

УДК 621.83-436.1

В.Ф. Семенюк, д-р. техн. наук, проф.,
В.Н. Лингур, инженер,
Одес. нац. политехн. ун-т

ОСОБЕННОСТИ ШАРИКОВОГО ПЕРЕДАТОЧНОГО МЕХАНИЗМА

В.Ф. Семенюк, В.М. Лингур. **Особенности кулькового передавального механизма.** Запропоновано конструкцію передавального механізму кулькового типу. Наведено розрахункові схеми для визначення залежності між вхідною силою та силою пружин з урахуванням сил тертя качення кульок. Наведено характерні особливості роботи кулькового передавального механізму та його переваги.

Ключові слова: кульковий передавальний механізм, комплект кульок, кути контакту між кульками, втрати на тертя між кульками.

В.Ф. Семенюк, В.Н. Лингур. **Особенности шарикового передаточного механизма.** Предложена конструкция передаточного механизма шарикового типа. Приведены расчетные схемы для определения зависимости между входной силой и силой пружин с учетом сил трения качения шариков. Представлены характерные особенности работы шарикового передаточного механизма и его преимущества.

Ключевые слова: шариковый передаточный механизм, комплект шариков, углы контакта между шариками, потери на трение между шариками.

V.F. Semeniuk, V.N. Lingur. **Specific features of the ball transmission mechanism.** A design of the ball transmission mechanism is proposed. The design diagrams are adduced to identify the dependence between the value of the force input and the spring pressure considering the rolling friction force. The specific features of the ball transmission mechanism operation, and its operational advantages, are presented.

Keywords: ball transmission mechanism, ball set, angles of contact between balls, losses due to friction between balls.

В машинах для преобразования движения и нагрузок (сил и вращающих моментов) используются различные механизмы, например, шарнирно-рычажные, кулачковые, зубчатые, фрикционные и др. К таким механизмам относится шариковый передаточный механизм (рис. 1).

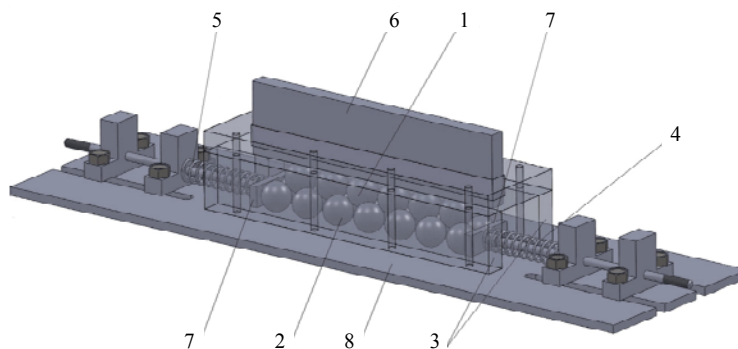


Рис. 1. Схема шарикового передаточного механизма: 1 — верхние шарики, 2 — нижние шарики, 3 — боковые направляющие, 4 и 5 — пружины, 6 — ползун, 7 — упоры, 8 — корпус

Он состоит из последовательно расположенных комплектов шариков, при этом каждый комплект (рис. 2) включает в себя верхний шарик 1 и несколько (например, два, три, четыре, пять) нижних шариков 2. Каждый верхний шарик расположен между несколькими нижними шариками. Под действием силы, приложенной к ползуну 6, верхние шарики опускаются и пе-

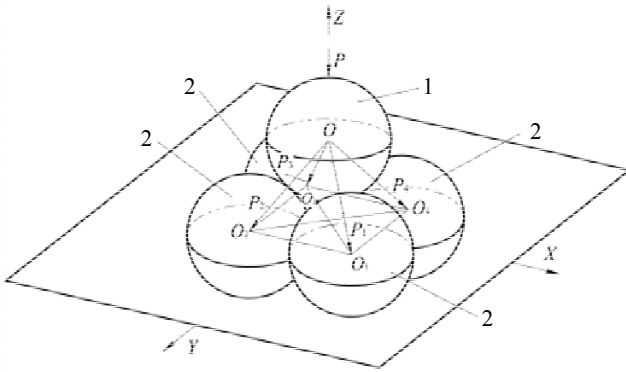


Рис. 2. Комплект шариков, состоящий из верхнего 1 и четырех нижних 2 шариков

ремещаются по плоскости ползуна в противоположные стороны относительно вертикальной оси симметрии, нижние шарики перемещаются в горизонтальном направлении по плоскости корпуса 8 также в противоположные стороны относительно вертикальной оси симметрии.

Характерной особенностью данного механизма является то, что сила пружин 4 и 5 при одной и той же силе, действующей на ползун 6, тем меньше, чем больше последовательно расположенных комплектов шариков. При этом уменьшение силы пружин 4 и 5 достигается, в основном, не за счет потерь на трение между шариками и плоскостями, по которым перемещаются шарики, и потерь на трение между самими шариками, а в результате такого распределения силового потока, при котором только крайние шарики нижнего ряда остаются неуравновешенными. Для доказательства этого найдем зависимость между $P_{ном}$, действующей на ползун 6 и силой $P_{пр}$, создаваемой пружинами 4 и 5. Расчетная схема для определения этой зависимости представлена на рис. 3.

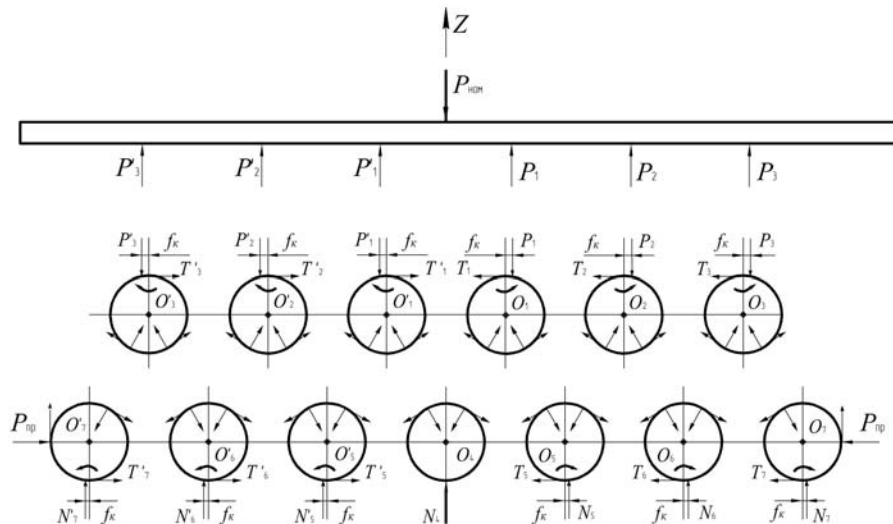


Рис. 3. Расчетная схема для определения зависимости между силами $P_{ном}$ и $P_{пр}$

Экспериментально установлен характер движения шариков и соответствующие ему величины и направления действующих сил: шарики верхнего ряда катятся только по плоскости ползуна 6, а шарики нижнего ряда — по плоскости корпуса 8. Между шариками происходит проскальзывание. Центральный шарик O_4 нижнего ряда остается неподвижным в процессе перемещения ползуна 6 и упора 7. Также учтено, что α — угол наклона между шариками верхнего и нижнего рядов (рис. 2), а, кроме того, плоскости, в которых расположены силы взаимодействия шариков верхнего и нижнего рядов, расположены под углом β по отношению к направлению ($x-x$) перемещения упора 7 (рис. 4).

Схема расположения сил, действующих на один из шариков рассматриваемого шарикового передаточного механизма, представлена на рис. 5.

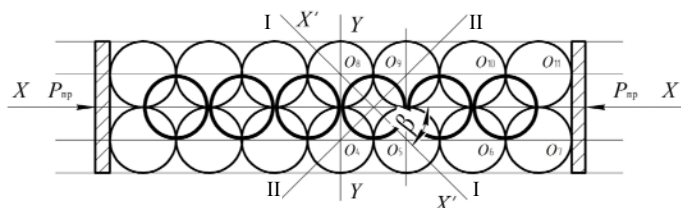


Рис. 4. Схема для определения положения плоскостей I—I и II—II, в которых расположены силы взаимодействия шариков верхнего и нижнего рядов

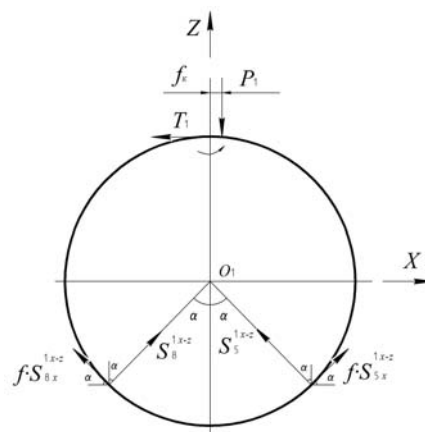


Рис. 5. Схема расположения сил, действующих на шарик O_1

На этом рисунке и далее при обозначении силовых факторов, возникающих между шариками, использована следующая индексация:

- нижний, цифровой индекс показывает, со стороны какого шарика осуществляется силовое воздействие;
- верхний, цифровой индекс показывает, на какой шарик оказывается силовое воздействие;
- верхний буквенный индекс обозначает текущую плоскость, в которой действует сила или ее проекция и которая проходит через указанные оси координат;
- нижний буквенный индекс обозначает, вдоль какой из координатных осей действует рассматриваемый силовой фактор.

После поворота сечения I—I на угол β в это сечение попадает и недостающий силовой фактор P_1 , и сила трения качения T_1 .

Следует также учесть, что силы реакций со стороны нижних шариков O_5 и O_8 на шарик O_1 в сечении I—I — S_5^1 и S_8^1 и после его поворота на угол β изменяются по величине.

Обозначим реакции со стороны нижних шариков на верхний, в сечении I—I через $S_5^{1x'-z}$ и $S_8^{1x'-z}$, а после поворота на угол β и совмещения осей X' и X — через S_5^{1x-z} и S_8^{1x-z} .

На примере контакта шариков O_5 и O_1 зависимость между силовыми факторами $S_5^{1x'-z}$ и S_5^{1x-z} выглядит как

$$S_5^1 = \frac{S_5^{1x-z}}{\sqrt{1 - \sin^2 \alpha (1 - \cos^2 \beta)}}; \quad S_5^{1x'-z} = S_5^1 \quad (1)$$

Условия равновесия шарика O_1 в плоскости $X-Z$:

$$\sum z = 0; \quad -P_1 + S_5^{1x'-z} \cos \alpha + fS_5^{1x'-z} \sin \alpha + S_8^{1x'-z} \cos \alpha + fS_8^{1x'-z} \sin \alpha = 0; \quad (2)$$

$$\sum x = 0; \quad -T_1 + fS_5^{1x'-z} \cos \alpha \cos \beta - S_5^{1x'-z} \sin \alpha \cos \beta + S_8^{1x'-z} \sin \alpha \cos \beta - fS_8^{1x'-z} \cos \alpha \cos \beta = 0; \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \sum M_{m.P_1} = 0; \quad & S_5^{1x'-z} \cos \alpha (r \sin \alpha - f_k) + fS_5^{1x'-z} \sin \alpha (r \sin \alpha - f_k) - S_5^{1x'-z} \sin \alpha \cos \beta (r + r \cos \alpha) + \\ & + fS_5^{1x'-z} \cos \alpha \cos \beta (r + r \cos \alpha) - S_8^{1x'-z} \cos \alpha (r \sin \alpha + f_k) - fS_8^{1x'-z} \sin \alpha (r \sin \alpha + f_k) + \\ & + S_8^{1x'-z} \sin \alpha \cos \beta (r + r \cos \alpha) - fS_8^{1x'-z} \cos \alpha \cos \beta (r + r \cos \alpha) = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Из выражения (2) находим

$$S_8^{1x'-z} = \frac{P_1 - S_5^{1x'-z} (\cos \alpha + f \sin \alpha)}{\cos \alpha + f \sin \alpha}. \quad (5)$$

Из выражения (4) находим силу, с которой шарик O_5 воздействует на шарик O_1 ,

$$S_5^1 = S_5^{1x'-z} = \frac{P_1}{\left(1 + \frac{B}{A}\right) (\cos \alpha + f \sin \alpha)}, \quad (6)$$

где $a = r \sin \alpha$, $b = r(1 + \cos \alpha)$ — плечи соответствующих сил;
 $b \sin \alpha \cos \beta - (a + f_k) \cos \alpha - (a + f_k) f \sin \alpha - fb \cos \alpha \cos \beta = A$;
 $b \sin \alpha \cos \beta - (a - f_k) \cos \alpha - f(a - f_k) \sin \alpha - fb \cos \alpha \cos \beta = B$.

Аналогичное выражение получим для реакции $S_5^1 = S_9^1$ со стороны другого шарика нижнего ряда O_9 на шарик O_1 , если рассмотреть сечение II—II, проходящее через шарики O_1 , O_4 и O_9 .

Далее, рассматривая последовательно равновесие шариков O_5 , O_2 , O_6 , O_3 и O_7 , получим зависимости:

$$S_2^5 = \frac{P_1}{\left(1 + \frac{B}{A}\right) (\cos \alpha + f \sin \alpha)} \frac{A}{B}; \quad (7)$$

$$S_2^5 = S_5^1 \frac{A}{B}; \quad (8)$$

$$S_{10}^2 = \frac{P_1}{\left(1 + \frac{B}{A}\right) (\cos \alpha + f \sin \alpha)} \left(\frac{A}{B}\right)^2; \quad (9)$$

$$P_2 = P_1 \frac{A^2}{B^2}; \quad (10)$$

$$S_3^6 = \frac{P_1}{(\cos \alpha + f \sin \alpha)} \frac{\left(1 + \frac{A}{B}\right)^3}{\left(1 + \frac{B}{A}\right)^4}; \quad (11)$$

$$S_{11}^3 = \frac{P_1}{(\cos \alpha + f \sin \alpha)} \frac{\left(1 + \frac{A}{B}\right)^4}{\left(1 + \frac{B}{A}\right)^5}; \quad (12)$$

$$P_3 = P_1 \frac{A^4}{B^4}; \quad (13)$$

$$P_1 = \frac{P_{\text{пр}} (\cos \alpha + f \sin \alpha) (f_1 (r - f_k) + r) \left(1 + \frac{B}{A}\right)^5}{A \left(1 + \frac{A}{B}\right)^4}. \quad (14)$$

Выражение (14) устанавливает связь между силой, которая воздействует на первый конструктивный элемент шарикового передаточного механизма (шарик O_1), и последним элементом — пружиной.

С другой стороны, если рассмотреть равновесие ползуна 6, получим выражение

$$2P_1 + 2P_2 + 2P_3 = P_{\text{ном}}. \quad (15)$$

Подставляя значения для сил P_2 и P_3 из выражений (10) и (13), получим

$$P_1 = \frac{P_{\text{ном}}}{2 \left(1 + \frac{A^2}{B^2} + \frac{A^4}{B^4}\right)}. \quad (16)$$

Выражение $1 + \frac{A^2}{B^2} + \frac{A^4}{B^4}$ представляет собой сумму членов убывающей геометрической прогрессии S_m

$$S_m = \frac{1 - \left(\frac{A}{B}\right)^n}{1 - \left(\frac{A}{B}\right)^2}. \quad (17)$$

Тогда, с учетом зависимости (17) выражение (16) примет вид

$$P_1 = \frac{P_{\text{ном}} \left[1 - \left(\frac{A}{B}\right)^2\right]}{2 \left[1 - \left(\frac{A}{B}\right)^n\right]}. \quad (18)$$

Подставив выражение (14) в (18), получим зависимость между силой $P_{\text{ном}}$, действующей на ползун 6 и силой $P_{\text{пр}}$, создаваемой пружинами 4 и 5,

$$P_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{ном}}}{2} \frac{1 - \left(\frac{A}{B}\right)^2}{1 - \left(\frac{A}{B}\right)^n} \frac{A \left(1 + \frac{A}{B}\right)^{n-2}}{(\cos \alpha + f \sin \alpha) [f(r - f_k) + r] \left(1 + \frac{B}{A}\right)^{n-1}}. \quad (19)$$

Учитывая, что силы трения качения, которые возникают при перекачивании шариков верхнего ряда по плоскости ползуна 6 и шариков нижнего ряда по плоскости корпуса 8, являются малыми величинами и не оказывают существенного влияния на характер передачи силовых потоков, поэтому ими можно пренебречь. Тогда $A=B$ и последнее выражение примет вид

$$P_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{ном}} (1 + \cos \alpha) \cos \beta (\sin \alpha - f \cos \alpha) - \sin \alpha (\cos \alpha + f \sin \alpha)}{2n (\cos \alpha + f \sin \alpha) (f_1 + 1)}, \quad (20)$$

где n — число шариков верхнего ряда.

Для оценки характера передачи силовых потоков шариковым передаточным механизмом проведены аналитические исследования при следующих исходных характеристиках:

входная сила $P_{\text{ном}}=20$ т; угол наклона между шариками верхнего и нижнего рядов изменяется в пределах $\alpha=45\dots75^\circ$; коэффициент трения скольжения между шариками $f=0,1$; коэффи-

коэффициент трения скольжения между шариками и плоскостями $f_1=0,15$; коэффициент трения качения $f_k=0,05$ мм; радиус шариков верхнего и нижнего рядов одинаков $r=14$ мм.

Анализ проводился для случаев расположения в верхнем ряду числа шариков $n=4, 6, 8$ и 10 .

В таблице приведены величины усилий в пружинах P_{np1} и P_{np2} , рассчитанные соответственно по формулам (20) и (19), а так же величина δ , которая оценивает потери от сил трения качения в общем усилии пружины и определяется по формуле

$$\delta = \frac{P_{np1} - P_{np2}}{P_{np1}} 100\%.$$

Силы в пружинах P_{np1} и P_{np2} при различном количестве шариков верхнего ряда

Угол наклона	$n=4$			$n=6$			$n=8$			$n=10$		
	P_{np1} , кН	P_{np2} , кН	δ , %	P_{np1} , кН	P_{np2} , кН	δ , %	P_{np1} , кН	P_{np2} , кН	δ , %	P_{np1} , кН	P_{np2} , кН	δ , %
$\alpha_2=45^\circ$	6,09	5,79	4,96	4,06	3,76	7,41	3,05	2,75	9,8	2,44	2,14	12,15
$\alpha_2=50^\circ$	9,74	9,44	3,11	6,49	6,19	4,66	4,87	4,57	6,2	3,89	3,59	7,72
$\alpha_2=55^\circ$	13,68	13,38	2,21	9,12	8,82	3,32	6,84	6,54	4,43	5,47	5,17	5,52
$\alpha_2=60^\circ$	18,21	17,91	1,65	12,14	11,84	2,49	9,11	8,81	3,33	7,28	6,98	4,16
$\alpha_2=65^\circ$	23,72	23,42	1,26	15,81	15,51	1,91	11,86	11,56	2,55	9,49	9,18	3,19
$\alpha_2=70^\circ$	30,87	30,58	0,96	20,58	20,28	1,46	15,44	15,13	1,95	12,35	12,05	2,45
$\alpha_2=75^\circ$	40,93	40,64	0,71	27,28	26,99	1,09	20,46	20,17	1,46	16,37	16,07	1,84

Из анализа зависимостей (19) и (20) и данных таблицы видно, что усилие в пружинах шарикового передаточного механизма в значительной степени уменьшается с увеличением числа шариков верхнего ряда. Уменьшение усилий в пружинах за счет потерь на трение между шариками и плоскостями, по которым перемещаются шарики, и потерь на трение между самими шариками незначительно и составляет максимально 5 % от общего уменьшения усилия при четырех шариках в верхнем ряду и 12 % при 10 шариках.

Выводы:

— Предложено устройство передаточного механизма шарикового типа, основными элементами которого являются определенным образом расположенные комплекты шариков.

— Такой передаточный механизм позволяет преобразовывать входящую силу в меньшую по величине силу на выходе, которая действует в перпендикулярных направлениях к силе на входе, что обеспечивает компактность конструкции.

— Уменьшение силы в пружинах шарикового передаточного механизма в значительной степени определяется увеличением числа шариков верхнего ряда.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. политехн. ун-та Дашенко А.Ф.

Поступила в редакцию 27 сентября 2012 г.