

УДК 621.876.2:62-83

А. А. ЧЕПАК (канд. техн. наук, доц.), РАКАН АЛЬ-СЛИХАТ,

В.Ф. БОРИСЕНКО (канд. техн. наук, проф.)

Государственное высшее учебное заведение

«Донецкий национальный технический университет»

toi@elf.dgtu.donetsk.ua

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ С УПРЕЖДАЮЩИМ РЕАГИРОВАНИЕМ НА АВАРИЙНЫЕ РЕЖИМЫ ДОМЕННОЙ СКИПОВОЙ ПОДЪЕМНОЙ УСТАНОВКИ

Приведены структура и математическое описание доменной скиповой подъемной установки с частотно-управляемым асинхронным электроприводом подъема, содержащим устройство упреждающей токовой защиты от аварийных механических перегрузок. Рассмотрены результаты математического моделирования, подтверждающие эффективность защиты.

Ключевые слова: доменная печь, скиповый подъемник, электропривод подъема, режимы работы, реле тока, упреждающая защита, математическое моделирование.

Постановка проблемы. Наиболее важным звеном системы загрузки доменной печи является скиповый подъемник [1, 2]. Даже кратковременный выход его из строя ведёт к «тихому ходу» или к остановке доменной печи, а следовательно – к большим затратам средств и времени на устранение аварии. По данным [3] 22,5% аварийных ситуаций приходится на загрузочный комплекс, а 8,5% суммарного времени простоя доменной печи приходится на скиповый подъемник. Потери от недоотпуска продукции по доменному цеху из-за выхода из строя подъемника, может составлять \$ 1-2 млн. в год. Отсюда актуальной является задача защиты механизма подъема от аварийных режимов, возникающих обычно в результате наезда груженого скипа на случайные препятствия или выбора значительного провиса тягового каната, вызывающих большие броски тягового усилия и тока электропривода подъема, что ведёт к сходу скипа с направляющих, его опрокидыванию, или порыву каната [4 – 6]. Решение данной проблемы является одним из этапов решения общей народно-хозяйственной задачи повышения качества и производительности металлургического производства.

Анализ предыдущих исследований и публикаций. В работе [7] нами была предложена рациональная структура упреждающей токовой защиты, отличающаяся от ближайшего аналогичного решения [8] тем, что сигнал тока электропривода, пропускаемый через два апериодических звена с различными постоянными времени, преобразуется при возрастании тока в два расходящихся (а не сходящихся, как принято в аналоге) во времени фильтрованных сигнала. Срабатывание защиты происходит в момент превышения разностным выходным сигналом фильтров порогового значения – уставки реле тока, что происходит при резких бросках тягового усилия, характерных для аварийных режимов. Такой принцип было рекомендовано положить в основу создания нового типа токового реле с высокой степенью помехозащищённости, поскольку полезный сигнал может значительно превышать уровень случайных проникающих помех, благодаря чему снижается вероятность ложных срабатываний защиты.

Дальнейшей задачей является уточнение селективных свойств защиты по отношению к темпам изменения тягового усилия (тока электропривода) в рабочих и аварийных режимах подъемной установки в условиях его работы, приближенных к реальным.

Постановка задачи. Для воспроизведения условий, близких к реальным, ставится задача изучения поведения упреждающей защиты методом математического моделирования, позволяющим учесть максимальное количество значимых параметров электромеханической системы подъемника.

Изложение основного материала. Для наглядности и достоверности воспроизведения процессов при моделировании целесообразно представить расчетную динамическую модель подъемника в том виде, в котором он существует реально. На рис. 1 приведена вращательно-поступательная динамическая модель скипового подъемника с частотно-управляемым двухдвигательным асинхронным электроприводом, где двигатели представлены одной эквивалентной электрической машиной суммарной мощности.

На схеме обозначены: КМ – контакты магнитного пускателя; ТПЧ – тиристорный преобразователь частоты; Д – двигатель; Т – фрикционный электромагнитный тормоз; Р – редуктор; Б – барабан; СГ, СП – скипы груженный и порожний; К_г, К_п – участки тягового каната к груженому и порожнему скипам; ЗИ – задатчик интенсивности; ДТ – датчик тока; Ф1, Ф2 – фильтры; НЭ – нелинейный элемент с порогом нечувствительности (уставкой срабатывания). Параметры модели: Т₁, Т₂ – малая и большая постоянные времени фильтров; U_{неч} – порог нечувствительности реле защиты; i_p – передаточное число редуктора; R_б – радиус барабана; l_с, C_с, b_с – соответственно рабочая длина, коэффициенты жесткости и внутреннего трения участка К_г каната; l_п, C_п, b_п – то же, но участка К_п каната; m_г, m_п – массы груженого и порожнего скипов.

© Чепак А. А., Аль-Слихат Р., Борисенко В. Ф., 2013

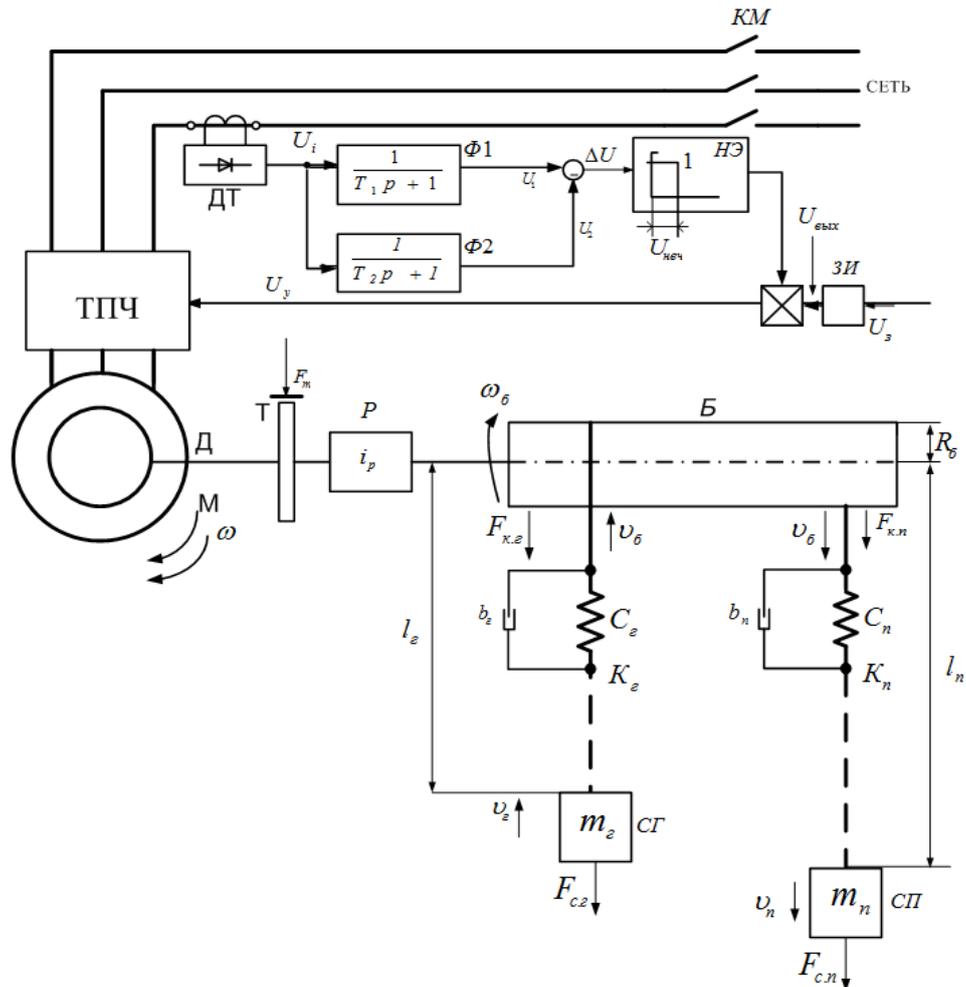


Рисунок 1 – Расчётная динамическая модель скипового подъемника с упреждающей токовой защитой

Текущие координаты: U_i – сигнал тока статорной цепи двигателя; $U_1, U_2, \Delta U$ – выходные сигналы и разностный сигнал фильтров; $U_3, U_{вых}, U_y$ – задающий, выходной и управляющий сигналы; M, ω – момент и угловая скорость вращения двигателя; F_m – тормозное усилие внешнего тормоза; ω_δ – угловая скорость вращения барабана; $F_{к.з}, F_{к.н}$ – тяговые усилия участков K_z и K_n каната; v_δ, v_z, v_n – линейные скорости навивки каната на барабан, движения груженого и порожнего скипов; $F_{с.з}, F_{с.н}$ – статические усилия (продольные составляющие веса скипов).

Поведение модели описывается следующими аналитическими выражениями:

- уравнение движения двигателя

$$M - (F_{к.з} - F_{к.н}) \frac{R_\delta}{i_p} - |M_{ном}| \text{sign} \omega - M_m = J_\Sigma p \omega;$$

- функция момента фрикционного тормоза

$$M_m = \begin{cases} |M_m| \text{sign} \omega & \text{при } M \leq M_{см}, \\ 0 & \text{при } M > M_{см}; \end{cases} \tag{1}$$

- функция тягового усилия участка K_z каната

$$F_{к.з} = \begin{cases} 0 & \text{при } S \leq \Delta S_{нр}, \\ (v_\delta - v_z) \left(\frac{C_z}{p} + b_z \right) & \text{при } S > \Delta S_{нр}; \end{cases} \tag{2}$$

- уравнение движения груженого скипа

$$F_{к.з} - F_{с.з} - F_{стоп} = m_z p v_z;$$

- функция силы стопорения

$$F_{стоп} = \begin{cases} |F_{стоп}| \text{sign} v_z & \text{при наезде скипа на препятствие,} \\ 0 & \text{без наезда;} \end{cases} \tag{3}$$

- уравнение движения порожнего скипа

$$F_{к.н} - F_{с.н} = m_n p v_n;$$

- функция преобразования момента двигателя в сигнал тока

$$\left(\frac{M}{c} + I_{1x}\right) K_{ДТ} = U_i;$$

- функция формирования разностного сигнала защиты

$$\Delta U = U_i \left(\frac{1}{T_{1p+1}} - \frac{1}{T_{2p+1}} \right);$$

- функция сигнала управления ТПЧ

$$U_y = \begin{cases} U_{\text{вых}} & \text{при } \Delta U \leq U_{\text{неч}}, \\ 0 & \text{при } U > U_{\text{неч}}, \end{cases}$$

(4)

- функция выходного сигнала ЗИ

$$U_{\text{вых}} = \frac{U_2}{T_{3ИП}} \text{ с ограничением } U_{\text{вых.огр}} = U_2;$$

- функция преобразования сигнала управления в синхронную скорость двигателя

$$U_y \frac{K_n}{T_{\mu p+1}} = \omega_0;$$

- динамическая механическая характеристика асинхронного электромеханического преобразователя

$$(\omega_0 - \omega) \beta = M(T_3 p + 1).$$

В приведенных выражениях обозначено: J_{Σ} – суммарный приведенный момент инерции электропривода; $M_{\text{пот}}$ – момент приведенных суммарных механических потерь в элементах вращения; β – жесткость механической характеристики электропривода; I_{1x} – ток холостого хода двигателя; $M_{\text{ст}}$ – статический момент, $M_{\text{ст}} = (F_{c,z} - F_{c,n}) \frac{R_{\text{с}}}{i_p}$; $\Delta S_{\text{нр}}$ – длина провиса каната; $T_{3И}$ – постоянная интегрирования датчика интенсивности; T_3 – электромагнитная постоянная времени двигателя; T_{μ} – постоянная времени преобразователя частоты; c – коэффициент момента двигателя; K_n – коэффициент передачи преобразователя частоты; $K_{ДТ}$ – коэффициент датчика тока.

Значения параметров типового доменного скипового подъемника и параметров настройки упреждающей токовой защиты даны в табл. 1.

Таблица 1 – Параметры электромеханической системы подъемника

Обозначения параметров	J_{Σ}	$\omega_{0н}$	β	$R_{\text{с}}$	i_p	m_z	m_n	$F_{c,z}$	$F_{c,n}$	$M_{\text{пот}}$
Значения	40,25	78,7	3500	1,7	31,1	$3 \cdot 10^4$	10^4	$2,6 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^4$	100
Размерности	$\text{кг} \cdot \text{м}^2$	с^{-1}	$\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}$	м	-	кг		Н		$\text{Н} \cdot \text{м}$
Обозначения параметров	M_m	I_{1x}	l_z	l_n	C_z'	C_n'	b_z	b_n	$F_{\text{стоп}}$	c
Значения	10^4	101,4	95	45	$2 \cdot 10^8 / l_z$	$2 \cdot 10^8 / l_n$	$5 \cdot 10^4 / l_z$	$5 \cdot 10^4 / l_n$	$13 F_{c,z}$	17
Размерности	$\text{Н} \cdot \text{м}$	А	м		$\text{Н} / \text{м}$		$\text{Н} \cdot \text{с} / \text{м}$		Н	$\text{Н} \cdot \text{м} / \text{А}$
Обозначения параметров	$\Delta S_{\text{нр}}$	K_n	$K_{ДТ}$	T_{μ}	T_1	T_2	$T_{3И}$	T_3	$U_{\text{неч}}$	U_2
Значения	3,5	7,87	10^{-3}	0,02	0,0015	0,02	5,5	0,0288	0,4	10
Размерности	м	$1 / (\text{В} \cdot \text{с})$	$\text{В} / \text{А}$	с						В

Структурная схема электромеханической системы подъемника, соответствующая приведенному математическому описанию, дана на рис. 2, где нелинейные элементы НЭ1 – НЭ3 выполняют следующие функции:

- элемент НЭ1, реализующий функцию (4), вводит в действие упреждающую защиту при превышении разностным сигналом ΔU порога нечувствительности $U_{\text{неч}}$ реле защиты. Его выходной сигнал обнуляет сигнал U_y на входе ТПЧ, что приводит к экстремному снижению скорости двигателя наложением электрического и механического тормозных режимов;

- элемент НЭ2, согласно (1), прекращает действие механического тормоза после преодоления моментом M двигателя момента статической нагрузки $M_{\text{ст}}$ скипов при пуске или вводит в действие механический тормоз при снижении момента с последующим изменением его направления в результате срабатывания защиты;

- элемент НЭ3, согласно (2), вызывает деформацию участка K_c каната при превышении текущей длиной S навивки каната на барабан величины $\Delta S_{\text{нр}}$ провиса.

Функция (3) наброса силы стопорения на груженный скип реализуется замыканием контакта К.

Математическая модель, составленная по данной структурной схеме, позволила произвести моделирование следующих режимов работы подъемника:

Таблиця 2 – Оценка степени аварийности режимов работы скипового подъемника

Режимы работы подъемника	Значения критерия K_a	Оценка режимов
1	0,5 - 0,6	Безаварийный
2	3,8 – 5,5	Тяжелая авария
3	1,0 – 1,5	Аварийный
4	0,5 – 0,8	Безаварийный
5	0,25 – 0,75	Безаварийный

Согласно рис.3,б, кривая 4 разностного сигнала ΔU токового реле пересекает линию порога нечувствительности $\Delta U_{неч}$ через $\Delta t_{сраб} = 0,02c$ после начала стопорения. При этом ток двигателя в момент срабатывания защиты составляет $I_{1сраб} = 1300 A$ (см. рис. 3, а), чему отвечает тяговое усилие со стороны груженого скипа.

$$F_{к.сраб} = \frac{I_{1сраб} - I_{1н}}{R_б} c \cdot i_p + F_{с.з} = 452 \text{ кН.}$$

С момента срабатывания защиты скипы останавливаются (см. рис. 3,б), причем движение груженого скипа близко к равнозамедленному длительностью $t_{стоп} = 0,03c$. По аналогичному закону снижается скорость на барабане с временем остановки $t_{ост} = 0,045 c$. Поскольку двигатель останавливается дольше, чем груженный скип, происходит дальнейший рост тягового усилия на величину

$$\Delta F_{к.стоп} = C_z \frac{v_{б.нач}}{2} (t_{ост} - t_{стоп}) = 66 \text{ кН,}$$

где $v_{б.нач}$ - скорость на барабане в момент срабатывания защиты.

С учётом этой надбавки, усилие в канате возрастает до

$$F_{к.стоп} = F_{к.сраб} + \Delta F_{к.стоп} = 518 \text{ кН.}$$

Это существенно ниже предельных значений тягового усилия по условиям устойчивости движения скипа - 747 кН [9] и механической прочности каната - 750 кН.

При более позднем срабатывании защиты, характерном для средств, действующих по перегрузу с отстройкой от пуско-тормозных режимов электропривода, усилие $F_{к.стоп}$ всегда превышает допустимые значения, чем подтверждается эффективность применения предложенной упреждающей токовой защиты.

Выводы. 1. На основе подробного математического описания доменного скипового подъемника с частотно-управляемым асинхронным электроприводом подъема произведено математическое моделирование процессов упреждающей токовой защиты в условиях работы механизма, приближенных к реальным.

2. Анализ полученных результатов позволил установить критерий аварийности механизма подъема, согласно которому наиболее тяжёлая авария возникает при наездах груженого скипа на случайные твёрдые препятствия.

3. Установлено, что максимальное значение усилия в канате при наезде скипа значительно ниже предельно допустимых значений по условиям устойчивости движения скипа и механической прочности каната в случае срабатывания упреждающей токовой защиты, но всегда превышает допустимые значения при использовании обычных средств защиты, действующих по перегрузу.

В перспективе – разработка пилотного образца электронного токового реле с тиристорным ключом в качестве коммутирующего органа упреждающей защиты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бычков В. П. Электропривод и автоматизация металлургического производства / В. П. Бычков. – М.: Высшая школа, 1977. – 391с.
2. Машины и агрегаты металлургических заводов / под. ред. А. Н. Целикова. – М.: «Металлургия», 1976. - Т. 1: Машины и агрегаты доменных цехов. – 1976. – 415 с.
3. Жеребин Б. Н. неполадки и аварии в работе доменных печей / Б. Н. Жеребин, А. Е. Пареньков. – Новокузнецк, 2001. – 234 с.
4. Анализ причин аварии. Доменное производство. – М.: ВНИИмехчермет, 2001. – Т.2: Оборудование и агрегаты, ЧМ. – 2001. - 110 с.
5. Диагностика аварийных ситуаций доменной печи с использованием экспертной системы: Сб. тр. / [А. Н. Ладонкин, Б. Н. Жеребин, В. П. Чистов, А. Е. Пареньков]. – М.: Металлург, 1997. – С. 46.
6. Плискановский С. Т. неполадки в работе доменных печей / С. Т. Плискановский, В. В. Полтавец. – Днепрпетровск: Пороги, 2002. – 301 с.
7. Ракан Аль-Слихат. Упреждающая токовая защита электромеханической системы наклонной подъемной установки / Ракан Аль-Слихат, А. А. Чепак, В. Ф. Борисенко // Наукові праці ДонНТУ. Серія: Гірничо-електромеханічна. – 2012. – N2 (24). – С. 188-197.
8. Электромеханические системы транспортирующих механизмов / [В. Ф. Борисенко, А. А. Чепак, В. А. Сидоров и др.]. – Донецк: «Вебер» (Донецкое отд.), 2007. – 332 с.

9. Чепак А. А. Влияние места крепления упряжи на устойчивость движения скипа доменного скипового подъемника / А. А. Чепак, Ракан Аль-Слихат, И. В. Борисенко // Наукові праці ДонНТУ. Серія «Електромеханіка і енергетика». – 2010. – Вип. 10 (180). – С. 204 – 207.

REFERENCES

1. Bychkov V.P. *Elektroprivod i avtomatizatsia metallurgicheskogo proizvodstva* [Electric drive and automation of metallurgical production]. – Moscow: Vischaya shkola, 1977. – 391 p.
2. Mashini i agregati metallurgicheskikh zavodov. Tom 1: Mashini i agregati domennich tsehov/ Pod. red. A.N. Tselikova. – M.: «Metallurgiya», 1976. – 415s.
3. Zherebin B.N., Parenkov A.E. Nepochadki i avarii v rabote domennyih pechey. – Novokuznetsk, 2001. – 234 p.
4. Analiz prichin avarii. Domennoe proizvodstvo. T.2: Oborudovanie i agregaty, ChM. – Moscow: VNIImehchermet, 2001. – 110 s.
5. Ladonkin A.N. Diagnostika avariynnyih situatsiy domennoy pechi s ispolzovaniem ekspertnoy sistemy / A.N. Ladonkin, B.N. Zherebin, V.P. Chistov, A.E. Parenkov [Sb. tr.]. – Moscow: Metallurg, 1997. – s. 46.
6. S.T. Pliskanovskiy, V.V. Poltavets. Nepochadki v rabote domennyih pechey. – Dnepropetrovsk: Porogi, 2002. – 301 p.
7. Rakan Al-Slihat, A.O. Chepak, V.F. Borisenko. Anticipatory current protection of inclined hoisting plant electromechanical system. Naukovi pratsi DonNTU. Seriya: Girnycho-elektromehanična. – Donetsk: DonNTU, 2012. – N2 (24). – Pp. 188-197.
8. Borisenko V. F. A.A. Chepak, V.A. Sidorov and others. *Electromechanicheskie sistemy transportiruyuschih mehanizmov* [Electromechanical systems of transport mechanisms]. Donetsk: «Veber» (Donetskoe otd.), 2007. – 332 p.
9. Чепак А.А. Влияние места крепления упряжи на устойчивость движения скипа доменного скипового подъемника/ А.А. Чепак, Ракан Аль-Слихат, И.В. Борисенко// Наукові праці ДонНТУ. Серія «Електромеханіка і енергетика». – Donetsk: DonNTU, 2010. – Vip: 10 (180). – Pp. 204 – 207.

Надійшла до редакції 13.04.2013

Рецензент: В.Ф.Сивокобиленко

А. О. ЧЕПАК, РАКАН АЛЬ-СЛИХАТ, В. П. БОРИСЕНКО

Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет»

Моделирование процессов струмового захисту з упереджувачим реагуванням на аварійні режими доменної скіпової підйомної установки. Приведені структура та математичний опис доменної скіпової підйомної установки з частотно-керованим асинхронним електроприводом підйому, який містить пристрій упереджувачого струмового захисту від аварійних механічних перевантажень. Розглянуті результати математичного моделювання, що підтверджують ефективність захисту.

Ключові слова: доменна піч, скіповий підйомник, електропривод підйому, режими роботи, реле струму, упереджувачий захист, математичне моделювання.

A. CHEPAK, RAKAN AL-SLIHAT, V. BORISENKO

State Institution of Higher Education “Donetsk National Technical University”

Simulation of Protection Processes with Proactive Reaction on the Emergency Mode of the Blast-Furnace Skip Hoist. The article analyzes the causes of accidents in an electromechanical system of skip blast-furnace hoist. The most common are the choice of slack rope over 3.5 m, and hitting the skip to a random obstacle. The driving force in the rope may exceed its tensile strength and the unit impulse, and can also be affected by the stability of skip sending up to gathering and overturning. The current maximum protection does not have time to respond to the rate of change of torque (current), proactive current protection is proposed that responds to the pace of change, and not its integral action. As the electric drive system is proposed inverter - induction motor with power current limit ahead.

Key words: electromechanical system, skip blast-furnace hoist, advanced current protection, emergency situation, electric drive, mathematical modeling.