



Ижевский государственный технический
университет
имени М.Т. Калашникова
Кафедра «Мехатронные системы»



ДЕТАЛИ МЕХАТРОННЫХ МОДУЛЕЙ, РОБОТОВ И ИХ КОНСТРУИРОВАНИЕ

**Кинематическая точность механизмов.
Податливость преобразователей движения.**

КИНЕМАТИЧЕСКАЯ ТОЧНОСТЬ

Погрешность системы управления и двигателя

Погрешность системы управления и двигателя, приведенная к выходному звену преобразователя движения, может быть определена в виде:

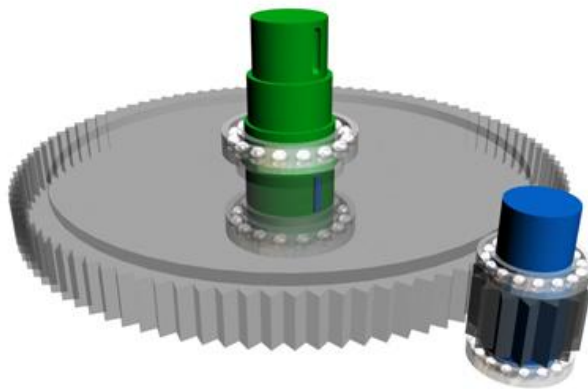
$$\Delta q = \frac{\Delta \varphi_{\text{дв}}}{u}$$

где u – передаточное отношение преобразователя движения;

$\Delta \varphi_{\text{дв}}$ – погрешность угла поворота двигателя.

**Кинематическая погрешность
и мертвый ход
преобразователей движения**

Кинематическая погрешность цилиндрической зубчатой передачи



Минимальное значение кинематической погрешности, мкм:

$$F'_{i0min} = AK_s(F'_{i1} + F'_{i2})$$

Максимальное значение кинематической погрешности, мкм:

$$F'_{i0max} = K \left[\sqrt{(F'_{i1})^2 + (E_{\Sigma M1})^2} + \sqrt{(F'_{i2})^2 + (E_{\Sigma M2})^2} \right]$$

A - коэффициент, учитывающий степень точности передачи (для зубчатой передачи 7-й и 8-й степеней точности $A=0,71$, для остальных степеней точности $A=0,62$);

K_s и K - коэффициенты фазовой компенсации, принимаемые в зависимости от передаточного

F'_i - допуск, мкм, на кинематическую погрешность колеса;

Мертвый ход цилиндрической зубчатой передачи

При расчете по методу максимума-минимума значение мертвого хода J_{tmin} цилиндрической зубчатой передачи, мкм:

$$J_{tmin} = \frac{Inmin}{\cos\alpha * \cos\beta}$$

J_{nmin} - гарантированный боковой зазор, мкм.

Максимальное значение мертвого хода [6] цилиндрической зубчатой передачи, мкм:

$$J_{tmax} = 0,7(E_{HS1} + E_{HS2}) + \sqrt{0,5(T_{H1}^2 + T_{H2}^2) + 2f_a^2 + G_{r1}^2 + G_{r2}^2}$$

E_{HS1} и E_{HS2} - наименьшее смещение, мкм, исходного контура первого и второго колёс;

T_{H1} и T_{H2} - допуск, мкм, на смещение исходного контура первого и второго колёс;

$\pm f_a$ - предельное отклонение, мкм, межосевого расстояния (плюс-верхнее, минус-нижнее);

$G_{r1} = e_{r1} = F_{r1}$ и $G_{r2} = e_{r2} = F_{r2}$ - радиальный зазор (люфт), мкм, в опоре вращения первого и второго колёс.

Коническая зубчатая передача

Максимальное значение мертвого хода, мкм:

$$J_{tmin} = 0,94(E_{S_{S_1}} + E_{S_{S_2}} \sqrt{0,46[(f_{AM1} \sin \delta_1)^2 + (f_{AM2} \sin \delta_2)^2 + ((G_{a1} \sin \delta_1))^2 + ((G_{a2} \sin \delta_2))^2]} + E_{\Sigma}^2 + (G_{r1} \cos \delta_1)^2 + (G_{r2} \cos \delta_2)^2] + 0,9(T_{S_1}^2 + T_{S_2}^2)$$

$E_{S_{S_1}}$ и $E_{S_{S_2}}$ - наименьшее отклонение, мкм, средней делительной толщины зуба первого и второго колёс по хорде;

$\pm f_{AM}$ - предельное осевое смещение, мкм, зубчатого венца;

$G_{a1} = e_{a1}$ и $G_{a2} = e_{a2}$ - осевой зазор, мкм, в опоре вращения первого и второго зубчатых колёс;

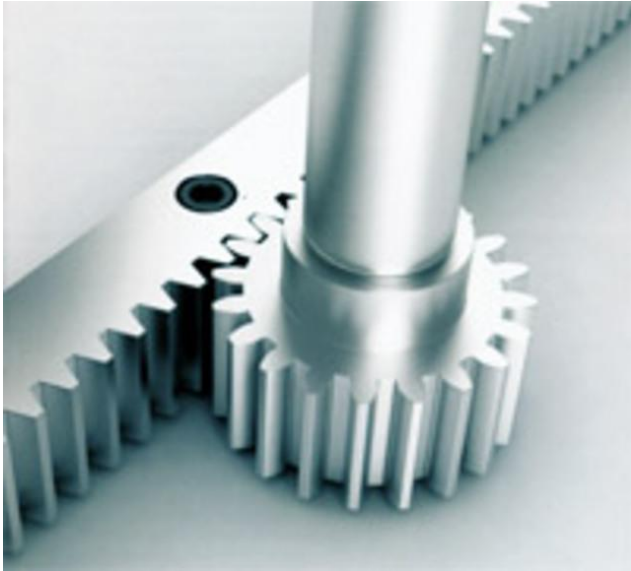
$\pm E_{\Sigma}$ - предельное отклонение, мкм, межосевого угла;

T_{S_1} и T_{S_2} - допуски, мкм, на среднюю делительную толщину зуба первого и второго зубчатых колёс по хорде;

δ_1 и δ_2 - угол делительного конуса первого и второго зубчатых колёс передачи, град.



Кинематическая погрешность и мертвый ход реечной зубчатой передачи



Минимальное и максимальное значения кинематической погрешности и мертвого хода реечной передачи определяют так же, как и цилиндрической зубчатой передачи с учетом $G_{r2}=0$, $E_{\Sigma M2}=0$

Кинематическая погрешность цилиндрической червячной передачи



Минимальное значение кинематической погрешности червячной передачи при расчете по методу максимума-минимума, мкм:

$$F'_{io_{min}} = 0.62[0.7(f_{hk} + f_{f1}) + F'_{i2}]$$

Максимальное значение кинематической погрешности передачи (мкм)

$$F'_{io_{max}} = 0.8 \sqrt{(f_{hk} + f_{f1})^2 + E_{\Sigma M1}^2} + \sqrt{(F'_{i2})^2 + E_{\Sigma M2}^2}$$

f_{hk} – допуск, мкм, на погрешность винтовой линии на длине нарезанной части червяка;

f_{f1} – допуск, мкм, на погрешность профиля витка червяка;

F'_{i2} – допуск на наибольшую кинематическую погрешность червячного колеса;

F_p – допуск на накопленную погрешность шага червячного колеса;

f_{f2} – допуск на погрешность профиля зуба червячного колеса;

$E_{\Sigma M1}$ – суммарная приведенная погрешность монтажа червяка, мкм:

Мертвый ход цилиндрической червячной передачи

При расчете по методу максимума- минимума минимальное значение мертвого хода червячной передачи, мкм:

$$J_{tmin} = \frac{J_{nmin}}{\cos\alpha * \cos\beta}$$

Максимальное значение мертвого хода червячной передачи, мкм:

$$J_{tmax} = 0,94E_{\overline{ss}} + \sqrt{0,9(T_s^2 + G_{a1}^2) + 2(f_a^2 + f_{ac}^2) + G_{r1}^2 + G_{r2}^2}$$

J_{nmin} - гарантированный боковой зазор, мкм;

$E_{\overline{ss}}$ - наименьшее отклонение, мкм, толщины витка червяка по хорде;

T_s – допуск, мкм, на толщину витка червяка по хорде;

$\pm f_{ac}$ - предельное отклонение, мкм, межосевого расстояния червячной передачи.

Кинематическая погрешность и мертвый ход волновой зубчатой передачи



Минимальное и максимальное значения кинематической погрешности передачи в минутах, ':

$$\delta_{\varphi_{\min}} = 3,67 \frac{F_{r1} + F_{r2}}{40 + d_1} \quad \delta_{\varphi_{\max}} = 4,67 \frac{F_{r1} + F_{r2}}{40 + d_1}$$

и радианах, рад:

$$\delta_{\varphi_{\min}} = 10,67 \frac{F_{r1} + F_{r2}}{(40 + d_1) * 10^4}$$
$$\delta_{\varphi_{\max}} = 13,58 \frac{F_{r1} + F_{r2}}{(40 + d_1) * 10^4}$$

F_{r1} и F_{r2} - допуски на радиальные биения зубчатых венцов гибкого и жесткого зубчатых колес, мкм;

d_1 - делительный диаметр гибкого зубчатого колеса,

Мертвый ход волновой зубчатой передачи ввиду многопарности зацепления и в зависимости от точности изготовления ее отдельных элементов можно приближенно считать равным 1'...9'.

Кинематическая погрешность передачи винт-гайка

Минимальное и максимальное значения кинематической погрешности, мкм, передачи при расчете по методу максимума-минимума:

$$F'_{i'_{0min}} = 0,62\delta_{t\Sigma} \quad F'_{i'_{0max}} = \sqrt{(\delta_{t\Sigma})^2 + (E_{\Sigma M})^2}$$



$\delta_{t\Sigma}$ - накопленная погрешность, мкм, шага резьбы – разность между действительным и номинальным расстояниями любых несоседних профилей витков резьбы по образующей среднего диаметра, $\approx 5 \dots 15$ мкм;
 $E_{\Sigma M}$ - суммарная приведенная погрешность монтажа винта, мкм.

Значение кинематической погрешности в минутах и радианах:

$$\delta\varphi = \frac{21,6F'_{i'_{0}}}{P_h}$$

$$\delta\varphi = \frac{F'_{i'_{0}}}{159,15P_h}$$

Мертвый ход передачи винт-гайка

Минимальное значение мертвого хода, мкм, при расчете методом максимума-минимума:

$$I_{t_{min}} = b'' \operatorname{tg} \psi$$

Максимальное значение мертвого хода, мкм:

$$I_{t_{max}} = b' \operatorname{tg} \psi + \sqrt{[(b'' - b') \operatorname{tg} \psi]^2 + (b \operatorname{tg} \psi)^2 + G_{a1}^2 + G_{a2}^2}$$

где b' и b'' - верхнее и нижнее предельные отклонения, мкм, среднего диаметра винта;

b – верхнее отклонение, мкм, среднего диаметра гайки;

G_{a1} и G_{a2} – осевые зазоры в опорах вращения, мкм.

Кинематическая погрешность ШВП

Максимальное и минимальное значения кинематической погрешности, мкм, шарико-винтовой передачи на длине l , мм, рабочего участка резьбы винта:

$$F'_{i0\max} = e_p \pm \frac{V_{\text{пр}}}{2}$$

e_p – среднее значение кинематической погрешности передачи, мкм;

$V_{\text{пр}}$ – ширина полосы колебаний кинематической погрешности на рабочей длине резьбы винта, мкм.

Вероятностное значение кинематической погрешности, мкм:

$$F'_{i0p} = K_p F'_{i0\max}$$

K_p – вероятностный коэффициент фазовой компенсации.

Значение кинематической погрешности в минутах, ' , и радианах, рад:

$$\delta_{\varphi} = \frac{21,6 F'_{i0}}{P_h} \quad \delta_{\varphi} = \frac{F'_{i0}}{159,15 P_h}$$

$P_h = P \cdot n$ – ход резьбы, мм;

P – шаг резьбы, мм; n – число заходов резьбы.



Мертвый ход шарико-винтовой передачи

Максимальное и минимальное значения мертвого хода, мкм, с учетом упругих деформаций соединения винт-гайка, винта и опор:

$$J_{t \min \max} = 2 \cdot 10^3 (0,01d_{\text{ш}} - \Delta d_{\text{ш}}) \sin\beta + \Delta_{\text{в.м.}} + \Delta_{\text{в}} + \Delta_{\text{оп}}$$

$d_{\text{ш}}$ - диаметр шарика, мм;

$\Delta d_{\text{ш}}$ - предельное отклонение диаметра шарика, мм (таблица);

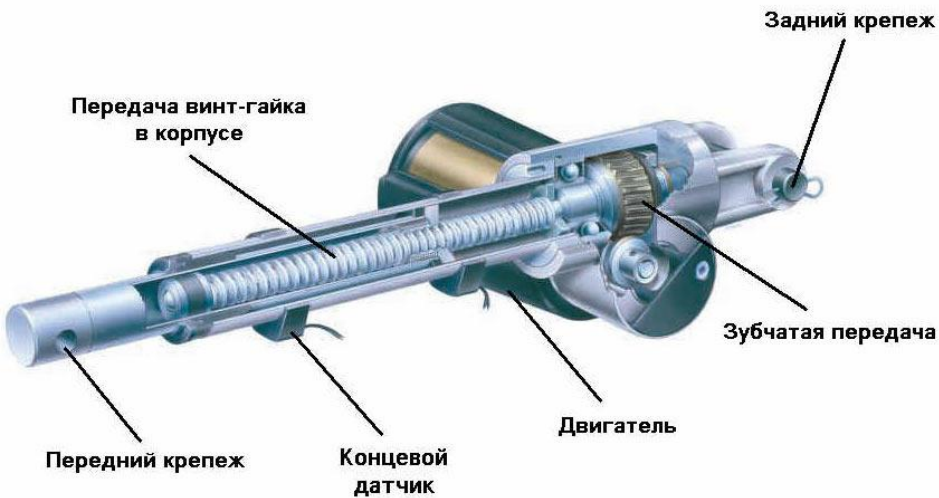
$\beta = 45^\circ$ - угол контакта шариков с винтом и гайкой;

$\Delta_{\text{в.м.}}$ - упругая деформация соединения винт-гайка, мкм:

При выполнении передачи с натягом, мкм:

$$J_{t \min \max} = \Delta_{\text{в.м.}} + \Delta_{\text{в}} + \Delta_{\text{оп}}$$

Кин. погрешность многоступенчатых преобразователей движения



Суммарная кинематическая погрешность многоступенчатого преобразователя движения при расчете по методу максимума-минимума равна:

$$\delta_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \delta_i$$

δ_i – кинематическая погрешность i -й передачи;

$$\delta_i = \begin{cases} \delta_{\varphi_i}, \text{ рад (минуты), при преобразовании вращательного} \\ \quad \text{или поступательного или } F'_{i0}, \text{ м,} \\ F'_{i0}, \quad \text{м, при преобразовании поступательного} \\ \text{или } \delta_{\varphi_i}, \text{ рад, вращательного движения в поступательное} \end{cases}$$

ε_i – передаточный коэффициент погрешности i -й передачи, учитывающий изменение кинематической погрешности передачи при приведении ее к выходному звену кинематической

Мертвый ход многоступенчатых преобразователей движения

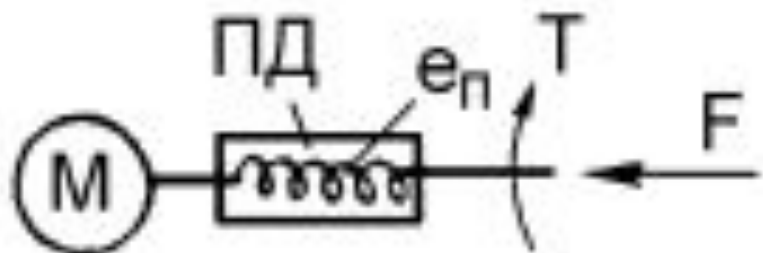
Суммарный мертвый ход многоступенчатого преобразователя движения при расчете по методу максимума-минимума равен:

$$J_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i J_i$$

J_i – мертвый ход i -й передачи:

$$J_i = \begin{cases} J_{\varphi i}, \text{ рад (минуты), при преобразовании вращательного} \\ \text{или } J_{ti}, \text{ м, поступательного движения во вращательное;} \\ J_{ti}, \text{ м, при преобразовании поступательного} \\ \text{или } J_{\varphi i}, \text{ рад, вращательного движения в поступательное.} \end{cases}$$

Погрешность, вызванная податливостью преобразователя движения



М – двигатель;
ПД – преобразователь движения

Погрешность положения выходного звена мехатронного модуля:

$$\Delta q' = e_{\text{п}} Q,$$

где

$$Q = \begin{cases} F - \text{сила сопротивления, Н, при линейном перемещении} \\ \text{выходного звена;} \\ T - \text{момент сопротивления, Нм, при угловом перемещении} \\ \text{выходного звена;} \end{cases}$$

$e_{\text{п}}$ – приведенная податливость преобразователя движения мехатронного модуля.

Податливость

Податливость элементов ПД

Податливость резьбового соединения, мм/Н:

$$e = \frac{\Delta \ell}{F} = \frac{K_p}{A},$$

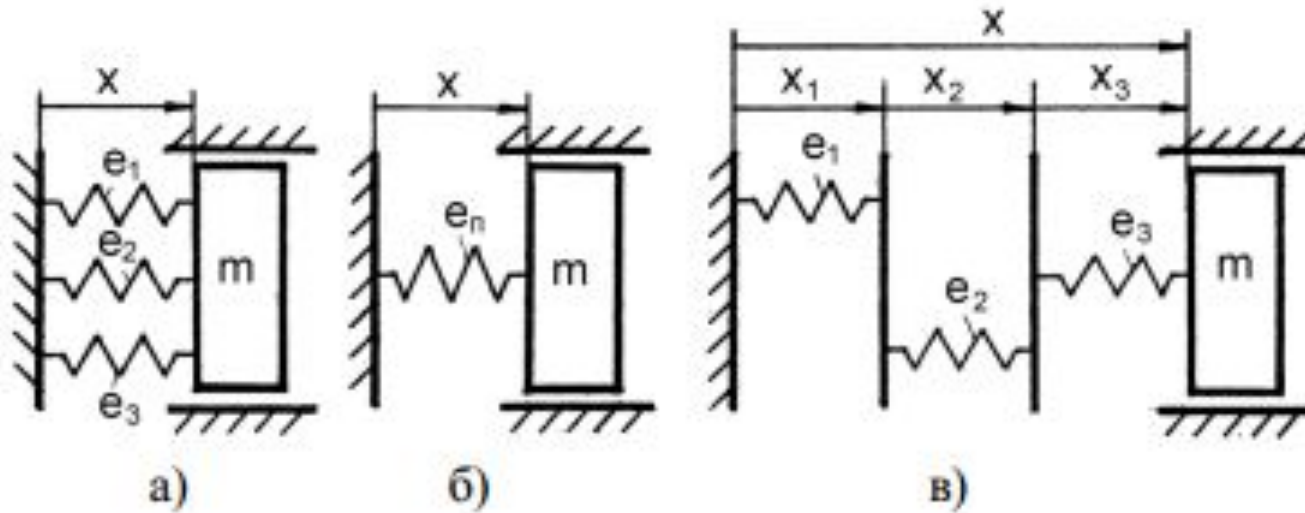
где $\Delta \ell$ – деформация витка резьбы, мм; F – внешняя осевая сила, действующая на виток резьбы, Н; A – площадь витка резьбы, мм²:

Податливость соединения винт-гайка качения, мм/Н:

$$e_{\text{ВМ}} = \frac{1}{2,6 \cdot d_o^{0,89} \cdot d_{\text{ш}}^{0,56} \cdot K_{\text{В}}^{0,67} \cdot F_{\text{н}}^{0,33} \cdot K_{\text{R}}},$$

где d_o – диаметр окружности, на которой расположены центры шариков, мм; $d_{\text{ш}}$ – диаметр шарика, мм; $K_{\text{В}}$ – число рабочих витков; $F_{\text{н}}$ – сила натяга, действующая на рабочую гайку, Н; K_{R} – коэффициент, зависящий от класса точности передачи.

Приведенная податливость ПД



а, б – параллельное соединение упругих элементов;
в – последовательное соединение упругих элементов

Приведенная податливость ПД

Параллельное соединение упругих элементов

Приведенная податливость:

$$e_{\text{п}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{e_i}}.$$

Обратная величина податливости представляет собой жесткость:

$$C = \frac{1}{e}.$$

Последовательное соединение упругих элементов

Приведенная податливость:

$$e_{\text{п}} = \sum_{i=1}^n e_i.$$

Погрешность мехатронного модуля

Полную погрешность выходного звена мехатронного модуля определяют в виде:

$$\Delta = \Delta q + \delta_{\Sigma} + J_{\Sigma} + \Delta q' ,$$

где Δq – погрешность системы управления и двигателя; δ_{Σ} – суммарная кинематическая погрешность преобразователя движения; J_{Σ} – суммарный мертвый ход преобразователя движения; $\Delta q'$ – погрешность, вызванная податливостью преобразователя движения.