

Канд. техн. наук, доц. Д.Л. Колосов,
канд. техн. наук, доц. А.В. Денищенко,
канд. техн. наук, доц. А.Н. Коптовец
(Национальный горный университет)

ДОПУСТИМОЕ ТОРМОЗНОЕ ЗАМЕДЛЕНИЕ КАНАТНОЙ ДОРОГИ

Досліджені гальмівні режими канатної надгрунтової дороги під час підйому та спуску составу. Зроблені висновки щодо допустимих значень гальмівного уповільнення приводного шківа тертя у різних умовах експлуатації.

PIRMISIBLE BRAKING SLOWING OF THE ROAD WAY

The braking modes of a rope soil road are investigated at ascent and descent of a structure. The conclusions about allowed values of braking deboosting in the various operation conditions are made.

Дороги канатные напочвенные (ДКН), работающие по принципу откатки партии шахтных вагонов замкнутым тяговым канатом, широко применяются в зарубежной практике. Сотрудниками шахты „Павлоградская” ОАО “Павлоградскоуголь” и НГУ проведен комплекс работ по внедрению этих установок в качестве основного вида транспорта при проведении слабонаклонных горных выработок, в результате которых скорость проходки достигла 300 метров в месяц при снижении уровня травматизма и трудоемкости работ.

На отечественных ДКН, оборудованных гидроприводом, в качестве рабочего тормоза используется гидропередача, предохранительный тормоз – колодочного типа с гидравлическим приводом и пружинным замыканием.

Существующие нормы [1] ограничивают величину тормозного замедления приводного шкива $a_T \leq 0,8$ м/с, но это замедление при рабочем и предохранительном торможении не должно превышать величины, обусловленной возможностью проскальзывания каната по шкиву. Поскольку, на практике часты случаи проскальзывания каната при правильно настроенном тормозе (на кратность тормозного момента $\geq 1,8$ и более), необходимо установить допустимую величину замедления шкива. Математическая модель [2] позволяет исследовать коэффициент динамичности привода ДКН

$$K_{\delta} = \frac{F_{\delta} \max}{F_c}$$

где $F_{\delta} \max$, F_c соответственно, максимальное и установившееся натяжение тягового каната в зависимости от тормозного замедления шкива.

В общем случае динамические усилия в канате влияют на его прочность, долговечность и могут вызвать стабильное проскальзывание на шкиве, что рассматривается как аварийный случай. Допустимые значения K_{δ} ДКН составили:

- по прочности тягового каната $K'_{\delta} \leq 1,4$;

– по его долговечности $K_{\delta}'' \leq 1,5$;

– по условию скольжения каната на шкиве $K_{\delta}''' \leq 1,4$.

При расчетах и эксплуатации ДКН рекомендуется принимать значение $K_{\delta} \leq 1,4$.

При составлении расчетной схемы приняты следующие допущения: наличие в канатной напочвенной дороге звена с повышенной податливостью (каната) позволяет рассматривать шкив трения и механическую передачу привода как абсолютно жесткий элемент системы; не учитывается податливость сцепок вагонеток, что дает возможность рассматривать состав вагонеток как абсолютно твердое тело (сосредоточенная масса); не учитываются аэродинамические силы сопротивления движению состава вследствие невысокой относительной скорости состава и воздушного потока; силы сопротивления перемещению состава и каната приняты пропорциональными нормальному давлению и учитываются коэффициентами сопротивления движению, что не искажает физическую сущность процесса; массы поддерживающих и направляющих роликов отнесены к массе тягового каната; массы тяговой и холостой ветвей каната учтены по методу линейно-кусочной аппроксимации, позволяющему рассматривать волновые процессы в канате; жесткость каната за время неустановившегося движения не изменяется, поскольку исследуемые процессы быстротечны и за время их протекания длина ветвей изменяется незначительно; канат, перемещающийся по роликам, принят гибкой упруговязкой нитью постоянного сечения; поперечные колебания не влияют на продольные, поскольку канат предварительно натянут и расположен на роликах.

С учетом принятых допущений расчетную схему установки можно представить в виде многомассной системы с упругими связями (рис. 1). Согласно методу линейно-кусочной аппроксимации каната масса каната заменяется несколькими (n) сосредоточенными массами, расположенными на равных отрезках невесомого каната так, что общая сумма этих масс и общая жесткость отрезков равна массе и жесткости в целом. При этом представлении установки получаем систему, состоящую из узлов, в которых сосредоточены массы, взаимодействующие между собой как материальные точки, т.е. в месте контакта двух соседних узлов одинаковые перемещения и силы. Далее рассматриваются узлы с их контактными точками, а масса состава последовательно присоединяется к этим узлам в зависимости от его местонахождения в выработке.

Рассмотрим силы, действующие на узлы. Вязкоупругие силы в канате:

$$F_i = \begin{cases} 2C_y [(x_{uu} - x_l) + \mu(V_{uu} - V_l) - \Delta_6], i=1; \\ C_y [(x_{i-1} - x_i) + \mu(V_{i-1} - V_i)], 2 \leq i \leq n-1; \\ C_n [(x_{n-1} - x_n) + \mu(V_{n-1} - V_n)], i=n; \\ C_6 [(x_n - x_{uu}) + \mu(V_6 - V_n) - \Delta_n], i=n+1, \end{cases}$$

где x_i – перемещение i -го узла; V_i – скорость i -го узла; $x_{ш}$ – перемещение шкива; $V_{ш}$ – скорость шкива; μ – коэффициент вязкости каната; $\Delta_в$, $\Delta_н$ – длина каната, соответственно, в верхнем и нижнем натяжных устройствах; $C_в$, C_n , C_y – жесткость, соответственно, последнего, предпоследнего и остальных участков.

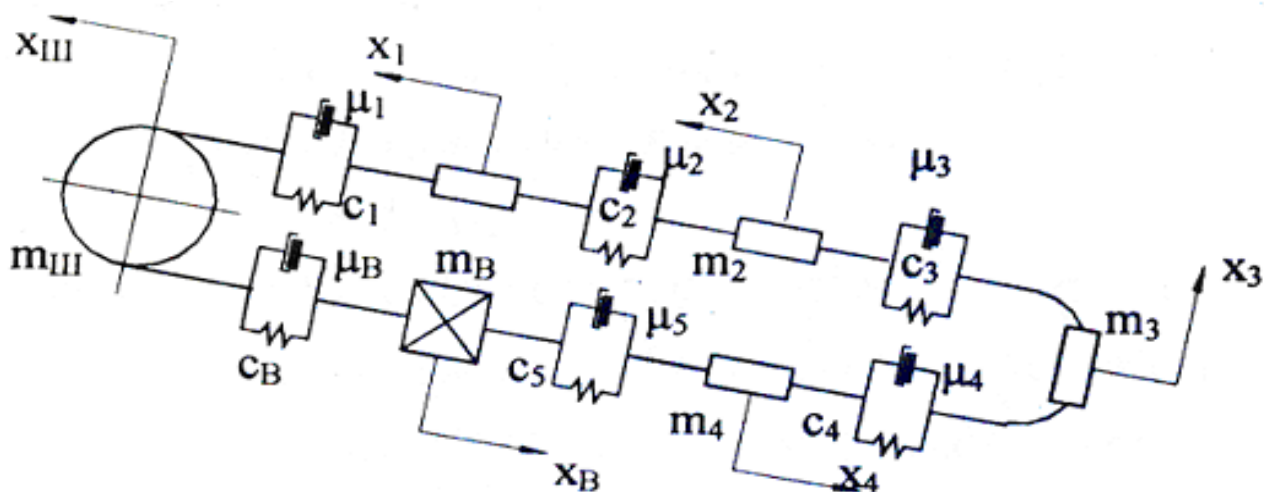


Рис. 1 – Расчетная схема тягового контура ДКН.

Жесткость любого участка каната, кроме последнего и предпоследнего:

$$C_y = \frac{E_k F_k}{(2L - L_в)(n - 1)},$$

где E_k – модуль упругости каната; F_k – площадь сечения проволок каната; L – длина установки; $L_в$ – длина последней секции; n – число узлов.

Жесткость предпоследней и последней секции:

$$C_n = \frac{2}{1/C_y + 2/C_в}; \quad C_в = \frac{E_k F_k}{2L_в},$$

где $L_в$ – длина последней секции.

Масса узлов системы:

$$m_i = \begin{cases} \frac{I_{ш}}{R_{ш}^2} + \rho * L_y, i = 0; & \frac{\rho * (2L - L_в)}{n - 1}, 1 \leq i \leq n - 1; \\ \frac{\rho * (2L - L_в)}{n - 1} + m_B, i = n_B; & \frac{\rho * (2L - L_в)}{n - 1} + m_в, i = n_в; \\ \rho * L_в, i = n, & \end{cases}$$

где $I_{ш}$ – момент инерции вращающихся частей шкива, редуктора и гидромоторов; $R_{ш}$ – радиус шкива; m_B – масса концевого блока; $m_г$ – масса состава вагонеток; $n_B, n_г$ – номер узла, где находится состав и концевой блок.

Для учета массы поддерживающих роликов введено понятие «приведенная погонная масса системы «канат - ролики»:

$$\rho^* = \frac{\rho b_p + m_p}{b_p},$$

где ρ – погонная масса каната; m_p – масса ролика; b_p – шаг установки роликов.

Силы тяжести узлов:

$$F_{Bi} = \begin{cases} m_i g \sin \alpha, 1 \leq i \leq n_{B-1}; \\ 0, i = n_B; \\ -m_i g \sin \alpha, n_{B+1} \leq i \leq n; \\ -(m_1 + m_г) g \sin \alpha, i = n_г, \end{cases}$$

где α – угол наклона выработки.

Силы трения:

$$F_{TPi} = \begin{cases} w_k m_i g \cos \alpha, 1 \leq i \leq n; \\ 0, i = n_B; \\ (m_1 + m_г) w_г \cos \alpha, i = n_г, \end{cases}$$

где w_k – коэффициент сопротивления движению каната на роликах.

Используя метод Даламбера, получим для i -го узла:

$$m_i \ddot{x}_i = F_i - F_{i+1} + F_{Bi} - F_{TPi} \text{sign}(V_i),$$

где F_i, F_{i+1} – силы вязкоупругости i -го и $(i+1)$ -го участков; F_{Bi} – силы тяжести i -го участка; F_{TPi} – силы трения i -го участка.

Для решения уравнений необходимо ввести начальные условия.

Номер узла, где находится состав вагонеток:

$i = n$ (состав внизу);

$i = [(n/2) + 2]$ (состав вверху).

Если $\alpha > 0$ (состав висит на верхней ветви каната):

$$F_{n+1} = F_{нг},$$

где $F_{н2}$ – сила натяжного устройства.

$$F_i = F_{i+1} - F_{Bi}, 1 \leq i \leq n; x_1 = -\frac{F_1}{2C_y}; n = 1;$$
$$x_i = x_{i-1} - \frac{F_i}{C_y}; 2 \leq i \leq n - 1; x_n = x_{n-1} - \frac{F_n}{C_n};$$
$$\Delta_n = -x_n; \Delta_0 = 0.$$

Если $\alpha < 0$ (состав висит на нижней ветви):

$$F_1 = F_{н2}, F_{i+1} = F_i + F_{gi}, 1 \leq i \leq n;$$
$$x_0 = \frac{F_{n+1}}{C_0}; x_{n-1} = x_0 + \frac{F_n}{C_n};$$
$$x_i = x_{i+1} + \frac{F_{i+1}}{C_y}; 1 \leq i \leq n - 2;$$
$$\Delta_0 = x_i; \Delta_n = 0.$$

При решении математической модели варьировали следующие исходные данные:

- масса состава вагонеток

$$1 \cdot 10^4 \text{ кг} \leq m_0 \leq 4 \cdot 10^4 \text{ кг};$$

- длина транспортирования

$$0,8 \cdot 10^3 \leq L \leq 3 \cdot 10^3 \text{ м};$$

- уклон рельсового пути

$$-6^0 \leq \alpha \leq +6^0;$$

- время разгона приводного шкива

$$10 \text{ с} \leq t_p \leq 40 \text{ с}$$

- скорость установившегося движения

$$1 \text{ м/с} \leq V_y \leq 5 \text{ м/с}$$

Угловое замедление шкива при предохранительном торможении

$$d\omega_{ш}/dt = (M_M - M_{CT} - M_C - M_T)/I_{ш},$$

где M_M – суммарный крутящий момент, развиваемый гидромоторами; M_{CT} – статический момент от нагрузки; M_C – момент сухого трения в гидромоторах; M_T – тормозной момент, $I_{ш}$ – момент инерции шкива.

Крутящий момент

$$M_M = ((p_H - p_B)q_M n_M) / 2\pi,$$

где p_H, p_B – давление, соответственно нагнетания и слива; q_M – рабочий объем мотора; n_M – число моторов.

Статический момент

$$M_{CT} = (F_{[1]} - F_{[NP+1]})R_{ш},$$

где $F_{[1]}, F_{[NP+1]}$ – усилие, соответственно, набегающей на шкив и сбегающей ветви каната; $R_{ш}$ – радиус шкива.

Момент сухого трения

$$M_C = (1 - \varepsilon_M \varepsilon_p) n_M M_{MH},$$

где $\varepsilon_M, \varepsilon_p$ – механический к.п.д., соответственно, мотора и редуктора; n_M – число моторов; M_{MH} – номинальный момент мотора.

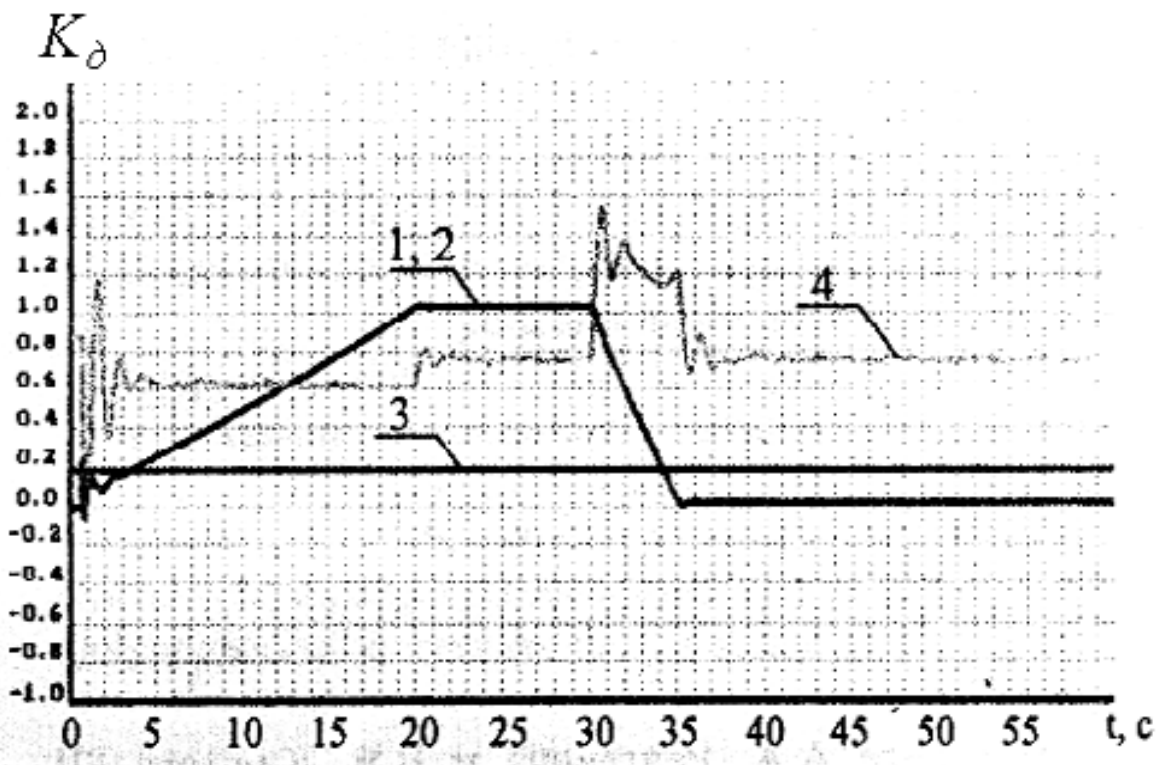
Тормозной момент

$$M_T = M_{CT} \kappa_T (t - t_T / \Delta t_T),$$

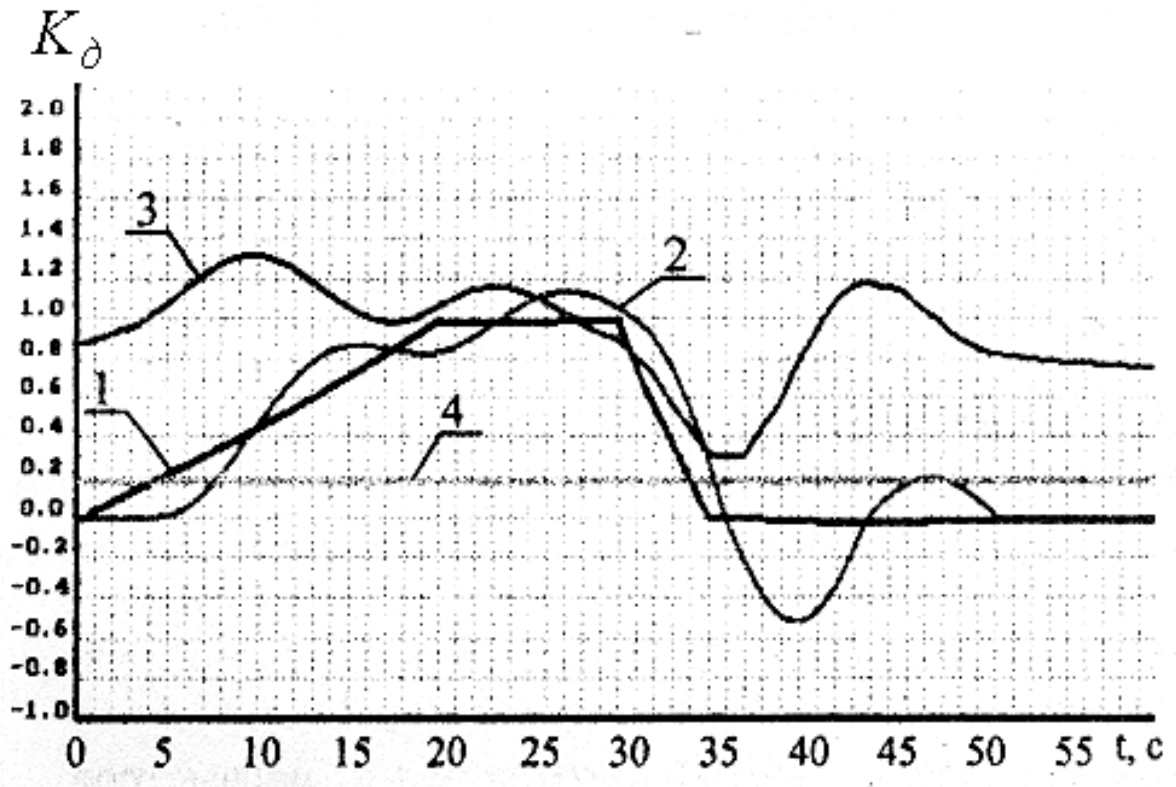
где κ_T – кратность тормозного момента; t – текущее время; t_T – время начала торможения; Δt_T – длительность торможения.

При рабочем торможении изменение скорости шкива задается линейным законом аналогично пуску. При эксплуатации ДКН возможны два случая торможения: на подъеме и спуске (рис. 2).

При торможении шкива, когда состав движется на подъем, происходит ослабление каната, затем движение состава в обратную сторону. Более опасен спуск состава, когда верхний конец каната тормозится, а состав по инерции продолжает движение. Зависимость коэффициента динамичности от тормозного замедления представлена на рис. 3.

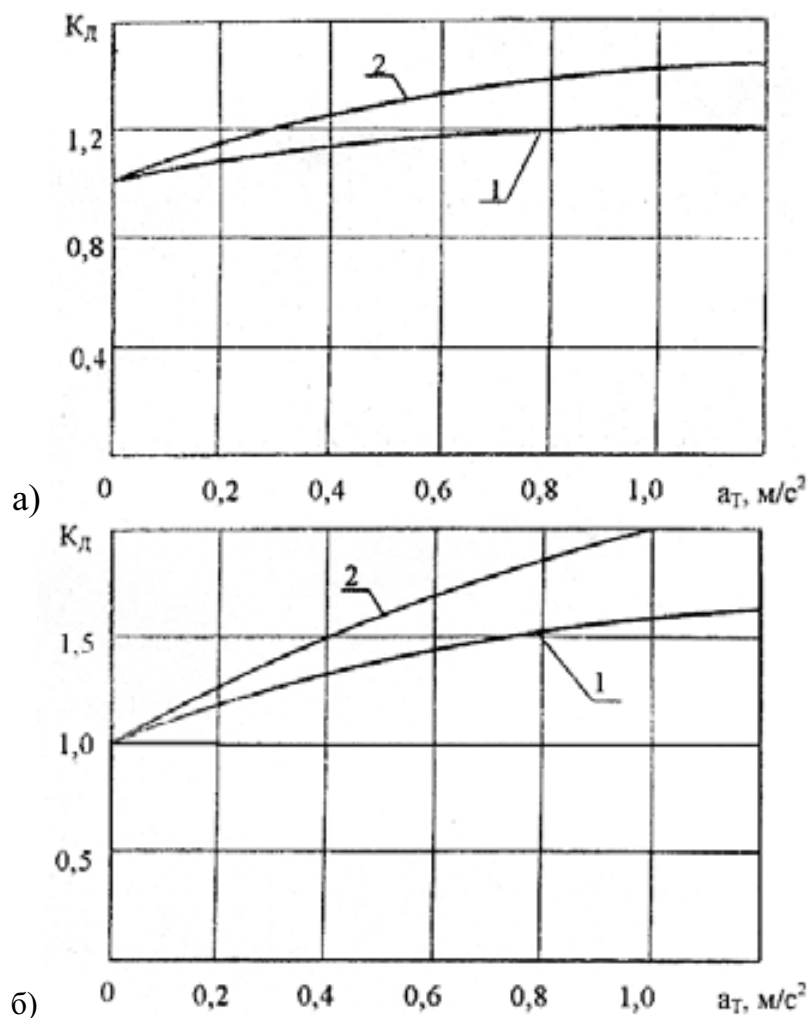


а)



б)

1, 2 – скорость, соответственно, шкива и состава;
 3, 4 – натяжение, соответственно, набегающей и сбегающей ветвей каната
 Рис. 2 – Режим торможения ДКН а) на спуске; б) на подъеме



а) режим подъема; б) режим спуска ($1 - \beta = 6^\circ$; $2 - \beta = 4^\circ$)

Рис. 3 – Зависимость коэффициента динамичности (K_D)

от тормозного замедления шкива (a_T).

Анализ полученных зависимостей позволяет сделать следующие выводы:

- наиболее опасным по динамическому фактору является предохранительное торможение при спуске состава;
- допустимой величиной тормозного замедления по условию долговечности, прочности и отсутствия проскальзывания каната по шкиву следует считать: $0,8 \text{ м/с}^2$ – при подъеме состава и $0,5 \text{ м/с}^2$ – при его спуске.

Дальнейшие исследования целесообразно проводить в направлении изучения процессов, происходящих в тяжелонагруженных и скоростных напочвенных дорогах, оборудованных резиновотросовым тяговым органом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инструкция по безопасной эксплуатации рельсовых напочвенных дорог в угольных шахтах. – Макеевка: МакНИИ, 1986. – 14 с.
2. Денищенко А.В. Обоснование математической модели динамики канатной напочвенной дороги // Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – 1999. – №2 (61). – С. 224-230.