



РЯХОВСКИЙ
Олег Анатольевич
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

RYAKHOVSKIY
Oleg Anatol'evich
(Moscow, Russian Federation,
Bauman Moscow State
Technical University)



ВОРОБЬЕВ
Александр Николаевич
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

VOROB'EV
Aleksandr Nikolaevich
(Moscow, Russian Federation,
Bauman Moscow State
Technical University)



МАРОХИН
Антон Сергеевич
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

MAROKHIN
Anton Sergeevich
(Moscow, Russian Federation,
Bauman Moscow State
Technical University)

Планетарный роliko-винтовой механизм преобразования вращательного движения в поступательное, выполненный по «перевернутой» схеме

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

Планетарный роliko-винтовой механизм (ПРВМ), выполненный по «перевернутой» схеме, применяются в приводах различного назначения: станки, авиация (привод закрылок), нефтегазовая отрасль (привод за-слонок), механизмы стабилизации ствола танка и т. д. В настоящее время такие механизмы широко используются при изготовлении электроцилиндров, которые поставляются в виде отдельных модулей и могут быть использованы в составе различных автоматизированных систем производства, например, в сварочных манипуляторах. Поскольку области применения ПРВМ и электроцилиндров на их основе постоянно расширяются, то необходимы методы их проектирования и расчета.

В настоящее время большинство методов, описанных в литературе, носит рекомендательный характер, что создает трудности для их применения на производстве. Таким образом, разработка единого метода проектирования и расчета ПРВМ является актуальной задачей.

В статье рассмотрена конструкция ПРВМ с длинной гайкой (так называемый «перевернутый» механизм). Оценены достоинства и недостатки данной конструкции ПРВМ. Проанализирована кинематика механизма и рассмотрены основные геометрические параметры, влияющие на скорость перемещения винта с роликo-ками относительно гайки. Получено выражение для определения скорости осевого перемещения винта относительно гайки в зависимости от частоты вращения гайки, шага и заходностей гайки, роликo-ков и винта.

Результаты, полученные в ходе проведенного исследования, являются частью метода проектирования ПРВМ, однако уже на данной стадии могут быть применены при первичном конструировании и опытном производстве ПРВМ.

Ключевые слова: перевернутый планетарный роliko-винтовой механизм, кинематика механизма, гайка, ролик, винт.

An inverted planetary roller screw mechanism for converting rotary motion into linear

O.A. Ryakhovskiy, A.N. Vorob'ev, A.S. Marokhin

An inverted planetary roller screw mechanism (PRSM) is applied in various drives, such as machine tools, aircraft flap drives, oil and gas valve drives, mechanisms to stabilize tank barrels, etc. Currently, these mechanisms are widely used in manufacturing electric cylinders supplied as individual units and can be implemented in various automated production systems, such as welding

manipulators. Since PRSMs as well as electric cylinders using them find expanding applications, methods for their design and analysis need to be developed. Most of the methods described in the literature are advisory by nature and do not comply with the production requirements. Thus, the development of a unified method for the design and calculation of PRSMs is an urgent task. This paper describes the design of a PRSM with a long nut, that is, the so-called inverted mechanism. The advantages and disadvantages of this PRSM are evaluated. The kinematics of the mechanism is analyzed and the basic geometric parameters influencing the speed of the screw and rollers relative to the nut are considered. The speed of the axial movement of the screw relative to the nut is determined as a function of the frequency of rotation of the nut, the pitch and entries of the nut, rollers and screw. The results obtained in the study are part of the method of PRSM design but, even at this stage, they can be applied for the initial design and pilot production of PRSMs.

Keywords: inverted planetary roller screw mechanism, kinematics of mechanisms, nut, roller, screw.

В настоящее время электромеханический привод находит все большее применение в различных отраслях (станкостроение, авиастроение, нефтегазовая отрасль и т.д.). Рассмотрим распространенный вид компактного электромеханического привода — электроцилиндр.

При использовании этого механизма конструкция электроцилиндра получается компактной, благодаря тому, что ротор встроенного электродвигателя установлен на вращающейся гайке. Недостатком конструкции является большая длина гайки, усложняющая точное изготовление резьбы.

Рассмотрим особенности конструкции и расчет этого механизма [1]. Гайка 1, на которой закреплен ротор встроенного электродвигателя (на рис. 1 не показан) является ведущим звеном механизма. На винте 2, соединенном с толкателем 3, нарезана резьба 4 и два зубчатых венца 5, расположенных на концах резьбового участка (см. рис. 1).

На торцах резьбовых роликов 6 изготовлены цилиндрические цапфы, которыми ролики соединены с двумя сепараторами 7 по посадке с зазором. Каждый сепаратор сопрягается

с шейкой гладкой части винта по посадке с зазором и удерживается разрезным стопорным кольцом.

«Перевернутый» ПРВМ с опорами качения гайки, ротором и статором электродвигателя, показан на рис. 2.

Изображение механизма в разобранном состоянии представлено на рис. 3.

Рассмотрим принцип его работы. В отличие от планетарных зубчатых передач, у которых оси сателлитов перемещаются в плоскости, нормальной к оси вращения центрального колеса, в рассматриваемом механизме резьбовые ролики, являясь сателлитами, участвуют в трех движениях:

- 1) вращаются вокруг своих осей;
- 2) вместе с сепараторами вращаются вокруг оси винта (гайки);

- 3) обкатываясь по резьбе гайки, ролики вместе с винтом перемещаются вдоль оси гайки.

Таким образом, трение скольжения между витками резьбы винта и гайки в обычной паре скольжения винт—гайка заменено в основном трением качения роликов по гайке и винту.

Шаг резьбы на гайке, винте и роликах одинаковый, а заходности резьбы гайки, винта и роликов различные.

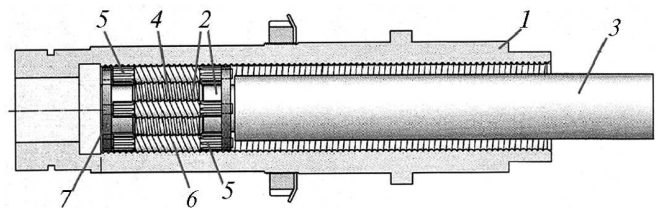


Рис. 1. Общий вид «перевернутого» ПРВМ [2]

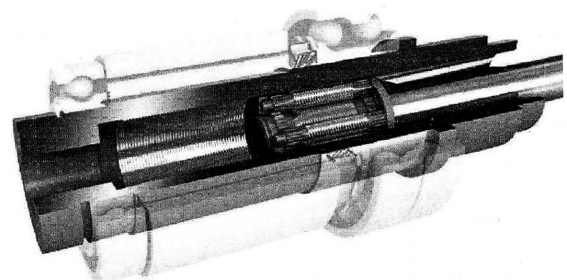


Рис. 2. «Перевернутый» ПРВМ с опорами качения гайки [2]

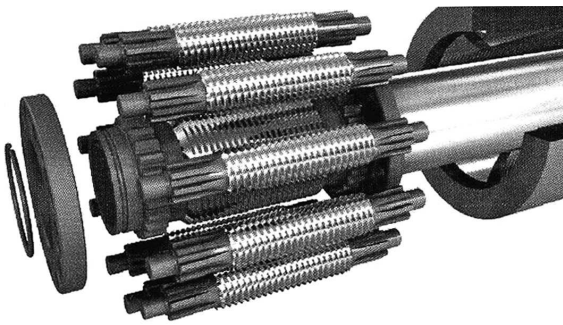


Рис. 3. «Перевернутый» ПРВМ в разобранном виде [2]

В ПРВМ разрабатываемой конструкции необходимая подача достигается за счет разности углов подъема резьбы гайки и ролика (рис. 4), т. е. за счет их заходностей и начальных диаметров, а углы подъема роликов и винта равны и противоположны по направлению для избежания смещения роликов относительно винта в осевом направлении.

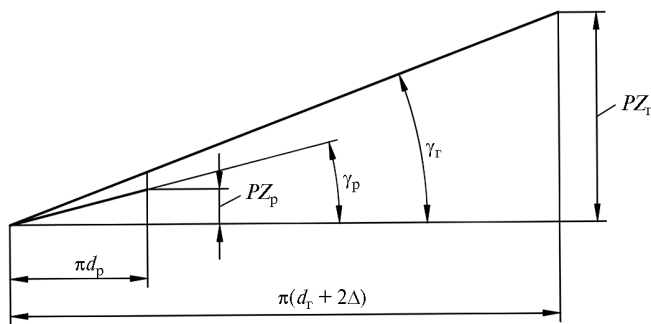


Рис. 4. Углы подъема резьбы гайки и ролика

Рассмотрим подробнее, какие условия необходимо выполнить, чтобы ролики при вращении не смещались относительно винта в осевом направлении [3].

Примем, что оси вращения ролика и винта неподвижны (нет планетарного движения ролика, относительно винта). Представим вращающиеся винт и ролик, как два цилиндра, диаметры которых равны средним диаметрам резьбы винта и ролика соответственно. При этом цилиндры могут смещаться вдоль оси вращения.

Допустим, что ролик и винт вращаются без проскальзывания. В этом случае $V_C^x = \omega_B \frac{d_B}{2} = \omega_P \frac{d_P}{2}$ (рис. 5):

$$\omega_P / \omega_B = d_B / d_P; \tag{1}$$

$$n_P / n_B = d_B / d_P, \tag{1a}$$

где ω_P, n_P — угловая скорость и частота вращения ролика; d_B, d_P — диаметр винта и ролика; ω_B, n_B — угловая скорость и частота вращения винта.

Рассмотрим движение ролика относительно винта в осевом направлении. Зафиксируем вращающийся винт от осевых перемещений. Проекция вектора скорости перемещения произвольной точки резьбового ролика, зацепляющегося с резьбой винта, на ось вращения винта определяется по формуле

$$V_C^z = n_B Pz_B, \tag{2}$$

где n_B — частота вращения винта, об/с; P — шаг резьбы, мм; z_B — заходность резьбы винта; Pz_B — ход винта, т. е. за один оборот точка ролика проходит путь в осевом направлении, равный ходу.

Рассмотрим движение вращающегося ролика в осевом направлении. При вращении с частотой n_P (см. рис. 5) ролик перемещается в осевом направлении со скоростью

$$V_P^z = n_P Pz_P, \tag{3}$$

или, используя соотношение (1a)

$$V_P^z = n_B \frac{d_B}{d_P} Pz_P. \tag{4}$$

Поскольку ролик и винт сопряжены посредством резьбы, запишем выражение для скорости перемещения ролика относительно винта, используя формулу (2) и (4), приняв, что резьба ролика — правая, а резьба винта — левая:

$$V_P^{z*} = n_B \left(\frac{d_B}{d_P} Pz_P - Pz_B \right). \tag{5}$$

В проектируемом механизме необходимо, чтобы $V_P^{z*} = 0$ м/с, тогда из (5) получим выражение

$$d_B / d_P = z_B / z_P, \tag{6}$$

связывающие диаметры винта и роликов с их заходностями в «перевернутом» ПРВМ.

Рассмотрим пару гайка–ролик проектируемого механизма. За счет разницы углов подъема резьб гайки и ролика обеспечивается необходимая подача винта. Для определения подачи рассмотрим кинематику ПРВМ (рис. 6).

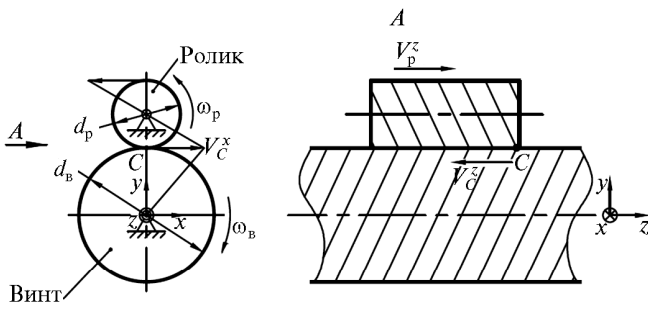


Рис. 5. Определение заходностей винта и ролика

Ведущим звеном ПРВМ является гайка, а ведомым — винт. При вращении гайки ролики совершают планетарное движение (рис. 6), и вместе с винтом смещаются относительно гайки вдоль оси за счет разности углов подъема резьбы на гайке и на ролике (см. рис. 4).

Для дальнейших расчетов определим угловую скорость сепаратора (см. рис. 6), которая является переносной скоростью ролика в планетарном движении: $V_c^x = \frac{V_{\Gamma}^{x,D}}{2} = \omega_{\Gamma} \frac{d_{\Gamma}}{2} \frac{1}{2}$. Исходя из плана скоростей (см. рис. 6), окончательное выражение для угловой скорости сепаратора примет следующий вид:

$$\omega_c = \omega_{\Gamma} \frac{d_{\Gamma}}{2(d_b + d_p)}. \quad (7)$$

Для дальнейшего описания кинематики механизма удобно воспользоваться методом остановки переносного движения роликов [3, 4]. В обращенном движении при остановленном переносном движении роликов угловые скорости звеньев ПРВМ соответственно равны: $\omega_b^* = -\omega_c$, $\omega_{\Gamma}^* = \omega_{\Gamma} - \omega_c$, и $\omega_c^* = 0$. После остановки переносного движения скорости звеньев распределяются как показано на рис. 7. Таким образом, получен механизм с отсутствием окружного перемещения осей вращения звеньев.

При вращении гайки скорость перемещения точки *D* резьбы ролика, сопряженного с резьбой гайки, в осевом направлении определяется по формуле (рис. 7)

$$V_D^z = \frac{PZ_{\Gamma}}{2\pi} \omega_{\Gamma}^*, \quad (8)$$

где $\omega_{\Gamma}^* = \omega_{\Gamma} - \omega_c$ — угловая скорость в обращенном движении.

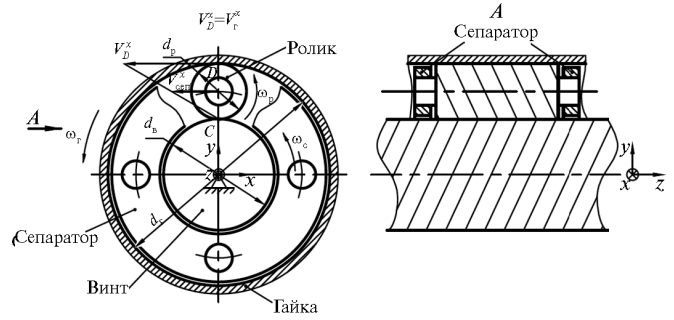


Рис. 6. Кинематика разрабатываемого ПРВМ

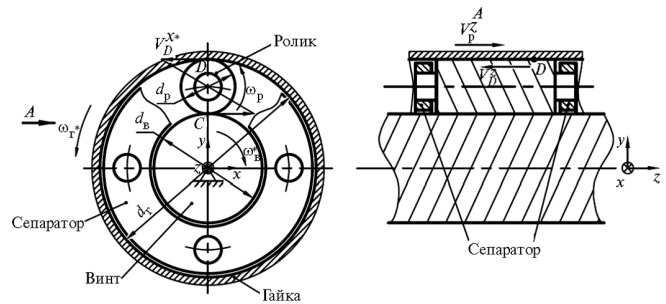


Рис. 7. Кинематика разрабатываемого ПРВМ в обращенном движении

Скорость перемещения ролика в осевом направлении при его вращении его с угловой скоростью ω_p^* (см. рис. 7, б) вычисляется по формуле

$$V_p^z = \frac{Pz_p}{2\pi} \omega_p^*. \quad (9)$$

Скорость ролика относительно гайки в осевом направлении

$$V_{p/\Gamma}^z = -V_D^z + V_p^z, \quad (10)$$

или после преобразований и подстановки в (10) формул (8) и (9)

$$V_{p/\Gamma}^z = -\frac{Pz_{\Gamma}}{2\pi} \omega_{\Gamma}^* + \frac{Pz_p}{2\pi} \omega_p^*. \quad (11)$$

Подставив в (11) выражение для угловой скорости ролика

$$\omega_p^* = \frac{V_D^x}{d_p/2} = \frac{\omega_{\Gamma}^* d_{\Gamma}/2}{d_p/2} = \omega_{\Gamma}^* \frac{d_{\Gamma}}{d_p},$$

получим

$$V_{p/\Gamma}^z = \frac{\omega_{\Gamma}^*}{2\pi} \left(Pz_p \frac{d_{\Gamma}}{d_p} - Pz_{\Gamma} \right). \quad (12)$$

Подставив в (12) выражение для угловой скорости $\omega_{\Gamma}^* = \omega_{\Gamma} - \omega_c$ в обращенном движении и выражения для угловой скорости сепаратора (7), найдем

$$V_{p/r}^z = \frac{\omega_r^* P}{2\pi} \left(1 - \frac{d_r}{2(d_b + d_p)} \right) \left(z_p \frac{d_r}{d_p} - z_r \right). \quad (13)$$

Заменяв в (13) угловую скорость частотой вращения, получим окончательное выражение для осевой скорости ролика (т. е. и осевой скорости винта):

$$V_{p/r}^z = n_r P \left(1 - \frac{d_r}{2(d_b + d_p)} \right) \left(z_p \frac{d_r}{d_p} - z_r \right). \quad (14)$$

Разделив обе части уравнения (14) на n_r , получим выражение для подачи разрабатываемого ПРВМ (в данном случае подачей обозначается линейное перемещение винта в мм за один оборот гайки):

$$i_{\text{ПРВМ}} = P \left(1 - \frac{d_r}{2(d_b + d_p)} \right) \left(z_p \frac{d_r}{d_p} - z_r \right), \quad (15)$$

где $d_r = d_b + 2d_p + 2\Delta$ — диаметр контакта роликов и гайки, мм; Δ — радиальное смещение осей ролика и гайки от номинального положения из-за разности углов подъема резьб, определяемая по методике, аналогичной [5, 6]; d_p — средний диаметр ролика, мм; d_b — средний диаметр винта, мм; z_p — заходность резьбы ролика; z_r — заходность резьбы гайки.

Таким образом, скорость перемещения винта зависит от частоты вращения гайки n_r , заходностей резьбы гайки и роликов z_r и z_p , шага резьбы P и диаметров гайки и роликов. Меняя величины этих параметров в разумных пределах, можно подбирать необходимую линейную скорость перемещения винта (толкателя) механизма рассматриваемой конструкции.

Литература

1. SKF Catalogue roller screw 2005–2008. Publication 4351 EN-2008-01. France, 88 p.

Информация об авторах

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

Information about the authors

RYAKHOVSKIY Oleg Anatol'evich (Moscow) — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of «Fundamentals of Machine Design» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: rolgan@mail.ru).

VOROB'EV Aleksandr Nikolaevich (Moscow) — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of «Fundamentals of Machine Design» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation).

MAROKHIN Anton Sergeevich (Moscow) — Post-Graduate of «Fundamentals of Machine Design» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation).

2. SKF compact inverted roller screw.

3. *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.

4. *Бушенин Д.В.* Несоосные винтовые механизмы. М.: Машиностроение, 1985. 112 с.

5. *Ряховский О.А., Сорокин Ф.Р., Соколов П.А.* Вычисление радиального смещения осей винта и ролика и положения точки контакта резьбы винта и ролика в планетарном ролик-винтовом механизме // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2011. № 6. С. 7–14.

6. *Блинов Д.С., Ряховский О.А., Соколов П.А., Лаптев И.А.* Определение размеров и полей допусков для основных деталей планетарных роликвинтовых передач // Справочник. Инженерный журнал. 2006. № 7, Приложение № 7. 24 с.

References

1. *Katalog SKF Roller screw 2005–2008* [Catalog SKF Roller screw 2005–2008]. SKF Group. Publication 4351 EN-2008-01. France, 88 p.

2. SKF compact inverted roller screw.

3. *Kozyrev V.V. Konstruktsii, teoriia i metodika proektirovaniia i issledovaniia planetarnykh peredach vint-gaika s rez'bovymi rolnikami i mekhatronnykh modulei na ikh baze* [Design, theory and methods of design and study of planetary gear-nut with threaded rollers and mechatronic modules based on them]. Vladimir, Vladimirkii gosudarstvennyi universitet publ., 2011, 238 p.

4. *Bushenin D.V. Nesoosnye vintovye mekhanizmy* [Misalignment of screw mechanisms]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1985, 112 p.

5. *Riakhovskii O.A., Sorokin F.R., Sokolov P.A. Vychislenie radial'nogo smeshcheniia osei vinta i rolrika i polozheniia tochki kontakta rez'by vinta i rolrika v planetarnom roliko-vintovom mekhanizme* [Calculation of radial displacement of screw and roller axes and position of a contact point of the screw and roller thread in a planetary screw roller train]. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building], no. 6, 2011, pp. 7–14.

6. *Blinov D.S., Riakhovskii O.A., Sokolov P.A., Laptev I.A. Opredelenie razmerov i polei dopuskov dlia osnovnykh detalei planetarnykh rolikovintovykh peredach* [Dimensioning and Tolerance fields for the main parts of the planetary gear rolikovintovykh] *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal* [Handbook. An Engineering Journal], 2006, no.7, app no. 7, p. 24.

Статья поступила в редакцию 06.06.2013