д.С., Ряховский О.А., Соколов П.А., Лаптев И.А. Определение размеров и полей допусков для основных деталей планетарных роликовинтовых передач. *Справочник. Инженерный журнал*, 2006, № 7, с. 1–24.
- [5] Ряховский О.А., Сорокин Ф.Д., Марохин А.С. Расчет ресурса по критерию изнашивания резьбы планетарного роликовинтового механизма. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2012, № 4, с. 42–49.
- [6] Бидерман В.Л. *Механика тонкостенных конструкций. Статика*. Москва, Машиностроение, 1977. 488 с.
- [7] Дьяконов В.П. *Mathematica 5.1/5.2/6. Программирование и математические вычисления*. Москва, ДМК-Пресс, 2008. 574 с.
- [8] Зубов Л.М., Карякин М.И. *Тензорное исчисление*. Москва, Вузовская книга, 2006. 120 с.
- [9] Ряховский О.А., ред. *Детали машин*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 465 с.
- [10] *SKF Catalogue roller screw 2005–2008*. Publication 4351 EN–2008-01. France, 88 p.

References

- [1] Bushenin D.V. *Nesoosnye vintovye mekhanizmy* [Misaligned screw mechanism]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1985. 112 p.

- [2] Kozyrev V.V. *Konstruktsii, teoriia i metodika proektirovaniia i issledovaniia planetarnykh peredach vint-gaika s rez'bovymi rolíkami i mekhatronnykh modulei na ikh baze* [Design theory and methods design and study of planetary transmission screw-nut screw rollers and mechatronic modules based on them]. Vladimir, VSU publ., 2011. 238 p.
- [3] *Planetarnye rolíkovintovye mekhanizmy. Konstruktsii, metody rascheta* [Planetary roller screw mechanisms. Design, calculation methods]. Ed. Blinov D.S., Riakhovskii O.A. Moscow, Bauman Press, 2006. 222 p.
- [4] Blinov D.S., Riakhovskii O.A., Sokolov P.A., Sokolov P.A., Laptev I.A. *Opređenje razmerov i polei dopuskov dlia osnovnykh detalei planetarnykh rolíkovintovykh peredach* [The sizing and margins of tolerance for the main parts of planetary roller screw gear]. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal* [Handbook. An Engineering journal]. 2006, no. S7, pp. 1–24.
- [5] Riakhovskii O.A., Sorokin F.D., Marokhin A.S. *Raschet resursa po kriteriiu iznashivaniia rez'by planetarnogo rolíkovintovogo mekhanizma* [Calculation of life time according to wear criterion of planetary roller screw mechanism thread]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building]. 2012, no. 4, pp. 42–49.
- [6] Biderman V.L. *Mekhanika tonkostennykh konstruktsii. Statika* [Mechanics of thin-walled structures. Statics]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1977. 488 p.
- [7] D'iakonov V.P. *Mathematica 5.1/5.2/6. Programmirovaniie i matematicheskie vychisleniia* [Mathematica 5.1/5.2/6. Programming and mathematical calculations]. Moscow, DMK-Press publ., 2008. 574 p.
- [8] Zubov L.M., Kariakin M.I. *Tenzornoe ischislenie* [Tensor calculus]. Moscow, Vuzovskaia kniga publ., 2006. 120 p.
- [9] *Detali mashin* [Machine parts]. Ed. Riakhovskii O.A. Moscow, Bauman Press, 2014. 465 p.
- [10] *SKF Catalogue roller screw 2005–2008*. Publication 4351 EN–2008-01. France, 88 p.

Статья поступила в редакцию 10.04.2017

Информация об авторах

РЯХОВСКИЙ Олег Анатольевич (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Основы конструирования машин». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: rolgan@mail.ru).

ВОРОБЬЕВ Александр Николаевич (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Основы конструирования машин». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

МАРОХИН Антон Сергеевич (Москва) — ассистент кафедры «Колесные машины». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Information about the authors

RYAKHOVSKIY Oleg Anatolievich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Fundamentals of Machine Design. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: rolgan@mail.ru).

VOROBYEV Aleksandr Nikolaevich (Moscow) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Fundamentals of Machine Design. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1).

MAROKHIN Anton Sergeevich (Moscow) — Assistant Lecturer, Department of Wheeled Vehicles. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1).