

УДК 621.9.025.7

А.Д. Бардовский, А.В. Калакуцкий

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРА ДВИЖЕНИЯ ТЯГОВЫХ КАНАТОВ РЕВЕРСИРУЮЩЕГО МЕХАНИЗМА ПРИВОДА ПИЛЫ ТИПА ПП

Представлено исследование характера движения тяговых канатов реверсирующего механизма привода пилы типа ПП. Рассмотрена схема сил, действующих на фрезу, и выведена формула для определения максимального тягового усилия в тяговом канате с учетом несинхронности движения ветвей каната. Определены значения коэффициента превышения усилий для различных подач.

Ключевые слова: Рычажно-роликовый реверсирующий механизм, тяговые канаты, несинхронность движения, усилие в канате, фреза, толщина среза.

Семинар № 3

Рычажно-роликовый реверсирующий механизм привода типа ПП (привод пилы) предназначен для преобразования вращательного движения вала привода в возвратно-поступательное движение пилы. Он состоит из двух одинарных механизмов, работающих в параллельных плоскостях и противоположных фазах. В схему механизма (рис. 1) входят ведущие звенья - водила 1, расположенные под углом 180° друг относительно друга на общем валу, подвижные (рабочие) блоки 2, установленные на концах водил, и неподвижные (уравнительные) блоки 3. Непрерывное вращение водил с рабочими блоками 2 сообщает гибкому режущему органу (пиле) 4 возвратно-поступательное движение резания.

Сочетание рычажно-роликового реверсирующего механизма с канатными барабанами 5 дает возможность осуществить движение резания с кинематически определенной скоростью подачи.

Главным требованием к качеству работы данного механизма является условие согласованного движения тяговых ветвей гибкого режущего органа. Применительно к перемещениям тяговых ветвей (канатов) это условие можно записать в виде:

$$S_\varphi = S_{\max} - S_{(\varphi+\pi)} \quad (1)$$

Для скоростей движения тяговых канатов это условие имеет вид:

$$V_\varphi = -V_{(\varphi+\pi)} \quad (2)$$

В работе Степанова Е.А. [1] были выведены формулы для определения скоростей движения ведущего и ведомого канатов применительно к приводу пилы типа ПП:

$$\left. \begin{aligned} V_{\text{раб}} &= \omega \cdot \ell_{\max} (0,495 \sin \omega t + 0,07 \sin 2\omega t - 0,028 \sin 3\omega t) \\ V_{\text{хол}} &= \omega \cdot \ell_{\max} (0,495 \sin \omega t - 0,07 \sin 2\omega t - 0,028 \sin 3\omega t) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Доказано, что максимальная несогласованность перемещения тяговых канатов из-за дефекта кинематики движения реверсора составляет величину, равную 1,4%

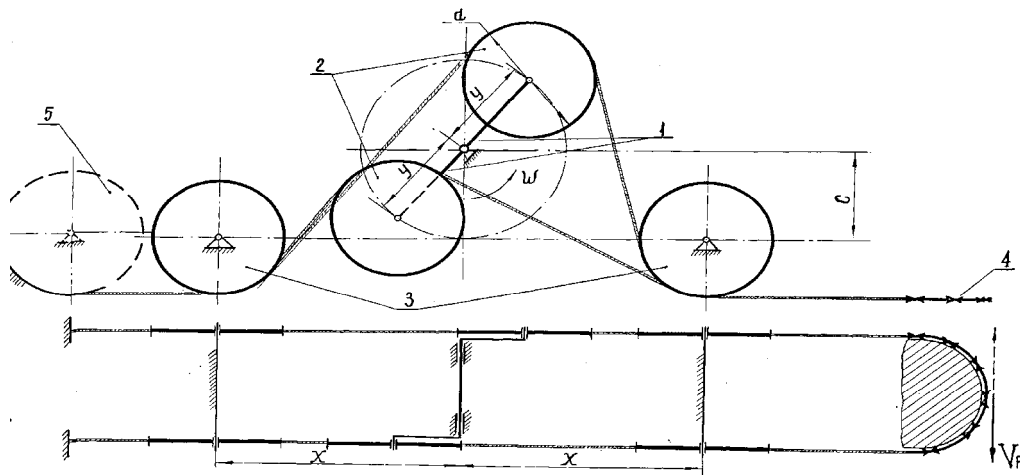


Рис. 1. Структурная схема рычажно-роликового реверсирующего механизма

от максимального хода пилы. Однако в процессе работы привода, как показала практика эксплуатации пил типа ПП, наблюдается резкое увеличение усилия в тяговом ведущем канате, приходящееся на середину хода режущего органа, что можно объяснить появлением дополнительной подачи пилы на забой.

Исследуем влияние дефекта кинематики приводов типа ПП на процесс резания и на формирование максимального тягового усилия в рабочем канате.

При составлении расчетной схемы в связи с достаточно большим расстоянием между фрезами сосредоточенную нагрузку заменить на равномерно распределенную не представляется возможным, поэтому традиционный метод определения тяговых усилий, основанный на использовании известной формулы Эйлера, применен быть не может.

Известно, что метод расчета тяговых усилий на режущем органе, представляющим собой гирлянду фрез, соединенных отрезками цепи, заключается в общем случае в последовательном определении усилий на каждой фрезе [1].

Как правило, соединительные отрезки цепи касаются груди забоя в интервалах между режущими элементами. Срезание слоя породы осуществляется только режущим инструментом, так как разрушение забоя несущим органом сравнительно мало.

Исследованиями, проведенными в работах Гойзмана Э.И.[1], Горшкова В.А. [2], Степанова Е.А. [3], и др., было установлено, что наиболее опасной стадией работы пилы является начальная стадия – стадия запиливания.

В работе [3] представлен вывод формулы для определения тягового усилия на ведущем канате в предположении синхронного движения рабочего и холостого канатов. Результаты расчета хорошо согласовывались с экспериментальными данными, полученными при установившейся форме траектории резания. Однако начало работы пилы сопровождается значительным превышением усилий, определенных экспериментально, над расчетными. Это, можно объяснить неучтенностью дополнительного движения подачи, появляющегося в результате вышеописанного дефекта кинематики.

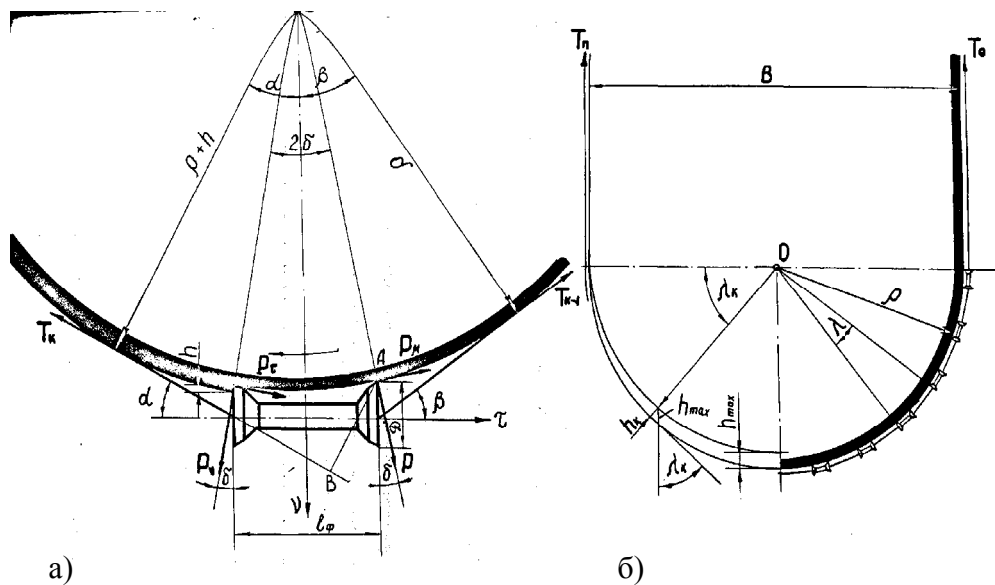


Рис. 2. а) схема сил, действующих на режущий инструмент; б) к определению толщины стружки

Рассмотрим схему сил, действующих на отдельный режущий инструмент (фрезу), и составим уравнения равновесия сил в проекциях на оси τ, ν , проведенные по касательной и нормали к траектории и моментов всех сил относительно точки А (рис. 2, а).

Исследования, проведенные для целого ряда разного типа пил, снабженных гибким исполнительным органом, показывают, что влияние собственного веса и динамических воздействий на формирование тяговых усилий в канатах незначительно. Поэтому при составлении расчетных схем эти силовые факторы, как правило, не учитывают ввиду их малости.

$$\left. \begin{aligned} -T_k \cos \alpha + P_\tau \cos \delta - P_\nu \sin \delta + T_{k-1} \cos \beta + P \sin \delta + P_M \cos \delta &= 0 \\ P_\nu \cos \delta - T_k \sin \alpha + P_\tau \sin \delta + P \cos \delta - P_M \sin \delta - T_{k-1} \sin \beta &= 0 \\ P_\nu l_\phi \cos \delta + P_\tau l_\phi \sin \delta + T_{k-1} \frac{D}{2} \cos \beta - T_k \left(l_\phi \sin \alpha + \frac{D}{2} \right) &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где T_k и T_{k-1} – усилия, действующие в ведущем и ведомом отрезке цепи; P_τ и P_ν – соответственно сопротивления резанию и подаче на режущем веере фрезы; P – усилие нормального давления фрезы на забой кромкой, не участвующей в резании.

Учитывая, что $\rho = \frac{B}{2}$ – радиус забоя в начале неустановившегося движения резания; D – диаметр фрезы или высота прорезаемой щели; l_ϕ – длина фрезы; h – толщина среза.

Принимая во внимание, что величины D , l_ϕ и h чрезвычайно малы по сравнению с ρ , а толщина среза h очень мала по сравнению с D , из прямоугольных треугольников, изображенных на рис. 2а, находим:

$$\left. \begin{aligned} \sin \alpha = \sin \beta = \frac{\ell_{\phi} + 2\sqrt{\rho D}}{2\rho} \\ \cos \alpha = \cos \beta \cong 1 \\ \delta \cong 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Усилия подачи P_v и усилие резания P_r на одном веере фрезы имеют вид [2]:
 $P_v = (a + ch)i \quad P_r = iKh + f'P_v$ (6)
 где a, c, K – константы, зависящие от крепости породы, сопротивления породы резанию, шага резания, износа режущего инструмента и других факторов; f' – коэффициент сопротивления резанию породы затупленным резцом; I – количество зубьев в одном веере фрезы.

Подставив выражения (5) и (6) в систему (4) и, учитывая, что $\mu = f'$, получим:

$$\left. \begin{aligned} T_{k-1} + iKh + f'(a + ch) + Pf' - T_k &= 0 \\ i(a + ch) + P - T_k \frac{\ell_{\phi} + 2\sqrt{\rho D}}{2\rho} - T_{k-1} \frac{\ell_{\phi} + 2\sqrt{\rho D}}{2\rho} &= 0 \\ i(a + ch)\ell_{\phi} + T_{k-1} \frac{D}{2} - T_k \frac{\ell_{\phi}^2 + 2\ell_{\phi}\sqrt{\rho D} + \rho D}{2\rho} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Из первых двух уравнений системы (6) находим значения тягового усилия на k -той фрезе:

$$T_k = \frac{T_{k-1}(2\rho + f'\ell_{\phi} + 2f'\sqrt{\rho D}) - 2iK\rho h}{2\rho - f'\ell_{\phi} - 2f'\sqrt{\rho D}} \quad (8)$$

Выражение для тягового усилия на k -той фрезе можно записать так:

$$T_k = a_0 T_{k-1} + b_0 h \quad (9)$$

где

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= \frac{2\rho + f'\ell_{\phi} + 2f'\sqrt{\rho D}}{2\rho - f'\ell_{\phi} - 2f'\sqrt{\rho D}} \\ b_0 &= \frac{2iK\rho}{2\rho - f'\ell_{\phi} - 2f'\sqrt{\rho D}} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Следовательно, действующие на каждой фрезе усилия, можно записать в виде:

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= a_0 T_0 + b_0 h_1 \\ T_2 &= a_0^2 T_0 + a_0 b_0 h_1 + b_0 h_2 \\ T_n &= a_0^n T_0 + b_0 \sum_{k=1}^n a_0^{n-k} h_k \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

где 1, 2, 3, ..., n – порядковые номера фрез; $h_1, h_2, h_3, \dots, h_n$ – текущие значения толщин среза для соответствующих фрез.

Рассмотрим характер формирования резцов в начале движения резания полосы при синхронном движении канатов применительно к одному зубку фрезы,

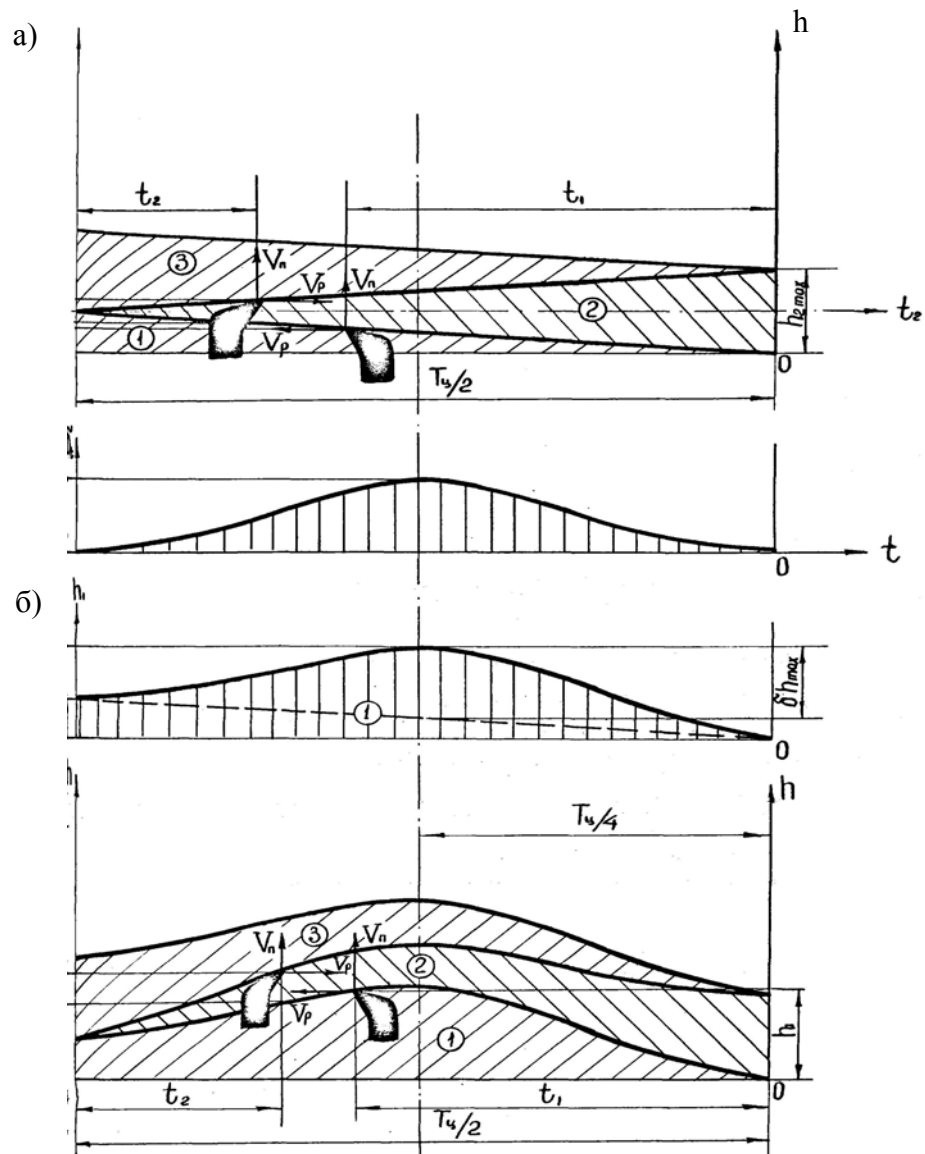


Рис. 3. Характер формообразования резов при синхронном (а) и (б) несинхронном движении тяговых канатов

работающей посредине забой, то есть снимающей максимальную стружку (рис. 3, а). При равномерной подаче пилы на забой стружка, снимаемая каждой фрезой, имеет форму серповидного треугольника. Приняв за исходную форму забой полуокружность с радиусом $\rho = \frac{B}{2}$, можно при некотором допущении заменить эти треугольники нормальными прямоугонными, имеющими высоту,

равную длине хода S_{\max} , а основание - максимальной толщине срезаемого слоя для соответствующей фрезы.

Суммарная длина ведущего и ведомого канатов, наматываемых на барабаны механизма подачи будет компенсироваться вытяжкой обоих канатов (податливостью пилы пренебрегаем из-за ее повышенной жесткости по сравнению с канатами) и перемещением исполнительного органа в направлении подачи.

$$\text{для первого реза: } \sum \ell_n = \ell_1 + \ell_2 = \Delta \ell_1^1 + \Delta \ell_2^1 + 2h_1$$

$$\text{для последующих: } \sum \ell_n = \ell_1 + \ell_2 = \Delta \ell_1 + \Delta \ell_2 + h,$$

где $\ell_1 = \ell_2 = V_n t$ - длины ведущего и ведомого канатов, наматываемых на барабаны за определенный промежуток времени t , причем: $0 \leq t \leq \frac{T_u}{2}$.

Здесь: $\frac{T_u}{2}$ - время одностороннего хода пилы; $\Delta \ell_1^1$ и $\Delta \ell_2^1$ - текущие значения вытяжки канатов при первом резе; $\Delta \ell_1$ и $\Delta \ell_2$ - текущие значения вытяжки канатов при любом другом резе.

Максимальных значений толщина стружки будет достигать в конце рабочего хода, то есть при $t = \frac{T_u}{2}$, где $T_u = \frac{2\pi}{\omega}$.

Очевидно, что:

$$\left. \begin{aligned} \Delta \ell_{1\max}^1 &= \frac{T_{n\max}^1 \cdot \ell}{E \cdot F} \\ \Delta \ell_{2\max}^1 &= \frac{T_{0\max}^1 \cdot \ell}{E \cdot F} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где $T_{n\max}^1$ и $T_{0\max}^1$ - соответственно максимальные усилия в ведущем (тяговом) и ведомом (холостом) канатах при первом резе; ℓ - длина каната от исполнительного органа до привода пилы; E - модуль упругости каната; F - площадь поперечного сечения каната.

Таким образом, максимальное значение толщины стружки при синхронном движении тяговых канатов для первого реза с учетом выражений можно записать в виде:

$$h_{1\max} = V_n \frac{\pi}{\omega} - \frac{\ell}{2EF} (T_{n\max}^1 + T_{0\max}^1)$$

Для зубка k -той фрезы максимальная толщина стружки при первом резе определится (Рис. 2,б): $h_{1k\max} = h_{1\max} \cdot \sin \lambda_k$, где $\lambda_k = \lambda \cdot k = k \frac{\pi}{n}$

Значит

$$h_{1k\max} = \left[V_n \frac{\pi}{\omega} - \frac{\ell}{2EF} (T_{n\max}^1 + T_{0\max}^1) \right] \sin k \frac{\pi}{n}$$

Условимся текущие значения несогласованности хода канатов для приводов пил типа ПП обозначать через δS_φ^{nn} (в функции угла поворота водил). Текущие

значения несогласованности хода канатов δS_φ^{nn} можно определить из системы уравнений (3):

$$\delta S_\varphi^{nn} = 0,007S_{\max} (1 - \cos 2\varphi). \quad (13)$$

Здесь $\varphi = \omega \cdot t$ – текущее значение угла поворота водил. Видно, что за один цикл рабочего хода пилы $\frac{T_{ц}}{2}$ имеется несогласованность хода канатов δS_φ^{nn} ко-

торая достигает максимальных значений при угле поворота водил, равном $\frac{\pi}{2}$.

Следовательно, $\delta S_{\varphi_{\max}}^{nn} = \delta S_{\frac{\pi}{2}}^{nn}$. Таким образом характер изменения усилия в ве-

дущем канате будет

отличаться от линейного а своего максимального значения усилие при первом резе может достичь в середине рабочего хода пилы, т.е. при $t = \frac{T_{ц}}{4}$.

По аналогии с ранее рассмотренным случаем максимальная толщина стружки, снимаемой одним зубком фрезы, работающей посередине забоя применительно к приводу пилы типа ГПП запишется в виде (Рис. 2,б):

$$h_{1\max}^{nn} = [V_n \cdot \frac{\pi}{2\omega} + \frac{1}{2} \delta S_{\max}^{nn} + \frac{\ell}{2EF} (\Gamma_{n_{\max}}^I + \Gamma_{0_{\max}}^I)] \sin K \frac{\pi}{n}. \quad (14)$$

Однако термин «первый рез» не следует понимать буквально, так как вначале запиливания фрезы вступают в работу не все сразу, а поочередно, начиная с угловых, и фактически этот период работы характеризуется сочетанием первых и последующих резов для соответствующих фрез. Так как учесть последовательность вступления в работу фрез невозможно (это зависит от ширины полосы, крепости породы, формы забоя и др. факторов), будем рассматривать наиболее опасный случай, когда начало запиливания полосы осуществляется всеми фрезами одновременно.

Преобразуем 3-е уравнение системы (7), относительно T_k :

$$T_k = \frac{2i\ell_\phi \rho}{\ell_\phi^2 + 2\ell_\phi \sqrt{\rho D} + \rho D} \cdot a + \frac{2i\ell_\phi \rho}{\ell_\phi^2 + 2\ell_\phi \sqrt{\rho D} + \rho D} \cdot ch + T_{k-1} \cdot \frac{\rho D}{\ell_\phi^2 + 2\ell_\phi \sqrt{\rho d} + \rho D}. \quad (15)$$

Обозначим:

$$\frac{2i\ell_\phi \rho}{\ell_\phi^2 + 2\ell_\phi \sqrt{\rho D} + \rho D} = c_0. \quad (16)$$

Тогда:

$$T_k = ac_0 + cc_0 h + T_{k-1} \frac{Dc_0}{2i\ell_\phi}. \quad (17)$$

Решая совместно уравнения относительно T_{k-1} , получим:

$$T_{k-1} = \left[\frac{ac_0}{2i\ell_\phi a_0 - Dc_0} + \frac{(cc_0 - b_0)h}{2i\ell_\phi a_0 - Dc_0} \right] 2i\ell_\phi. \quad (18)$$

Применительно к 1-ой фрезе, ($k = 1$):

$$T_0 = 2i\ell_\phi \left[\frac{ac_0}{2i\ell_\phi a_0 - Dc_0} + \frac{(cc_0 - b_0)h_1}{2i\ell_\phi a_0 - Dc_0} \right]. \quad (19)$$

С учетом (14) усилие в холостом канате при повороте водил на угол $\varphi = \frac{\pi}{2}$:

$$T_0 = A_0 + \frac{1}{2}B_0 \left[V_n \frac{\pi}{\omega} + \delta S_{\max}^{nn} - \frac{\ell}{EF} (T_n + T_0) \right], \quad (20)$$

$$\text{где } A_0 = \frac{2i\ell_\phi ac_0}{2i\ell_\phi a_0 - Dc_0} \quad B_0 = \frac{2i\ell_\phi (cc_0 - b_0)}{2i\ell_\phi a_0 - Dc_0}. \quad (21)$$

Преобразуем уравнение, относительно T_0 :

$$T_0 = \frac{A_0 + \frac{1}{2} [B_0 (V_n \frac{\pi}{\omega} + \delta S_{\max}^{nn}) - T_n \frac{B_0 \ell}{EF}] \sin \frac{\pi}{n}}{1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{B_0 \ell}{EF} \sin \frac{\pi}{n}}. \quad (22)$$

Обозначив:

$$\sum_{k=1}^n a_0^{n-k} \cdot \sin K \frac{\pi}{n} = B_x \quad \sin \frac{\pi}{n} = A_x, \quad (23)$$

решаем совместно уравнения с учетом относительно T_n . Выполнив ряд элементарных преобразований, окончательно получим:

$$T_{1\max}^{nn} = \frac{\frac{1}{2} (V_n \frac{\pi}{\omega} + \delta S_{\max}^{nn}) \cdot (B_0 A_x + b_0 B_x) + A_0 (a_0^n - \frac{b_0 \ell}{2EF} B_x)}{1 + \frac{\ell}{2EF} [B_0 A_x (a_0^n + 1) + b_0 B_x]}. \quad (24)$$

При синхронном движении тяговых канатов максимальной величины усилие в канате будет достигать при $t = \frac{T_n}{2}$ тогда, применительно к первому резу:

$$T_{1\max}^{nn} = \frac{V_n \frac{\pi}{\omega} (B_0 A_x + b_0 B_x) + A_0 (a_0^n - \frac{b_0 \ell}{2EF} B_x)}{1 + \frac{\ell}{2EF} [B_0 A_x (a_0^n + 1) + b_0 B_x]}.$$

Представляется возможным по данным, приведенным в работе Степанова Е.А. [3], сравнить тяговые усилия в ведущем канате при первом резе пилы для существующего привода пилы ПП-2 в середине хода пилы и для привода с теми же параметрами, но с синхронизированным движением канатов в конце хода пилы.

Условимся отношение вышеуказанных величин называть коэффициентом превышения усилий $K_{пр}$.

Тогда

$$K_{пр} = \frac{T_{1\max}^{nn}}{T_{1\max}} = \frac{\frac{1}{2} (V_n \frac{\pi}{\omega} + \delta S_{\max}^{nn}) \cdot (B_0 A_x + b_0 B_x) + A_0 (a_0^n - \frac{b_0 \ell}{2EF} B_x)}{V_n \frac{\pi}{\omega} (B_0 A_x + b_0 B_x) + A_0 (a_0^n - \frac{b_0 \ell}{2EF} B_x)} \quad (25)$$

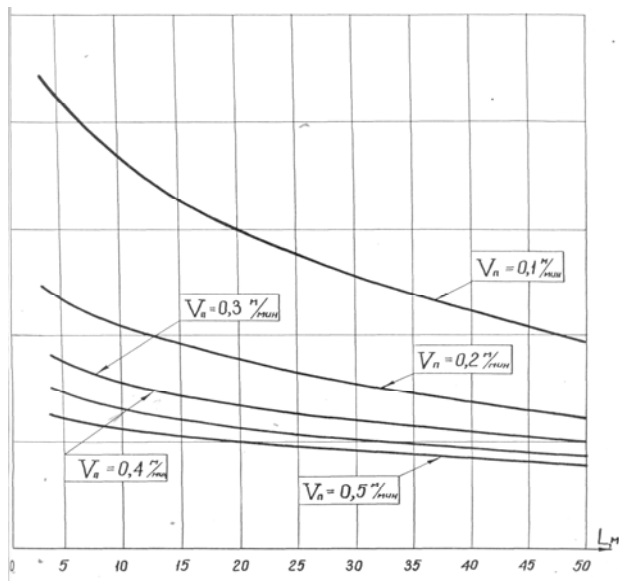


Рис. 4. Зависимости коэффициента превышения усилий $K_{пр}$ от длин тяговых канатов при резании породы (крепость $f = 0.9$) для различных подач

На рис. 4 показаны кривые зависимости коэффициента превышения усилий $K_{пр}$, вычисленного применительно к конкретным условиям работы привода пилы ПП-2 при резании угля, в зависимости от длины тяговых канатов для рабочего диапазона подач: 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5 (м/мин).

Анализируя представленные кривые зависимости коэффициента превышения подач от длины тяговых канатов для диапазона рабочих подач, можно установить, что при пониженных скоростях подачи значение $K_{пр}$ возрастает, следовательно, возрастает и относительная величина максимальных тяговых усилий. Таким образом, несинхронность движения тяговых канатов затрудняет или делает практически невозможной (крепкие породы) начало запиливания полосы пласта.

Увеличение толщины снимаемой стружки в начале запиливания требует увеличения высоты лезвия зубка, диаметра фрезы и, следовательно, высоты врубовой щели. Перед началом запиливания забой имеет произвольную форму (чаще всего прямоугольную).

Такими образом, несинхронность движения тяговых канатов, обусловленная дефектом кинематики рычажно-роликового реверса привода пилы типа ПП, приводит к резкому увеличению усилий в режущем органе в начальный период работы пилы и, следовательно, к частым порывам канатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гойзман Э.И. Исследование работы исполнительного органа угольной канатной пилы. Кандидатская диссертация М., 1962.
2. Горшков А.В. Исследование параметров угольных пил для выемки крутых пластов полосами по восстанию. Кандидатская диссертация, Пермь 1965.
3. Степанов Е.А. Исследование привода гибкого исполнительного органа возвратно-поступательного действия для резания горных пород Кандидатская диссертация, Прокопьевск, 1965. **ГИАБ**

Коротко об авторах

Бардовский А.Д. – профессор, доктор технических наук,
 Калакуцкий А.В. – аспирант,
 Московский государственный горный университет,
 Moscow State Mining University, Russia, ud@msmu.ru