

МЕТОД РАСЧЕТА ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ЦИКЛОИДАЛЬНОГО ПЛАСТИКОВОГО САТЕЛЛИТА ПЛАНЕТАРНО-ЦЕВОЧНОЙ ПЕРЕДАЧИ

Бексултанова А.Ж.

Научный руководитель: Ермолаев М.М.

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
г.Москва*

Ключевые слова: планетарно-цевочный редуктор, износостойкость, удельное скольжение, циклоидальное зацепление.

Аннотация. Планетарно-цевочные редукторы (ПЦР) нашли широкое применение в робототехнике, станкостроении, высокоточных медицинских приборах и других областях промышленности, где требуется сочетание точности и нагрузочной способности при малых габаритах редуктора. В планетарно-цевочных передачах эти свойства обусловлены многопарностью зацепления, приводящей к большой степени статической неопределенности, и как следствие, сложностям в расчетах. Наличие пластикового сателлита расширяет список возможных отказов передачи; если подвижность цевок ограничена, необходимым критерием работоспособности считаем также износостойкость зацепления.

METHOD FOR CALCULATING THE WEAR RESISTANCE OF CYCLOIDAL PLASTIC PLANETARY-PINION GEAR SATELLITE

Bexultanova A.Zh.

Scientific advisor: Ermolaev M.M.

Bauman Moscow state technical university, Moscow

Keywords: planetary-pinion gear, wear resistance, specific glide, cycloidal engagement.

Abstract. Planetary-pinion gears are used in robotics, machine tool industry, precision medical devices and other fields of industry where a combination of accuracy and load capacity is required with small dimensions of the gearboxes. In planetary gear drives these properties are due to multi-pair gearing which leads to a large degree of static uncertainty and, as a result, difficulties in calculations. The presence of a plastic satellite expands the list of possible transmission failures; if the mobility of the spars is limited we also consider the wear resistance a necessary performance criterion.

Наряду с обкатыванием сателлита о цевки, имеет место их скольжение вдоль контура сателлита, что приводит к износу рабочей поверхности сателлита. Существующие расчеты ПЦР [1-3] в качестве критерия работоспособности предполагают статическое разрушение сателлита, что не позволяет оценить ресурс передачи. Износ цевок происходит менее интенсивно, т.к. они, как правило, изготавливаются из более твердого материала, а также могут поворачиваться в пазах обоймы.

В планетарно-цевочной передаче сателлит мягче сопряженных с ним деталей. Поэтому условием износостойкости передачи можно считать износостойкость сателлита. Помимо снижения точности работы передачи, износ сателлита приводит к уменьшению числа цевок, находящихся в зацеплении, что равносильно снижению допустимого момента, передаваемого редуктором.

Для оценки износа сателлита необходимо задаться допустимой величиной линейного износа $[h]$. Если линейный износ сателлита h не превысит указанного значения, передачу можно считать удовлетворяющей критерию износостойкости [4, 5]:

$$h = SI_h \leq [h], \quad (1)$$

где S – путь трения, I_h – интенсивность изнашивания.

Путь трения представляет собой путь, который проходит сопряженная поверхность относительно данной точки сателлита. Его можно оценить согласно зависимости [4]:

$$S = 2a_H \theta N_{HE}. \quad (2)$$

где a_H – полуширина площадки контакта двух тел, θ – удельная скорость скольжения в паре трения (удельное скольжение), $N_{HE} = 60t_{\Sigma}n_e$ – число циклов работы, t_{Σ} – ресурс передачи в часах, n_e – частота вращения эксцентрикового вала.

Благодаря деформациям касание происходит по площадке шириной $2a_H$. Размер полуширины площадки контакта a_H вычисляется из формулы Герца для начального контакта по линии:

$$a_H = \sqrt{\frac{F}{\pi K E b_p}}, \quad (3)$$

где F – сила, действующая на сателлит в точке контакта; $K = 1/r_1 + 1/r_2$ – приведенная кривизна в точке контакта, r_1 и r_2 – радиусы кривизны сателлита и цевки в точке контакта; $E^* = [(1 - \mu_c^2)/E_c + (1 - \mu_p^2)/E_p]^{-1}$ – приведенный модуль упругости, E_c , E_p – модули упругости материалов сателлита и цевки, μ_c и μ_p – коэффициенты Пуассона соответственно; b_p – длина линии контакта.

Сила в контакте сателлит-цевка пропорциональна сближению и определяется выражением:

$$F = \frac{T}{4ez_s} \cdot \frac{z_p}{z_c} \cdot \frac{\sin(z_c t)}{\sqrt{1 + \lambda^2 - 2\lambda \cos(\nu)}}, \quad (4)$$

где T – крутящий момент на обойме, z_s – число сателлитов, z_p – число цевок, z_c – число зубьев сателлита.

Удельная скорость скольжения θ определяется как скорости скольжения $v_{S\tau}$ контактирующих тел на касательную ось τ к скорости относительного перемещения точки контакта [4]:

$$\theta = \frac{v_{S\tau}}{v_{A\tau}} = \frac{v_{p\tau} - v_{c\tau}}{v_{A\tau}}, \quad (5)$$

где $v_{p\tau}$ – проекция на общую касательную к поверхности трения скорости точки на цевке, $v_{c\tau}$ – проекция на общую касательную к поверхности трения скорости точки на сателлите, $v_{A\tau}$ – скорость перемещения точки контакта относительно изнашиваемой поверхности.

Влияние скорости скольжения и времени контакта также широко описаны в литературе [6-8].

Интенсивность изнашивания I_h зависит от давления в контакте σ_H и свойств используемых материалов. Для оценки интенсивности изнашивания, предполагая, что передача приработана, используем формулу Арчарда [9]:

$$I_h = K_h \frac{\sigma_H}{HB}, \quad (6)$$

где K_h – коэффициент износа, определяемый экспериментально (зависит от материала), HB – твердость материала сателлита.

При начальном касании по линии, характерном для зубчатых передач, роликовых подшипников и т.д., контактное напряжение вычисляется по формуле Герца, полученной из решения контактной задачи теории упругости для зоны касания двух цилиндров по общей образующей:

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{FKE^*}{\pi b_p}}. \quad (7)$$

Сопоставление формул (2-7) получим формулу для оценки линейного износа сателлита:

$$h = \frac{2 N_{HE}}{\rho} \frac{K_h}{HB} \frac{1}{b_p} (\theta F). \quad (8)$$

Для оценки скорости скольжения $v_{ст}$, рассмотрим относительное перемещение точки контакта нулевой цевки с сателлитом в некоторый момент времени, заданный углом φ поворота эксцентрикового вала относительно его начального положения. Введем обозначения: A_p – точка цевки, соответствующая точке контакта, A_c – точка сателлита, соответствующая точке контакта. Точка A_c перемещается вместе с сателлитом по окружности радиуса e , поэтому вектор ее скорости равен:

$$v_c = e\omega_e \begin{Bmatrix} \cos(z_p t) \\ -\sin(z_p t) \end{Bmatrix}, \quad (9)$$

где e – эксцентриситет, ω_e – угловая скорость эксцентрикового вала, z_p – количество цевок, $t = 0 \dots 2\pi$ – свободный параметр.

Точка A_p вращается вместе с обоймой вокруг ее оси, поэтому вектор ее скорости равен:

$$v_p = R_A(t) \frac{\omega_e}{z_p} \begin{Bmatrix} \cos t \\ -\sin t \end{Bmatrix}, \quad (10)$$

где $R_A(\varphi)$ – расстояние от центра обоймы до места контакта сателлита с нулевой цевкой:

$$R_A(t) = \left| P(t) + e \begin{Bmatrix} \sin(z_p t) \\ s \cos(z_p t) \end{Bmatrix} \right| = \sqrt{\frac{a_p^2 + d_p^2}{4} + \frac{a_p d_p}{2} \frac{\lambda \cos(z_c t)}{\sqrt{1 + \lambda^2 - 2\lambda \cos(z_c t)}}}, \quad (11)$$

где $P(t) = C(t) + \frac{d_p}{2} N(t)$ – радиус-вектор, описывающий профиль сателлита,

$$C(t) = \frac{a_p}{2} \begin{Bmatrix} \sin t \\ \cos t \end{Bmatrix} - e \begin{Bmatrix} \sin(z_p t) \\ \cos(z_p t) \end{Bmatrix} - \text{радиус-вектор, описывающий трохойду, на}$$

которой расположены центры цевок в системе координат сателлита,

$$N(t) = \frac{1}{\sqrt{1 + \lambda^2 - 2\lambda \cos(z_c t)}} \left[- \begin{Bmatrix} \sin t \\ \cos t \end{Bmatrix} + \lambda \begin{Bmatrix} \sin(z_p t) \\ \cos(z_p t) \end{Bmatrix} \right] - \text{нормаль к трохоиде,}$$

$\lambda = \frac{2ez_p}{a_p}$ – коэффициент укорочения циклоиды, a_p – делительный диаметр

обоймы, d_p – диаметр цевки.

Скорость скольжения равна проекции разности скоростей $v_{c\tau}$ и $v_{p\tau}$ на направление касательной к профилю сателлита:

$$v_{pc} = (v_{c\tau} - v_{p\tau}) \begin{Bmatrix} -N_y \\ N_x \end{Bmatrix} = \omega_e \frac{a_p [\lambda^2 - \lambda \cos(z_c t)] + 2[1 - \lambda \cos(z_c t)] R_A(t)}{2z_p \sqrt{1 + \lambda^2 - 2\lambda \cos(z_c t)}}, \quad (12)$$

Полагая, что $d_p \ll a_p$ и $R_A \approx a_p / 2$:

$$v_{pc} \approx \omega_e \frac{a_p \sqrt{1 + \lambda^2 - 2\lambda \cos(z_c t)}}{2sz_p}. \quad (13)$$

Скорость перемещения точки контакта относительно сателлита найдем, дифференцируя радиус-вектор, описывающий профиль сателлита $P(t)$ (в расчете принимаем, что $d_p \ll a_p$):

$$|P'_t| \approx |C'_t| = \frac{a_p}{2} \sqrt{1 + \lambda^2 - 2\lambda \cos(z_c t)}. \quad (14)$$

Тогда, согласно (13, 14) удельное скольжение θ :

$$\theta = \frac{v_{pc}}{|P'_t| \frac{\omega_e}{z_p}} \approx 1. \quad (15)$$

В нашем случае, распределение линейного износа h аналогично распределению силы, действующей в точке контакта:

$$h = \frac{2 N_{HE} K_h T z_p \sin(z_c t)}{\pi NB b_p 4ez_s z_c \sqrt{1 + \lambda^2 - 2\lambda \cos(z_c t)}}. \quad (16)$$

Формула (16) позволяет рассчитать линейный износ сателлита в планетарно-цевочной передаче. Из формулы следует, что распределение износа пропорционально распределению силы в цевках. Из эпюр распределения сил и износа, а также, вводя допускаемый люфт в передаче, можно определить допускаемый линейный износ сателлита.

Список литературы

1. Конструктивные исполнения планетарно-цевочных редукторов для высокоточных следящих приводов / А.С. Иванов и др. // Вестник машиностроения. 2013, №3. С. 9-11.
2. Шанников В.М. Планетарные редукторы с внецетроидным зацеплением. – М.: Машгиз, 1948. – 172 с.
3. Фомин М.В. Планетарно-цевочные передачи: Учеб.пособие – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 64 с.
4. Ражиков В.Н. Детали машин: учебник. – СПб.: Политехника, 2015. – 695 с.
5. Крагельский И.В. Трение и износ. Изд. 2, перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1968. – 480с.

6. Бартенев Г.М. Трение и износ полимеров. – Ленинград: Химия, 1972. – 240 с.
7. Крагельский И.В., Чупилко Т.Е., Чичинадзе А.В. Процессы трения в тормозах авиаколес. – М.: Изд. АН СССР, 1955. – 190 с.
8. Кеглин Б.Т., Храпов Б.И. Измерение температуры в точке поверхности при нестационарном трении // Заводская лаборатория. 1964. №8. С. 968-969.
9. Archard J.F. Contact and rubbing of flat surfaces // J. Appl. Phys. 1953 (24), p. 981-988.

Сведения об авторах:

Бексултанова Асель Жуматаевна – студент, МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва;

Ермолаев Михаил Михайлович – научный руководитель, к.т.н, доцент, МГТУ им.

Н.Э. Баумана г. Москва.