

УДК 621.83.06

А. П. Прудников

ПЕРЕДАЧА С ФИКСИРОВАННЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ТЕЛ КАЧЕНИЯ

UDC 621.83.06

A. P. Prudnikov

TRANSMISSION WITH FIXED ARRANGEMENT OF INTERMEDIATE ROLLING BODIES

Аннотация

Предложена конструкция передачи с фиксированным расположением промежуточных тел качения, не допускающая перекоса роликов в пазах ведомого вала. Получены уравнения кривых для изготовления беговых дорожек на торцевой поверхности кулачков. На базе проведенного кинематического анализа предложены рекомендации по назначению длины ролика, обеспечивающей высокий КПД передачи. Обосновано создание мультипликатора на базе передачи с фиксированным расположением промежуточных тел качения.

Ключевые слова:

механическая передача, промежуточные тела качения, составной ролик, мультипликатор.

Abstract

The paper presents the design of a transmission with a fixed arrangement of intermediate rolling bodies, not allowing roller skewing in the grooves of the driven shaft. The equations for curves to manufacture raceways on the face surface of cams have been obtained. Based on the kinematic analysis, the recommendations on the roller length that provides high transmission efficiency are proposed. The creation of a speed multiplier based on the transmission with the fixed arrangement of intermediate rolling bodies is substantiated.

Keywords:

mechanical transmission, intermediate rolling bodies, composite roller, speed multiplier.

Необходимость передачи больших мощностей при малых габаритах и массе редуктора привела к развитию передач с промежуточными телами качения [1]. Они нашли свое применение при создании компактных приводных систем, буровой техники, средств малой механизации (ключи, лебедки) и т. д. Указанная сфера использования передач с промежуточными телами качения вызвана их такими преимуществами, как малые габаритные размеры и высокая нагрузочная способность благодаря передаче нагрузки по множеству параллельных потоков (тел качения).

Основным недостатком передач с

промежуточными телами качения является низкий КПД, что объясняется возникновением трения скольжения в местах взаимодействия основных звеньев передачи (ведущее, ведомое, заторможенное) с телами качения. Предложенное в [2] применение в качестве промежуточных тел качения составных роликов для замены трения скольжения на трение качения не позволяет полностью избежать потерь мощности на проскальзывание. Образующиеся при изготовлении и сборке передачи зазоры между роликами и беговыми дорожками, в которых они располагаются, при приложении нагрузки вызывают перекосы роликов



вдоль пазов ведомого вала, что, в свою очередь, приводит к их скольжению при перемещении. По вышеуказанной причине высокая скорость вращения ведущего вала и большой передаваемый момент могут вызывать перекося роликов, приводящий к их заклиниванию и утрате работоспособности передачи.

В связи с этим возникает необходимость создания передачи с фиксированным расположением промежуточных тел качения, т. е. когда тела качения не образуют с ведомым валом поступательную кинематическую пару. При этом необходимо сохранить преимущества передач с промежуточными телами качения, в частности малые габаритные размеры и массу, высокую нагрузочную способность вследствие распределения нагрузки по потокам, технологичность изготовления.

Была предложена конструкция передачи, позволяющая удовлетворить всем изложенным условиям. В ней ролики зафиксированы на ведомом валу от радиального и осевого перемещения и образуют с ведомым валом враща-

тельную кинематическую пару. Вращение ведущего вала и однопериодной беговой дорожки, с которой взаимодействует один из концов ролика, вынуждает его совершать колебательные движения. При этом второй конец ролика взаимодействует с неподвижной многопериодной беговой дорожкой. Такие наложенные связи вынуждают ведомый вал вращаться с уменьшенной угловой скоростью. Беговые дорожки могут быть выполнены как на цилиндрической, так и плоской поверхности, т. е. может быть реализован радиальный и цилиндрический типы передачи с промежуточными телами качения.

При такой конструкции передачи перекося роликов невозможен, соответственно, при использовании составных роликов обеспечивается высокий КПД и надежность передачи.

На рис. 1 представлена модель взаимодействия тел качения с основными звеньями зацепления (развертка на плоскость) с учетом указанных ранее условий.

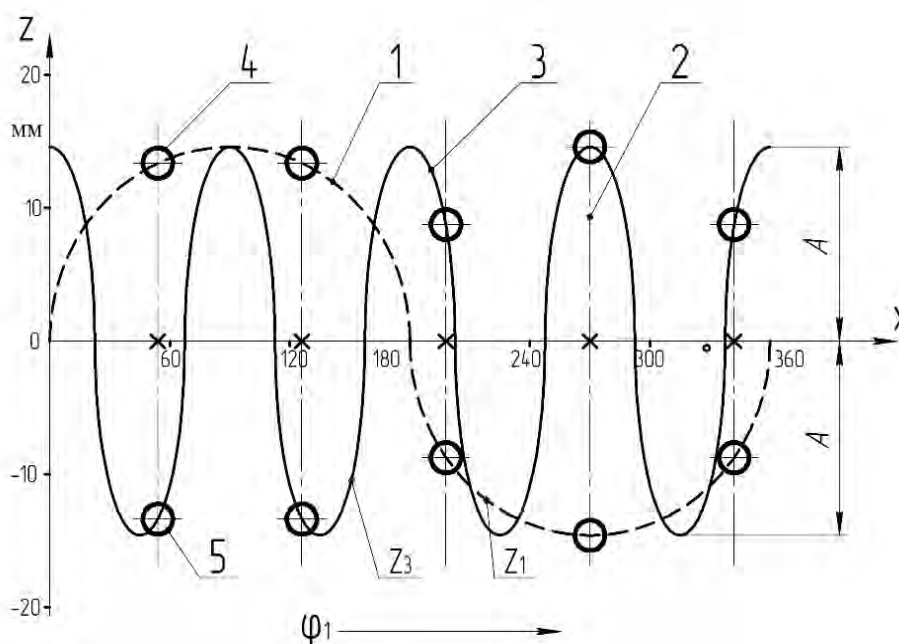


Рис. 1. Модель взаимодействия тел качения с основными звеньями зацепления (развертка на плоскость)



Беговые дорожки в развертке на плоскость могут быть представлены в виде синусоид 1 и 3. Ролики 2 закрепляются на ведомом валу, образуя в местах крепления с валом вращательную кинематическую пару, причем расстояния от точки крепления до концов ролика равны. При этом один конец ролика 4 взаимодействует с однопериодной беговой дорожкой 1 (на рис. 1 число периодов $Z_1 = 1$), расположенной на ведущем валу. Второй конец ролика 5 взаимодействует с многопериодной беговой дорожкой 3 (на рис. 1 число периодов $Z_3 = 4$), расположенной на закрепленном в корпусе звене. При движении однопериодной синусоиды 1 относительно неподвижной многопериодной синусоиды 3, например вправо, конец 4 ролика 2 начинает перемещаться вдоль оси z , вынуждая ролик 2 вращаться относительно точки его крепления на ведомом валу (ролик поворачивается относительно оси x). Соответственно, второй конец ролика 5 будет перемещаться вдоль оси z (на расстояние, равное тому, на которое переместился ко-

нец 4), взаимодействуя с неподвижной многопериодной синусоидой 3. Это приведет к тому, что ролик 2 в результате наложенных связей переместится вдоль оси x . Расстояние вдоль оси абсцисс между роликами 2 при этом остается неизменным.

Перемещение кривых вдоль оси абсцисс в развертке на плоскость соответствует относительному повороту звеньев 1 и 2 в передаче, причем беговая дорожка 3 неподвижна, а звенья 1 и 2 вращаются с разными угловыми скоростями. Передаточное число постоянно, определяется как сумма чисел периодов периодических кривых ($Z_1 + Z_3$) и не зависит непосредственно от размеров передачи.

На рис. 2 представлены кинематические схемы передач с фиксированным расположением промежуточных тел качения – передач радиального (беговые дорожки выполнены на плоских поверхностях) и цилиндрического (беговые дорожки выполнены на цилиндрических поверхностях) типов.

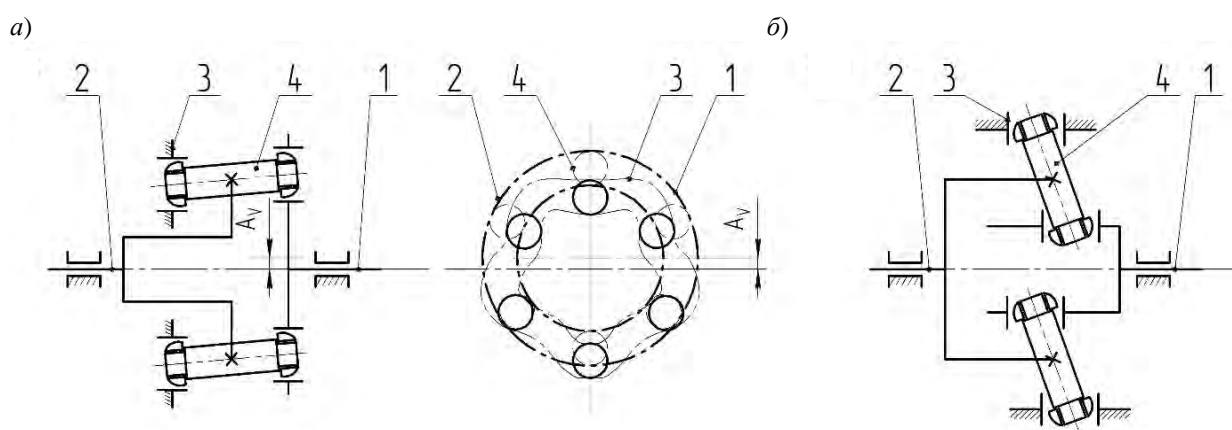


Рис. 2. Кинематическая схема передачи с фиксированным расположением промежуточных тел качения: *а* – беговые дорожки расположены на плоских поверхностях (радиальный тип передачи); *б* – беговые дорожки расположены на цилиндрических поверхностях (цилиндрический тип передачи)

Уравнения кривых (например, синусоид), используемых для получения беговых дорожек в обоих типах передач, аналогичны тем, что используются

в передачах с промежуточными телами качения (с нефиксированным расположением роликов), и приведены соответственно в [3, 4].



Однако при использовании этих уравнений вследствие того, что ролик совершает колебательное движение (его конец движется по траектории, представляющей собой часть дуги окружности), контакт ролика с беговой дорожкой является точечным. Соответственно, значительно снижается нагрузочная способность передачи.

Для устранения указанного недостатка беговая дорожка должна быть спрофилирована с учетом траектории движения конца ролика при совершении им колебательного движения. В этом случае для передачи цилиндрического типа кривые, используемые для получения беговых дорожек, должны распола-

гаться на сферических поверхностях. Уравнения таких кривых (для синусоиды) представлены в [5]. Анализ конструкции передачи показывает, что при этом значительно увеличивается трудоемкость изготовления деталей и сборки передачи. Для передачи радиального типа такая проблема не возникает, однако для нее данные уравнения не применимы.

На рис. 3 приведена кинематическая схема передачи с фиксированным расположением промежуточных тел качения радиального типа с беговыми дорожками, спрофилированными с учетом траектории движения конца ролика при совершении им колебательного движения.

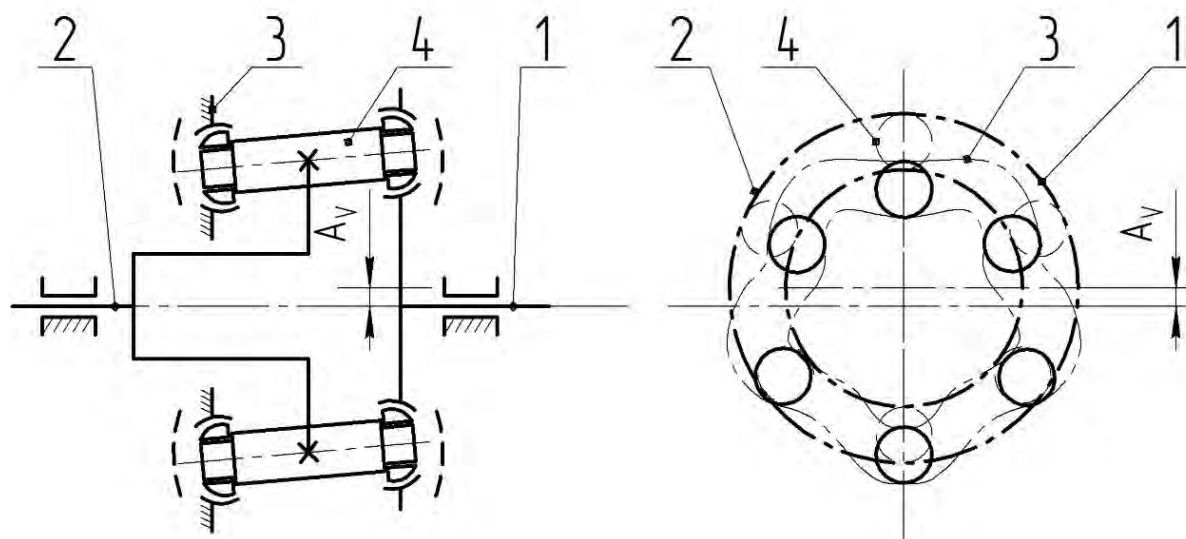


Рис. 3. Кинематическая схема передачи радиального типа с фиксированным расположением промежуточных тел качения

Выведем уравнения кривых (для синусоиды), используемых для получения беговых дорожек, для передачи радиального типа с фиксированным расположением роликов.

Система уравнений для получения участка кривой синусоиды, составляющей половину периода, имеет вид:

$$\begin{cases} \rho = R_v - A_v \cdot \sin(Z_v \cdot \varphi); \\ x = \rho \cdot \cos(\varphi); \\ y = \rho \cdot \sin(\varphi); \\ z = r \cdot (\cos(-\frac{\gamma}{2} + \varphi \cdot (\frac{Z_v}{\pi}) \cdot \gamma) - \cos(\frac{\gamma}{2})), \end{cases} \quad (1)$$

где R_v – радиус окружности, на которую деформируется ось плоской синусоиды, м; A_v – амплитуда синусоиды, м;



Z_v – число периодов синусоиды; φ – полярный угол, рад; r – радиус окружности, описываемой концом ролика, при совершении им колебательного движения, м; γ – угол поворота ролика при совершении им колебательного движения (рис. 4), рад.

Полярный угол φ для получения участка кривой синусоиды, составляющей половину периода, изменяется в диапазоне от 0 до π/Z_v .

Угол поворота ролика при совершении им колебательного движения

определяется в соответствии с рис. 4 по формуле

$$\gamma = 2 \cdot \arcsin\left(\frac{A_v}{r}\right). \quad (2)$$

На рис. 5 представлены участки кривых синусоид (одно- и многопериодной), составляющие половину периода, на плоскости (см. рис. 5, а) и вся кривая в пространстве (см. рис. 5, б). При построении были приняты следующие параметры передачи: $Z_v = 3$; $R_v = 30$ мм; $r = 20$ мм; $A_v = 5$ мм.

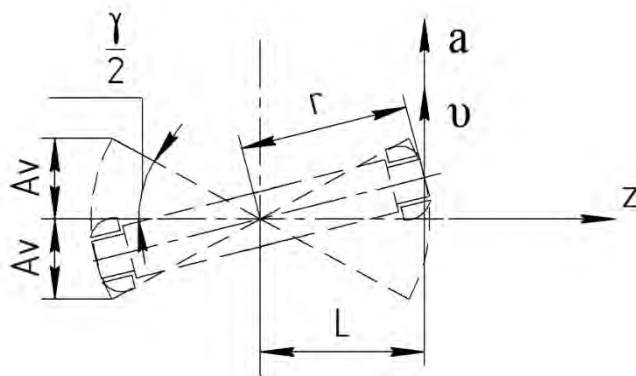


Рис. 4. Схема колебаний ролика

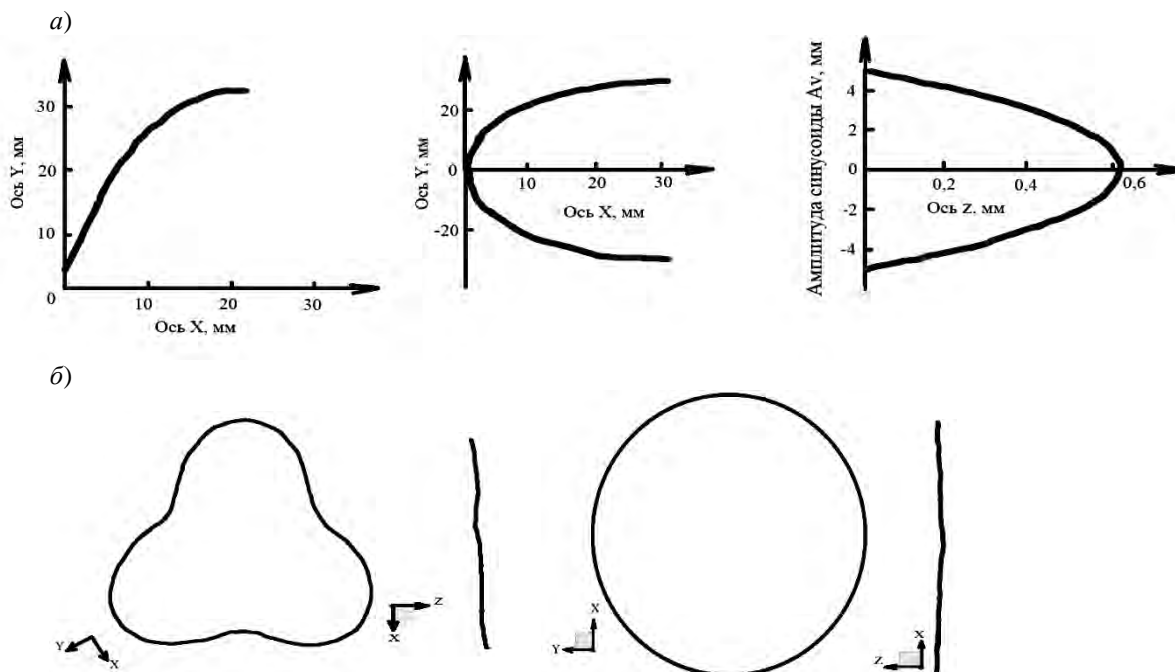


Рис. 5. Кривые, применяемые для получения беговых дорожек передачи радиального типа с фиксированным расположением промежуточных тел качения: а – участки кривых синусоид (одно- и многопериодной), составляющие половину периода, на плоскости; б – синусоиды (одно- и многопериодная) в пространстве



Проведем кинематический анализ передачи и определим скорость и ускорение ролика при совершении им колебательного движения (см. рис. 4).

Линейная скорость перемещения конца ролика однопериодной беговой дорожкой рассчитывается по формуле

$$v = \rho' = -Z_v \cdot A_v \cdot \cos(Z_v \cdot \varphi). \quad (3)$$

Линейное ускорение при перемещении конца ролика однопериодной беговой дорожкой находят по формуле

$$a = v' = \rho'' = Z_v^2 \cdot A_v \cdot \sin(Z_v \cdot \varphi). \quad (4)$$

Угловые скорость и ускорение ролика определяются по следующим формулам:

$$\omega = \frac{v}{L}; \quad \varepsilon = \frac{a}{L}, \quad (5)$$

где L – расстояние, измеренное вдоль оси z от конца ролика до центра его поворота при совершении им колебательного движения (см. рис. 4), м;

$$L = r \cdot \cos\left(-\frac{\gamma}{2} + \varphi \cdot \left(\frac{Z_v}{\pi}\right) \cdot \gamma\right). \quad (6)$$

На рис. 6 приведены графики линейных и угловых скоростей и ускорений для ролика, совершающего колебательное движение, при прохождении им половины периода беговой дорожки. При расчете были приняты следующие параметры передачи: $Z_v = 3$; $R_v = 30$ мм; $r = 20$ мм; $A_v = 5$ мм.

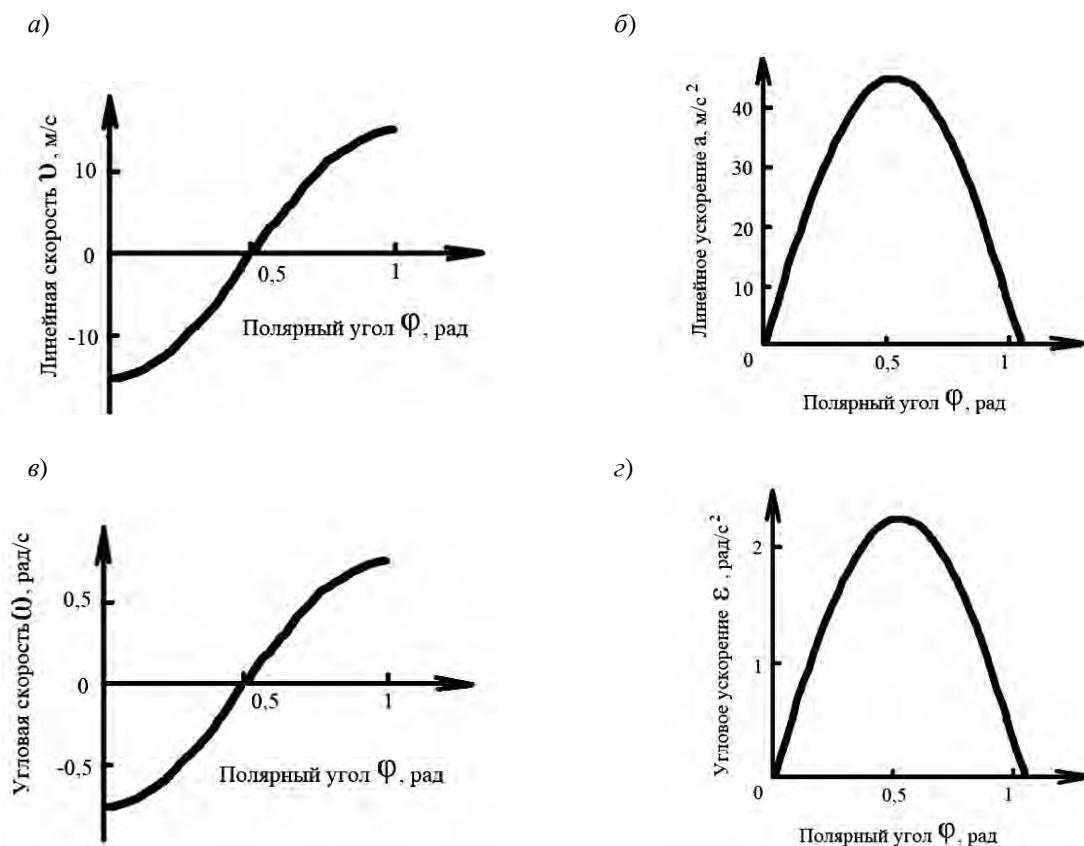


Рис. 6. Графики линейных и угловых скоростей и ускорений для ролика при совершении колебательного движения: a – линейная скорость конца ролика; $б$ – линейное ускорение конца ролика; $в$ – угловая скорость ролика; $г$ – угловое ускорение ролика

Как видно из графиков, максимальные значения ускорений возникают при прохождении роликом середины участка беговой дорожки, составляющей половину периода синусоиды, ее образующей.

Главным фактором, влияющим на величину ускорения, является амплитуда синусоиды. Ее оптимальное с точки зрения КПД значение определяется по формуле [3]

$$A_{\text{в опт}} = \frac{\pi \cdot R_v \cdot \sqrt{2 \cdot Z_v - \text{tg}^2(\theta)}}{4 \cdot Z_v}, \quad (7)$$

где θ – угол трения, рад.

Соответственно, изменять величину амплитуды для снижения ускорений нельзя, т. к. это приведет к снижению КПД передачи.

Однако в передаче с фиксированным расположением тел качения на величину угловых скорости и ускорения в соответствии с формулой (5) влияет длина ролика. На рис. 7 представлены графики зависимости угловых скорости и ускорения от длины ролика. При расчете были приняты следующие параметры передачи: $Z_v = 3$; $R_v = 30$ мм; $A_v = 5$ мм.

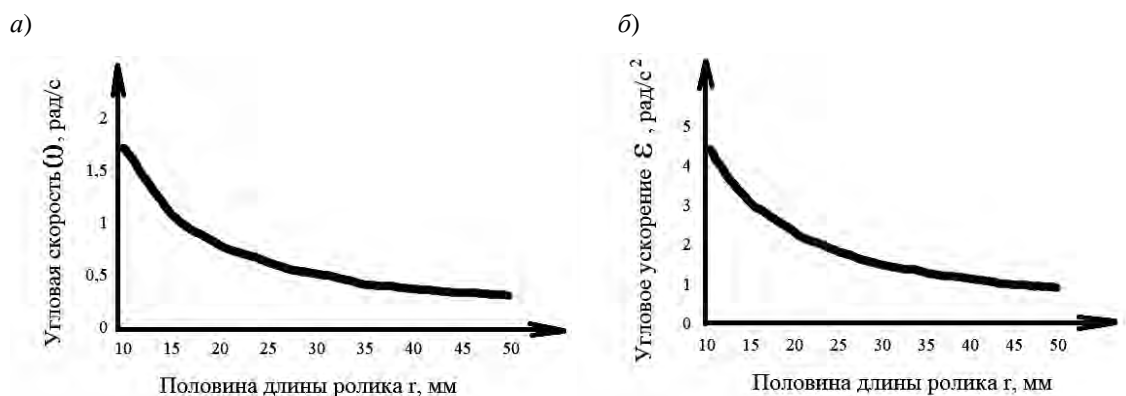


Рис. 7. Графики зависимости угловых скорости и ускорения ролика при совершении колебательного движения от его длины: а – угловая скорость ролика; б – угловое ускорение ролика

С учетом того, что увеличение длины роликов приводит к росту осевых габаритных размеров передачи радиального типа рациональные величины радиуса окружности, описываемой концом ролика, при совершении им колебательного движения находятся в диапазоне от 20 до 40 мм.

Уменьшение угловых скорости и ускорения колебательного движения составного ролика приведет к снижению потерь на трение в месте его установки на ведомом валу и повышению КПД передачи. При этом линейные ускорения конца ролика не изменятся.

Предложенная конструкция передачи с фиксированным расположением

тел качения позволяет применять ролики с разными длинами концов, взаимодействующих с одно- и многопериодной беговыми дорожками. В этом случае должна быть различна амплитуда синусоид, образующих одно- и многопериодную беговые дорожки. Указанная возможность позволяет создавать на базе передачи с фиксированным расположением роликов мультипликатор.

В передаче с промежуточными телами качения сложность создания мультипликатора связана с наличием самоторможения, возникающего, когда угол подъема участка синусоиды, образующей однопериодную беговую дорожку, меньше угла трения. Чтобы вращение



звена с однопериодной беговой дорожкой стало возможным, необходимо выполнение условия (рис. 8)

$$A_{v1} \geq \sqrt{R_v^2 + A_{v1}^2} \cdot \sin(\theta), \quad (8)$$

где A_{v1} – амплитуда однопериодной синусоиды, м.

Амплитуда синусоиды для многопериодной беговой дорожки для по-

лучения максимального КПД определяется по формуле (7). Длина конца ролика, взаимодействующего с многопериодной беговой дорожкой, назначается минимально возможной исходя из конструктивных требований. Длина конца ролика, взаимодействующего с однопериодной беговой дорожкой, назначается из рекомендованного диапазона (от 20 до 40 мм).

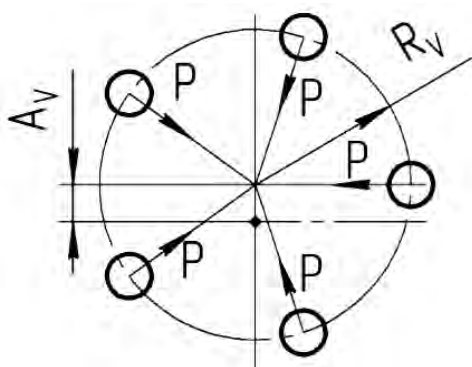


Рис. 8. Схема сил, действующих на однопериодную беговую дорожку со стороны роликов

Амплитуда синусоиды для однопериодной беговой дорожки в этом случае рассчитывается по формуле

$$A_{v1} = \frac{r_1 \cdot A_{v3}}{r_3}, \quad (9)$$

где r_1 , r_3 – радиусы окружностей, описываемых концами ролика, взаимодействующими с одно- и многопериодными беговыми дорожками соответственно (рис. 9), м; A_{v3} – амплитуда многопериодной синусоиды, м.

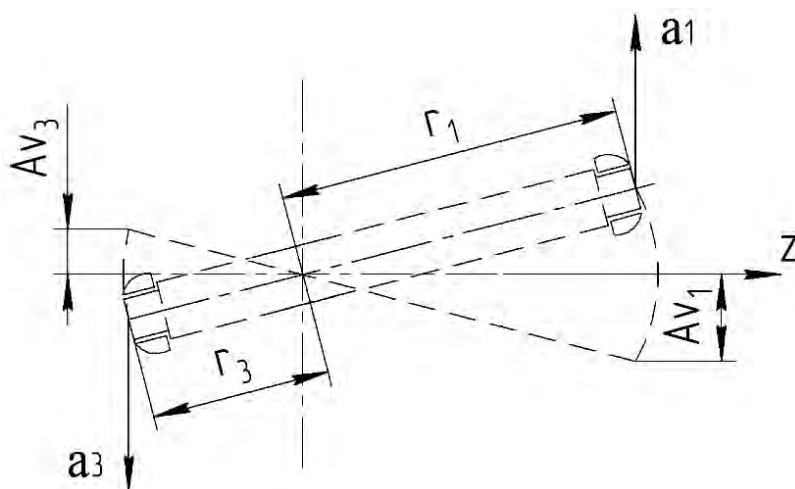


Рис. 9. Схема ролика для определения линейных ускорений его концов

В этом случае линейное ускорение конца ролика, взаимодействующего с однопериодной беговой дорожкой, будет повышаться за счет увеличения амплитуды однопериодной синусоиды. Но при этом линейное ускорение конца ролика, взаимодействующего с многопериодной беговой дорожкой, будет снижаться за счет разности длин концов роликов. Поскольку отношение амплитуд синусоид пропорционально отношению длин концов роликов, то линейное ускорение более нагруженного конца ролика, взаимодействующего с многопериодной беговой дорожкой, будет равно его ускорению для случая использования роликов с равными длинами концов (применяемых в конструкции редуктора).

Таким образом, предложена кон-

струкция передачи с фиксированным расположением промежуточных тел качения, не допускающая перекоса роликов вдоль пазов ведомого вала, что приводит к повышению ее КПД и надежности. Получены уравнения кривых (для синусоиды), используемых для получения беговых дорожек, для передачи радиального типа. Проанализированы скорости и ускорения составного ролика при совершении им колебательных движений, что позволило получить рекомендации по назначению рациональной длины ролика (в диапазоне от 20 до 40 мм), обеспечивающей повышение КПД передачи.

Обосновано создание на базе передачи с фиксированным расположением промежуточных тел качения мультипликатора.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сазонов, И. С.** Повышение нагрузочной способности и КПД кулачково-роликовых передач: монография / И. С. Сазонов, М. Е. Лустенков, А. П. Прудников. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2016. – 163 с.: ил.
2. **Прудников, А. П.** Результаты экспериментальных исследований цилиндрической кулачковой роликовой передачи / А. П. Прудников, М. Е. Лустенков, Е. С. Фитцова // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2013. – № 3 (40). – С. 37–45.
3. **Лустенков, М. Е.** Передачи с промежуточными телами качения: определение и минимизация потерь мощности: монография / М. Е. Лустенков. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2010. – 274 с.
4. Планетарные кулачково-плунжерные передачи. Проектирование, контроль и диагностика / М. Ф. Пашкевич [и др.]. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2003. – 221 с.
5. Сравнительный анализ различных типов центровых кривых кулачковых профилей сферических роликовых передач / М. Е. Лустенков, И. И. Маковецкий, Е. С. Лустенкова, Ю. В. Машин, В. Л. Комар // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2017. – № 3 (56). – С. 74–82.

Статья сдана в редакцию 20 июня 2019 года

Александр Петрович Прудников, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.
E-mail: prudnikov_a@tut.by.

Aleksandr Petrovich Prudnikov, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.
E-mail: prudnikov_a@tut.by.

