

УДК 621.83(075)

РОЛИКОВИНТОВЫЕ МЕХАНИЗМЫ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ ЗУБЧАТЫМ ЗАМЫКАНИЕМ ЗВЕНЬЕВ

Шинаков И.В., Жданов А.В., Кузнецова С.В.

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича
и Николая Григорьевича Столетовых, Владимир, e-mail: tms@vlsu.ru

В статье проводится анализ кинематических характеристик роликовинтовых механизмов (РВМ) с дополнительным зубчатым замыканием звеньев. Показана необходимость дополнительного зубчатого замыкания звеньев РВМ поступательного перемещения с целью стабилизации кинематических характеристик, приведена классификация РВМ с дополнительным зубчатым замыканием. Авторами предложены аналитические зависимости для расчета кинематических характеристик РВМ для каждого из пяти вариантов дополнительного зубчатого замыкания. Особенностями полученных формул является возможность варьирования входным и выходным звеньями. В качестве ведущего звена в таких механизмах могут выступать винт, водило или гайка, а в качестве выходного – гайка или винт. Дополнительное замыкание звеньев приводит к существенному уменьшению кинематической передаточной функции (КПФ) – до 0,1 мм/об при шаге резьбы 1 мм. На основе аналитических зависимостей построены графики и показано влияние дополнительного зубчатого замыкания на КПФ РВМ. На КПФ существенное влияние оказывают соотношение диаметров винта и роликов, а также число зубьев на ведущем звене.

Ключевые слова: роликовинтовые механизмы, кинематическая передаточная функция

ROLLER SCREW MECHANISM WITH EXTRA GEAR CIRCUIT LINKS

Shinakov I.V., Zhdanov A.V., Kuznetsova S.V.

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

The article analyzes the kinematic characteristics roller screw mechanisms (RSM) with an additional gear closure of units. Shows the need for additional timing circuit units roller screw mechanisms of translational movement in order to stabilize the kinematic characteristics, a classification of roller screw mechanisms with additional gear closure. The authors have proposed analytical expressions for the calculation of the kinematic characteristics of roller screw mechanisms for each of the five options for additional timing circuit. The features of these formulas is the possibility of varying the input and output units. As the leading units in such mechanisms may be a screw, carrier or nut and as an output – a nut or screw. Additional gear closure of units leads to a significant reduction of the kinematic transfer function (KTF) – up to 0.1 mm / rev at step of 1 mm thread. Based on the analytical dependence graphs plotted and shows the impact of additional timing circuit for the KTF of RSM. At the KTF is significantly influenced by the ratio of the diameters of the screw and the rollers, as well as the number of teeth on the drive unit.

Keywords: roller screw mechanisms, kinematic transfer function

Роликовинтовые механизмы (РВМ), обеспечивающие преобразование вращательного движения в поступательное и создающие высокую редукцию, имеют широкие кинематические и силовые характеристики (рис. 1). Ряд схем РВМ обеспечивают стабильную кинематическую передаточную функцию (КПФ) – это механизмы, выпускаемые известными фирмами SKF

(Швеция), INA (Германия), Exclar (США) под торговой маркой Transroll, у которых значение КПФ может быть определено по формуле $S_x = z_1 \cdot p_x = \text{const}$, где p_x – шаг резьбы, мм; z_1 – число заходов на 1-м звене – винте. Конструктивной особенностью передач Transroll является равенство чисел заходов на 1-м (винте) и 3-м звене (гайка), т.е. $z_1 = z_3 \geq 3$.

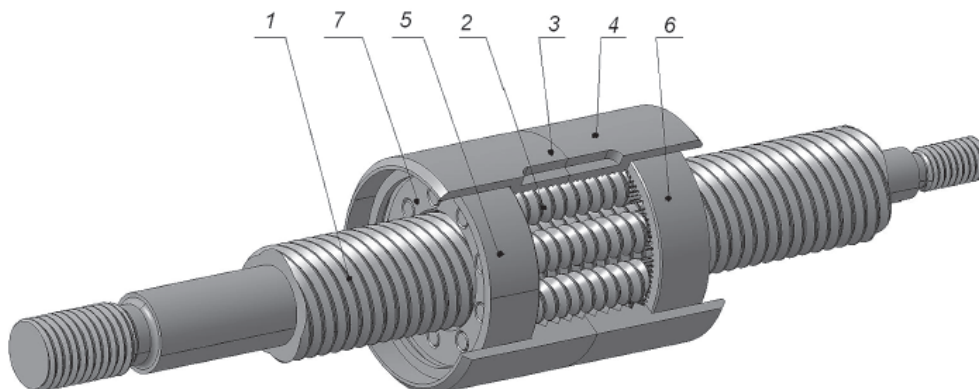


Рис. 1. Роликовинтовой механизм (РВМ):
1 – винт; 2 – ролик; 3 – полугайка; 4 – полугайка; 5 – зубчатый венец;
6 – зубчатый венец; 7 – сепаратор

Наиболее большой класс РВМ разработан для случая $z_1 \neq z_3$, однако КПФ

$$S_x = z_1 P_x / u \neq \text{const},$$

т.к. передача переходит в класс фрикционных механизмов (u – коэффициент редукции) [1]. Для приводов с обратной связью данная нестабильность не является критической, т.к. не превышает 6%, однако для высокоточных устройств необходимо предложить пути обеспечения стабильной КПФ РВМ.

Стабильность КПФ можно достигнуть несколькими способами:

- 1) подбором геометрических параметров механизма;
- 2) созданием принципиально новых схем передач [1];
- 3) введением дополнительного зубчатого зацепления.

Последний путь будет подробнее рассмотрен ниже. Замкнутые РВМ представляют собой механизмы, в которых на звенья накладываются дополнительные кинематические связи в виде планетарных зубчатых замыканий. Это обеспечивает жесткое сопряжение между звеньями без проскальзывания и стабильную передаточную функцию для поступательного перемещения выходного звена.

Замкнутые РВМ можно классифицировать по нескольким признакам:

1. *По типу планетарной передачи*, включаемой в состав РВМ (данная классификация эквивалентна количеству центральных колес). Классификация аналогична [2]: передачи типа $2K - H$ и передачи типа $3K$.

2. *По степени замыкания*.

- а) РВМ с полным замыканием;
- б) РВМ с неполным замыканием звеньев.

В механизмах первой группы замыкаются все три резьбовые звена (винт, ролик и гайка), т.е. на всех резьбовых элементах дополнительно нарезаны зубья. В механизмах второй группы с неполным замыканием возможны два варианта: когда замыкаются ролик-гайка и винт-ролик.

3. *По конструктивным особенностям* обеспечения зубчатого замыкания. Различают введение зубчатого замыкания на основных (резьбовых) элементах (винт, ролик, гайка) и вспомогательных элементах (сепаратор, корпус). При этом введение зубчатой нарезки возможно на опорный винт (а.с. 1747771 и 1585578) и опорную гайку (а.с. 1610139, 739289, 968542). Замыкание через корпус возможно для роликов на гайку и корпус (а.с. 737687), а также для сепаратора (а.с. 1663273).

В соответствии с принятой классификацией для РВМ возможны 5 вариантов до-

полнительных зубчатых замыканий между звеньями. Ниже рассматриваются все эти случаи.

Вариант 1. Все три звена РВМ – винт, ролик и гайка снабжаются зубчатыми венцами, у которых начальные поверхности совпадают со средними диаметрами соответствующих резьб. Замыкающая кинематическая цепь, необходимая для получения степени подвижности механизма $W = 1$, состоит из зубчатых колес z_4 и z_5 , из которых первое заблокировано с роликом, а второе со стойкой. Все зубчатые зацепления образуют планетарный механизм с одним входным и двумя выходными звеньями. Вопрос о том, какое из трех звеньев – винт 1 , гайка 3 или водило H (сепаратор роликов) сделать ведущим, следует решать с учетом КПД планетарного механизма. Звеном, ведущим осевую полезную нагрузку, в принципе может быть как винт 1 , так и гайка 3 .

Конструктивные особенности механизма, выполняемого по *варианту 1*, следующие: на выходном звене необходим широкий зубчатый венец соответственно длине хода этого венца; выходное звено должно совершать вращательное движение, что видно из эпюр окружных скоростей; это требует применения упорных подшипников между перемещаемым объектом и выходным звеном. Кинематика механизма, выполненного по варианту 1 , может быть двух типов:

- а) ведущее звено – водило, а выходное – винт 1 , гайка 3 и ролик 2 не должны иметь осевого перемещения относительно стойки;
- б) ведущее звено – гайка 3 , выходное – винт 1 . Гайка и ролик не имеют осевого перемещения относительно стойки.

При любом ведущем звене могут быть найдены передаточные отношения, необходимые для определения функции положения и условия неподвижности звеньев относительно друг друга. Подбор числа зубьев должен производиться согласно условиям соосности зубчатых венцов. При этом предполагается что зубчатые венцы изготовлены с коэффициентами суммы смещений $x_\Sigma = 0$. Таким образом, при четырех неизвестных z_2, z_3, z_4, z_5 есть три уравнения, поэтому задача о выборе чисел зубьев имеет множество решений.

Вариант 2. Зубчатыми венцами снабжаются все три звена, но винт или гайка фиксируются от поворота. В этом варианте зубчатые венцы и сепаратор – водило H образуют рядный планетарный механизм с опорным колесом z_3 при невращающейся гайке 3 или колесом z_1 при невращающемся винте 1 . В первом случае (*вариант а*) ведущим может быть водило H или винт 1 , во втором водило H или гайка 3 (*вариант б*).

Конструктивные особенности механизма: на выходном звене необходим широкий зубчатый венец соответственно длине хода; выходное звено не совершает вращательного движения, что исключает применение упорных подшипников между перемещаемым объектом и выходным звеном. Для подбора числа зубьев необходимо использовать условия соосности и чистого качения средних цилиндров резьб. Таким образом, если задаться одним из z , то остальные два определяются однозначно, то есть задача будет иметь единственное решение.

Вариант 3. Зубчатыми венцами снабжены ролики 2 и гайка 3. Для данного случая замыкающая кинематическая цепь, необходимая для получения степени подвижности $W = 1$, состоит из дополнительных зубчатых колес на гайке z_4 и водиле – сепараторе z_H и блока колес z_5 и z_6 , вращающегося в неподвижной опоре. Все зубчатые зацепления образуют так называемый замкнутый дифференциальный механизм. Ведущим звеном может быть гайка 3, водило H или блок колес z_5 и z_6 . КПФ и условие опорного сопряжения определяются в предположении, что винт 1 не вращается, то есть $\varphi_1 = 0$. Числа зубьев колес при введении зубчатого замыкания должны удовлетворять четырем условиям: соосности, чистого качения ролика по гайке, чистого качения ролика по винту, и условию, получающемуся из рассмотрения эпюр окружных скоростей звеньев. Четыре уравнения при пяти неизвестных z_3, z_4, z_5, z_6 и z_H дают множество решений. Конструктивные особенности варианта 3: отсутствие зубчатого венца на выходном звене; отсутствие вращения выходного звена; не исключается применение блока колес z_5 и z_6 с внутренними зубчатыми колесами.

Вариант 4. Зубчатые венцы выполняются на роликах и винте. Замыкающая кинематическая цепь состоит из дополнительных зубчатых колес на винте z_4 и водиле-сепараторе z_H и блока колес z_5 и z_6 с неподвижной осью вращения. Все зацепления образуют замкнутый дифференциальный механизм. Ведущим звеном может быть винт 1 или блок колес z_5 и z_6 . Передаточная функция и условие опорного сопряжения определяются в предположении, что выходное звено – гайка 3 не вращается, то есть $\varphi_3 = 0$. Числа зубьев колес должны удовлетворять условиям соосности, качения роликов по винту, качения роликов по гайке. Конструктивные особенности механизма аналогичны варианту 3.

Вариант 5. Зубчатые венцы выполняются либо на роликах 2 и гайке 3, либо на роликах 2 и винте 1. Поскольку винт 1 и гайка 3 фиксируются от вращения, то ве-

дущим звеном может быть только водило H . В качестве выходного звена принимается то, которое не имеет зубчатого зацепления с роликами 2. Данный вариант отличается конструктивной простотой в сравнении со всеми остальными, но здесь неизбежно скольжение резьбовых поверхностей роликов 2 и выходного звена со скоростью, близкой к наибольшей окружной скорости ролика.

Кинематические характеристики РВМ с различными вариантами зубчатого замыкания звеньев сведены в таблицу. По формулам, представленным в ней, были рассчитаны значения КПФ для всех вариантов зубчатого замыкания. На рис. 2 и 3 представлены зависимости КПФ от отношения диаметров k винта и роликов. Анализ данных зависимостей показывает, что с увеличением значений k передаточная функция РВМ увеличивается. При сравнении КПФ замкнутой и незамкнутой передач видно, что для замкнутых типов РВМ КПФ меньше от 1,7 до 8 раз в зависимости от варианта зубчатого замыкания. Введение зубчатого замыкания в РВМ приводит к смене направления движения передачи. Так для 3-го и 4-го вариантов $S_x < 0$, т.е. передача двигается в направлении, противоположном исходному.

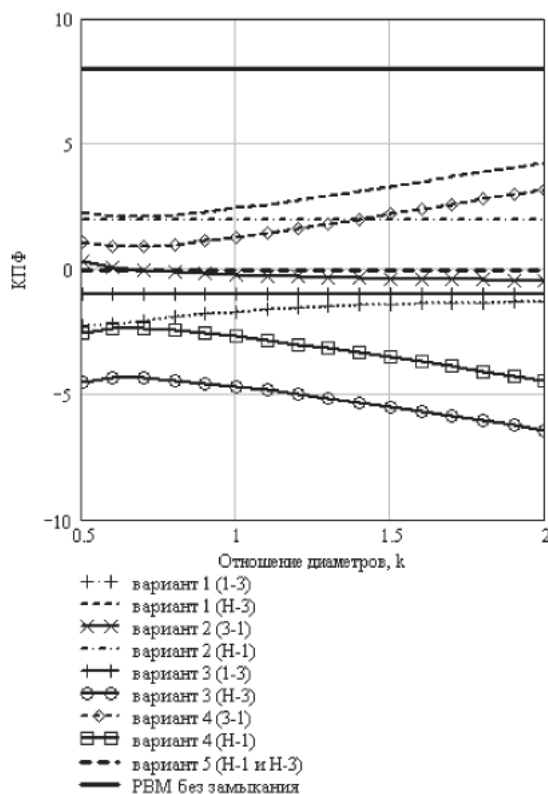


Рис. 2. Зависимость КПФ от отношения диаметров k

Кинематические параметры РВМ при различных вариантах зубчатого замыкания звеньев

Вариант	Входное (ведущее) звено	Выходное звено	Невращающееся звено	КПФ по отношению к перемещению входного звена	Условие опорного сопряжения
1	Винт 1	Гайка 3	нет	$z_3(i_{31} - i_{H1}) - z_1(1 - i_{H1})$	$z_1(i_{1H} - 1) - z_2(i_{2H} - 1) = 0$
	Водило H	Гайка 3	нет	$z_3(i_{3H} - 1) - z_1(i_{H1} - 1)$	
2	Гайка 3	Винт 1	нет	$z_1(i_{13} - i_{H3}) - z_3(1 - i_{3H})$	$z_3(i_{3H} - 1) - z_2(i_{2H} - 1) = 0$
	Водило H	Винт 1	нет	$z_1(i_{1H} - 1) - z_3(i_{3H} - 1)$	
3	Винт 1	Гайка 3	Гайка 3	$-z_3 i_{H1} - z_1(1 - i_{H1})$	$z_3(i_{3H} - 1) - z_2(i_{2H} - 1) = 0$
	Водило H	Гайка 3	Гайка 3	$-z_3 - z_1(i_{1H} - 1)$	
4	Гайка 3	Винт 1	Винт 1	$-z_1 i_{H3} - z_3(1 - i_{3H})$	$i_{H2}(z_2 - z_3) - z_2 = 0$
	Водило H	Винт 1	Винт 1	$-z_1 - z_3(i_{3H} - 1)$	
5	Водило H	Винт 1	Винт 1 Гайка 3	$z_3 - z_1$	$i_{H2}(z_2 - z_3) - z_2 = 0$
	Водило H	Гайка 3		$z_1 - z_3$	$i_{H2}(z_2 - z_1) - z_2 = 0$

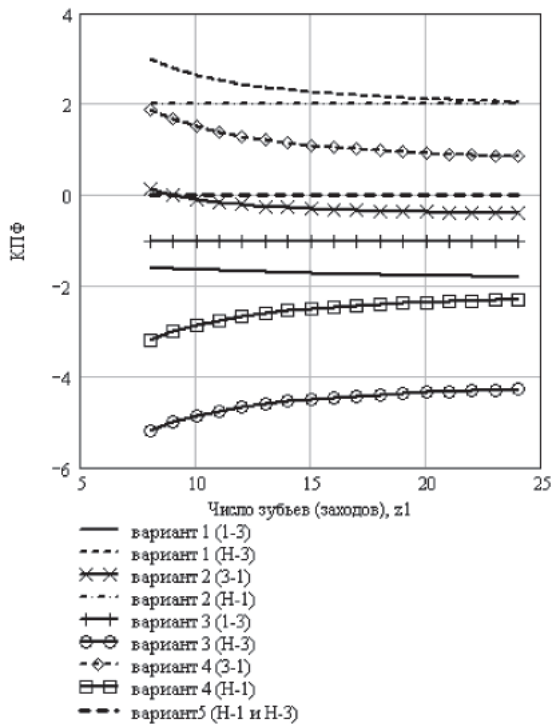


Рис. 3. Зависимость КПФ от отношения числа зубьев z_1 винта

Проведенные исследования позволили спроектировать и изготовить планетарный РВМ с зубчатым замыканием звеньев. Технические характеристики полученной передачи получены следующими: КПФ – 0,25 мм/об. (при шаге резьбы $p_x = 1$ мм),

рабочая осевая нагрузка на привод – 7 кН (кратковременная статическая нагрузка – 30 кН); ход – 80 мм; габариты – $D = 50$ мм, $L = 200$ мм.

Список литературы

1. Морозов В.В. Роликовинтовые механизмы. Кинематические характеристики: монография. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2005. – 78 с.
2. Планетарные передачи: Справочник / под ред. В.Н. Кудрявцева, Ю.Н. Кирдяшева. – Л.: Машиностроение, 1977. – 536 с.
3. Морозов В.В., Панюхин В.И. Зубчато-винтовые передачи для преобразования вращательного движения в поступательное: монография. – Владимир, 2000. – 160 с.
4. Морозов В.В., Панюхин В.И., Панюхин В.В. Механические передачи: КПД и самоторможение: монография; под ред. В.В. Морозова; Владим. гос. ун-т. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2002. – 164 с.
5. Козырев В.В. Конструкции, теория и методика проектирования и исследования планетарных передач винт-гайка с резьбовыми роликами и мехатронных модулей на их базе: монография. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2011. – 238 с.

Рецензенты:

Гоц А.Н., д.т.н., профессор кафедры тепловых двигателей и энергетических установок Владимирского государственного университета им. А. Г. и Н. Г. Столетовых Министерства образования и науки РФ, г. Владимир;
Житников Б.Ю., д.т.н., профессор, профессор кафедры специальной техники и информационных технологий ФГОУ ВПО ВЮИ ФСИН России, г. Владимир.

Работа поступила в редакцию 10.11.2011.