

УДК 621.833.6
DOI 10.5862/TMM.44.1

Поступила в редакцию 02.06.2019

После доработки 18.11.2019

Принята к печати 18.12.2019



К вопросу о кинематике планетарной передачи 2К-V

Л.П. Сенчурин

Сенчурин Леонид Порфирьевич

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. В статье рассматривается кинематика планетарной передачи 2К-V по классификации В.Н. Кудрявцева. Особенностью передачи является изменение взаимного расположения осей зубчатых колес в процессе работы. Аналитическими методами: методом обращенного движения и с помощью анализа сложного движения механизма, – получена формула передаточного отношения передачи 2К-V.

Ключевые слова: планетарная передача, обращенный механизм, циклоидальный сателлит, корончатое колесо, механизм параллельных кривошипов.

Введение

Кинематическая схема 2К-V является одной из трёх схем (К-H-V, 2КН, 2К-V) [1, 2], широко применяемых в планетарно-цевочных передачах [2-10]. В этой группе планетарных механизмов передача типа 2К-V обладает рядом преимуществ по рабочим характеристикам [6] и находит все более широкое применение в приводах промышленных роботов, станков, следящих систем [4, 6, 10-14].

Описание передачи

Схема передачи 2К-V (рис. 1) в отличие от остальных содержит две планетарные ступени: эвольвентную ag и цевочную bf . Солнечная шестерня a , установленная на входном валу, зацепляется с сателлитами g первой (быстроходной) ступени; сателлиты установлены на валах с эксцентриковыми кривошипами e ; вращение кривошипов заставляет циклоидальный сателлит f второй (тихоходной) ступени обкатываться по корончатому цевочному колесу b и приводит во вращение водило h с выходным валом v . Таким образом, передача 2К-V по виду относится к комбинированным (зубчато-рычажным) механизмам: зубчатый

механизм с наличием механизма параллельных кривошипов радиуса e (см. рис. 1). Эта особенность приводит к изменению взаимного расположения осей зубчатых колес в процессе их движения [1] и отличает эту схему от К-H-V и 2КН.

В ряде работ приведен кинематический анализ планетарно-цевочных механизмов, дается формула передаточного отношения передачи 2К-V без вывода, причем она в одном из источников отличается от остальных.

В связи с этим исследуем кинематику данной передачи и найдем передаточное отношение в случае ведущего колеса a , ведомого водила h при неподвижном корончатом колесе b .

Метод обращения движения

Используем метод обращения движения [15]. Кинематическая схема обращенного механизма, полученного из передачи 2К-V при неподвижном водиле h , дана на рис. 2.

Звенья механизма имеют скорости:

$$\omega_a^h = \omega_a^b - \omega_h^b, \quad \omega_g^h = \omega_g^b - \omega_h^b,$$

$$\omega_b^h = \omega_b^b - \omega_h^b = -\omega_h^b.$$

Тогда передаточное отношение
обращённого механизма

$$i_{ab}^h = \frac{\omega_a^h}{\omega_b^h} = 1 - i_{ah}^b.$$

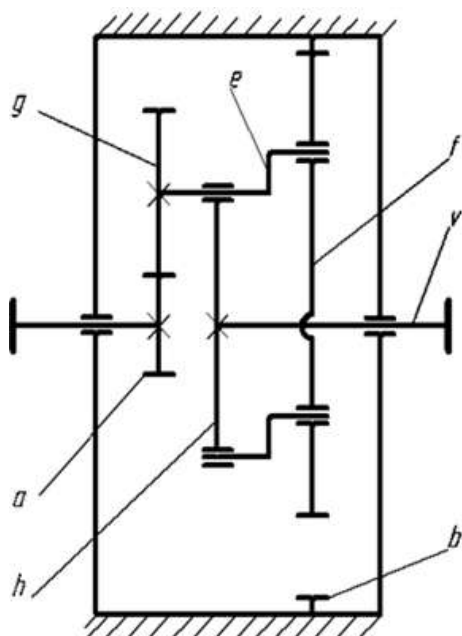


Рис. 1. Кинематическая схема передачи 2К-V

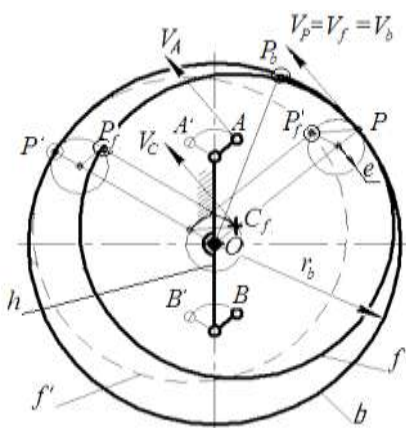


Рис. 2. Обращённый механизм

Передаточное отношение от колеса a к водилу h при неподвижном корончатом колесе b

$$i_{ah}^b = \frac{\omega_a^b}{\omega_h^b} = 1 - i_{ab}^h. \quad (1)$$

Исследуем схему обращенного механизма. Кривошипы e вращаются с угловой скоростью ω_g^h сателлитов g (см. рис. 1). Точки A , C_f и B механизма параллельных кривошипов при переходе сателлита из положения f в положение f' совершают вращательное движение по дугам окружностей AA' , $C_f C_f'$ и BB' . Точка полюса зацепления P при совместном движении колёс f и b переходит в положение P' . При этом положение линий AB и $A'B'$ сателлита f в двух его положениях f и f' остаётся взаимно параллельным (см. рис. 2). Следовательно, угловое перемещение сателлита отсутствует (т.е. $\omega_f^h = 0$) и он совершает плоское поступательное движение.

Точка полюса P , принадлежащая одновременно сателлиту f и корончатому колесу b , имеет линейную скорость V_P , которая при поступательном движении сателлита, равна скоростям точек A , B кривошипов и центра C_f сателлита (см. рис. 2).

Точка P , принадлежащая сателлиту f , перемещается по дуге окружности радиуса e из положения P в положение P'_f . При этом она проходит угловой путь, равный углу поворота кривошипа при переходе его из положения A в положение A' , который соответствует углу поворота ϕ_g^h сателлита g .

Точка P корончатого колеса b в этом случае перемещается из P в положение P_b , и колесо b совершает поворот вокруг своего центра O на угол ϕ_b^h (угол POP_b на рис. 2). При повороте кривошипов на угол ϕ_g^h , соответствующий углу поворота сателлита g (переход полюса из P в P'), колесо b поворачивается в том же направлении на гораздо меньший угол ϕ_b^h . Колесо b

вращается вокруг своего центра O с угловой скоростью

$$\omega_b^h = \frac{V_P}{r_b}.$$

Скорость точки P определяется скоростью точки P_f сателлита f , которая равна V_C . Тогда

$$V_P = \omega_g^h e.$$

Дуговой путь PP_b , пройденный точкой P колеса b , равен дуговому пути PP'_f , пройденному точкой P сателлита f , а именно:

$$PP'_f = \omega_g^h t e,$$

$$PP_b = \omega_b^h t r_b = \frac{V_P}{r_b} t r_b = \frac{\omega_g^h e}{r_b} t r_b = \omega_g^h e t.$$

Тогда угол поворота POP_b колеса b

$$\Phi_b^h = \Phi_g^h \frac{e}{r_b}.$$

Передаточное отношение от кривошипа e к корончатому колесу b в обращённом механизме

$$i_{eb}^h = i_{gb}^h = \frac{\Phi_g^h}{\Phi_b^h} = \frac{r_b}{e} = \frac{r_b}{r_b - r_f} = \frac{z_b}{z_b - z_f}.$$

Передача двухступенчатая, то есть $i_{ab}^h = i_{ag}^h i_{eb}^h$. После подстановки получаем формулу передаточного отношения обращённого механизма:

$$i_{ab}^h = \frac{\omega_a^h}{\omega_g^h} \cdot \frac{\omega_g^h}{\omega_b^h} = -\frac{z_g}{z_a} \cdot \frac{z_b}{z_b - z_f}. \quad (2)$$

С другой стороны звенья h, e, f являются механизмом параллельных кривошипов. Для него имеем:

$$\omega_e^f = \omega_e^b - \omega_f^b, \quad \omega_e^h = \omega_e^b - \omega_h^b.$$

При остановленном водиле h сателлит f не вращается и $\omega_e^f = \omega_e^h$, поэтому $\omega_f^b = \omega_h^b$.

Следовательно, в механизме $2K-V$ при неподвижном корончатом колесе b скорости вращения водила h и циклоидального сателлита f одинаковы и равны скорости выходного вала v механизма.

При остановленном водиле h , когда угловая скорость сателлита f механизма

параллельных кривошипов так же равна нулю, скорости звеньев e и b имеют вид:

$$\omega_e^f = \omega_e^b - \omega_f^b, \\ \omega_f^b = \omega_b^b - \omega_f^b = -\omega_f^b.$$

Сравним передаточные отношения i_{eb}^h и i_{eb}^f с учётом $\omega_f^b = \omega_h^b$:

$$i_{eb}^h = \frac{\omega_e^h}{\omega_b^h} = \frac{\omega_g^h}{\omega_b^h} = \frac{\omega_g^b - \omega_h^b}{-\omega_h^b} = 1 - \frac{\omega_g^b}{\omega_h^b}, \\ i_{eb}^f = \frac{\omega_e^f}{\omega_b^f} = \frac{\omega_e^b - \omega_f^b}{-\omega_f^b} = 1 - \frac{\omega_e^b}{\omega_f^b} = \\ = 1 - \frac{\omega_e^b}{\omega_h^b} = 1 - \frac{\omega_g^b}{\omega_h^b} = i_{eb}^h. \quad (3)$$

Из (3) видно, что передаточные отношения i_{eb}^h и i_{eb}^f (при неподвижном h и отсутствии вращения сателлита f) равны. Тогда передаточное отношение обращённого механизма

$$i_{ab}^h = i_{ag}^h i_{eb}^h = \frac{i_{ag}^h}{i_{be}^f} = \frac{i_{ag}^h}{1 - i_{bf}^e} = -\frac{z_g}{z_a} \cdot \frac{z_b}{z_b - z_f}. \quad (4)$$

Формула (4) совпала с (2).

После подстановки в формулу (1) выражения (4) имеем для редуктора схемы $2K-V$ передаточное отношение от входного колеса a на выходной вал $h-v$ при неподвижном цевочном колесе b в виде:

$$i_{ah}^b = 1 - i_{ab}^h = 1 + \frac{z_g z_b}{z_a (z_b - z_f)}. \quad (5)$$

Анализ сложного движения механизма

Получим формулу передаточного отношения (5) на основе анализа сложного движения механизма.

Рассмотрим абсолютные, переносные и относительные скорости движения кинематических пар A и B , принадлежащих одновременно сдвоенным кривошипам e и циклоидальному сателлиту f .

Скорости движения характерных точек звеньев механизма при неподвижном колесе b даны на рис. 3.

Абсолютная скорость точки контакта зубьев колёс a и g в полюсе зацепления P_1

$$V_{P_1}^{(a)} = \omega_a^b r_a.$$

Для колеса g абсолютная скорость полюса складывается из переносной скорости

$$V_{P_1}^{(e)} = V_{O_g} = \omega_h^b \cdot (r_a + r_g)$$

центра сателлита, определяемой скоростью вращения водила ω_h^b , и относительной скорости

$$V_{P_1}^{(r)} = \omega_g^b e$$

вследствие вращения сателлита со скоростью ω_g^b .

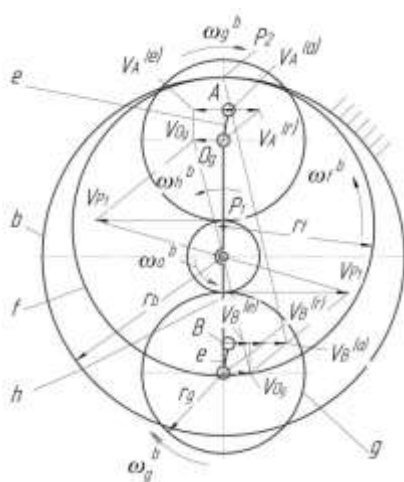


Рис. 3. Скорости точек звеньев механизма

Получаем уравнение, связывающее скорости вращения трёх звеньев (см. рис. 3):

$$\omega_a^b r_a = \omega_h^b (r_a + r_g) + \omega_g^b r_g. \quad (6)$$

Циклоидальный сателлит f вращается относительно полюса P_2 с угловой скоростью ω_f^b .

Абсолютная скорость $V_A^{(a)}$ точки A сателлита, совершающего плоскопараллельное движение, определяется переносной $V_A^{(e)} = \omega_h^b (r_a + r_g)$ и относительной $V_A^{(r)} = \omega_g^b e$, скоростями движения точки A кривошипа e . Скорости вращения кривошипа и жёстко связанного с ним сателлита g одинаковы.

Получаем второе уравнение для трёх угловых скоростей звеньев:

$$\omega_f^b r_A = -\omega_h^b (r_a + r_g) + \omega_g^b e. \quad (7)$$

Абсолютная скорость вращения точки B сателлита является суммой скоростей (см. рис. 3)

$$V_B^{(a)} = V_B^{(e)} + V_B^{(r)},$$

или

$$\omega_f^b r_B = \omega_h^b (r_a + r_g) + \omega_g^b e. \quad (8)$$

Из решения системы уравнений (6) – (8) получаем формулы угловых скоростей сателлитов g и f и водила h при неподвижном корончатом колесе b в виде:

$$\omega_g^b = \omega_a^b \frac{r_a (r_a + r_b)}{(r_a + r_b) r_g + (r_b - r_a) e},$$

$$\omega_h^b = \omega_a^b \frac{r_a (r_a + r_g) e}{r_f r_g + (r_a + r_g) e}, \quad \omega_f^b = \omega_h^b.$$

И в числах зубьев колёс:

$$\omega_g^b = \omega_a^b \frac{z_a z_f}{z_g z_f + (z_a + z_g)(z_b - z_f)},$$

$$\omega_h^b = \omega_a^b \frac{z_a (z_b - z_f)}{z_g z_f + (z_a + z_g)(z_b - z_f)}.$$

Передаточное отношение при неподвижном цевочном колесе

$$i_{ah}^b = \frac{\omega_a^b}{\omega_h^b} = \frac{z_g z_f + (z_a + z_g)(z_b - z_f)}{z_a (z_b - z_f)} =$$

$$= 1 + \frac{z_g \cdot z_b}{z_a \cdot (z_b - z_f)}$$

имеет тот же вид, что и в выражении (5).

Выводы

Выведенная двумя методами формула (см. (5)) передаточного отношения передачи $2K-V$ в случае ведущего колеса a , ведомого водила h при неподвижном корончатом колесе b совпадает с формулами в [1, 3, 9]. В статье [5] эта же формула получена графоаналитическим методом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кудрявцев В.Н.** Планетарные передачи. – М-Л.: Машиностроение. –1966.–308 с.
2. **Артемов И.И., Чуфистов Е.А., Липов А.В., Чуфистов О.Е., Большаков Г.С., Носков К.А.** Обеспечение качества планетарно-цевочных передач при проектировании и производстве. // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2018. №3 (47) – С. 124-139. – DOI 10/21685/2072-3059-2018-3-12. (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)
3. **Borislavov B., Borisov I., Panchev V.** Design of a Planetary-Cyclo-Drive Speed Reducer. Sweden: Linnaeus University. 2012. – 90 p.
4. **Иванов А.С., Ермолаев М.М., Крикунов Д.Э., Мирошник А.А., Руднев С.К., Чиркин А.В.** Конструктивные исполнения планетарно-цевочных редукторов для высокоточных следящих приводов. // Вестник машиностроения. – 2013. - №3. – С. 9-11.
5. **Иванов А.С., Фомин М.В., Ермолаев М.М., Куралина Н.Н., Муркин С.В.** Кинематический анализ планетарно-цевочных механизмов. // Вестник машиностроения. – 2012. – №8. – С. 23-25.
6. **Киреев С.О.** Планетарные передачи с внецентроидным внутренним цевочным зацеплением в машиностроении (обзор). // Вестник ДГТУ. – 2011. Т. 11. – № 7(58). – С. 1051-1058.
7. **Киреев С.О., Васильев Б.Н.** Расчет несущей способности совмещенных конических опор качения водила планетарно-цевочной передачи типа $2K-V$. // Вестник ДГТУ. – 2011. Т. 11. – № 5(56). – С. 683-687.
8. **Киреев С.О., Ковалёв В.Н.** Структура, кинематика и геометрия планетарных передач с внецентроидным цевочным зацеплением. – Новочеркасск: НГТУ, 1995. – 98 с.
9. **Киреев С.О., Ковалёв В.Н., Степанов В.П.** Кинематика двухступенчатого планетарного механизма типа $2K-V$ с цевочным зацеплением. // Изв. ВУЗов. Машиностроение. – 1989. – №5. – С. 46-51.
10. **Муравьев Е.В.** Планетарно-цевочные редукторы и мотор-редукторы // Редукторы и приводы. – 2005. - №4-5. – С. 14-16. [Электронный ресурс] https://news.reduktorntc.ru/nomer/n_05_03.shtml
11. Nabtesko. Каталог. [Электронный ресурс] <http://www.drivemeh.ru /produkcija/nabtesco/ nabtesco-katalogi.php>.
12. Планетарно-цевочные редукторы ПЦР / ООО АВВИ // . Разработка и производство высокоточных редукторов. – 2013. [Электронный ресурс] <https://avvi.ru/eng/products/pcr/>
13. Редукторы и мотор-редукторы планетарно-цевочные: каталог. – СПб.: Редуктор. . – 2005. – 32 с.
14. Sumitomo. Каталог. [Электронный ресурс] http://www.sumitomodrive.ru/upload/private/information_items_property_1114.pdf.
15. **Kolovsky M.Z., Evgrafov A.N., Semenov Yu.A., Slusch A.V.** Advanced Theory of Mechanisms and Machines. – Berlin, New York, London: Springer, 2000. – 396 p. (Foundations of engineering mechanics).