

УДК 621.833.6

И. В. Кузнецов, аспирант, Глазовский инженерно-экономический институт (филиал) ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

РАСЧЕТ НАГРУЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СОСТАВНОГО РОЛИКА ПЛАНЕТАРНОЙ ПЕРЕДАЧИ ТИПА К-Н-У

Основными критериями при выборе планетарной передачи являются ее простота, высокий КПД, хорошие массогабаритные показатели. Таким требованиям отвечает планетарная передача с одним или двумя внутренними зацеплениями зубчатых колес при небольшой разнице в числах их зубьев [1]. Главным недостатком, сдерживающим их применение, является необходимость использования сложного механизма восприятия момента сил, действующих на сателлит.

Предложенная нами конструкция планетарной передачи лишена указанного недостатка [2]. Ее меха-

низм восприятия момента выполнен в виде дисков с отверстиями, в которых установлены составные ролики (рис. 1). Отверстия такого же диаметра имеют и сателлиты. Разница диаметров отверстий дисков, сателлитов (D) и роликов (d) равна эксцентриситету a_w ведущего вала-водила. Конструкция проста и в то же время не приводит к большим потерям мощности на трение, так как ролики в процессе работы передачи перекатываются по цилиндрическим поверхностям дисков. Составные ролики, имея меньшую жесткость, чем цельные, обеспечивают более равномерное распределение нагрузки, как по роликам, так и их длине.

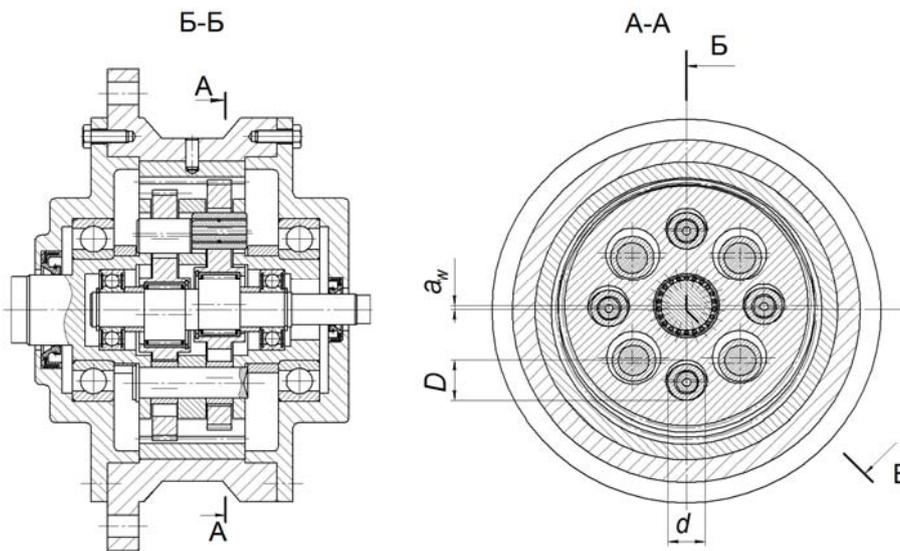


Рис. 1. Зубчато-роликотая планетарная передача с составными роликами

Для расчета данной планетарной передачи на прочность необходимо знать законы распределения нагрузки в зонах контакта ролика с сателлитом и диском. В существующих методах расчета распределение нагрузки определялось только по длине цельного ролика [3]. Найдем закон распределения нагрузки в зонах контакта составного ролика с диском и сателлитом.

В зоне контакта составного ролика с сателлитом распределенная нагрузка для внутреннего ролика $\omega_2(x) = [y_2(x) + \delta_2] C_{вн}$, внешнего – $\omega_1(x) - \omega_2(x) = [y_1(x) + \delta_1] C_{вн}$. Здесь $\delta_2, \delta_1 = \text{const}$; $y_2(x), y_1(x)$ – перемещение на участке длиной l (l – половина дли-

ны площадки контакта ролика с сателлитом) для внутреннего и внешнего ролика соответственно;

$$C_{вн} = E \frac{[\ln(1 + h_2/r_{в2})]^3}{24(\pi/8 - 1/\pi) + \pi[\ln(1 + h_2/r_{в2})]^2} - \text{удельная}$$

жесткость внутреннего ролика;

$$C_{внш} = E \frac{[\ln(1 + h_1/r_{в1})]^3}{24(\pi/8 - 1/\pi) + \pi[\ln(1 + h_1/r_{в1})]^2} - \text{удельная}$$

жесткость внешнего ролика, где E – модуль упругости первого рода; h_1, h_2 и $r_{в1}, r_{в2}$ – толщина стенки и радиус внутренней поверхности внешнего и внутреннего роликов соответственно.

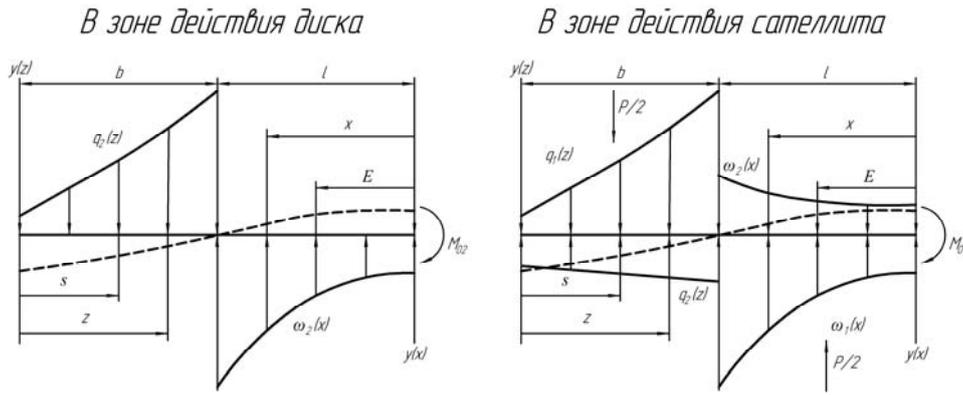


Рис. 2. Схема нагруженно-деформированного состояния составного ролика механизма восприятия момента

Тогда уравнение упругой линии для внутреннего и внешнего роликов в зоне контакта с сателлитом примут следующий вид:

$$y_2^{\text{II}}(x)C_{\text{вн}} = \omega_2^{\text{II}}(x) = C_{\text{вн}} \frac{M_2(x)}{J_2 E} + KC_{\text{вн}} \frac{\omega_2(x)}{F_2 G}; \quad (1)$$

$$y_1^{\text{II}}(x)C_{\text{вн}} = \omega_1^{\text{II}}(x) - \omega_2^{\text{II}}(x) = C_{\text{вн}} \frac{M_1(x)}{J_1 E} + KC_{\text{вн}} \frac{\omega_1(x) - \omega_2(x)}{F_1 G}. \quad (2)$$

Здесь $M_2(x) = M_{02} - \int_0^x \omega_2(v)(x-v)dv$; $M_1(x) = M_{01} - \int_0^x (\omega_1(v) - \omega_2(v))(x-v)dv$; $K = 1,11$; G – модуль упругости второго рода; F_2, J_2 и F_1, J_1 – площадь и осевой момент инерции сечения внутреннего и внешнего роликов соответственно; M_2 и M_1 – момент изгиба роликов в среднем сечении (при $x = 0$).

Из уравнений (1) и (2) следует:

$$\omega_2^{\text{IV}}(x) - \frac{KC_{\text{вн}}}{F_2 G} \omega_2^{\text{II}}(x) + \frac{C_{\text{вн}}}{J_2 E} \omega_2(x) = 0; \quad (3)$$

$$\omega_1^{\text{IV}}(x) - \omega_2^{\text{IV}}(x) - \frac{KC_{\text{вн}}}{F_1 G} (\omega_1^{\text{II}}(x) - \omega_2^{\text{II}}(x)) + \frac{C_{\text{вн}}}{J_1 E} (\omega_1(x) - \omega_2(x)) = 0. \quad (4)$$

Аналогично в зоне контакта составного ролика с диском нагрузка $q_2(z) = [y_2(z) + \Delta_2]C_{\text{вн}}$ и $q_1(z) - q_2(z) = [y_1(z) + \Delta_1]C_{\text{вн}}$, Δ_2 и $\Delta_1 = \text{const}$, уравнение упругой линии:

$$y_2^{\text{II}}(z)C_{\text{вн}} = q_2^{\text{II}}(z) = C_{\text{вн}} \frac{M_2(z)}{J E} + \frac{KC_{\text{вн}}}{F_2 G} q_2(z); \quad (5)$$

$$y_1^{\text{II}}(z)C_{\text{вн}} = q_1^{\text{II}}(z) - q_2^{\text{II}}(z) = C_{\text{вн}} \frac{M_1(x)}{J_1 E} + \frac{KC_{\text{вн}}}{F_1 G} (q_1(z) - q_2(z)). \quad (6)$$

Здесь

$$M_2(z) = - \int_0^z q_2(\xi)(z-\xi)d\xi;$$

$$M_1 = - \int_0^z (q_1(\xi) - q_2(\xi))(z-\xi)d\xi.$$

Тогда

$$q_2^{\text{IV}}(z) - \frac{KC_{\text{вн}}}{F G} q_2^{\text{II}}(z) + \frac{C_{\text{вн}}}{J E} q_2(z) = 0; \quad (7)$$

$$q_1^{\text{IV}}(z) - q_2^{\text{IV}}(z) - \frac{KC_{\text{вн}}}{F_1 G} (q_1^{\text{II}}(z) - q_2^{\text{II}}(z)) + \frac{C_{\text{вн}}}{J_1 E} (q_1(z) - q_2(z)) = 0. \quad (8)$$

Решим системы неоднородных дифференциальных уравнений (3), (4) и (7), (8), используя принцип суперпозиции и следующие граничные условия и уравнения статики.

1. По условиям симметрии кривой распределения нагрузки при $x = 0$ $\omega_1^{\text{I}}(x) = 0$, $\omega_1^{\text{III}}(x) = 0$ и $\omega_2^{\text{I}}(x) = 0$, $\omega_2^{\text{III}}(x) = 0$.

2. В зоне действия диска на внешний ролик сила $P/2$ равна интегралу от распределенной нагрузки $q_1(z)$ на участке длиной b :

$$\frac{1}{b} \int_0^b q_1(z) dz = \frac{P/2}{b} = q,$$

для внутреннего ролика [4]:

$$\frac{1}{b} \int_0^b q_2(z) dz = \frac{(\ln(n_2))^3}{24 \left(\frac{\pi}{8} - \frac{1}{\pi} \right) + \pi (\ln(n_2))^2} \times \left[\frac{q \left[24 \left(\frac{\pi}{8} - \frac{1}{\pi} \right) + \pi (\ln(n_1))^2 \right]}{(\ln(n_1))^3} - q \Delta^* \right].$$

Здесь $\Delta^* = \frac{\Delta E}{q}$, где Δ – зазор между внешним и внутренним роликами,

$$n_1 = 1 + \frac{h_1}{r_{в1}} \text{ и } n_2 = 1 + \frac{h_2}{r_{в2}}.$$

3. Аналогично в зоне действия сателлита на внешний ролик сила $P/2$ равна интегралу от распределенной нагрузки $\omega_1(x)$ на участке длиной l :

$$\frac{1}{l} \int_0^l \omega_1(x) dx = \frac{P/2}{l} = q,$$

для внутреннего ролика [4]:

$$\frac{1}{l} \int_0^l \omega_2(z) dz = \frac{(\ln(n_2))^3}{24 \left(\frac{\pi}{8} - \frac{1}{\pi} \right) + \pi (\ln(n_2))^2} \times \left[\frac{q \left[24 \left(\frac{\pi}{8} - \frac{1}{\pi} \right) + \pi (\ln(n_1))^2 \right]}{(\ln(n_1))^3} - q \Delta^* \right].$$

4. Угол наклона упругой линии ролика в зоне его взаимодействия с диском равен углу наклона кривой в зоне взаимодействия ролика с сателлитом:

$$q_1^I(z=b) = \omega_1^I(x=l);$$

$$q_2^I(z=b) = \omega_2^I(x=l).$$

5. На границе участков справедливо равенство: для внутреннего ролика

$$\omega_2^II(x=l) = \frac{C_{вн}}{J_2 E} \int_0^l q_2(z)(l-z) dz + \frac{KC_{вн}}{F_2 G} \omega_2(x=l);$$

для внешнего ролика

$$\omega_1^II(x=l) - \omega_2^II(x=l) = \frac{C_{вн}}{J_1 E} \int_0^l (q_1(z) - q_2(z))(l-z) dz + \frac{KC_{вн}}{F_1 G} (\omega_1(x=l) - \omega_2(x=l)).$$

6. На границе ролика в зоне действия диска (при $z=0$) справедливо равенство:

для внешнего ролика

$$q_1^II(z=b) - q_2^II(z=b) = \frac{C_{вн}}{J_1 E} \int_0^b (q_1(z) - q_2(z))(b-z) dz + \frac{KC_{вн}}{F_1 G} (q_1(z=b) - q_2(z=b));$$

для внутреннего ролика

$$q_2^II(z=b) = \frac{C_{вн}}{J_2 E} \int_0^b q_2(z)(b-z) dz + \frac{KC_{вн}}{F_2 G} q_2(z=b).$$

Постоянные интегрирования для уравнений (3), (4), (7) и (8) определяются численно из вышеприведенных равенств.

На рис. 3 показано распределение нагрузок на участках составного ролика при следующих параметрах: $b=l$, $\frac{l}{d}=1$, $\frac{D}{d}=1,8$, $\Delta^*=1,05$.

На рис. 4 приведены графики зависимости коэффициентов неравномерности распределения нагрузки при параметрах $b=l$, $\frac{l}{d}=1$, $\Delta^*=0$ для внешнего ролика в зоне контакта с сателлитом $\left(K_W = \frac{\omega_{\max}}{\omega_{\text{cp}}} \right)$

и диском $\left(K_Q = \frac{q_{\max}}{q_{\text{cp}}} \right)$ от отношения внешнего диаметра ролика к внутреннему $Y = \frac{D}{d}$ при различных значениях $\frac{D}{l}$ (ω и q – средние значения нагрузок).

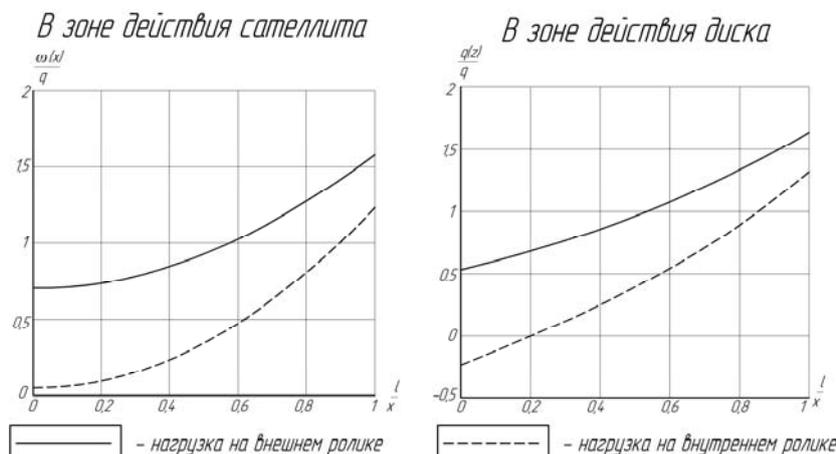


Рис. 3. Распределение нагрузки по длине составного ролика

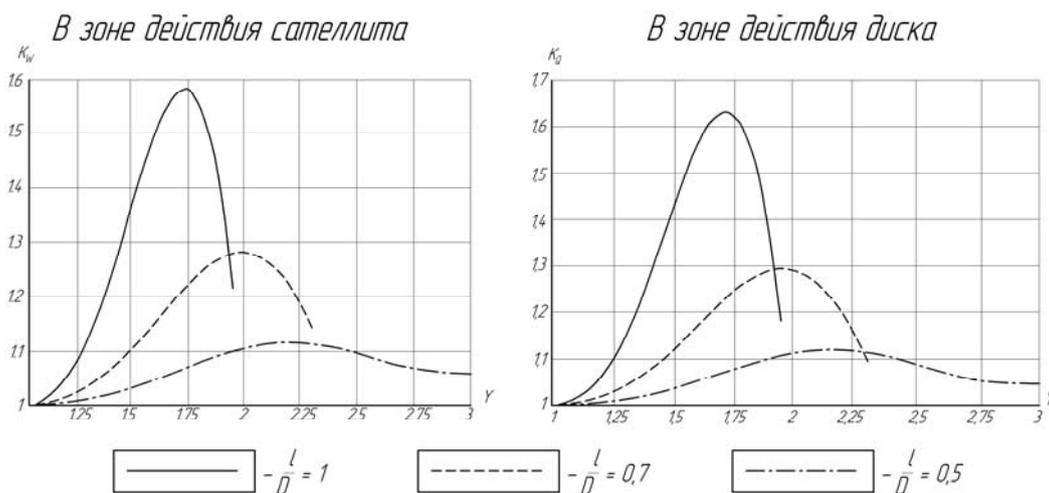


Рис. 4. График неравномерности распределения нагрузки по длине внешнего ролика при различных значениях $\frac{l}{d}$

График распределения нагрузки по внутреннему ролику, представленный на рис. 5, построен при следующих параметрах:

$$b = l, \frac{l}{d} = 1, \frac{D}{d} = 1,5, q = 2 \cdot 10^5 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$$

Сравнительный анализ законов распределения нагрузки по длине сборного ролика показывает,

что коэффициент неравномерности распределения нагрузки значительно меньше (на 10–25 %) по сравнению с цельным роликом вследствие реакции внутреннего ролика на воздействие со стороны внешнего ролика, что говорит о целесообразности использования в передачах типа К-Н-V механизма снятия движения с сателлитов со сборными роликами.

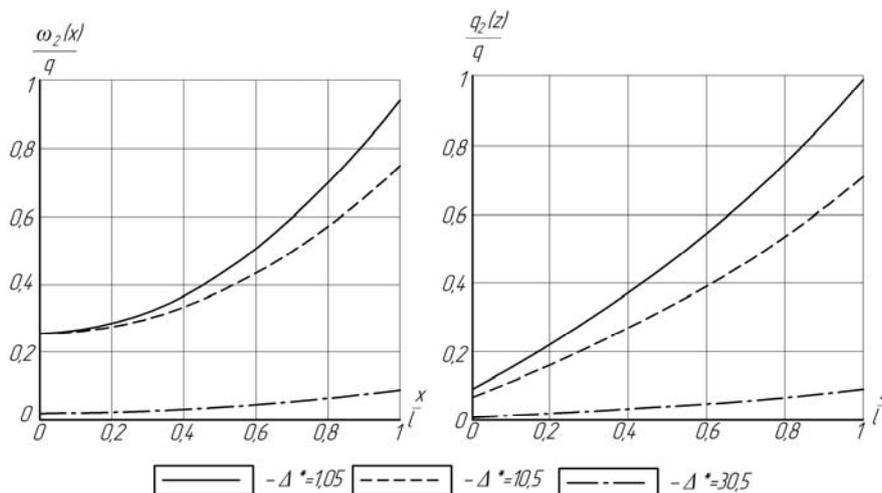


Рис. 5. Распределение нагрузки по длине внутреннего ролика при различных значениях Δ^*

Библиографические ссылки

1. Кудрявцев В. Н., Кирдяшев Ю. Н., Гинзбург Е. Г. Планетарные передачи : справочник. – Л. : Машиностроение, 1977. – 563 с.
2. Пат. 2399813 Рос. Федерации. МПК F16Н 1/32. Планетарная передача.

3. Плеханов Ф. И., Овсянников А. В. Исследование распределения нагрузки по длине ролика зубчато-роликковой планетарной передачи // Вестник машиностроения. – 2011. – № 3. – С. 12–14.
4. Плеханов Ф. И., Кузнецов И. В. Исследование жесткости сборного ролика зубчато-роликковой планетарной передачи типа К-Н-V // Научно-технические и социально-экономические проблемы регионального развития : науч. конф. – Глазов, 2014. – С. 28–31.