

МЕТОДИКА И АЛГОРИТМ РАСЧЕТА РАСПЕРЕДЕЛЕНИЯ НАТЯЖЕНИЯ МЕЖДУ ВЕТВЯМИ РЕМНЯ ЗАДАННОГО ПЕРЕДАТОЧНОГО МЕХАНИЗМА

Эргашов Махамматрасул

д-р техн. наук,

Ташкентский институт текстильной и легкой промышленности,

Республика Узбекистан, г. Ташкент

E-mail: mahamatrasul.ergashov@gmail.com

Приведены постановка и решения задач о вращении растяжимого и нерастяжимого ремня передаточного механизма, имеющего заданной конструкции и вращающегося в стационарном режиме с заданной скоростью.

Задача, в случае растяжимого в пределах упругости материала, сведена к численному решению системы алгебраических уравнений относительно деформаций свободных от контакта с поверхностями шкивов ветвей ремня, а в случае нерастяжимого ремня получены удобные для научного анализа и инженерных расчетов натяжения ветвей ремня. Рассматривается задача проектирования начальных параметров, устанавливаемых при подготовке механизма к работе.

Ключевые слова: *шкив, ремень, технологические параметры, механизм, деформация, натяжение, уравнение, задача.*

Постановка задачи. Как известно [1-5], текущие напряженные состояния свободных от поверхности шкивов ветвей ремня (рис. 1), существенно зависят от конструкционного построения механизма. Изменения конструктивных параметров механизма влияют на направления действия векторов сил трения, давления, натяжения, и перемещения. Поэтому, решения задач о напряженных состояниях ветвей ремня, получаемые для различных по конструкционному построению механизмов отличаются между собой как качественно так и количественно. В предыдущих работах [6-15] рассматривается случай (рис. 1).

Ниже приведены постановка и решения задач о вращении растяжимого и нерастяжимого ремня передаточного механизма, поперечные сечения шкивов которой расположены в одной плоскости и диаметры удовлетворяют следующие условия. При составлении и решения системы уравнения стационарного движения ремня используются методика, предложенная в работах [8-12]. Показано, что параметры вращения ремня в случае механизма со шкивами, диаметры которых удовлетворяют условия, количественно отличаются от параметров движения ремня в случае.

Начало системы координат разместим в центре первого шкива. Горизонтальная ось проходит через центры первого и третьего шкивов, а ось – перпендикулярно к оси .

Параметрам растяжимого ремня будем присуждать индексы , в соответствии с принятым на рис.1 областям движения, а параметрам нерастяжимого ремня в состоянии покоя механизма и движения в стационарном режиме, будем присваивать индексы 00 и 0 соответственно.

На участках контакта ремня со шкивами действуют распределенные по длине этого участка силы давления и трения , связанные между собой с помощью закона Кулона [1, 2], где . В зависимости от величины диаметров , координата расположения центров шкивов силы давления , , и (рис. 2– 5), а также свойства материала ремня векторы реактивных сил могут образовать с горизонтальной осью углы соответственно [1-5].

Предположим, что линии действия равнодействующих сил давления совпадают с биссектрисами углов обхвата ремнем поверхности соответствующих шкивов. Линии действия сил трения и ведущих сил шкивов перпендикулярны к линиям действия соответствующих сил давления [6-10].

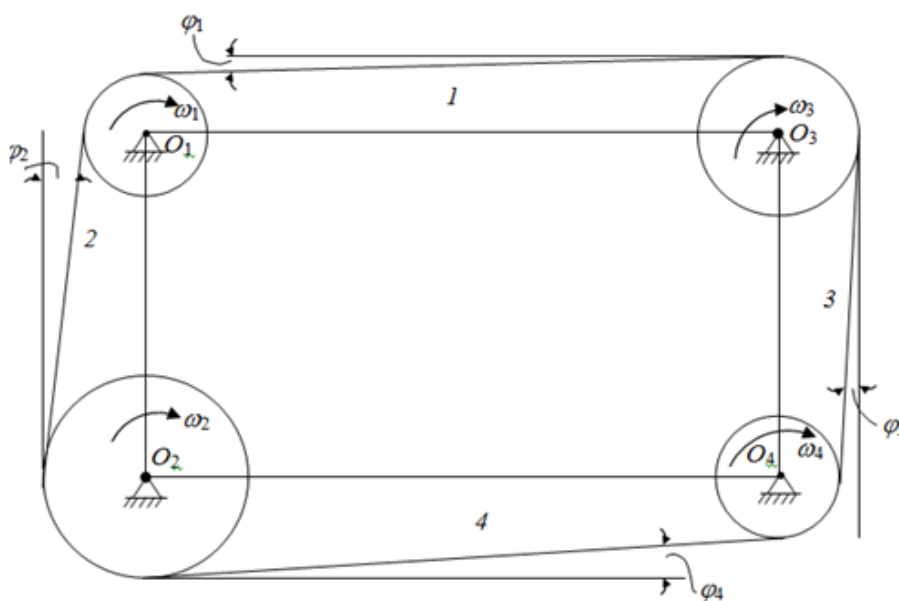


Рис. 1. Схема движения передаточного механизма.

Неизвестные углы β_i определяются из следующих выражений (рис.2–5):

$$\beta_1 = \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}; \quad \beta_2 = \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_4 - \varphi_2}{2};$$

$$\beta_3 = \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_1 - \varphi_3}{2}; \quad \beta_4 = \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_3 - \varphi_1}{2}.$$

Уравнения движения растяжимого ремня. Кинематические условия непрерывности движения и закон сохранения массы элемента ремня, имеющие место при переходе поверхности шкивов, принимают вид:

$$\begin{aligned}x_1^* dt &= \cos \varphi_1 ds_1, & y_1^* dt &= -\sin \varphi_1 ds_1; & x_2^* dt &= -\sin \varphi_2 ds_2, & y_2^* dt &= \cos \varphi_2 ds_2; \\x_3^* dt &= \sin \varphi_3 ds_3, & y_3^* dt &= -\cos \varphi_3 ds_3; & x_4^* dt &= -\cos \varphi_4 ds_4, & y_4^* dt &= \sin \varphi_4 ds_4; \\&&&&&&&&&\rho_0 F_0 ds_0 &= \rho_1 F_i ds_i.\end{aligned}$$

Здесь и в дальнейшем: x_i^* и y_i^* – составляющие скорости движения частиц ремня на оси Ox и Oy соответственно; φ_i – угол, образованный между касательной к рассматриваемой точке ремня и осью Ox ; t – время; ρ , F – плотность материала, площадь поперечного сечения и длина рассматриваемого элемента ремня; P – натяжение.

Запишем уравнения закона сохранения количества движения в проекциях на оси Ox и Oy [11-14]:

– на поверхности первого шкива

$$\begin{aligned}\rho_1 F_1 ds_1 (x_1^* - x_2^*) &= (T_1 \cos \varphi_1 - T_2 \sin \varphi_2 - R_1 \cos \beta_1 + fR_1 \sin \beta_1 - P_1 \sin \beta_1) dt, \\ \rho_1 F_1 ds_1 (y_1^* - y_2^*) &= (T_1 \sin \varphi_1 - T_2 \cos \varphi_2 - R_1 \sin \beta_1 - fR_1 \cos \beta_1 + P_1 \cos \beta_1) dt;\end{aligned}$$

– на поверхности второго шкива

$$\begin{aligned}\rho_2 F_2 ds_2 (x_2^* - x_4^*) &= (T_2 \sin \varphi_2 + T_4 \cos \varphi_4 - R_2 \cos \beta_2 + fR_2 \sin \beta_2 - P_2 \sin \beta_2) dt, \\ \rho_2 F_2 ds_2 (y_2^* - y_4^*) &= (T_2 \cos \varphi_2 + T_4 \sin \varphi_4 - R_2 \sin \beta_2 - fR_2 \cos \beta_2 + P_2 \cos \beta_2) dt;\end{aligned}$$

– на поверхности третьего шкива

$$\begin{aligned}\rho_3 F_3 ds_3 (x_3^* - x_1^*) &= (-T_3 \sin \varphi_3 - T_1 \cos \varphi_1 + R_3 \cos \beta_3 - fR_3 \sin \beta_3 + P_3 \sin \beta_3) dt, \\ \rho_3 F_3 ds_3 (y_3^* - y_1^*) &= (-T_3 \cos \varphi_3 - T_1 \sin \varphi_1 + R_3 \sin \beta_3 + fR_3 \cos \beta_3 - P_3 \cos \beta_3) dt;\end{aligned}$$

– на поверхности четвертого шкива

$$\begin{aligned}\rho_4 F_4 ds_4 (x_4^* - x_3^*) &= (-T_4 \cos \varphi_4 + T_3 \sin \varphi_3 + R_4 \cos \beta_4 + fR_4 \sin \beta_4 - P_4 \sin \beta_4) dt, \\ \rho_4 F_4 ds_4 (y_4^* - y_3^*) &= (-T_4 \sin \varphi_4 + T_3 \cos \varphi_3 - R_4 \sin \beta_4 + fR_4 \cos \beta_4 - P_4 \cos \beta_4) dt.\end{aligned}$$

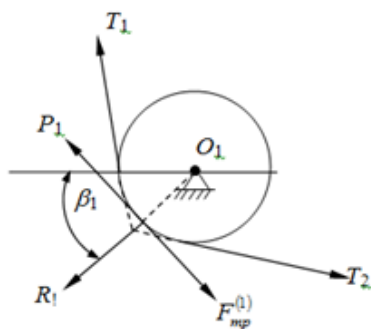


Рис. 2. Схема действия сил на ремень на поверхности первого шкива.

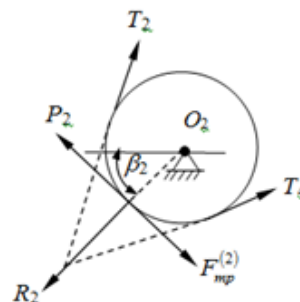


Рис. 3. Схема действия сил на ремень на поверхности второго шкива.

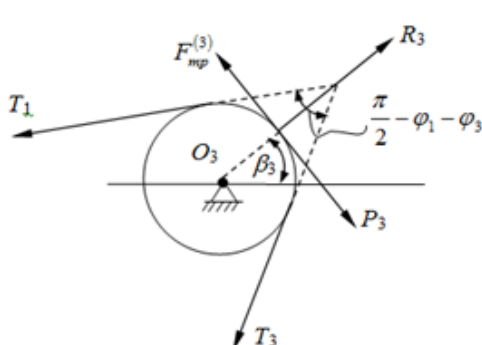


Рис. 4. Схема действия сил на ремень на поверхности третьего шкива.

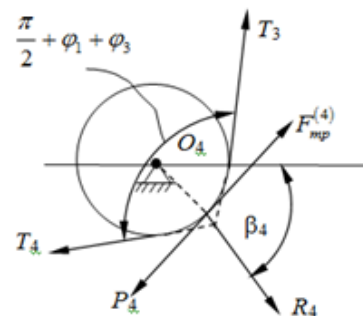


Рис. 5. Схема действия сил на ремень на поверхности четвертого шкива.

Решение задачи. С помощью несложных преобразований [], уравнения закона сохранения количества движения, приводим к виду

$$\frac{\varepsilon_1}{(1 + \varepsilon_{001})(1 + \varepsilon_1)} (-\varepsilon_1 \cos \varphi_1 + \varepsilon_2 \sin \varphi_2) = \varepsilon_1 \cos \varphi_1 - \varepsilon_2 \sin \varphi_2 - \hat{R}_1 \eta_{11} - \hat{P}_1 \sin \beta_1,$$

$$\frac{\varepsilon_1}{(1 + \varepsilon_{001})(1 + \varepsilon_1)} (-\varepsilon_1 \sin \varphi_1 + \varepsilon_2 \cos \varphi_2) = \varepsilon_1 \sin \varphi_1 - \varepsilon_2 \cos \varphi_2 - \hat{R}_1 \eta_{12} + \hat{P}_1 \cos \beta_1,$$

$$\frac{\varepsilon_2}{(1 + \varepsilon_{002})(1 + \varepsilon_2)} (-\varepsilon_2 \sin \varphi_2 + \varepsilon_4 \cos \varphi_4) = \varepsilon_2 \sin \varphi_2 + \varepsilon_4 \cos \varphi_4 - \hat{R}_2 \eta_{21} - \hat{P}_2 \sin \beta_2,$$

$$\frac{\varepsilon_2}{(1 + \varepsilon_{002})(1 + \varepsilon_2)} (-\varepsilon_2 \cos \varphi_2 + \varepsilon_4 \sin \varphi_4) = \varepsilon_2 \cos \varphi_2 + \varepsilon_4 \sin \varphi_4 - \hat{R}_2 \eta_{22} + \hat{P}_2 \cos \beta_2,$$

$$\frac{\varepsilon_3}{(1 + \varepsilon_{003})(1 + \varepsilon_3)} (\varepsilon_3 \sin \varphi_3 - \varepsilon_1 \cos \varphi_1) = \varepsilon_1 \cos \varphi_1 + \varepsilon_3 \sin \varphi_3 - \hat{R}_3 \eta_{31} - \hat{P}_3 \sin \beta_3,$$

$$\frac{\varepsilon_3}{(1 + \varepsilon_{003})(1 + \varepsilon_3)} (\varepsilon_3 \cos \varphi_3 - \varepsilon_1 \sin \varphi_1) = \varepsilon_1 \sin \varphi_1 + \varepsilon_3 \cos \varphi_3 - \hat{R}_3 \eta_{32} + \hat{P}_3 \cos \beta_3,$$

$$\frac{\varepsilon_4}{(1 + \varepsilon_{004})(1 + \varepsilon_4)} (\varepsilon_4 \cos \varphi_4 - \varepsilon_3 \sin \varphi_3) = \varepsilon_4 \cos \varphi_4 - \varepsilon_3 \sin \varphi_3 - \hat{R}_4 \eta_{41} + \hat{P}_4 \sin \beta_4,$$

$$\frac{\varepsilon_4}{(1 + \varepsilon_{004})(1 + \varepsilon_4)} (-\varepsilon_4 \sin \varphi_4 + \varepsilon_3 \cos \varphi_3) = -\varepsilon_4 \sin \varphi_4 + \varepsilon_3 \cos \varphi_3 - \hat{R}_4 \eta_{42} + \hat{P}_4 \cos \beta_4,$$

где

$$\begin{aligned} \eta_{11} &= \cos \beta_1 - f \sin \beta_1, & \eta_{12} &= \sin \beta_1 + f \cos \beta_1, \\ \eta_{21} &= \cos \beta_2 - f \sin \beta_2, & \eta_{22} &= \sin \beta_2 + f \cos \beta_2, \\ \eta_{31} &= \cos \beta_3 - f \sin \beta_3, & \eta_{32} &= \sin \beta_3 + f \cos \beta_3, \\ \eta_{41} &= \cos \beta_4 + f \sin \beta_4, & \eta_{42} &= \sin \beta_4 - f \cos \beta_4. \end{aligned}$$

Здесь и в дальнейшем

$$\hat{T}_i = \frac{T_i}{\rho_{00} F_{00} a_0^2}, \quad \hat{R}_i = \frac{R_i}{\rho_{00} F_{00} a_0^2}, \quad \hat{P}_i = \frac{P_i}{\rho_{00} F_{00} a_0^2}, \quad i = 1, 2, 3, 4.$$

Применяя несложные преобразования, последние уравнения приводим к виду

$$\frac{-\varepsilon_1 \varepsilon_2 \cos(\varphi_2 + \varphi_1)}{(1 + \varepsilon_{001})(1 + \varepsilon_1)} = \varepsilon_2 \cos(\varphi_2 + \varphi_1) - \hat{R}_1 \lambda_{11} - \hat{P}_1 \cos(\varphi_1 - \beta_1),$$

$$\frac{-\varepsilon_1^2 \cos(\varphi_2 + \varphi_1)}{(1 + \varepsilon_{001})(1 + \varepsilon_1)} = \varepsilon_1 \cos(\varphi_2 + \varphi_1) - \hat{R}_1 \lambda_{12} - \hat{P}_1 \sin(\varphi_2 + \beta_1),$$

$$\frac{\varepsilon_2 \varepsilon_4 \cos(\varphi_4 + \varphi_2)}{(1 + \varepsilon_{002})(1 + \varepsilon_2)} = \varepsilon_4 \cos(\varphi_4 + \varphi_2) - \hat{R}_2 \lambda_{21} - \hat{P}_2 \sin(\varphi_2 + \beta_2),$$

$$\frac{\varepsilon_2^2 \cos(\varphi_2 + \varphi_4)}{(1 + \varepsilon_{002})(1 + \varepsilon_2)} = -\varepsilon_2 \cos(\varphi_2 + \varphi_4) - \hat{R}_2 \lambda_{22} - \hat{P}_2 \cos(\varphi_4 - \beta_2),$$

$$\frac{\varepsilon_1 \varepsilon_3 \cos(\varphi_1 + \varphi_3)}{(1 + \varepsilon_{003})(1 + \varepsilon_3)} = \varepsilon_1 \cos(\varphi_1 + \varphi_3) - \hat{R}_3 \lambda_{31} - \hat{P}_3 \sin(\varphi_3 + \beta_3),$$

$$\frac{-\varepsilon_3^2 \cos(\varphi_1 + \varphi_3)}{(1 + \varepsilon_{003})(1 + \varepsilon_3)} = -\varepsilon_3 \cos(\varphi_1 + \varphi_3) - \hat{R}_3 \lambda_{32} - \hat{P}_3 \cos(\varphi_1 - \beta_3),$$

$$\frac{\varepsilon_4 \varepsilon_3 \cos(\varphi_4 + \varphi_3)}{(1 + \varepsilon_{004})(1 + \varepsilon_4)} = \varepsilon_3 \cos(\varphi_4 + \varphi_3) - \hat{R}_4 \lambda_{41} + \hat{P}_4 \cos(\varphi_4 - \beta_4),$$

$$\frac{\varepsilon_4^2 \cos(\varphi_4 + \varphi_3)}{(1 + \varepsilon_{004})(1 + \varepsilon_4)} = \varepsilon_4 \cos(\varphi_4 + \varphi_3) - \hat{R}_4 \lambda_{42} + \hat{P}_4 \cos(\varphi_3 + \beta_4),$$

где

$$\lambda_{11} = -\eta_{11} \sin \varphi_1 + \eta_{12} \cos \varphi_1, \quad \lambda_{12} = \eta_{12} \sin \varphi_2 - \eta_{11} \cos \varphi_2,$$

$$\lambda_{21} = \eta_{22} \sin \varphi_2 - \eta_{21} \cos \varphi_2, \quad \lambda_{22} = \eta_{22} \cos \varphi_4 - \eta_{21} \sin \varphi_4,$$

$$\lambda_{31} = -\eta_{31} \cos \varphi_3 + \eta_{32} \sin \varphi_3, \quad \lambda_{32} = -\eta_{31} \sin \varphi_1 + \eta_{32} \cos \varphi_1,$$

$$\lambda_{42} = -\eta_{41} \sin \varphi_1 + \eta_{42} \cos \varphi_1, \quad \lambda_{41} = \eta_{41} \cos \varphi_3 + \eta_{42} \sin \varphi_3.$$

Исключая неизвестные реактивные силы, предыдущие уравнения представим в виде

$$\frac{-\varepsilon_2}{\lambda_{11}} \left[\frac{\varepsilon_1}{(1 + \varepsilon_{001})(1 + \varepsilon_1)} + 1 \right] + \hat{P}_1 \frac{\cos(\varphi_1 - \beta_1)}{\lambda_{11} \cos(\varphi_2 + \varphi_1)} =$$

$$= \frac{-\varepsilon_1}{\lambda_{12}} \left[\frac{\varepsilon_1}{(1 + \varepsilon_{001})(1 + \varepsilon_1)} + 1 \right] + \hat{P}_1 \frac{\sin(\varphi_2 + \beta_1)}{\lambda_{12} \cos(\varphi_2 + \varphi_1)},$$

$$\frac{\varepsilon_4}{\lambda_{21}} \left[\frac{\varepsilon_2}{(1 + \varepsilon_{002})(1 + \varepsilon_2)} - 1 \right] + \hat{P}_2 \frac{\sin(\varphi_2 + \beta_2)}{\lambda_{21} \cos(\varphi_2 + \varphi_4)} =$$

$$= \frac{\varepsilon_2}{\lambda_{22}} \left[\frac{\varepsilon_2}{(1 + \varepsilon_{002})(1 + \varepsilon_2)} + 1 \right] + \hat{P}_2 \frac{\cos(\varphi_4 - \beta_2)}{\lambda_{22} \cos(\varphi_2 + \varphi_4)},$$

$$\begin{aligned} & \frac{\varepsilon_1}{\lambda_{31}} \left[\frac{\varepsilon_3}{(1 + \varepsilon_{003})(1 + \varepsilon_3)} - 1 \right] + \hat{P}_3 \frac{\sin(\varphi_3 + \beta_3)}{\lambda_{31} \cos(\varphi_1 + \varphi_3)} = \\ & = \frac{-\varepsilon_3}{\lambda_{32}} \left[\frac{\varepsilon_3}{(1 + \varepsilon_{003})(1 + \varepsilon_3)} - 1 \right] + \hat{P}_3 \frac{\cos(\varphi_1 - \beta_3)}{\lambda_{32} \cos(\varphi_1 + \varphi_3)} , \\ & \frac{\varepsilon_3}{\lambda_{41}} \left[\frac{\varepsilon_4}{(1 + \varepsilon_{004})(1 + \varepsilon_4)} - 1 \right] - \hat{P}_4 \frac{\cos(\varphi_4 - \beta_4)}{\lambda_{41} \cos(\varphi_4 + \varphi_3)} = \\ & = \frac{\varepsilon_4}{\lambda_{42}} \left[\frac{\varepsilon_4}{(1 + \varepsilon_{004})(1 + \varepsilon_4)} - 1 \right] - \hat{P}_4 \frac{\sin(\varphi_3 + \beta_4)}{\lambda_{42} \cos(\varphi_4 + \varphi_3)} . \end{aligned}$$

Последние уравнения образуют систему относительно неизвестных деформаций ε_i . Они могут быть использованы для численно-экспериментального установления зависимости значения и закона распределения деформаций ветвей ремня от свойства материала ремня и конструктивных параметров заданного механизма.

Частные случаи. 1°. Пусть

$$\varepsilon_{001} = 0, \quad \varepsilon_{002} = 0, \quad \varepsilon_{003} = 0 \quad \text{и} \quad \varepsilon_{004} = 0,$$

то есть начальные деформация ремня отсутствуют. Тогда последние уравнения приводятся к виду

$$\begin{aligned} -\lambda_{12}\varepsilon_2(1 + 2\varepsilon_1) + \lambda_{11}\varepsilon_1(1 + 2\varepsilon_1) &= (1 + \varepsilon_1) \frac{\hat{P}_1}{\cos(\varphi_2 + \varphi_1)} [-\lambda_{12} \cos(\varphi_1 - \beta_1) + \lambda_{11} \sin(\varphi_2 + \beta_1)], \\ -\lambda_{22}\varepsilon_4 - \lambda_{21}\varepsilon_2(1 + 2\varepsilon_2) &= (1 + \varepsilon_2) \frac{\hat{P}_2}{\cos(\varphi_2 + \varphi_4)} [-\lambda_{22} \sin(\varphi_2 + \beta_2) + \lambda_{21} \cos(\varphi_4 - \beta_2)], \\ -\lambda_{32}\varepsilon_1 - \lambda_{31}\varepsilon_3 &= (1 + \varepsilon_3) \frac{\hat{P}_3}{\cos(\varphi_1 + \varphi_3)} [-\lambda_{32} \sin(\varphi_3 + \beta_3) + \lambda_{31} \cos(\varphi_1 - \beta_3)], \\ -\lambda_{42}\varepsilon_3 + \lambda_{41}\varepsilon_4 &= (1 + \varepsilon_4) \frac{\hat{P}_4}{\cos(\varphi_4 + \varphi_3)} [\lambda_{42} \cos(\varphi_4 - \beta_4) - \lambda_{41} \sin(\varphi_3 + \beta_4)]. \end{aligned}$$

Отсюда

$$-\lambda_{12}\varepsilon_2(1 + 2\varepsilon_1) + \lambda_{11}\varepsilon_1(1 + 2\varepsilon_1) = (1 + \varepsilon_1)\gamma_1, \quad (1)$$

$$-\lambda_{22}\varepsilon_4 - \lambda_{21}\varepsilon_2(1 + 2\varepsilon_2) = (1 + \varepsilon_2)\gamma_2, \quad (2)$$

$$-\lambda_{32}\varepsilon_1 - \lambda_{31}\varepsilon_3 = (1 + \varepsilon_3)\gamma_3, \quad (3)$$

$$-\lambda_{42}\varepsilon_3 + \lambda_{41}\varepsilon_4 = (1 + \varepsilon_4)\gamma_4, \quad (4)$$

где

$$\gamma_1 = \frac{\hat{P}_1}{\cos(\varphi_2 + \varphi_1)} [-\lambda_{12} \cos(\varphi_1 - \beta_1) + \lambda_{11} \sin(\varphi_2 + \beta_1)],$$

$$\gamma_2 = \frac{\dot{P}_2}{\cos(\varphi_2 + \varphi_4)} [-\lambda_{22} \sin(\varphi_2 + \beta_2) + \lambda_{21} \cos(\varphi_4 - \beta_2)],$$

$$\gamma_3 = \frac{\dot{P}_3}{\cos(\varphi_1 + \varphi_3)} [-\lambda_{32} \sin(\varphi_3 + \beta_3) + \lambda_{31} \cos(\varphi_1 - \beta_3)],$$

$$\gamma_4 = \frac{\dot{P}_4}{\cos(\varphi_4 + \varphi_1)} [\lambda_{42} \cos(\varphi_4 - \beta_4) - \lambda_{41} \sin(\varphi_3 + \beta_4)].$$

Из уравнения (1), (3) и (4), найдем

$$\varepsilon_2 = \frac{\lambda_{11} \varepsilon_1 (1 + 2\varepsilon_1) - (1 + \varepsilon_1) \gamma_1}{\lambda_{12}}, \quad \varepsilon_3 = \frac{-\lambda_{32} \varepsilon_1 - \gamma_3}{\lambda_{32} + \gamma_3} = \frac{\lambda_{32} \varepsilon_1 + \gamma_3}{\gamma_{33}},$$

$$\varepsilon_4 = \frac{\gamma_4 + \lambda_{42} \varepsilon_1}{\lambda_{41} - \gamma_4} = \frac{\gamma_4 \gamma_{33} + \lambda_{32} \lambda_{42} \varepsilon_1 + \gamma_3 \lambda_{42}}{\gamma_{33} \gamma_{44}} = \frac{\gamma_{33}^* + \lambda_{32} \lambda_{42} \varepsilon_1}{\gamma_{44}^*},$$

где

$$\gamma_{33} = -\lambda_{31} - \gamma_3, \quad \gamma_{44} = \lambda_{41} - \gamma_4, \quad \gamma_{44}^* = \gamma_{33} \gamma_{44}, \quad \gamma_{33}^* = \gamma_4 \gamma_{33} + \gamma_3 \lambda_{42}.$$

Подставляя выражения ε_2 и ε_4 в уравнение (2), получаем

$$\begin{aligned} & \frac{-\lambda_{22} (\gamma_{33}^* + \lambda_{32} \lambda_{42} \varepsilon_1)}{\gamma_{44}^*} - \frac{\lambda_{11} \lambda_{21} \varepsilon_1 (1 + 2\varepsilon_1) - (1 + \varepsilon_1) \gamma_1 \lambda_{21}}{\lambda_{12}} \left[1 + \frac{2\lambda_{11} \varepsilon_1 (1 + 2\varepsilon_1) - 2(1 + \varepsilon_1) \gamma_1}{\lambda_{12}} \right] = \\ & = \gamma_2 \left[1 + \frac{\lambda_{11} \varepsilon_1 (1 + 2\varepsilon_1) - (1 + \varepsilon_1) \gamma_1}{\lambda_{12}} \right] \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} & -\gamma_{44}^* [\lambda_{11} \lambda_{21} \varepsilon_1 (1 + 2\varepsilon_1) - \lambda_{21} \gamma_1 (1 + \varepsilon_1)] [\lambda_{12} + 2\lambda_{11} \varepsilon_1 (1 + 2\varepsilon_1) - 2\gamma_1 (1 + \varepsilon_1)] = \\ & = \lambda_{12}^2 \lambda_{22} \gamma_{33}^* + \lambda_{12}^2 \lambda_{22} \lambda_{32} \lambda_{42} \varepsilon_1 + \gamma_2 \gamma_{44}^* \lambda_{12} [\lambda_{12} + \lambda_{11} \varepsilon_1 (1 + 2\varepsilon_1) - \gamma_1 (1 + \varepsilon_1)]. \end{aligned}$$

Обозначим

$$\begin{aligned} m_0 &= -\lambda_{12}^2 \lambda_{22} \gamma_{33}^*, \quad m_1 = -\lambda_{12}^2 \lambda_{22} \lambda_{32} \lambda_{42}, \quad n_0 = \lambda_{21} \gamma_1 \gamma_{44}^*, \quad n_1 = -\gamma_{44}^* \lambda_{21} (\lambda_{11} - \gamma_1), \quad n_2 = -2\lambda_{11} \lambda_{21} \gamma_{44}^*, \\ k_0 &= \lambda_{12} - 2\gamma_1, \quad k_1 = 2(\lambda_{11} - \gamma_1), \quad k_2 = 4\lambda_{11}, \quad q_0 = \gamma_2 \gamma_{44}^* \lambda_{12} (\lambda_{12} - \gamma_1), \quad q_1 = \gamma_2 \gamma_{44}^* \lambda_{12} (\lambda_{11} - \gamma_1), \\ q_2 &= 2\gamma_2 \gamma_{44}^* \lambda_{12} \lambda_{11}. \end{aligned}$$

Тогда последнее уравнение принимает вид

$$m_0 + m_1 \varepsilon_1 + (n_0 + n_1 \varepsilon_1 + n_2 \varepsilon_1^2) (k_0 + k_1 \varepsilon_1 + k_2 \varepsilon_1^2) = q_0 + q_1 \varepsilon_1 + q_2 \varepsilon_1^2.$$

Отсюда

$$b_0 + b_1 \varepsilon_2 + b_2 \varepsilon_2^2 + b_3 \varepsilon_2^3 + b_4 \varepsilon_2^4 = 0,$$

где

$$b_4 = n_2 k_2, \quad b_3 = n_1 k_2 + n_2 k_1, \quad b_2 = n_0 k_2 + n_1 k_1 + n_2 k_0 - q_2, \quad b_1 = m_1 + n_0 k_1 + n_1 k_0 - q_1, \\ b_0 = m_0 + n_0 k_0 - q_0.$$

Таким образом, в рассматриваемом частном случае задача сводится к решению алгебраического уравнения четвертой степени относительно неизвестных деформаций.

2°. Далее, если предположить, что $\gamma_1 = 0$ ($P_1 = 0$), $\varepsilon_1 \neq 0$, $\varepsilon_1 \neq \frac{1}{2}$ и $\varepsilon_1 \neq 1$, то

$$\varepsilon_2 = \frac{\lambda_1 \varepsilon_1}{\lambda_{12}}.$$

Подставляя выражения ε_2 и ε_4 в уравнение (2) будем иметь

или

$$\xi_0 + \xi_1 \varepsilon_1 + \xi_2 \varepsilon_1^2 = 0,$$

где

$$\xi_2 = 2\lambda_1^2 \lambda_{21} \lambda_{44}^*, \quad \xi_1 = -\lambda_{12} [\lambda_{12} \lambda_{22} \lambda_{32} \lambda_{42} + \lambda_{11} \lambda_{44}^* (\lambda_{21} + \gamma_2)], \quad \xi_0 = -\lambda_{12}^2 (\gamma_{33}^* \lambda_{22} + \gamma_2 \gamma_{44}^*).$$

В рассматриваемом частном случае задача сводится к решению алгебраического уравнения второй степени относительно деформации ε_1 .

3°. При малых относительных деформациях, исходные уравнения приводятся к следующему виду

$$-\lambda_{12} \varepsilon_2 + (\lambda_{11} - \gamma_1) \varepsilon_1 = \gamma_1, \quad -\lambda_{22} \varepsilon_4 - (\lambda_{21} + \gamma_2) \varepsilon_2 = \gamma_2, \\ -\lambda_{32} \varepsilon_1 - (\lambda_{31} + \gamma_3) \varepsilon_3 = \gamma_3, \quad -\lambda_{42} \varepsilon_3 + (\lambda_{41} - \gamma_4) \varepsilon_4 = \gamma_4.$$

Отсюда

$$\varepsilon_1 = \frac{(\lambda_{31} + \gamma_3)(\lambda_{41} - \gamma_4)[\gamma_1(\lambda_{21} + \gamma_2) - \lambda_{12} \gamma_2] + \lambda_{12} \lambda_{22} [\lambda_{42} \gamma_3 - (\lambda_{31} + \gamma_3) \gamma_4]}{(\lambda_{11} - \gamma_1)(\lambda_{21} + \gamma_2)(\lambda_{31} + \gamma_3)(\lambda_{41} - \gamma_4) - \lambda_{12} \lambda_{22} \lambda_{32} \lambda_{42}}, \\ \varepsilon_2 = \frac{\lambda_{42} \lambda_{22} [\lambda_{32} \gamma_1 + (\lambda_{11} - \gamma_1) \gamma_3] - (\lambda_{31} + \gamma_3)(\lambda_{11} - \gamma_1) [\gamma_2(\lambda_{41} - \gamma_4) + \lambda_{22} \gamma_4]}{(\lambda_{11} - \gamma_1)(\lambda_{21} + \gamma_2)(\lambda_{31} + \gamma_3)(\lambda_{41} - \gamma_4) - \lambda_{12} \lambda_{22} \lambda_{32} \lambda_{42}}, \\ \varepsilon_3 = \frac{(\lambda_{21} + \gamma_2)(\lambda_{41} - \gamma_4) [\lambda_{32} \gamma_1 + \gamma_3(\lambda_{11} - \gamma_1)] - \lambda_{12} \lambda_{32} [(\lambda_{41} - \gamma_4) \gamma_2 + \lambda_{22} \gamma_4]}{\lambda_{12} \lambda_{22} \lambda_{32} \lambda_{42} - (\lambda_{11} - \gamma_1)(\lambda_{21} + \gamma_2)(\lambda_{31} + \gamma_3)(\lambda_{41} - \gamma_4)}, \\ \varepsilon_4 = \frac{\lambda_{32} \lambda_{42} [\gamma_1(\lambda_{21} + \gamma_2) - \gamma_2 \lambda_{12}] + (\lambda_{11} - \gamma_1)(\lambda_{21} + \gamma_2) [\gamma_3 \lambda_{42} - \gamma_4(\lambda_{31} + \gamma_3)]}{\lambda_{12} \lambda_{22} \lambda_{32} \lambda_{42} - (\lambda_{11} - \gamma_1)(\lambda_{21} + \gamma_2)(\lambda_{31} + \gamma_3)(\lambda_{41} - \gamma_4)}.$$

Нерастяжимый ремень. В случае нерастяжимого материала условия непрерывности движения \dots законы сохранения массы и количества движения рассматриваемого элемента ремня имеет соответственно вид:

$$ds_{00} = ds_{01} = ds_{02} = ds_{03} = ds_{04}; \\ \rho_{00} F_{00} ds_{00} = \rho_{01} F_{01} ds_{01} = \rho_{02} F_{02} ds_{02} = \rho_{03} F_{03} ds_{03} = \rho_{04} F_{04} ds_{04};$$

$$\begin{aligned}
 x_{01}^* dt &= \cos \varphi_{01} ds_{01}, & y_{01}^* dt &= \sin \varphi_{01} ds_{01}; & x_{02}^* dt &= \sin \varphi_{02} ds_{02}, & y_{02}^* dt &= \cos \varphi_{02} ds_{02}; \\
 x_{03}^* dt &= -\sin \varphi_{03} ds_{03}, & y_{03}^* dt &= -\cos \varphi_{03} ds_{03}; & x_{04}^* dt &= -\cos \varphi_{04} ds_{04}, & y_{04}^* dt &= -\sin \varphi_{04} ds_{04}; \\
 \rho_{01} F_{01} ds_{01} (x_{01}^* - x_{02}^*) &= (T_{01} \cos \varphi_{01} - T_{02} \sin \varphi_{02} - R_{01} \cos \beta_{01} + f R_{01} \sin \beta_{01} - P_{01} \sin \beta_{01}) dt, \\
 \rho_{01} F_{01} ds_{01} (y_{01}^* - y_{02}^*) &= (T_{01} \sin \varphi_{01} - T_{02} \cos \varphi_{02} - R_{01} \sin \beta_{01} - f R_{01} \cos \beta_{01} + P_{01} \cos \beta_{01}) dt; \\
 \rho_{02} F_{02} ds_{02} (x_{02}^* - x_{04}^*) &= (T_{02} \sin \varphi_{02} + T_{04} \cos \varphi_{04} - R_{02} \cos \beta_{02} + f R_{02} \sin \beta_{02} - P_{02} \sin \beta_{02}) dt, \\
 \rho_{02} F_{02} ds_{02} (y_{02}^* - y_{04}^*) &= (T_{02} \cos \varphi_{02} + T_{04} \sin \varphi_{04} - R_{02} \sin \beta_{02} - f R_{02} \cos \beta_{02} + P_{02} \cos \beta_{02}) dt; \\
 \rho_{03} F_{03} ds_{03} (x_{03}^* - x_{01}^*) &= (-T_{03} \sin \varphi_{03} - T_{01} \cos \varphi_{01} + R_{03} \cos \beta_{03} - f R_{03} \sin \beta_{03} + P_{03} \sin \beta_{03}) dt, \\
 \rho_{03} F_{03} ds_{03} (y_{03}^* - y_{01}^*) &= (-T_{03} \cos \varphi_{03} - T_{01} \sin \varphi_{01} + R_{03} \sin \beta_{03} + f R_{03} \cos \beta_{03} - P_{03} \cos \beta_{03}) dt; \\
 \rho_{04} F_{04} ds_{04} (x_{04}^* - x_{03}^*) &= (-T_{04} \cos \varphi_{04} + T_{03} \sin \varphi_{03} + R_{04} \cos \beta_{04} + f R_{04} \sin \beta_{04} - P_{04} \sin \beta_{04}) dt, \\
 \rho_{04} F_{04} ds_{04} (y_{04}^* - y_{03}^*) &= (-T_{04} \sin \varphi_{04} + T_{03} \cos \varphi_{03} - R_{04} \sin \beta_{04} + f R_{04} \cos \beta_{04} - P_{04} \cos \beta_{04}) dt.
 \end{aligned}$$

Отсюда

$$\begin{aligned}
 T_{01} \cos \varphi_{01} - T_{02} \sin \varphi_{02} - R_{01} (\cos \beta_{01} - f \sin \beta_{01}) &= \rho_{00} F_{00} \mu_0^2 (\cos \varphi_{01} - \sin \varphi_{02}) + P_{01} \sin \beta_{01}, \\
 T_{01} \sin \varphi_{01} - T_{02} \cos \varphi_{02} - R_{01} (\sin \beta_{01} - f \cos \beta_{01}) &= \rho_{00} F_{00} \mu_0^2 (\sin \varphi_{01} - \cos \varphi_{02}) - P_{01} \cos \beta_{01}, \\
 T_{02} \sin \varphi_{02} + T_{04} \cos \varphi_{04} - R_{02} (\cos \beta_{02} - f \sin \beta_{02}) &= \rho_{00} F_{00} \mu_0^2 (\sin \varphi_{02} + \cos \varphi_{04}) + P_{02} \sin \beta_{02}, \\
 T_{02} \cos \varphi_{02} + T_{04} \sin \varphi_{04} - R_{02} (\sin \beta_{02} - f \cos \beta_{02}) &= \rho_{00} F_{00} \mu_0^2 (\cos \varphi_{02} + \sin \varphi_{04}) - P_{02} \cos \beta_{02}, \\
 T_{03} \sin \varphi_{03} + T_{01} \cos \varphi_{01} - R_{03} (\cos \beta_{03} - f \sin \beta_{03}) &= \rho_{00} F_{00} \mu_0^2 (\sin \varphi_{03} + \cos \varphi_{01}) - P_{03} \sin \beta_{03}, \\
 T_{03} \cos \varphi_{03} + T_{01} \sin \varphi_{01} - R_{03} (\sin \beta_{03} + f \cos \beta_{03}) &= \rho_{00} F_{00} \mu_0^2 (\cos \varphi_{03} + \sin \varphi_{01}) - P_{03} \cos \beta_{03}, \\
 T_{04} \cos \varphi_{04} - T_{03} \sin \varphi_{03} - R_{04} (\cos \beta_{04} + f \sin \beta_{04}) &= \rho_{00} F_{00} \mu_0^2 (\cos \varphi_{04} - \sin \varphi_{03}) - P_{04} \sin \beta_{04}, \\
 -T_{04} \sin \varphi_{04} + T_{03} \cos \varphi_{03} - R_{04} (\sin \beta_{04} - f \cos \beta_{04}) &= \rho_{00} F_{00} \mu_0^2 (\cos \varphi_{03} - \sin \varphi_{04}) + P_{04} \cos \beta_{04}.
 \end{aligned}$$

Обозначим

$$\begin{aligned}
 \eta_{11} &= \cos \beta_{01} - f \sin \beta_{01}, & \eta_{12} &= \sin \beta_{01} - f \cos \beta_{01}, & \eta_{21} &= \cos \beta_{02} - f \sin \beta_{02}, \\
 \eta_{22} &= \sin \beta_{02} - f \cos \beta_{02}, & \eta_{31} &= \cos \beta_{03} - f \sin \beta_{03}, & \eta_{32} &= \sin \beta_{03} + f \cos \beta_{03}, \\
 \eta_{41} &= \cos \beta_{04} + f \sin \beta_{04}, & \eta_{42} &= \sin \beta_{04} - f \cos \beta_{04}, \\
 A_1 &= \rho_{00} F_{00} \mu_0^2 (\cos \varphi_{01} - \sin \varphi_{02}) + P_{01} \sin \beta_{01}, & A_2 &= \rho_{00} F_{00} \mu_0^2 (\sin \varphi_{01} - \cos \varphi_{02}) - P_{01} \cos \beta_{01}, \\
 B_1 &= \rho_{00} F_{00} \mu_0^2 (\sin \varphi_{02} + \cos \varphi_{04}) + P_{02} \sin \beta_{02}, & B_2 &= \rho_{00} F_{00} \mu_0^2 (\cos \varphi_{02} + \sin \varphi_{04}) - P_{02} \cos \beta_{02}, \\
 C_1 &= \rho_{00} F_{00} \mu_0^2 (\sin \varphi_{03} + \cos \varphi_{01}) - P_{03} \sin \beta_{03}, & C_2 &= \rho_{00} F_{00} \mu_0^2 (\cos \varphi_{03} + \sin \varphi_{01}) - P_{03} \cos \beta_{03},
 \end{aligned}$$

$$D_1 = \rho_{00} F_{00} \mu_0^2 (\cos \varphi_{04} - \sin \varphi_{03}) - P_{04} \sin \beta_{04}, \quad D_2 = \rho_{00} F_{00} \mu_0^2 (\cos \varphi_{03} - \sin \varphi_{04}) + P_{04} \cos \beta_{04}.$$

Подставляя эти обозначения, последние уравнения приводим к виду

$$T_{01} \cos \varphi_{01} - T_{02} \sin \varphi_{02} - R_{01} \eta_{11} = A_1, \quad (5)$$

$$T_{01} \sin \varphi_{01} - T_{02} \cos \varphi_{02} - R_{01} \eta_{12} = A_2, \quad (6)$$

$$T_{02} \sin \varphi_{02} + T_{04} \cos \varphi_{04} - R_{02} \eta_{21} = B_1, \quad (7)$$

$$T_{02} \cos \varphi_{02} + T_{04} \sin \varphi_{04} - R_{02} \eta_{22} = B_2, \quad (8)$$

$$T_{03} \sin \varphi_{03} + T_{01} \cos \varphi_{01} - R_{03} \eta_{31} = C_1, \quad (9)$$

$$T_{03} \cos \varphi_{03} + T_{01} \sin \varphi_{01} - R_{03} \eta_{32} = C_2, \quad (10)$$

$$T_{04} \cos \varphi_{04} - T_{03} \sin \varphi_{03} - R_{04} \eta_{41} = D_1, \quad (11)$$

$$-T_{04} \sin \varphi_{04} + T_{03} \cos \varphi_{03} - R_{04} \eta_{42} = D_2. \quad (12)$$

Исключая, отсюда, приведенные значения неизвестных реактивных сил, найдем

$$T_{01}(\eta_{12} \cos \varphi_{01} - \eta_{11} \sin \varphi_{01}) - T_{02}(\eta_{12} \sin \varphi_{02} - \eta_{11} \cos \varphi_{02}) = A_1 \eta_{12} - A_2 \eta_{11}.$$

$$T_{02}(\eta_{22} \sin \varphi_{02} - \eta_{21} \cos \varphi_{02}) + T_{04}(\eta_{22} \cos \varphi_{04} - \eta_{21} \sin \varphi_{04}) = B_1 \eta_{22} - B_2 \eta_{21}.$$

$$T_{03}(\eta_{32} \sin \varphi_{03} - \eta_{31} \cos \varphi_{03}) + T_{01}(\eta_{32} \cos \varphi_{01} - \eta_{31} \sin \varphi_{01}) = C_1 \eta_{32} - C_2 \eta_{31}.$$

$$T_{04}(\eta_{42} \cos \varphi_{04} + \eta_{41} \sin \varphi_{04}) - T_{03}(\eta_{42} \sin \varphi_{03} + \eta_{41} \cos \varphi_{03}) = D_1 \eta_{42} - D_2 \eta_{41}.$$

Введем обозначения

$$\alpha_{11} = \eta_{12} \cos \varphi_{01} - \eta_{11} \sin \varphi_{01}, \quad \alpha_{12} = -\eta_{12} \sin \varphi_{02} + \eta_{11} \cos \varphi_{02}, \quad \alpha_{21} = \eta_{22} \sin \varphi_{02} - \eta_{21} \cos \varphi_{02},$$

$$\alpha_{22} = \eta_{22} \cos \varphi_{04} - \eta_{21} \sin \varphi_{04}, \quad \alpha_{31} = \eta_{32} \cos \varphi_{01} - \eta_{31} \sin \varphi_{01}, \quad \alpha_{32} = \eta_{32} \sin \varphi_{03} - \eta_{31} \cos \varphi_{03},$$

$$\alpha_{41} = \eta_{42} \cos \varphi_{04} + \eta_{41} \sin \varphi_{04}, \quad \alpha_{42} = -\eta_{42} \sin \varphi_{03} - \eta_{41} \cos \varphi_{03},$$

$$A = A_1 \eta_{12} - A_2 \eta_{11}, \quad B = B_1 \eta_{22} - B_2 \eta_{21}, \quad C = C_1 \eta_{32} - C_2 \eta_{31}, \quad D = D_1 \eta_{42} - D_2 \eta_{41}.$$

Тогда уравнения (54)–(12) приводятся к виду

$$T_1 \alpha_{11} + T_2 \alpha_{12} = A, \quad T_2 \alpha_{21} + T_4 \alpha_{22} = B,$$

$$T_3 \alpha_{31} + T_4 \alpha_{32} = C, \quad T_4 \alpha_{41} + T_3 \alpha_{42} = D.$$

Отсюда

$$T_{01} = \frac{(A\alpha_{21} - B\alpha_{12})\alpha_4\alpha_{32} - (C\alpha_{42} - D\alpha_{32})\alpha_{22}\alpha_{12}}{\alpha_1\alpha_{21}\alpha_4\alpha_{32} - \alpha_3\alpha_{42}\alpha_{22}\alpha_{12}},$$

$$T_{02} = \frac{A}{\alpha_{12}} - \frac{\alpha_{11}}{\alpha_{12}} \frac{(A\alpha_{21} - B\alpha_{12})\alpha_4\alpha_{32} - (C\alpha_{42} - D\alpha_{32})\alpha_{22}\alpha_{12}}{\alpha_1\alpha_{21}\alpha_4\alpha_{32} - \alpha_3\alpha_{42}\alpha_{22}\alpha_{12}},$$

$$T_{03} = \frac{D}{\alpha_{42}} - \frac{\alpha_{41}}{\alpha_{42}} \frac{(A\alpha_{21} - B\alpha_{12})\alpha_3\alpha_{42} - (C\alpha_{42} - D\alpha_{32})\alpha_1\alpha_{21}}{-\alpha_{22}\alpha_{12}\alpha_3\alpha_{42} + \alpha_4\alpha_{32}\alpha_1\alpha_{21}},$$

$$T_{04} = \frac{(A\alpha_{21} - B\alpha_{12})\alpha_3\alpha_{42} - (C\alpha_{42} - D\alpha_{32})\alpha_1\alpha_{21}}{-\alpha_{22}\alpha_{12}\alpha_3\alpha_{42} + \alpha_4\alpha_{32}\alpha_1\alpha_{21}}.$$

Последние выражения являются аналитическим решением задачи, позволяющий устанавливать зависимости значения и распределения натяжения между ветвями нерастяжимого ремня от конструктивных показателей и скорости вращения механизма. Проведенные численно-экспериментальные исследования показали [], что в случае $d_1 > d_4 > d_2 = d_3$ между натяжениями T_{0i} ветвей ремня можно установить линейные зависимости следующего вида $T_{01} = \lambda_{12} T_{02}$, $T_{02} = \lambda_{24} T_{04}$, $T_{04} = \lambda_{34} T_{03}$, $T_{03} = \lambda_{31} T_{01}$. При исходных значениях: $f = 0.3$, $p_{0i} = 0$; $\varphi_{01} = 6^\circ$; $\varphi_{02} = 8^\circ$; $\varphi_{03} = 10^\circ$; $\varphi_{04} = 12^\circ$ и возрастании скорости вращения в пределах $u = 10 \div 16 \frac{M}{C}$,

значения коэффициентов λ возрастают в пределах; $\lambda_{12} = 1.01 \div 1.04$, $\lambda_{24} = 1.09 \div 1.19$; $\lambda_{34} = 1.06 \div 1.14$; $\lambda_{31} = 1.02 \div 1.07$.

Расчеты, в рассматриваемом случае, проводились для случая $d_1 = d_4 < d_3 < d_2$ и следующих значений углов обхвата ремнем поверхности шкивов $\varphi_{01} = 6^\circ$; $\varphi_{02} = 12^\circ$; $\varphi_{03} = 8^\circ$; $\varphi_{04} = 10^\circ$, а остальные параметры расчета – совпадают с предыдущим случаем. При этом, возрастание скорости вращения механизма приводит к возрастанию параметра λ в пределах $\lambda_{24} = 1.01 \div 1.03$, $\lambda_{34} = 1.10 \div 1.17$; $\lambda_{13} = 1.04 \div 1.11$; $\lambda_{24} = 1.01 \div 1.05$.

Сравнивая результатов проведенных расчетов, приходим к следующему выводу – возрастание диаметра шкива, приводит к уменьшению разности натяжения между набегающей и сбегающей ветвей ремня.

Начальные натяжения. Запишем условия равновесия ремня:

$$T_{001} \cos \varphi_{001} - T_{002} \sin \varphi_{002} - R_{001}(\cos \beta_{001} - f \sin \beta_{001}) = P_{001} \sin \beta_{001},$$

$$T_{001} \sin \varphi_{001} - T_{002} \cos \varphi_{002} - R_{001}(\sin \beta_{001} - f \cos \beta_{001}) = -P_{001} \cos \beta_{001};$$

– на поверхности второго шкива

$$T_{002} \sin \varphi_{002} + T_{004} \cos \varphi_{004} - R_{002}(\cos \beta_{002} - f \sin \beta_{002}) = P_{002} \sin \beta_{002},$$

$$T_{002} \cos \varphi_{002} + T_{004} \sin \varphi_{004} - R_{002}(\sin \beta_{002} - f \cos \beta_{002}) = -P_{002} \cos \beta_{002};$$

– на поверхности третьего шкива

$$T_{003} \sin \varphi_{003} + T_{001} \cos \varphi_{001} - R_{003}(\cos \beta_{003} - f \sin \beta_{003}) = -P_{003} \sin \beta_{003},$$

$$T_{003} \cos \varphi_{003} + T_{001} \sin \varphi_{001} - R_{003}(\sin \beta_{003} + f \cos \beta_{003}) = -P_{003} \cos \beta_{003};$$

– на поверхности четвертого шкива

$$T_{004} \cos \varphi_{004} - T_{003} \sin \varphi_{003} - R_{004}(\cos \beta_{004} + f \sin \beta_{004}) = -P_{004} \sin \beta_{004},$$

$$-T_{004} \sin \varphi_{004} + T_{003} \cos \varphi_{003} - R_{004} (\sin \beta_{004} - f \cos \beta_{004}) = P_{004} \cos \beta_{004}.$$

Введем обозначения:

$$M_1 = P_{001} \sin \beta_{001}, \quad M_2 = -P_{001} \cos \beta_{001}; \quad N_1 = P_{002} \sin \beta_{002}, \quad N_2 = -P_{002} \cos \beta_{002};$$

$$K_1 = -P_{003} \sin \beta_{003}, \quad K_2 = -P_{003} \cos \beta_{003}; \quad E_1 = -P_{004} \sin \beta_{004}, \quad E_2 = P_{004} \cos \beta_{004}$$

$$\eta_{11} = \cos \beta_{001} - f \sin \beta_{001}, \quad \eta_{12} = \sin \beta_{001} - f \cos \beta_{001}; \quad \eta_{21} = \cos \beta_{002} - f \sin \beta_{002},$$

$$\eta_{22} = \sin \beta_{002} - f \cos \beta_{002}; \quad \eta_{31} = \cos \beta_{003} - f \sin \beta_{003}; \quad \eta_{32} = \sin \beta_{003} + f \cos \beta_{003};$$

$$\eta_{41} = \cos \beta_{004} + f \sin \beta_{004}; \quad \eta_{42} = \sin \beta_{004} - f \cos \beta_{004}.$$

Используя эти обозначения, последние уравнения представим в виде:

$$T_{001} \cos \varphi_{001} - T_{002} \sin \varphi_{002} - R_{001} \eta_{11} = M_1; \quad T_{001} \sin \varphi_{001} - T_{002} \cos \varphi_{002} - R_{001} \eta_{12} = M_2;$$

$$T_{002} \sin \varphi_{002} + T_{004} \cos \varphi_{004} - R_{002} \eta_{21} = N_1; \quad T_{002} \cos \varphi_{002} + T_{004} \sin \varphi_{004} - R_{002} \eta_{22} = N_2;$$

$$T_{003} \sin \varphi_{003} + T_{001} \cos \varphi_{001} - R_{003} \eta_{31} = K_1; \quad T_{003} \cos \varphi_{003} + T_{001} \sin \varphi_{001} - R_{003} \eta_{32} = K_2;$$

$$T_{004} \cos \varphi_{004} - T_{003} \sin \varphi_{003} - R_{004} \eta_{41} = E_1, \quad -T_{004} \sin \varphi_{004} + T_{003} \cos \varphi_{003} - R_{004} \eta_{42} = E_2.$$

Исключая неизвестные реактивные силы, получаем

$$T_{001} (\eta_{12} \cos \varphi_{001} - \eta_{11} \sin \varphi_{001}) - T_{002} (\eta_{12} \sin \varphi_{002} - \eta_{11} \cos \varphi_{002}) = M_1 \eta_{12} - M_2 \eta_{11},$$

$$T_{002} (\eta_{22} \sin \varphi_{002} - \eta_{21} \cos \varphi_{002}) + T_{004} (\eta_{22} \cos \varphi_{004} - \eta_{21} \sin \varphi_{004}) = N_1 \eta_{22} - N_2 \eta_{21},$$

$$T_{003} (\eta_{32} \sin \varphi_{003} - \eta_{31} \cos \varphi_{003}) + T_{001} (\eta_{32} \cos \varphi_{001} - \eta_{31} \sin \varphi_{001}) = K_1 \eta_{32} - K_2 \eta_{31},$$

$$T_{004} (\eta_{42} \cos \varphi_{004} + \eta_{41} \sin \varphi_{004}) - T_{003} (\eta_{42} \sin \varphi_{003} + \eta_{41} \cos \varphi_{003}) = E_1 \eta_{42} - E_2 \eta_{41}.$$

Обозначим

$$M = M_1 \eta_{12} - M_2 \eta_{11}, \quad N = N_1 \eta_{22} - N_2 \eta_{21}, \quad K = K_1 \eta_{32} - K_2 \eta_{31}, \quad E = E_1 \eta_{42} - E_2 \eta_{41},$$

$$\alpha_{11} = \eta_{12} \cos \varphi_{001} - \eta_{11} \sin \varphi_{001}; \quad \alpha_{12} = -\eta_{12} \sin \varphi_{002} + \eta_{11} \cos \varphi_{002}; \quad \alpha_{21} = \eta_{22} \sin \varphi_{002} - \eta_{21} \cos \varphi_{002};$$

$$\alpha_{22} = \eta_{22} \cos \varphi_{004} - \eta_{21} \sin \varphi_{004}; \quad \alpha_{31} = \eta_{32} \cos \varphi_{001} - \eta_{31} \sin \varphi_{001}; \quad \alpha_{32} = \eta_{32} \sin \varphi_{003} - \eta_{31} \cos \varphi_{003};$$

$$\alpha_{41} = \eta_{42} \cos \varphi_{004} + \eta_{41} \sin \varphi_{004}; \quad \alpha_{42} = -\eta_{42} \sin \varphi_{003} - \eta_{41} \cos \varphi_{003}.$$

Используя эти обозначения, последние уравнения представим в виде

$$T_{001} \alpha_{11} + T_{002} \alpha_{12} = M, \quad T_{002} \alpha_{21} + T_{004} \alpha_{22} = N,$$

$$T_{003} \alpha_{31} + T_{001} \alpha_{32} = K, \quad T_{004} \alpha_{41} + T_{003} \alpha_{42} = E.$$

Данную систему легко можно описать так:

$$T_{001} = \frac{(M \alpha_{21} - N \alpha_{12}) \alpha_4 \alpha_{32} - (K \alpha_{42} - E \alpha_{32}) \alpha_2 \alpha_{12}}{\alpha_1 \alpha_{21} \alpha_4 \alpha_{32} - \alpha_3 \alpha_{42} \alpha_{22} \alpha_{12}},$$

$$T_{002} = \frac{M}{\alpha_{12}} - \frac{\alpha_{11}}{\alpha_{12}} \frac{(M \alpha_{21} - N \alpha_{12}) \alpha_4 \alpha_{32} - (K \alpha_{42} - E \alpha_{32}) \alpha_2 \alpha_{12}}{\alpha_1 \alpha_{21} \alpha_4 \alpha_{32} - \alpha_3 \alpha_{42} \alpha_{22} \alpha_{12}},$$

$$T_{003} = \frac{E}{\alpha_{42}} - \frac{\alpha_{41}}{\alpha_{42}} \frac{(M \alpha_{21} - N \alpha_{12}) \alpha_3 \alpha_{42} - (K \alpha_{42} - E \alpha_{32}) \alpha_1 \alpha_{21}}{-\alpha_2 \alpha_{12} \alpha_3 \alpha_{42} + \alpha_4 \alpha_{32} \alpha_1 \alpha_{21}},$$

$$T_{004} = \frac{(M \alpha_{21} - N \alpha_{12}) \alpha_3 \alpha_{42} - (K \alpha_{42} - E \alpha_{32}) \alpha_1 \alpha_{21}}{-\alpha_2 \alpha_{12} \alpha_3 \alpha_{42} + \alpha_4 \alpha_{32} \alpha_1 \alpha_{21}}.$$

Полученные выражения служат для установления зависимости значения и распределения начального (наладочного) натяжения между ветвями нерастяжимого ремня от конструктивных показателей и распределения силы натяга .

ВЫВОДЫ

1. Используя: условия непрерывности стационарного движения материальных частицу ремня; зависимости кинематических условий, ищущих места в точках

набегания и сбегания элементов ремня с поверхности шкивов и зависимости направления действия реактивных сил, имеющих место на поверхности шкивов от конструктивных параметров механизма; теорему об изменении количества движения и закона сохранения массы элементов ремня, имеющих в областях перехода элементов ремня поверхности шкивов; законов Гука для растяжимого материала ремня и Кулона для сил трения ремня о поверхности шкивов построена замкнутая система для определения показателя распределения натяжения и деформации между ветвями ремня.

2. Задача, в случае растяжения ремня в пределах упругости, сведена к численному решению системы алгебраических уравнений относительно деформаций ветвей ремня, а в случае нерастяжимого ремня получены удобные для инженерных расчетов зависимости значения и закона распределения натяжения между ветвями ремня от свойства материала, конструктивных и технологических параметров, а также скорости вращения механизма. Рассматривается задача расчета рациональных начальных (наладочных) параметров, устанавливаемых при подготовке механизма к работе.

3. Полученные решения могут быть использованы при проектировании новых и прогнозирования рациональных конструктивных и технологических параметров заданных механизмов передачи, выявления причин появления и мер устранения различных пороков, возникающих при работе механизмов передачи и технологических машин.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого тела. М.: Наука, 1988. 712 с.
2. Шахмейстер Л.Г., Дмитриев В.Г. Теория и расчет ленточных конвейеров. М.: Машиностроение, 1987. 336 с.
3. Вейц В.Л., Кочура А.Е., Мартиненко А.М. Динамические расчеты приводов машин. Л.: Машиностроение, 1970. 212 с.
4. Воробьев И.И. Ременные передачи. М.: Машиностроение, 1979. 168 с.
5. Вейц В.Л., Динамика машинных агрегатов. Л.: Машиностроение. 1969. 368 с.
6. Эргашов М. Баймуратов Б.Х. Дремова Н.В. Нуруллаева Х.Т. Юсупова З.Р. Моделирование сложного передаточного механизма с растяжимым или нерастяжимым ремнем/ CONGRESS PROGRAM (online) May 10-11, 2022. Tashkent. / Meeting ID: 844 1438 6914. Passcode: 001001.
7. Эргашов М., Дремова Н.В. Нуруллаева Х.Т. Методика установления зависимости напряженного состояния ремня от конструктивных параметров передаточного механизма. U55 Universum: технические науки: научный журнал. – № 6(99). Часть 4. М., Изд. «МЦНО», 2022. – 72 с.

8. Эргашов М. Исследование процессов распространения упругих волн в намоточных связях при учете эффектов их вращения при растяжении// Изв. АН России. ПММ. Т. 56. 1992. Вып. 1. С. 117-124.
9. Эргашов М., Максудов Р.Х., Усманкулов А. К. Теория расчета натяжения передаточного механизма. Ташкент, Фан. 2004. 257 с.
10. Эргашов М. Султонов Д. З., Каримов Н.А., Салимова М.М. Об одном методе расчета натяжения ремня передаточного механизма// Вестник ТашГТУ. 2002. № 2. С. 13-19.
11. Махаммадрасул, Э., Дремова, Н. В., Нуруллаева, Х. Т. (2021). Методика оценки влияния взаимодействия и отражения продольных волн от поверхности рабочего органа. *Universum: технические науки*, (5-3 (86)), 50-53.
12. Эргашов М., Максудов Р.Х., Усманкулов А. К. Теория расчета натяжения передаточного механизма. Ташкент, Фан. 2004. 265 с.
13. Максудов Р.Х., Эргашов М., Методы исследования натяжения ремня приводных механизмов технологических машин. Т.: Фан. 2009. 355 с.
14. Эргашов М., Максудов Р.Х., Мухамедсаидов Б.К., Даминова Р.Б., Якубова И.Ж. Программа-04 проектирования начальных параметров ленточного передаточного механизма с двумя внутренними и двумя наружными шкивами. ГАС АИС РУЗ. Авторское свидетельство. № DGU 02212. 03.10.2011.
15. Эргашов, М., Дремова, Н. В., Нуруллаева, Х. Т., & Ахунбабаев, О. А. (2022). Расчет зависимости напряженного состояния материала ремня от конструктивных параметров передачи и силы сопротивления технологических машин. *European Journal of Interdisciplinary Research and Development*, 7, 50-67.