

РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МАШИН

621.01

САМОТОРМОЖЕНИЕ ПЛАНЕТАРНЫХ ПЕРЕДАЧ С ТРЁХВЕНЦОВЫМИ САТЕЛЛИТАМИ

*Д-р техн. наук, проф. Г.А. ТИМОФЕЕВ, д-р техн. наук, проф. В.В. ПАНЮХИН,
асп. Д.В. САЩЕНКО*

Представлены результаты исследования самотормозящихся планетарных передач с трёхвенцовыми сателлитами. Цель исследования – поиск геометрических параметров профилей зубьев, обеспечивающих максимальную эффективность передачи, а также определение усилий в зацеплениях. Показано, что для получения эффекта самоторможения необходимо использовать передачи внеполюсного зацепления. Условия существования различных вариантов самоторможения в передачах с трёхвенцовыми сателлитами обеспечиваются необходимым смещением рабочих участков профилей зацепления в направлении, зависящем от соотношения чисел зубьев колёс.

Настоящая работа представляет собой продолжение исследования самоторможения планетарных передач, методика которого уже разработана и использована для наиболее распространённых простейших схем передач A_{H1}^3 , A_{H3}^1 , B_{H1}^4 , C_{1H}^4 (C_{H1}^4) [1]. Ниже приведены результаты исследования передачи с трёхвенцовыми сателлитами, обозначаемой $(3k)_{61}^4$ по классификации В.Н. Кудрявцева [2]. Целью проведённого исследования, как и в предыдущих схемах, был поиск геометрических параметров профилей, обеспечивающих максимально высокую эффективность передачи при сохранении эффекта самоторможения, а также определение усилий в зацеплениях.

Поиск требуемых параметров осуществлён в области внеполюсных зацеплений косозубых передач, поскольку именно углы наклона зубьев оказались теми геометрическими параметрами, которые обеспечивают самоторможение передачи. Внеполюсность

же необходима для сохранения постоянства направления силы трения скольжения в заданном режиме.

Кинематическая схема передачи с трёхвенцовыми сателлитами $(3k)_{61}^4$ приведена на рис. 1,а. Используя разработанную методику исследования самоторможения планетарных передач [1], вычислим КПД η_{61} обратного хода передачи. В случае $z_4z_5 < z_3z_6$ получаем:

$$\eta_{61} = \frac{\left(1 + \frac{z_2z_4}{z_1z_3}\right) \left(1 - \frac{z_4z_5}{z_3z_6\eta_{43}\eta_{56}}\right)}{\left(1 - \frac{z_4z_5}{z_3z_6}\right) \left(1 + \frac{z_2z_4}{z_1z_3\eta_{21}\eta_{43}}\right)}, \quad (1)$$

где z_i – число зубьев i -го колеса, $i = 1, \dots, 6$;

η_{21} , η_{43} , η_{65} – КПД обратного хода зацеплений колёс 1–2, 3–4 и 5–6 при остановленном водиле;

η_{34} , η_{56} – КПД прямого хода зацеплений колёс 3–4 и 5–6 при остановленном водиле.

В случае $z_4z_5 > z_3z_6$ формула (1) принимает вид:

$$\eta_{61} = \frac{\left(\frac{z_2z_4}{z_1z_3} + 1\right) \left(\frac{z_4z_5\eta_{65}}{z_3z_6} - \frac{1}{\eta_{34}}\right)}{\left(\frac{z_4z_5}{z_3z_6} - 1\right) \left(\frac{z_2z_4}{z_1z_3\eta_{21}} + \frac{1}{\eta_{34}}\right)}; \quad (2)$$

Условия самоторможения передачи при обратном ходе с сохранением способности работы в режиме отгормаживания [3] имеют такой вид

при $z_4z_5 < z_3z_6$:

$$-\frac{z_2z_4}{z_1z_3} < \eta_{21}\eta_{43} < 0, \text{ или } 0 < \eta_{43}\eta_{56} < \frac{z_4z_5}{z_3z_6}; \quad (3)$$

при $z_4z_5 > z_3z_6$:

$$-\frac{z_2z_4}{z_1z_3} < \frac{\eta_{21}}{\eta_{34}} < 0, \text{ или } \eta_{34}\eta_{65} < \frac{z_3z_6}{z_4z_5}. \quad (4)$$

Выразив условия (3) и (4) через параметры косозубых или шевронных колёс передачи, получим при внеполюсном зацеплении колёс 1 и 2 известные зависимости [1] углов наклона β_y от нормальных углов профилей α_{ny} :

$$\cos \beta_{y1} \leq \operatorname{tg} \alpha_{ny1} \sqrt{\sqrt{\frac{1}{4} + \left[\frac{\min f}{(1 - \min \psi_1) \sin \alpha_{ny1}} \right]^2} - \frac{1}{2}}; \quad (5)$$

$$\cos \beta_{y2} > \operatorname{tg} \alpha_{ny2} \sqrt{\sqrt{\frac{1}{4} + \left[\frac{\max f}{(1 + \min \psi_2) \sin \alpha_{ny2}} \right]^2} - \frac{1}{2}}; \quad (6)$$

где f – коэффициент трения скольжения в зацеплении;

ψ_1 и ψ_2 – коэффициенты, учитывающие трение качения и верчения в зацеплении и трение в опорах [4].

При внеполусном зацеплении косозубых или шевронных колёс 3 и 4 и смещении рабочих участков профилей этого зацепления от оси вращения водила при $z_4 z_5 < z_3 z_6$ и к оси – при $z_4 z_5 > z_3 z_6$ получим при $z_4 z_5 < z_3 z_6$ и $\beta_{y4} < \beta_{y3}$ для угла β_{y3} зависимости

$$\cos \beta_{y3} \geq \operatorname{tg} \alpha_{ny3} \sqrt{\sqrt{\frac{1}{4} + \left[\frac{\max f_{34}}{(1 - \max \psi_3) \sin \alpha_{ny3}} \right]^2} - \frac{1}{2}}; \quad (7)$$

$$\cos \beta_{y3} < \operatorname{tg} \alpha_{ny3} \sqrt{\sqrt{\frac{1}{4} + \left[\frac{\frac{\min f_{34}}{\sin \alpha_{ny3}}}{1 - \min \psi_3 - \frac{z_4 z_5 (1 - \min \tau_{43} + \min \psi_4)}{z_3 z_6 \eta_{56}}} \right]^2} - \frac{1}{2}}; \quad (8)$$

при $z_4 z_5 > z_3 z_6$ и $\beta_{y3} < \beta_{y4}$:

$$\cos \beta_{y4} \geq \operatorname{tg} \alpha_{ny4} \sqrt{\sqrt{\frac{1}{4} + \left[\frac{\max f_{34}}{(1 - \max \psi_4) \sin \alpha_{ny4}} \right]^2} - \frac{1}{2}}; \quad (9)$$

$$\cos \beta_{y4} < \operatorname{tg} \alpha_{ny4} \sqrt{\sqrt{\frac{1}{4} + \left[\frac{\frac{\min f_{34}}{\sin \alpha_{ny4}}}{1 - \min \psi_4 - \frac{z_3 z_6 (1 - \min \tau_{34} + \min \psi_3)}{z_4 z_5 \eta_{65}}} \right]^2} - \frac{1}{2}}. \quad (10)$$

При внеполусном зацеплении косозубых или шевронных колёс 5 и 6 с углами наклона зубьев $\beta_{y5} < \beta_{y6}$ и смещении рабочих участков профилей к оси вращения водила при $z_4 z_5 < z_3 z_6$:

$$\cos \beta_{y6} \geq \operatorname{tg} \alpha_{ny6} \sqrt{\frac{1}{4} + \left[\frac{\max f_{56}}{(1 - \max \psi_6) \sin \alpha_{ny6}} \right]^2} - \frac{1}{2}; \quad (11)$$

$$\cos \beta_{y6} < \operatorname{tg} \alpha_{ny6} \sqrt{\frac{1}{4} + \left[\frac{\frac{\min f_{56}}{\sin \alpha_{ny6}}}{1 - \min \psi_6 - \frac{z_4 z_5 (1 - \min \tau_{56} + \min \psi_5)}{z_3 z_6 \eta_{43}}} \right]^2} - \frac{1}{2} \quad (12)$$

При внеполосном зацеплении косозубых или шевронных колёс 5 и 6 с углами наклона зубьев $\beta_{y6} < \beta_{y5}$ и смещении рабочих участков профилей от оси вращения водила при $z_4 z_5 > z_3 z_6$:

$$\cos \beta_{y5} \geq \operatorname{tg} \alpha_{ny5} \sqrt{\frac{1}{4} + \left[\frac{\max f_{56}}{(1 - \max \psi_5) \sin \alpha_{ny5}} \right]^2} - \frac{1}{2}; \quad (13)$$

$$\cos \beta_{y5} < \operatorname{tg} \alpha_{ny5} \sqrt{\frac{1}{4} + \left[\frac{\frac{\min f_{56}}{\sin \alpha_{ny5}}}{1 - \min \psi_5 - \frac{z_3 z_6 (1 - \min \tau_{65} + \min \psi_6)}{z_4 z_5 \eta_{34}}} \right]^2} - \frac{1}{2} \quad (14)$$

При внеполосном зацеплении колёс 3 и 4 возможно самоторможение прямозубых колёс, если их углы профилей на рабочих участках удовлетворяют условиям:

при $z_4 z_5 < z_3 z_6$ и $\alpha_{y4} < \alpha_{y3}$:

$$\frac{1 - \min \psi_3 - \frac{z_4 z_5 (1 - \min f_{34} \operatorname{tg} \alpha_{y4} + \min \psi_4)}{z_3 z_6 \eta_{56}}}{\min f_{34}} < \operatorname{tg} \alpha_{y3} < \frac{1 - \max \psi_3}{\max f_{34}}; \quad (15)$$

при $z_4 z_5 > z_3 z_6$ и $\alpha_{y3} < \alpha_{y4}$:

$$\frac{1 - \min \psi_4 - \frac{z_3 z_6 (1 - \min f_{34} \operatorname{tg} \alpha_{y3} + \min \psi_3)}{z_4 z_5 \eta_{65}}}{\min f_{34}} < \operatorname{tg} \alpha_{y4} < \frac{1 - \max \psi_4}{\max f_{34}}. \quad (16)$$

При внеполосном зацеплении колёс 5 и 6 возможно самоторможение прямозубых колёс, если их углы профилей на рабочих участках удовлетворяют условиям:

при $z_4 z_5 < z_3 z_6$ и $\alpha_{y5} < \alpha_{y6}$:

$$\frac{1 - \min \psi_6 - \frac{z_4 z_5 (1 - \min f_{56} \operatorname{tg} \alpha_{y5} + \min \psi_5)}{z_3 z_6 \eta_{43}}}{\min f_{56}} < \operatorname{tg} \alpha_{y6} < \frac{1 - \max \psi_6}{\max f_{56}}; \quad (17)$$

при $z_4 z_5 > z_3 z_6$ и $\alpha_{y6} < \alpha_{y5}$:

$$\frac{1 - \min \psi_5 - \frac{z_3 z_6 (1 - \min f_{56} \operatorname{tg} \alpha_{y6} + \min \psi_6)}{z_4 z_5 \eta_{34}}}{\min f_{56}} < \operatorname{tg} \alpha_{y5} < \frac{1 - \max \psi_5}{\max f_{56}}. \quad (18)$$

Для того, чтобы самотормозящаяся передача $(3k)_{61}^4$ могла работать только в тяговом режиме прямого хода, достаточно выполнить одно из условий:
при внеполюсном зацеплении колёс 1 и 2:

$$\cos \beta_{y1} \leq \operatorname{tg} \alpha_{ny1} \sqrt{\frac{1}{4} + \left[\frac{\min f_{12}}{(1 - \min \psi_1) \sin \alpha_{ny1}} \right]^2} - \frac{1}{2}; \quad (19)$$

$$\cos \beta_{y1} < \cos \beta_{y2} \leq \operatorname{tg} \alpha_{ny2} \sqrt{\frac{1}{4} + \left[\frac{\min f_{12}}{(1 + \max \psi_2) \sin \alpha_{ny2}} \right]^2} - \frac{1}{2}; \quad (20)$$

при $z_4 z_5 < z_3 z_6$ и внеполюсном зацеплении колёс 3 и 4:

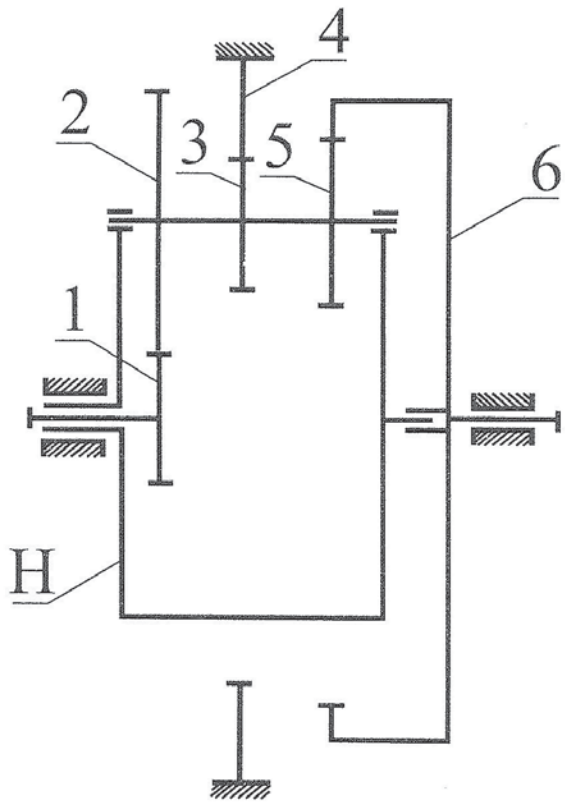
$$\cos \beta_{y3} \leq \operatorname{tg} \alpha_{ny3} \sqrt{\frac{1}{4} + \left[\frac{\min f_{34}}{(1 - \min \psi_3) \sin \alpha_{ny3}} \right]^2} - \frac{1}{2}; \quad (21)$$

$$\cos \beta_{y3} < \cos \beta_{y4} \leq \operatorname{tg} \alpha_{ny4} \sqrt{\frac{1}{4} + \left[\frac{\min f_{34}}{(1 + \max \psi_4) \sin \alpha_{ny4}} \right]^2} - \frac{1}{2}; \quad (22)$$

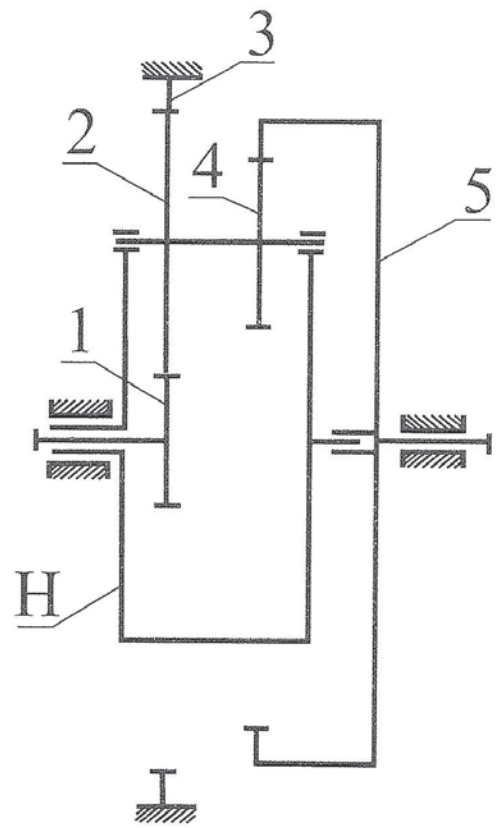
при $z_4 z_5 > z_3 z_6$ и внеполюсном зацеплении колёс 3 и 4:

$$\cos \beta_{y4} \leq \operatorname{tg} \alpha_{ny4} \sqrt{\frac{1}{4} + \left[\frac{\min f_{34}}{(1 - \min \psi_4) \sin \alpha_{ny4}} \right]^2} - \frac{1}{2}; \quad (23)$$

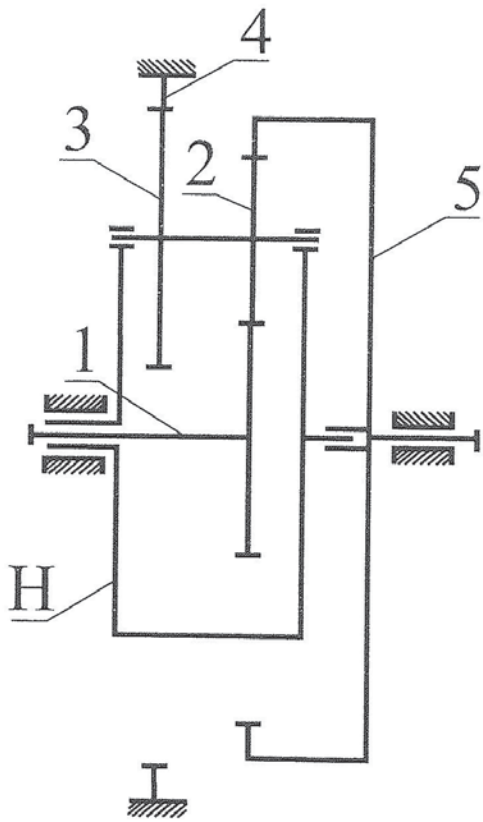
$$\cos \beta_{y4} < \cos \beta_{y3} \leq \operatorname{tg} \alpha_{ny3} \sqrt{\frac{1}{4} + \left[\frac{\min f_{34}}{(1 + \max \psi_3) \sin \alpha_{ny3}} \right]^2} - \frac{1}{2}; \quad (24)$$



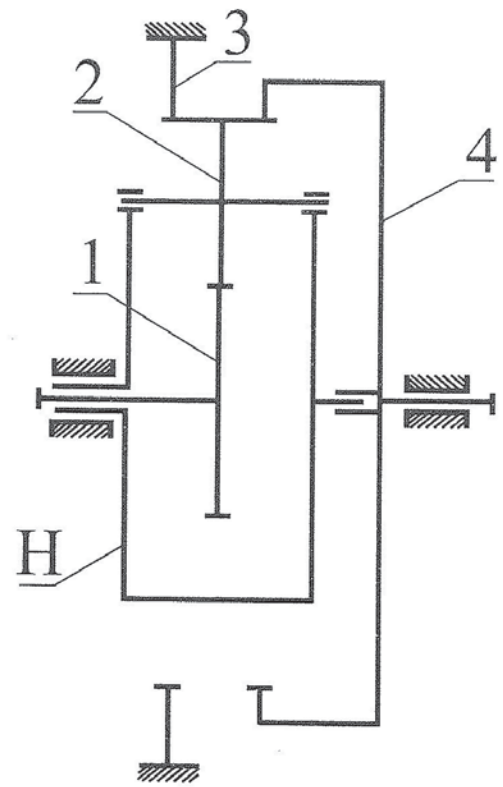
а)



б)



в)



г)

Рис. 1 Планетарная передача 3к:

$$\text{а) } \nabla(3k)_{61}^4, \text{ б) } \nabla(3k)_{51}^3, \text{ в) } \nabla(3k)_{51}^4, \text{ г) } \nabla(3k)_{41}^3$$

при $z_4z_5 < z_3z_6$ и внеполюсном зацеплении колёс 5 и 6:

$$\cos\beta_{y6} \leq \operatorname{tg}\alpha_{ny6} \sqrt{\frac{1}{4} + \left[\frac{\min f_{56}}{(1 - \min \psi_6) \sin \alpha_{ny6}} \right]^2} - \frac{1}{2}; \quad (25)$$

$$\cos\beta_{y6} < \cos\beta_{y5} \leq \operatorname{tg}\alpha_{ny5} \sqrt{\frac{1}{4} + \left[\frac{\min f_{56}}{(1 + \max \psi_5) \sin \alpha_{ny5}} \right]^2} - \frac{1}{2}; \quad (26)$$

при $z_4z_5 > z_3z_6$ и внеполюсном зацеплении колёс 5 и 6:

$$\cos\beta_{y5} \leq \operatorname{tg}\alpha_{ny5} \sqrt{\frac{1}{4} + \left[\frac{\min f_{56}}{(1 - \min \psi_5) \sin \alpha_{ny5}} \right]^2} - \frac{1}{2}; \quad (27)$$

$$\cos\beta_{y5} < \cos\beta_{y6} \leq \operatorname{tg}\alpha_{ny6} \sqrt{\frac{1}{4} + \left[\frac{\min f_{56}}{(1 + \max \psi_6) \sin \alpha_{ny6}} \right]^2} - \frac{1}{2}. \quad (28)$$

Все зависимости для передач $(3k)_{51}^3$ (рис. 1.б), $(3k)_{51}^4$ (рис. 1.в), $(3k)_{41}^3$ (рис. 1.г), которые являются частными случаями передачи $(3k)_{61}^3$ (рис. 1.а), могут быть получены из приведённых выше зависимостей путём простой замены индексов в соответствии со схемами на рис. 1.

Перейдём к определению усилий в зацеплениях. Определим составляющие реакций в зацеплениях передачи $(3k)_{61}^3$ в тяговом режиме прямого хода. Чтобы определить нормальные реакции, составим силовую схему для случая $z_4z_5 > z_3z_6$ (рис. 2) и запишем уравнения равновесия звеньев:

входное колесо 1:

$$M_1 = r_{b1} (N_{12} + T_{12} \operatorname{tg}\alpha_{1y1}); \quad (29)$$

блок сателлитов с венцами 2, 3 и 5

$$r_{b2} (N_{121} + T_{21} \operatorname{tg}\alpha_{1y2}) = r_{b5} (N_{156} + T_{56} \operatorname{tg}\alpha_{1y5}) - r_{b3} (N_{134} - T_{34} \operatorname{tg}\alpha_{1y3}); \quad (30)$$

корпус передачи с опорным колесом 4

$$M_4 = r_{b4} (N_{143} - T_{43} \operatorname{tg}\alpha_{1y4}); \quad (31)$$

выходное колесо 6

$$M_6 = r_{b6} (N_{165} + T_{65} \operatorname{tg}\alpha_{1y6}); \quad (32)$$

передача в целом:

$$M_6 = M_4 - M_1. \quad (33)$$

где M_i – момент, действующий на i -ое звено, $i = 1, \dots, 6$;

r_b – радиус основной окружности;

N_i – проекция нормального усилия на торцовую плоскость;

T – сила трения скольжения в зацеплении;

α_i – торцовый угол профиля.

Введём параметры торможения τ_{ij} [1]:

$$\tau_{ij} = \frac{f_{ij} \operatorname{tg} \alpha_{ij}}{\cos \beta_b}; \quad i, j = 1, \dots, 6 \quad (34)$$

и представим уравнения (29) – (33) в виде:

$$M_1 = N_{12} r_{b1} \cos \beta_{b12} (1 + \tau_{12}); \quad (35)$$

$$N_{21} r_{b2} \cos \beta_{b21} (1 + \tau_{21}) = N_{56} r_{b5} \cos \beta_{b56} (1 + \tau_{56}) - N_{34} r_{b3} (1 - \tau_{34}); \quad (36)$$

$$M_4 = N_{43} r_{b4} (1 - \tau_{43}); \quad (37)$$

$$M_6 = N_{65} r_{b6} (1 + \tau_{65}). \quad (38)$$

Из уравнений (35) – (38) выразим нормальные реакции в тяговом режиме прямого хода:

$$N_{12} = N_{21} = \frac{M_1}{nr_{b1} \cos \beta_{b12} (1 + \tau_{12})}; \quad (39)$$

$$N_{34} = N_{43} = \frac{M_1}{nr_{b3} (1 - \tau_{34})} \left[\frac{r_{b5} \left(\frac{z_2 z_4}{z_1 z_3} \eta_{12} + \eta_{43} \right)}{r_{b6} \left(\frac{z_4 z_5}{z_3 z_6} - \eta_{43} \eta_{56} \right)} - \frac{r_{b2}}{r_{b1}} \eta_{12} \right]; \quad (40)$$

$$N_{56} = N_{65} = \frac{M_1 \left(\frac{z_2 z_4}{z_1 z_3} \eta_{12} + \eta_{43} \right)}{nr_{b6} \cos \beta_{b56} \left(\frac{z_4 z_5}{z_3 z_6} - \eta_{43} \right)}. \quad (41)$$

где n – число сателлитов.

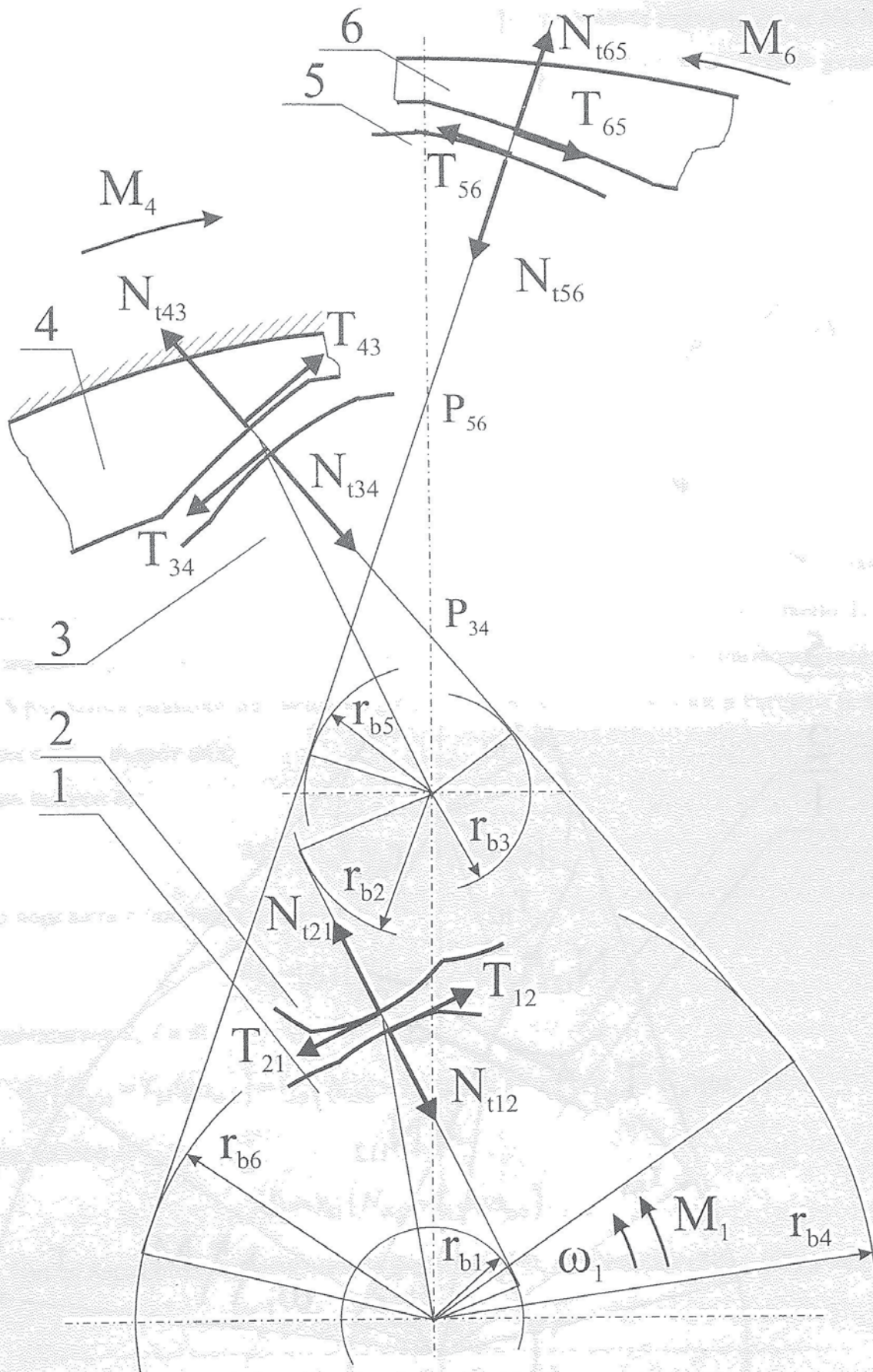


Рис. 2 Схема сил в торцовом сечении планетарной передачи с трёхвенцовыми сателлитами при $z_4z_5 > z_3z_6$

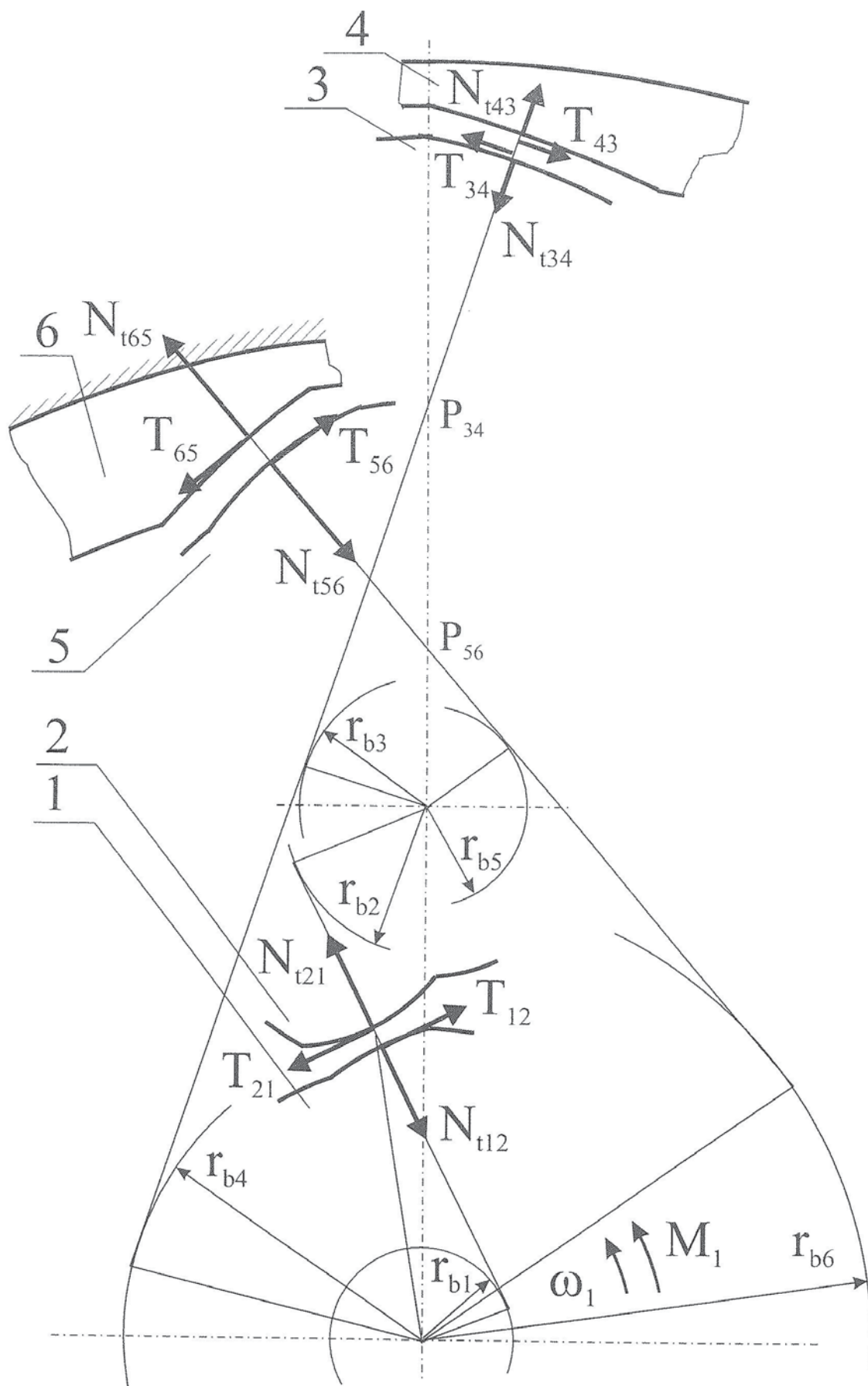


Рис. 3 Схема сил в торцовом сечении планетарной передачи с трёхвенцовыми сателлитами при $z_4 z_5 < z_3 z_6$

В случае $z_4z_5 < z_3z_6$ (рис. 3) формула (39) для нормальных реакций N_{12} и N_{21} в тяговом режиме прямого хода остаётся справедливой, в остальных зацеплениях реакции определяются аналогично:

$$N_{34} = N_{43} = \frac{M_1}{nr_{b3}(1-\tau_{34})} \left[\frac{r_{b5} \left(1 + \frac{z_2z_4}{z_1z_3} \eta_{12}\eta_{34} \right)}{r_{b6}\eta_{56} \left(1 - \frac{z_4z_5}{z_3z_6} \eta_{34} \right)} - \frac{r_{b2}}{r_{b1}} \eta_{12} \right]; \quad (42)$$

$$N_{56} = N_{65} = \frac{M_1 \left(1 + \frac{z_2z_4}{z_1z_3} \eta_{12}\eta_{34} \right)}{nr_{b6} \cos\beta_{b56} \left(1 - \frac{z_4z_5}{z_3z_6} \eta_{34} \right)}. \quad (43)$$

Схемы сил, действующих на звенья передачи при обратном ходе, отличаются от схем на рис. 2 и 3 тем, что ведущим становится звено 6, а ведомым – звено 1. При этом направления движения звеньев и сил трения изменяются на противоположные.

Уравнения равновесия звеньев при установившемся движении в тяговом режиме обратного хода имеют вид:

ведущее колесо 6:

$$M_6 = r_{b6} (N_{165} - T_{65} \operatorname{tg}\alpha_{1y6}); \quad (44)$$

корпус передачи с опорным колесом 4:

$$M_4 = r_{b4} (N_{143} + T_{43} \operatorname{tg}\alpha_{1y4}); \quad (45)$$

блок сателлитов 2, 3 и 5:

$$r_{b2} (N_{121} - T_{21} \operatorname{tg}\alpha_{1y2}) = r_{b5} (N_{156} - T_{56} \operatorname{tg}\alpha_{1y5}) - r_{b3} (N_{134} + T_{34} \operatorname{tg}\alpha_{1y3}); \quad (46)$$

ведомое колесо 1:

$$M_1 = r_{b1} (N_{112} - T_{12} \operatorname{tg}\alpha_{1y1}). \quad (47)$$

Вводя параметры торможения по формуле (34), представим (44) – (47) в виде:

$$M_6 = N_{65} r_{b6} \cos\beta_{b56} (1 - \tau_{65}); \quad (48)$$

$$M_4 = N_{43} r_{b4} \cos\beta_{b34} (1 + \tau_{43}); \quad (49)$$

$$N_{21} r_{b2} \cos\beta_{b12} (1 - \tau_{21}) = N_{56} r_{b5} \cos\beta_{b56} (1 - \tau_{56}) - N_{34} r_{b3} \cos\beta_{b34} (1 + \tau_{34}); \quad (50)$$

$$M_1 = N_{12} r_{b1} \cos \beta_{b12} (1 - \tau_{12}). \quad (51)$$

В тяговом режиме обратного хода нормальные реакции в передачах $(3k)_{61}^3$ в случае $z_4 z_5 > z_3 z_6$ в соответствии с (48) – (51) определяются так:

$$N_{12} = N_{21} = \frac{M_1}{nr_{b1} \cos \beta_{b12} (1 - \tau_{12})}; \quad (52)$$

$$N_{34} = N_{43} = \frac{M_1}{nr_{b3} (1 + \tau_{34})} \left[\frac{r_{b5} \left(\frac{z_2 z_4 \eta_{34} + 1}{z_1 z_3 \eta_{21}} \right)}{r_{b6} \left(\frac{z_4 z_5}{z_3 z_6} \eta_{34} - \frac{1}{\eta_{65}} \right)} - \frac{r_{b2}}{r_{b1} \eta_{21}} \right]; \quad (53)$$

$$N_{56} = N_{65} = \frac{M_1 \left(\frac{z_2 z_4 \eta_{34} + 1}{z_1 z_3 \eta_{21}} \right)}{nr_{b6} \cos \beta_{b56} \left(\frac{z_4 z_5}{z_3 z_6} \eta_{34} \eta_{65} - 1 \right)}. \quad (54)$$

В случае $z_4 z_5 < z_3 z_6$ (рис. 3) формула (52) для нормальных реакций N_{12} и N_{21} в тяговом режиме обратного хода остаётся справедливой, в остальных зацеплениях реакции определяются аналогично:

$$N_{34} = N_{43} = \frac{M_1}{nr_{b3} (1 + \tau_{34})} \left[\frac{r_{b5} \left(\frac{z_2 z_4}{z_1 z_3 \eta_{21}} + \eta_{43} \right)}{r_{b6} \left(\eta_{43} - \frac{z_4 z_5}{z_3 z_6} \eta_{65} \right)} - \frac{r_{b2}}{r_{b1} \eta_{21}} \right]; \quad (55)$$

$$N_{56} = N_{65} = \frac{M_1 \left(\frac{z_2 z_4}{z_1 z_3 \eta_{21}} + \eta_{43} \right)}{nr_{b6} \cos \beta_{b56} \left(\eta_{43} - \frac{z_4 z_5}{z_3 z_6} \eta_{65} \right)}. \quad (56)$$

Осталось найти радиальные R_{ij} и окружные V_{ij} составляющие реакций в зацеплениях передач. В соответствии со схемой на рис. 2 (при $z_4 z_5 > z_3 z_6$):

$$R_{12} = N_{12} \left(\cos \beta_{b12} \sin \alpha_{ty1} \pm f_{12} \cos \alpha_{ty1} \right); \quad (57)$$

$$V_{12} = N_{12} \left(\cos \beta_{b12} \cos \alpha_{ty1} \pm f_{12} \sin \alpha_{ty1} \right); \quad (58)$$

$$R_{21} = N_{21} \left(\cos \beta_{b12} \sin \alpha_{\gamma 2} \pm f_{12} \cos \alpha_{\gamma 2} \right); \quad (59)$$

$$V_{21} = N_{21} \left(\cos \beta_{b12} \cos \alpha_{\gamma 2} \pm f_{12} \sin \alpha_{\gamma 2} \right); \quad (60)$$

$$R_{34} = N_{34} \left(\cos \beta_{b34} \sin \alpha_{\gamma 3} \pm f_{34} \cos \alpha_{\gamma 3} \right); \quad (61)$$

$$V_{34} = N_{34} \left(\cos \beta_{b34} \cos \alpha_{\gamma 3} \mp f_{34} \sin \alpha_{\gamma 3} \right); \quad (62)$$

$$R_{43} = N_{43} \left(\cos \beta_{b34} \sin \alpha_{\gamma 4} \pm f_{34} \cos \alpha_{\gamma 4} \right); \quad (63)$$

$$V_{43} = N_{43} \left(\cos \beta_{b34} \cos \alpha_{\gamma 4} \mp f_{34} \sin \alpha_{\gamma 4} \right); \quad (64)$$

$$R_{56} = N_{56} \left(\cos \beta_{b56} \sin \alpha_{\gamma 5} \mp f_{56} \cos \alpha_{\gamma 5} \right); \quad (65)$$

$$V_{56} = N_{56} \left(\cos \beta_{b56} \cos \alpha_{\gamma 5} \pm f_{56} \sin \alpha_{\gamma 5} \right); \quad (66)$$

$$R_{65} = N_{65} \left(\cos \beta_{b56} \sin \alpha_{\gamma 6} \mp f_{56} \cos \alpha_{\gamma 6} \right); \quad (67)$$

$$V_{65} = N_{65} \left(\cos \beta_{b56} \cos \alpha_{\gamma 6} \pm f_{56} \sin \alpha_{\gamma 6} \right). \quad (68)$$

В (57) – (68) верхний знак соответствует прямому ходу, а нижний – обратному. Эти же уравнения определяют радиальные и окружные составляющие реакций в зацеплениях передач $(3k)_{61}^3$ в случае $z_4z_5 < z_3z_6$ (рис. 3), если считать, что верхние знаки в (57) – (68) соответствуют обратному ходу, а нижние – прямому. При этом знаки перед слагаемыми, содержащими коэффициенты трения, указаны для случая, когда расположение зацеплений колёс 1-2 и 3-4 относительно своих полюсов соответствует рис. 2 и 3. Если какое-либо зацепление расположено по другую сторону от своего полюса, то знаки перед указанными слагаемыми должны быть изменены на противоположные.

ВЫВОДЫ

1. Для получения эффекта самоторможения необходимо использовать передачи заплосного зацепления, обеспечивающие существенные различия в значениях КПД прямого и обратного хода и неизменность направления силы трения в каждом из режимов работы.

2. Для обеспечения самоторможения передачи в целом, по крайней мере, одно из её звеньев должно быть тормозящим в заданном режиме, что достигается за счёт углов наклона достаточной при заданном коэффициенте трения величины.

3. Передачи $(3k)_{61}^4$ с трёхвенцовыми сателлитами могут быть самотормозящимися при обратном ходе с возможностью оттормаживания либо без таковой при обеспечении необходимого смещения рабочих участков профилей зацепления, причём смещение должно быть к оси вращения водила при $z_4z_5 < z_3z_6$ и от оси при $z_4z_5 > z_3z_6$.

4. При определённых углах профиля и внеполусном зацеплении колёс 3 и 4, а также 5 и 6 возможно самоторможение прямозубых колёс.

5. Формулы для расчёта передач $(3k)_{51}^3$, $(3k)_{51}^4$, $(3k)_{41}^3$, которые являются частными случаями передачи $(3k)_{61}^3$, получаются из выведенных для общей схемы зависимостей путём простой замены индексов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимофеев Г.А., Панюхин В.В., Сащенко Д.В. Исследование самоторможения планетарных передач. // Известия вузов. Машиностроение. – 2007. – № 3. – С. 3-12.
2. Планетарные передачи / Справочник. Под ред. В.Н. Кудрявцева и Ю.Н. Кирдяшева. — Л.: Машиностроение, 1977. – 536 с.
3. Вейц В.А. Динамика машинных агрегатов. - Л.: Машиностроение, 1969. - 370 с.
4. Пат. 1479765 РФ, МКИ F 16 Н 1/18. Цилиндрическая зубчатая передача / В.В. Панюхин (РФ). – № 4336734/25-28. Оpubл. 15.05.89. Бюл. № 18 // Открытия. Изобретения. – 1989. – № 18. – С.156.