

УДК 621.833.6

Канд. техн. наук А. Ф. Коляда, К. С. Кожемякин

Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье

ЦИРКУЛЯЦИЯ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В САТЕЛЛИТАХ ЗУБЧАТЫХ МЕХАНИЗМОВ

Рассматривается изменение кинетической энергии в сателлите зубчатого механизма, вызванное сложным характером его движения и силы, которые при этом возникают.

Ключевые слова: планетарная передача, сателлит, кинетическая энергия.

Рассматриваются сателлитные зубчатые механизмы, используемые в главных редукторах турбовинтовых авиационных двигателей, особенностью которых является высокая скорость вращения входного колеса (порядка 20000 об/мин). Даже при постоянных скоростях вращения колес, линейные скорости точек сателлита изменяются, что вызвано сложным характером их движения.

Рассматриваются сателлитные зубчатые механизмы, используемые в главных редукторах турбовинтовых авиационных двигателей, особенностью которых является высокая скорость вращения входного колеса (порядка 20000 об/мин). Даже при постоянных скоростях вращения колес, линейные скорости точек сателлита изменяются, что вызвано сложным характером их движения.

Далее рассматривается изменение линейных скоростей точек сателлита, поля кинетической энергии и сил, которые связаны с этими изменениями. Для сателлитного редуктора (рис. 1) скорости точек сателлита определялись с использованием мгновенного центра скоростей. При выбранных значениях радиусов колес $r_1, r_2, r_3 = r_1 + 2 \cdot r_2$ и угловой скорости колеса 1 ω_1 угловые скорости колеса 2 и водила равны

$$\omega_2 = \frac{\omega_1 \cdot r_1}{2 \cdot r_2}, \quad \omega_H = \frac{\omega_1 \cdot r_1}{2 \cdot (r_1 + r_2)}.$$

Линейные скорости точек сателлита на поверхности радиуса r пропорциональны угловой скорости сателлита и расстоянию между мгновенным центром скоростей и рассматриваемой точкой, и имеют вид:

- на поверхности колеса радиуса r_2

$$V(\alpha) = 2 \cdot \omega_2 \cdot r_2 \cdot \sin(\alpha/2),$$

- на поверхности колеса радиуса r ($0 \leq r \leq r_2$)

$$V(r, \alpha) = \sqrt{r_0^2 + r^2 - 2 \cdot r_0 \cdot r \cdot \cos \alpha},$$

где α – угол между мгновенным центром скоростей и рассматриваемой точкой.

Скорости точек на поверхности сателлита радиуса r_2 $V(\alpha)$ и радиуса r $V(r, \alpha)$ показаны на

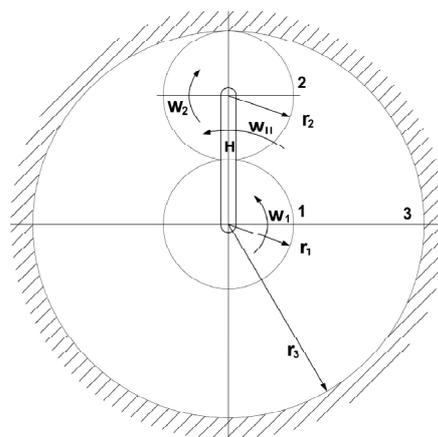


Рис. 1. Схема сателлитного редуктора

рисунке 2 (а, б).

Скорости точек на поверхности колеса радиуса $r = r_2$ наиболее сильно изменяются, в центре колеса $r = 0$ – постоянные (рис. 2, б).

Следует отметить, что скорости точек в системе координат, связанной с водилом, разные $V(r, \alpha)$, но постоянные во времени, в системе координат, связанной с сателлитом – переменные во времени в связи с изменением положения мгновенного центра скоростей $V(r, \alpha, t)$. Тогда кинетическая энергия точек $T = \rho \cdot V^2(r, \alpha, t)/2$, где ρ – масса окрестности точек, также изменяется во времени с периодом оборота сателлита. Таким образом, имеется переменное во времени поле кинетической энергии, наиболее сильно изменяющееся на периферии колеса и постоянное в центре колеса.

С другой стороны, кинетическая энергия сателлита постоянна, так как постоянный его момент инерции относительно мгновенного центра вращения и постоянная угловая скорость ω_2 . Таким образом, имеется циркуляция кинетической энергии (без учета рассеивания энергии) внутри сателлита. Изменение кинетической энергии связано с работой сил, которые дополнительно нагружают конструкцию сателлита.

Анализ годографа скоростей равномерно расположенных точек сателлита ($\Delta \alpha = \text{const}$) на

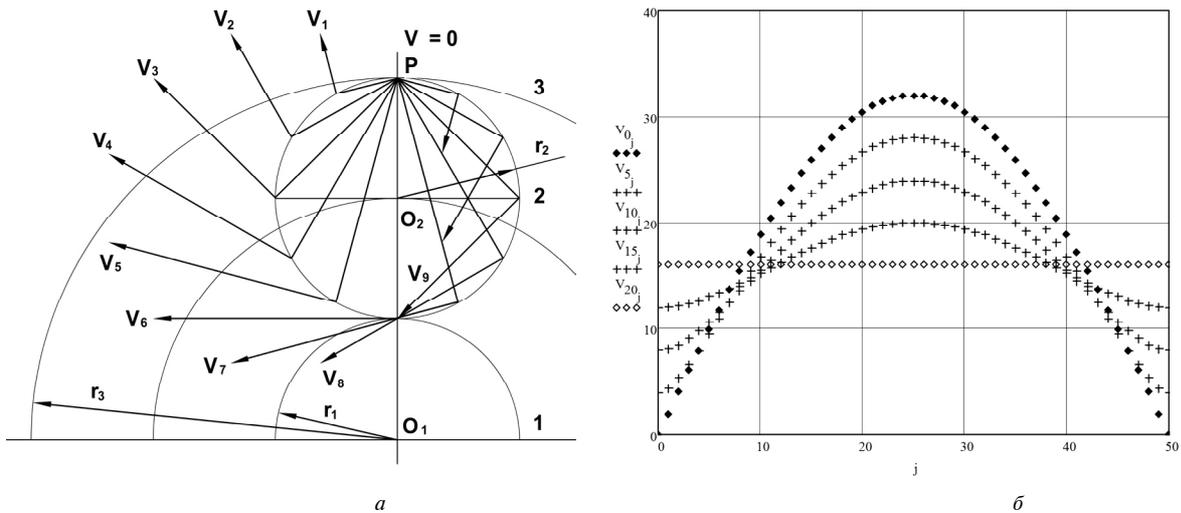


Рис. 2. Скорости точек колеса 2 на поверхности радиуса r_2 , $V(\alpha)$ (а) и радиуса r , $V(r, \alpha)$ (б)

поверхности радиуса r_2 показывает, что приращение скорости соседних точек постоянно $\Delta V = \text{const}$, (рис. 3, 4).

Тогда $\Delta \alpha = \omega_2 \cdot \Delta t$ и $\Delta V / \Delta t \rightarrow \alpha = \text{const}$, где α – модуль ускорения точки спутника. Таким

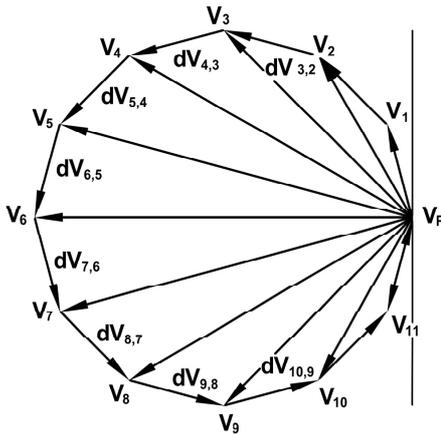


Рис. 3. Годографы скоростей V и разности соседних скоростей dV

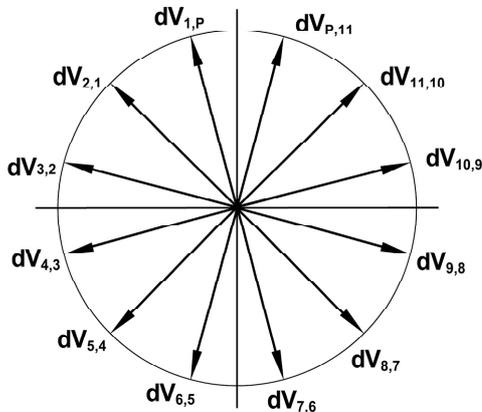


Рис. 4. Годографы ускорений точек спутника

образом, можно говорить, что мгновенный центр ускорений находится на оси спутника. Направление ускорения меняется и меняется угол между вектором скорости и вектором ускорения. Тогда нормальная и тангенциальные составляющие ускорения (проекции на направление скорости) – переменные величины.

Исходя из уравнения энергетического баланса, можно говорить, что работа, приводящая к изменению кинетической энергии, равна работе сил инерции и что только тангенциальная составляющая равнодействующей всех внешних сил выполняет эту работу. Величина этой составляющей равна проекции равнодействующей всех внешних сил на направление скорости. Причем угол между силой и скоростью равен углу между вектором скорости и вектором ускорения.

Величина равнодействующих всех внешних сил F , ее проекция на направление скорости F_τ получены из уравнения изменения кинетической энергии в дифференциальной форме

$$\frac{\partial T}{\partial t} = P = \vec{F} \cdot \vec{V} = F \cdot V \cdot \cos \beta = F_\tau \cdot V,$$

$$F_\tau = F \cdot \cos \beta, T = 4 \cdot \Delta \rho \cdot \omega_2^2 \cdot r_2^2 \cdot \sin^2(\alpha/2),$$

$$\Delta \rho = \rho \cdot b \cdot \Delta l \cdot \Delta r,$$

где $T(\Delta \rho, \omega_2, r_2, \alpha)$ – кинетическая энергия, отнесенная к единице массы окрестности точки,

$\frac{\partial T}{\partial t}$ – производная кинетической энергии по времени, $P = \vec{F} \cdot \vec{V}$ – мощность всех внешних сил, β – угол между вектором силы и вектором скорости,

$F_\tau = F \cdot \cos \beta$ – проекция равнодействующих всех внешних сил на направление скорости. При заданных значениях $r_2 = 0,08$ м, $b = 0,04$ м, величина

на силы F_τ , отнесенная к единице массы $\Delta\rho = 3 \cdot 10^{-3}$ кг, в зависимости от угловой скорости ω_2 и угла α показана на рисунке 5 и может достигать значений (при $\omega_2 = 900 \text{ с}^{-1}$, $\alpha = 0$)

$$F_\tau = 200 \text{ Н}$$

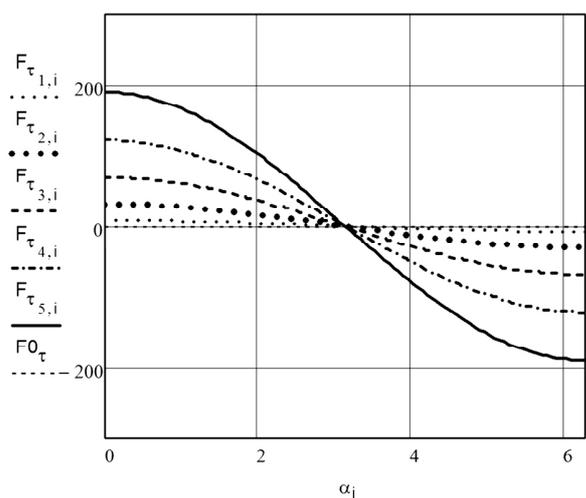


Рис. 5. Зависимость F_τ , отнесенная к единице массы $\Delta\rho$ от ω_2 и α

Выводы

1. В спутнике циркулирует переменное по поверхности и во времени поле кинетической энергии.
2. Изменение кинетической энергии обеспечивается работой внешних сил, которые дополнительно нагружают конструкцию спутника.
3. Наибольшие значения сил, приводящих к изменению кинетической энергии, возникают в полюсе мгновенных скоростей спутника.

Список литературы

1. Лойцянский Л. Г. Курс теоретической механики ч. 1 / Лойцянский Л. Г., Лурье А. И. – М.: Наука, 1982. – 352 с.
2. S. Targ. Theoretical mechanics / S. Targ. – М.: Mir, 1976. – 525 p.

Поступила в редакцию 01.05.2014

Коляда О.Ф., Кожемякин К.С. Циркуляція кінетичної енергії у сателітах зубчатих механізмів

Розглядається зміна кінетичної енергії в сателіті зубчатого механізму, викликана складним характером його руху і сили, які при цьому виникають.

Ключові слова: сателіт, планетарна передача, кінетична енергія.

Kolyada A., Kogemyakin K. Circulation of kinetic energy in planetary pinion of epicyclical gear train

A change of kinetic energy in planetary pinion of epicyclical gear train, caused by complex motion of pinion and forces which arise up here is examined.

Key words: satellite, planetary gear, kinetic energy.