

7. Справочное пособие по деревообработке / В.В. Кислый, П.П. Щеглов, Ю.И. Братенков [и др]. – Екатеринбург: БРИЗ, 1995. – 558 с.

8. Глебов, И.Т. Справочник по дереворежущему инструменту / И.Т. Глебов, Д.В. Неустроев. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. акад., 2000. – 253 с.

9. Абдулов, А.Р. Повышение износостойкости стальных ножей сборных фрез методом борирования в порошках / А.Р. Абдулов, В.Г. Новоселов // Леса России и хозяйство в них. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т. – 2013. – Вып. 4 (47). – С. 6–9.

УДК 629.033

Л.Т. Раевская

(L.T. Raevskaya)

(УГЛТУ, г. Екатеринбург, РФ)

E-mail для связи с автором: ltrvsk@yandex.ru

РАСЧЕТ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ СПЕЦИАЛЬНОГО ГУСЕНИЧНОГО ДВИЖИТЕЛЯ

CALCULATION OF THE SPECIAL CATERPILLAR ENGINE KINETIC ENERGY

Представлен динамический расчет привода гусеницы. Было получено соотношение для кинетической энергии механической системы. Обсуждались некоторые особенности вычисления энергии. Движение отдельных частей привода гусеницы было рассмотрено более подробно.

Presents a dynamic calculation of the caterpillar drive. The relation of the mechanical system kinetic energy has been obtained. Some features of energy calculation were discussed. The movement of individual parts caterpillar drive was examined in detail.

Для исследования переходных процессов в механических системах, прежде всего, необходимо получить дифференциальные уравнения, описывающие исследуемые перемещения. При разгрузке-погрузке, при любом изменении направления движения, при начале движения и торможении могут возникать большие динамические нагрузки, превышающие статические. Необходимость в анализе переходных процессов возникает в связи с тем, что производительность машин определяется, кроме всего прочего, временем протекания переходных процессов [1].

В настоящей работе рассматривается процесс начала движения специального гусеничного движителя (рис. 1), особенность устройства которого рассматривалась нами ранее [2].

На рисунке 1 изображен движитель с вновь вводимым узлом – ведущей звёздочкой 3. Она расположена примерно под серединой верхней ветви гусеницы и натяжной звёздочкой 2, размещённой над гусеницей впереди идущей звёздочки. Кроме того, на рисунке 1 показаны:

- направляющий каток 1,
- заднее колесо 4,
- опорные катки 5–8.
- M_1, M_2, M_3 – моменты, приложенные к соответствующим звеньям.

Пробуксовка и скольжение отсутствуют. В момент начала движения появляется ускорение. Для системы, показанной на рисунке 1, ограничимся двумя степенями свободы.

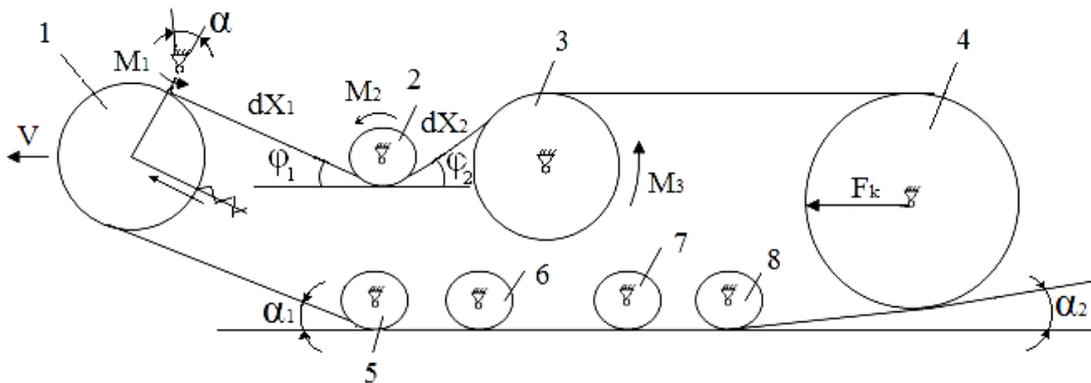


Рис. 1. Схематическое изображение движителя

Для составления дифференциальных уравнений, описывающих динамический процесс, проще всего записать уравнения Лагранжа 2-го рода. Важным шагом в этом направлении является вычисление кинетической энергии механизма, которая зависит от абсолютных скоростей центров масс. Правильный расчет кинетической энергии движителя и получение соотношений для ускорений составляет цель настоящей работы. Этот расчет необходим для дальнейших исследований переходных процессов в подъемно-транспортных машинах. В связи с тем, что все силы и моменты учесть невозможно, в работе приняты следующие допущения:

- трактор движется без буксования и скольжения;
- опорные катки катятся по гусенице без пробуксовки;
- трактор движется прямолинейно;
- вертикальные перемещения опорных катков не учитываются.

Потери на проскальзывание звеньев на ведущем колесе при ударе звеньев о зубья звездочки, на трение качения направляющих колёс, опорных и поддерживающих катков составляют не более 5 % от общих внутренних потерь и в практических расчётах не учитываются.

Поскольку угол между задней ветвью гусеницы и дорогой α_2 мал (α_2 принят равным 7 градусам для этого типа движителя), то касательную силу тяги можно считать одинаковой на ведущем звене и на опорной поверхности гусениц.

Кинетическая энергия всего движителя $E_{\text{дв}}$ определяется как кинетическая энергия гусеницы и всех колес и звездочек:

$$E_{\text{дв}} = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + 4E_{5-8} + E_6,$$

где E_1 – кинетическая энергия направляющего колеса,

E_2 – кинетическая энергия верхней звездочки;

E_3 – кинетическая энергия ведущей звездочки;

E_4 – кинетическая энергия заднего колеса;

E_{5-8} – кинетическая энергия опорных катков;

E_6 – кинетическая энергия гусеницы.

Запишем кинетическую энергию отдельных участков гусеницы.

1. Левая прямолинейная часть нижней ветви гусеницы наклонена к оси X под углом α_1 . Этот участок совершает два поступательных движения (рис. 2a). Скорости

переносного (V_e) и относительного движения (V_r) равны по модулю: $V_e = V_r = V$.

Тогда для скорости левого нижнего участка V_n^l получим:

$$V_n^l = \sqrt{V_e^2 + V_r^2 - 2V_e V_r \cos \alpha_1} = \sqrt{2V^2 - 2V^2 \cos \alpha_1} = V\sqrt{2(1 - \cos \alpha_1)}.$$

Следовательно, для кинетической энергии этого участка получаем соотношение $E_n^l = m_n^l V^2 (1 - \cos \alpha_1)$

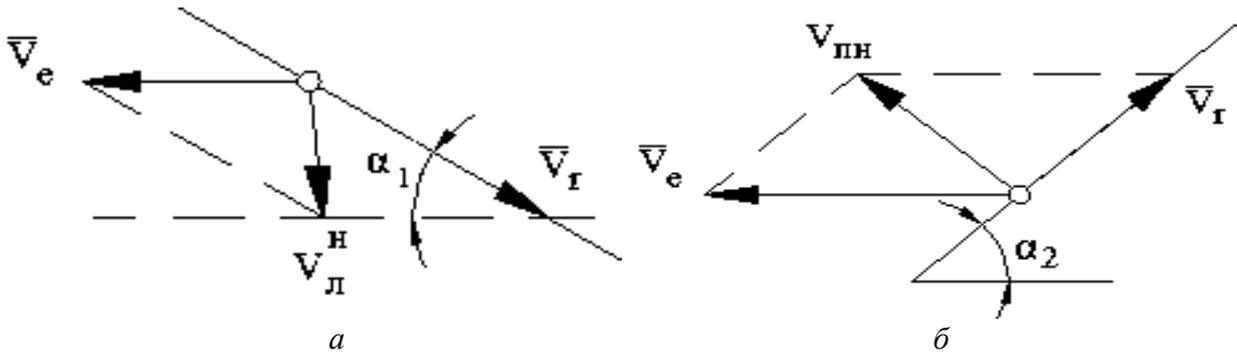


Рис. 2. К расчету скоростей левого (а) и правого (б) нижних участков гусеницы

2. Рабочая ветвь – это та часть прямолинейного участка правой части нижней ветви, которая находится между опорным катком 8 и задним колесом 4 (см. рис. 1). Аналогично предыдущему расчету получаем для скорости V_{nn} (рис. 2б) и кинетической энергии E_{nn} :

$$V_{nn}^2 = V_e^2 + V_r^2 - 2V_e V_r \cos \alpha_2 = 2V^2 (1 - \cos \alpha_2), \quad E_{nn} = m_{nn} V^2 (1 - \cos \alpha_2).$$

3. Дуговая ветвь. Участок гусеницы, находящийся в контакте с натяжной звездочкой 2 в данный момент времени участвует в 2-х движениях: переносном со скоростью центра колеса и относительном вращении вокруг центра колеса.

$$E_{r2} = \frac{m_{r2} V^2}{2} + \frac{I_{r2} V^2}{2R_2^2} = \frac{V^2}{2} \left(m_{r2} + \frac{I_{r2}}{R_2^2} \right),$$

где m_{r2} – масса этого участка гусеницы;

I_{r2} – момент инерции этого участка гусеницы относительно центра.

4. Свободная верхняя ветвь движется горизонтально между ведущей звездочкой 3 и задним колесом 4 с результирующей скоростью $\bar{V}_e = \bar{V}_e + \bar{V}_r$, $V_e = 2V$. Таким образом, кинетическая энергия получается в виде

$$E_e = \frac{m_{e6} (2V)^2}{2} = 2m_{e6} V^2.$$

5. Наклонная верхняя часть гусеницы между ведущей звездочкой 3 и наружной звездочкой 2 участвует в 2-х поступательных движениях со скоростями переносной и относительной с углом между ними φ_2 (рис. 3а):

$$V_{\varphi_2}^2 = V_e^2 + V_r^2 + 2V_e V_r \cos \varphi_2, \quad V_{\varphi_2}^2 = 2V^2(1 + \cos \varphi_2).$$

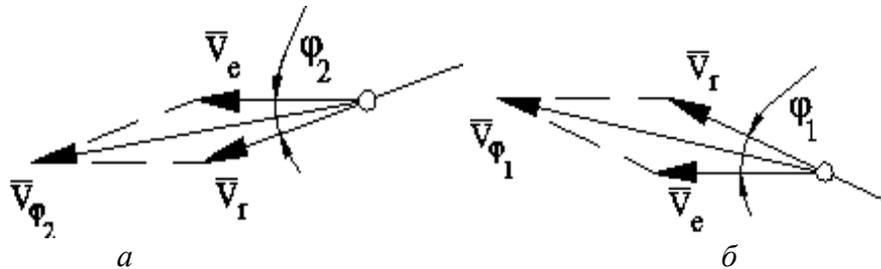


Рис. 3. К расчету скоростей наклонных верхних участков гусеницы: а – участок между 2 и 3 звеньями; б – участок между 2 и 1 звеньями движителя

Кинетическая энергия этой части гусеницы будет:

$$E_{\varphi_2} = m_{\varphi_2} V^2(1 + \cos \varphi_2).$$

6. Наклонная верхняя часть ветви гусеницы между наружной звездочкой 2 и направляющим колесом 1 участвует в 2-х поступательных движениях со скоростями переносной (\bar{V}_e) и относительной (\bar{V}_r), с углом между ними φ_1 (рис. 3б).

$$V_{\varphi_1}^2 = V_e^2 + V_r^2 + 2V_e V_r \cos \varphi_1$$

Аналогично предыдущему расчету получим для кинетической энергии

$$E_{\varphi_1} = m_{\varphi_1} V^2(1 + \cos \varphi_1).$$

Рассмотрим движение отдельных деталей движителя. Натяжная звёздочка 2, ведущая звёздочка 3 и заднее колесо 4 имеют угловую скорость и поступательную V с остовом трактора. Опорные катки 5–8 вращаются вокруг своих осей и имеют угловую скорость и поступательную V вместе с остовом.

7. Наружная звездочка 2:

$$E_2 = \frac{m_2 V^2}{2} + \frac{I_2 \omega_2^2}{2} = \frac{V^2}{2} \left(m_2 + \frac{I_2}{R_2^2} \right), \quad \omega_2 = \frac{V}{R_2}.$$

8. Ведущая звездочка 3:

$$E_3 = \frac{m_3 V^2}{2} + \frac{I_3 \omega_3^2}{2} = \frac{V^2}{2} \left(m_3 + \frac{I_3}{R_3^2} \right), \quad \omega_3 = \frac{V}{R_3}.$$

9. Заднее колесо 4:

$$E_4 = \frac{m_4 V^2}{2} + \frac{I_4 \omega_4^2}{2} = \frac{V^2}{2} \left(m_4 + \frac{I_4}{R_4^2} \right), \quad \omega_4 = \frac{V}{R_4}.$$

10. Опорный каток совершает плоское движение, которое можно рассмотреть как вращательное движение вокруг точки касания с неподвижной опорной ветвью гусеницы или как сумму 2-х движений со скоростями переносной \bar{V}_e и относительной \bar{V}_r (аналогично расчетам пунктов 8–10):

$$E_i = \frac{m_i V^2}{2} + \frac{I_i \omega_i^2}{2} = \frac{V^2}{2} \left(m_i + \frac{I_i}{R_i^2} \right), \quad \omega_i = \frac{V}{R_i}, \quad E_5 + E_6 + E_7 + E_8 = 2V^2 \left(m_k + \frac{I_k}{R_k^2} \right),$$

где m_k – масса опорного катка,

I_k – момент инерции опорного катка относительно центра масс.

11. Направляющее колесо 1 участвует в движениях: поступательном (вместе с остовом со скоростью V), и вращательном (вокруг своего центра и оси кривошипа). Кроме того, колесо 1 имеет дополнительную степень свободы за счет вращения кривошипа OC вокруг шарнира (рис. 4). Абсолютная скорость центра O зависит от направления вращения кривошипа. Возможны 2 варианта вращения кривошипа: по часовой стрелке (рис. 4) и против часовой стрелки. Для варианта на рисунке 4 получаем:

$$V_0^2 = V^2 + V_{OC}^2 + 2VV_{OC} \cos \varphi, \quad V_{OC} = \omega_0 l, \quad V_0^2 = V^2 + \omega_0^2 l^2 + 2V\omega_0 l \cos \varphi.$$

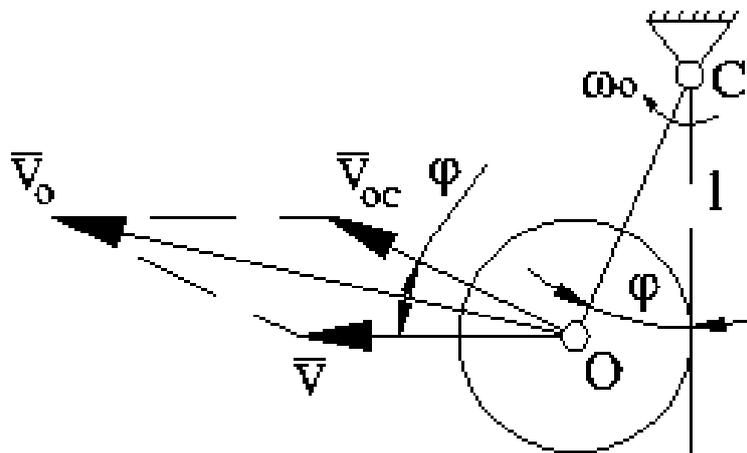


Рис. 4. К расчету абсолютной скорости центра направляющего колеса 1;
 OC – длина кривошипа l , ω_0 – угловая скорость кривошипа

При вращении против часовой стрелки скорость точки O получается в виде

$$V_0^2 = V^2 + \omega_0^2 l^2 - 2V\omega_0 l \cos \varphi.$$

Для кинетической энергии направляющего колеса 1 получаем

$$E_1 = \frac{m_1(V^2 + \omega_0^2 l^2 \pm 2V\omega_0 l \cos \varphi)}{2} + \frac{I_1 V^2}{2R_1^2}.$$

E_{r1} – энергия того участка гусеницы, который в данный момент находится в контакте с направляющим колесом 1. Этот участок гусеницы совершает 2 движения: относительное вращательное движение вокруг центра направляющего колеса 1 и переносное поступательное движение вместе с центром колеса. Скорость центра направляющего колеса 1 уже найдена и потому для кинетической энергии этого участка гусеницы получаем:

$$E_{r1} = \frac{m_{r1}(V^2 + \omega_0^2 l^2 \pm 2V\omega_0 l \cos \varphi)}{2} + \frac{I_{r1} V^2}{2R_1^2},$$

где m_{r1} – масса этого участка гусеницы,

I_{r1} – момент инерции этого участка гусеница относительно центра колеса 1.

Суммируя все энергии для идеальной модели движителя, кинетическую энергию можем записать в виде:

$$E_{\text{об}} = \frac{V^2}{2} \left(m_{r1} + \frac{I_{r1}}{R_1^2} + m_1 + \frac{I_1}{R_1^2} + 4m_k + 4\frac{I_k}{R_k^2} + m_4 + \frac{I_4}{R_4^2} + m_3 + \frac{I_3}{R_3^2} + m_2 + \frac{I_2}{R_2^2} + \right. \\ \left. 2m_{\varphi_1}(1 + \cos \varphi_1) + 2m_{\varphi_2}(1 + \cos \varphi_2) + 4m_{\varepsilon} + m_{r2} + \frac{I_{r2}}{R_2^2} + 2m_{\alpha_2}(1 - \cos \alpha_2) + 2m_{\alpha_1}(1 - \cos \alpha_1) \right) + \\ (1/2)(m_{r1} + m_1)(\omega_0^2 l^2 \pm 2V\omega_0 l \cos \varphi),$$

где коэффициент перед $\frac{V^2}{2}$ – приведенная масса.

Определив обобщенные силы для каждой степени свободы, можно записать уравнения Лагранжа и получить дифференциальные уравнения движения, из которых определяются и кинематические характеристики, и силовые воздействия, что и является целью дальнейших исследований.

Библиографический список

1. Смехов, А.А. Оптимальное управление подъемно-транспортными машинами / А.А. Смехов, Н.И. Ерофеев. – М.: Машиностроение, 1975. – 239 с.
2. Раевская, Л.Т. Механико-математическая модель специального гусеничного движителя / Л.Т. Раевская, А.М. Боровских // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – № 1. – М.: изд-во Московского государственного горного университета.