

## К ВОПРОСУ О ПРИМЕНЕНИИ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ ОТ СХОДА СКИПОВ С НАПРАВЛЯЮЩИХ ДОМЕННОВОГО СКИПОВОГО ПОДЪЕМНИКА

*Чепак А.А., Борисенко В.Ф., Бобровицкий В.И., Григорьев С.В.*  
 Донецкий национальный технический университет  
 olga@pandora.kita.dgtu.donetsk.ua

*On the basis of study the regularity of development the break – down regimes by collide with one skip on obstacle, application the correction – but current protection acting on a special braking the electric drive of lift are offered*

Во время эксплуатации наклонных доменных скиповых подъемников нередко крупные аварии в результате схода скипов с направляющих при их наездах на случайные препятствия – куски руды или выступающие части фермы моста.

С целью выбора или создания эффективной защиты, снижающей вероятность появления аварийных режимов, необходимо, в первом приближении, выявить основные закономерности поведения электромеханической системы (ЭМС) при стопорении скипа.

Схема динамической модели ЭМС подъемника, с имитацией наезда груженого скипа на препятствие, приведена на рис. 1, где  $\omega$  – частота вращения электропривода;  $J$ ,  $C_k$  – приведенные к частоте вращения  $\omega$  суммарный момент инерции привода и жесткость тягового каната;  $C$  – скип;  $У$  – неподвижный упор, имитирующий препятствие;  $\Pi$  – поводок, связанный со скипом;  $\Delta\phi$  – эквивалентный угловой зазор, соответствующий расстоянию между скипом и препятствием;  $M$  – суммарный момент приводных двигателей;  $M_k$ ,  $M_t$  – приведенные текущий упругий момент каната и момент электромагнитного фрикционного тормоза;  $M_{k,нач}$  – начальное значение приведенного упругого момента, предшествующее стопорению. Последнее

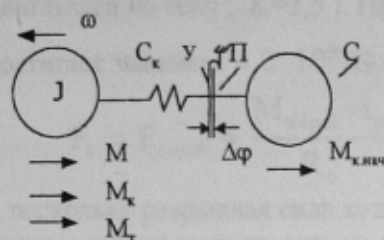


Рисунок 1 – Динамическая модель электромеханической системы подъемника

определяется составляющей веса груженого скипа при его движении вверх по наклонному мосту.

Электропривод подъемника обычно строится по системе генератор – двигатель с двумя электродвигателями и общим редуктором [1]. В якорной цепи предусматривается электромагнитное реле максимальной токовой защиты. Рабочая скорость движения скипов обеспечивается ослаблением поля двигателей. Одно из возможных сочетаний параметров электромеханической системы подъемника приведено в табл. 1, где  $R_b, i_p$  – радиус канатного барабана и передаточное число редуктора;  $M_n$  – суммарный номинальный момент двигателей;  $I_n$  – номинальный ток якорной цепи;  $K_\phi, C$  – коэффициент ослабления поля и суммарная постоянная двигателей с ослабленным полем;  $\omega_0$  – частота вращения привода при идеальном холостом ходе с ослаблением поля двигателей;  $\beta_1$  – жесткость механической характеристики привода с ослабленным полем двигателей.

Таблица 1 – Параметры ЭМС подъемника в условиях Макеевского МК

$R_b$ м	$i_p$	$J$ , кг·м <sup>2</sup>	$M_n$ Н·м	$I_n$ , А	$K_\phi$	$C$ В·с	$\omega_0$ , с <sup>-1</sup>	$\beta_1$ , Н·м·с	$C_k$ (Н·м) при положении скипа		
									у скиповой ямы	в середине наклонного моста	у разгру- зочных кривых
1	29,4	145	$10^4$	860	1,32	9,15	73,7	$2,1 \cdot 10^3$	$2,3 \cdot 10^3$	$3,3 \cdot 10^3$	$4,6 \cdot 10^3$

При стопорении скип останавливается ( $\Delta\phi = 0$ ), а двигатели продолжают вращаться, положив начало росту вытяжки каната и момента двигателей. В связи с очень малым значением постоянной времени якорной цепи, уравнения движения электропривода можно представить как

$$\beta_1(\omega_0 - \omega) - M_{k,нач} - C_k \int_0^t \omega dt = J \frac{d\omega}{dt}$$

или, в операторной форме,

$$\beta_1 \omega_0 - M_{к.нач} = C_k \frac{\omega}{p} (T^2 p^2 + 2\kappa_1 T p + 1), \quad (1)$$

где  $T$  – постоянная времени механической части ЭМС,  $T = \sqrt{J/C_k}$ ;

$\kappa_1$  – коэффициент затухания,  $\kappa_1 = \beta_1 / 2\sqrt{JC_k}$ .

Указанным в табл.1 параметрам отвечает неравенство  $\kappa_1 > 1$ , определяющее общее решение уравнения (1) в виде

$$\omega = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}, \quad (2)$$

где

$A_1, A_2$  – постоянные интегрирования;

$p_1, p_2$  – корни характеристического полинома  $T^2 p^2 + 2\kappa_1 T p + 1 = 0$ ,  $p_{1,2} = (-\kappa_1 \pm \sqrt{\kappa_1^2 - 1})/T$ .

Коэффициенты  $A_1$  и  $A_2$  определяются согласно равенству (2) исходя из начальных условий:  $t=0$ ,  $\omega = \omega_{нач}$ ;  $d\omega/dt = (d\omega/dt)_{нач}$ . При движении скипа с номинальным грузом:  $M_{к.нач} = M_n / K_\phi$ ,  $\omega_{нач} = \omega_0 - M_{к.нач} / \beta_1$ . В силу упругих сил каната при стопорении скипа ускорение двигателей  $(d\omega/dt)_{нач} = 0$ . В результате получим:  $A_1 = -p_2 \omega_{нач} / (p_1 - p_2)$ ;  $A_2 = p_1 \omega_{нач} / (p_1 - p_2)$ . Последние определяют частное решение уравнения (1) -

$$\omega = \frac{\omega_{нач}}{p_1 - p_2} (p_1 e^{p_2 t} - p_2 e^{p_1 t}),$$

на основе которого находятся временные зависимости:

- суммарного момента двигателей

$$M = \beta_1 (\omega_0 - \omega) = \beta_1 \left[ \omega_0 + \frac{\omega_{нач}}{p_1 - p_2} (p_2 e^{p_1 t} - p_1 e^{p_2 t}) \right]; \quad (3)$$

- приведенного упругого момента каната

$$M_k = C_k \int_0^t \omega dt + M_{к.нач} = C_k \frac{\omega_{нач}}{p_1 - p_2} \left[ \frac{p_2}{p_1} (1 - e^{p_1 t}) - \frac{p_1}{p_2} (1 - e^{p_2 t}) \right] + M_{к.нач}. \quad (4)$$

По уравнениям (3), (4) и данным табл.1 на рис.2 построены кривые  $M(t)$  и  $M_k(t)$  при стопорении скипа.

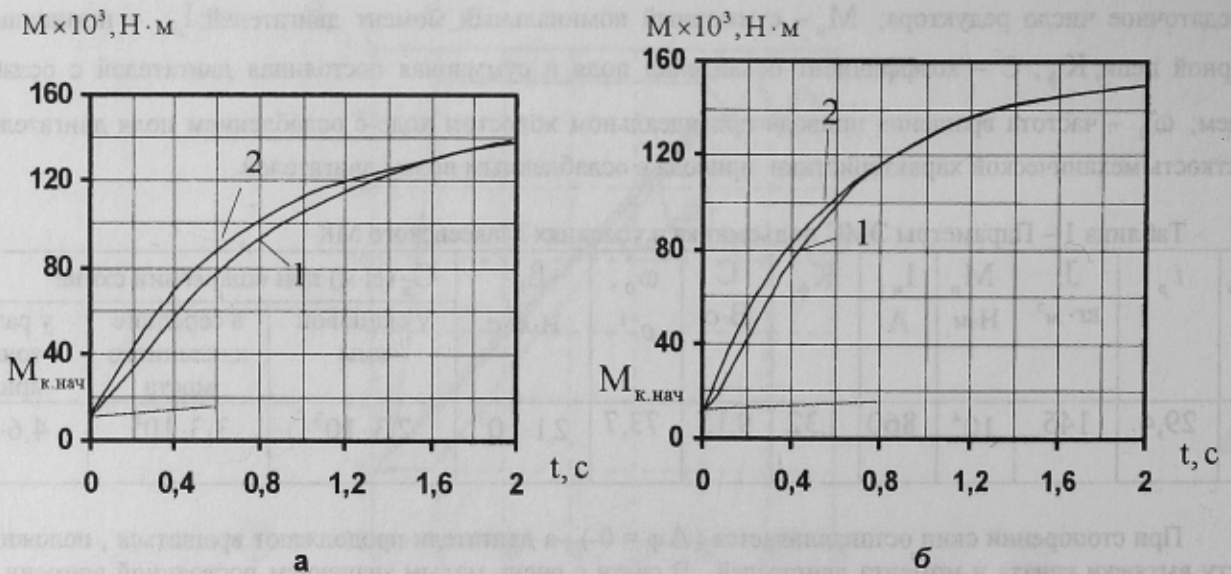
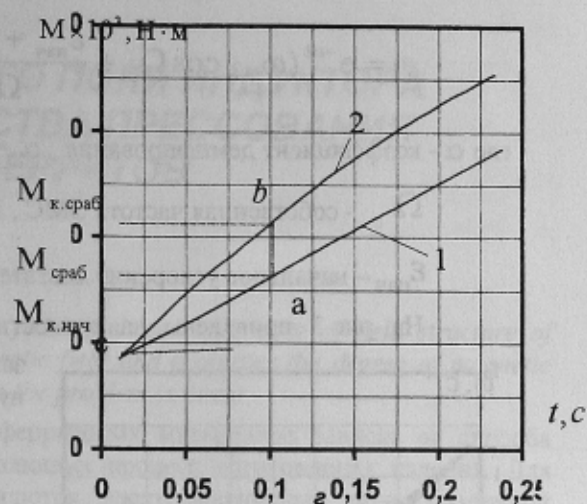
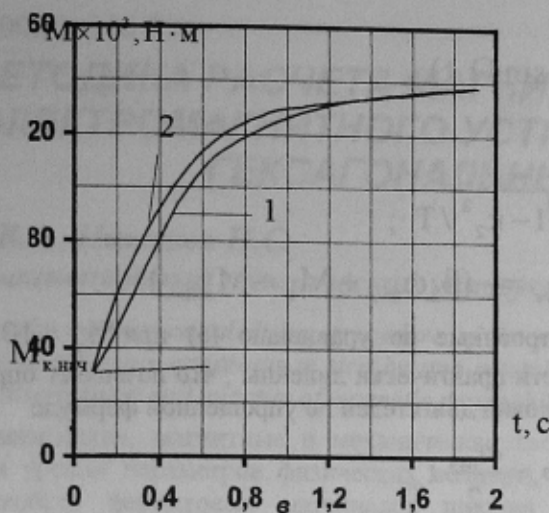


Рисунок 2 – Зависимости от времени момента  $M$  двигателей (1) и приведенного упругого момента  $M_k$  каната (2) при наезде скипа на препятствие, находящееся: а – у скиповой ямы; б – в середине моста; в, г – у разгрузочных кривых (г – увеличенный фрагмент рис. в)





Продолжение рисунка 2

Из них следует, что если даже исходить из наименьшей уставки максимальной токовой защиты электропривода  $I_{уст} = \lambda I_N$ , то срабатывание токового реле произойдет при достижении двигателями суммарного момента (точка *a* на рис 2,з)  $M = M_{сраб} = C \lambda I_N = 27,4 \cdot 10^3 \text{ Н}\cdot\text{м}$  ( $\lambda$  - перегрузочная способность двигателей по току,  $\lambda = 2,5$ ). При этом приведенный упругий момент каната  $M_k = M_{к.сраб}$  (точка *b* на рис 2,з) достигает значения  $4,2 \cdot 10^4 \text{ Н}\cdot\text{м}$ , сила натяжения каната –

$$F_k = F_{к.сраб} = \frac{M_{к.сраб} \cdot i_p}{R_с} = 1,23 \cdot 10^6 \text{ Н} = 1230 \text{ кН},$$

а поскольку разрывная сила каната лежит в пределах 750 ... 1000 кН [2], то неизбежен его разрыв, или сход скипа с направляющих еще до срабатывания максимальной защиты при возможном сохранении целостности каната.

Таким образом, использование максимальной токовой защиты с присущей ей высокой уставкой срабатывания, для отстройки от пуско-тормозных режимов электропривода, неэффективно при стопорении из-за запаздывания срабатывания.

В связи с этим проверим возможность придания ЭМС подъемника защитных функций с помощью упреждающей токовой защиты, которая срабатывала бы в самом начале возрастания моментов  $M$  и  $M_k$  (точка *c* на рис 2,з). О реальности создания такой защиты свидетельствует большое различие между темпами нарастания момента двигателей при стопорении механизма и в пуско-тормозных режимах электропривода (см. пунктирные линии  $M(t)$  на рис. 2, отражающие начало разгона после снятия тормоза). Это позволяет строить защиту на принципе селективности по отношению к темпу изменения тока якорной цепи.

Приняв, что действие данной защиты будет направлено на отключение и экстренную остановку двигателей в режиме динамического торможения с наложением фрикционных колодок на тормозные шкивы канатного барабана, оценим ее эффективность по значению прироста тягового усилия в канате в результате остановки.

Уравнение движения электропривода после срабатывания защиты можно выразить как

$$-\beta_2 \omega - M_T - C_k \int_0^t \omega dt - M_{к.нач} = J \frac{d\omega}{dt}$$

или, в операторной форме,

$$-M_T - M_{к.нач} = C_k \frac{\omega}{p} (T^2 p^2 + 2\kappa_2 T p + 1), \quad (5)$$

где  $\beta_2$  - суммарная жесткость механических характеристик двигателей при динамическом торможении,

$$\beta_2 = M_{сраб} / \omega_{нач};$$

$$\kappa_2 - \text{коэффициент затухания}, \quad \kappa_2 = \beta_2 / 2\sqrt{J C_k}.$$

Поскольку в данном случае  $\kappa_2 < 1$ , то решение уравнения (5) выражается временной функцией

$$\omega = e^{-\alpha t} \left( \omega_{\text{нач}} \cos \Omega_c t + \frac{\varepsilon_{\text{нач}} + \alpha \omega_{\text{нач}}}{\Omega_c} \sin \Omega_c t \right), \quad (6)$$

где  $\alpha$  - коэффициент демпфирования,  $\alpha = \kappa_2/T$ ;

$\Omega_c$  - собственная частота ЭМС,  $\Omega_c = \sqrt{1 - \kappa_2^2} / T$ ;

$\varepsilon_{\text{нач}}$  - начальное ускорение двигателя,  $\varepsilon_{\text{нач}} = -(\beta_2 \omega_{\text{нач}} + M_T + M_{\text{к.нач}}) / J$ .

На рис.3 приведены зависимости, построенные по уравнению (6) при  $M_T = 10M_H$ . Указанные зависимости практически линейны, что позволяет определить угловой путь остановки двигателей по упрощенной формуле

$$\varphi \approx \frac{\omega_{\text{нач}}}{2} t_{\text{ост}}, \quad (7)$$

где  $t_{\text{ост}}$  - время остановки.

Прирост приведенного упругого момента за время остановки  $M_{\text{к.пр}} = C_k \varphi$ . (8)

С учетом начального натяжения каната, его приведенный упругий момент в конце остановки будет

$$M_{\text{к.ост}} = M_{\text{к.нач}} + M_{\text{к.пр}}, \quad (9)$$

$$\text{а тяговое усилие} - F_{\text{к.ост}} = \frac{M_{\text{к.ост}}}{R_6} i_p. \quad (10)$$

В табл.2 представлены результаты расчетов по выражениям (7)...(10).

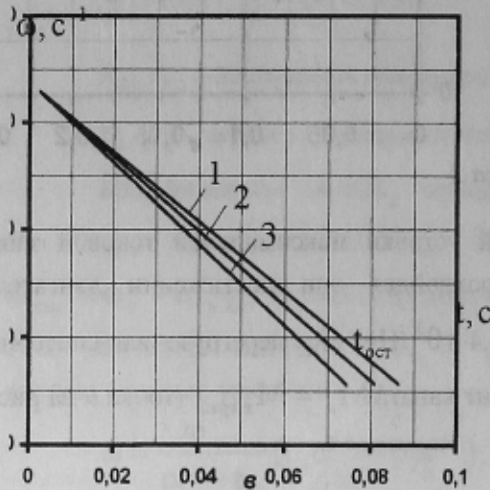


Рисунок 3 – Зависимости частоты вращения двигателей от времени после срабатывания защиты при положении скипа: 1- у скиповой ямы; 2 – в середине моста; 3 – у разгрузочных кривых

Таблица 2 – Результаты расчетов приведенного момента и силы натяжения каната

Положение скипа при стопорении	$\varphi$ , рад	$M_{\text{к.пр}}$ , Н·м	$M_{\text{к.ост}}$ , Н·м	$F_{\text{к.ост}}$ , кН
У скиповой ямы	3,15	$7,2 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10^4$	441
В середине моста	2,8	$9,2 \cdot 10^3$	$1,7 \cdot 10^4$	500
У разгрузочных кривых	2,76	$1,3 \cdot 10^4$	$2,07 \cdot 10^4$	609

Полученные значения тягового усилия ниже допустимого  $F_{\text{к.доп}} = 655$  кН по условию устойчивости движения скипа и 750 ... 1000 кН по условию прочности каната [2], что свидетельствует о достаточной эффективности упреждающей токовой защиты и целесообразности ее применения.

Изложенное позволяет сделать следующие выводы:

- а) в силу высокой уставки срабатывания, максимальная токовая защита, защищающая силовую цепь электропривода от коротких замыканий, неэффективна при стопорении скипа;
- б) достаточно эффективную и надежную защиту от схода скипа с направляющих при его стопорении обеспечивает упреждающая токовая защита, базирующаяся на принципе избирательности по отношению к темпу изменения тока силовой цепи электропривода.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бычков В.П. Электропривод и автоматизация металлургического производства. – М.: Высшая школа, 1966. – 480 с.
2. Чепак А.А., Борисенко В.Ф., Бобровицкий В.И. Влияние динамических нагрузок привода доменного скипового подъемника на целостность тягового каната и устойчивость движения скипа // Наукові праці ДонНТУ. Вип. 28. Серія "Електромеханіка і енергетика". - Донецьк, ДонНТУ. - 2001. - С.44-46