

УДК 621.876.2:62-83

**РАКАН АЛЬ-СЛИХАТ, А.А. ЧЕПАК** (канд.техн.наук, доц.)**В.Ф. БОРИСЕНКО** (канд.техн.наук, доц.)

Донецкий национальный технический университет

toi@elf.dgtu.donetsk.ua

## **К СОЗДАНИЮ УПРЕЖДАЮЩЕЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ ОТ СХОДА СКИПОВ С НАПРАВЛЯЮЩИХ ДОМЕННОВОГО СКИПОВОГО ПОДЪЕМНИКА ПРИ ОБОРУДОВАНИИ ЧАСТОТНО-УПРАВЛЯЕМЫМ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ**

It is explained the possibility of realization the lead current protection from accident mechanical overload of the blastfurnace skip lift with variable- frequency electric drive.

**Введение.** В настоящее время скиповые подъемники доменных печей оборудуются, в основном, электроприводом постоянного тока по системе генератор-двигатель (Г-Д). В последние годы имеет место переход на систему тиристорный преобразователь – двигатель (ТП-Д), обладающий известными преимуществами по сравнению с системой Г-Д. Однако, сохраняется главный недостаток электроприводов с двигателями постоянного тока по сравнению с асинхронными короткозамкнутыми двигателями. Последние значительно проще и надежнее из-за отсутствия коллектора, дешевле и легче, не требуют больших эксплуатационных затрат. В связи с этим наметилась тенденция к переходу на скиповых подъемниках к частотно-управляемым асинхронным электроприводам (ТПЧ-АД), обладающим такими же высокими электромеханическими свойствами, как и электроприводы по системе ТП-Д. Поэтому считается, что частотно-управляемый электропривод является приводом будущего.

Однако, вследствие высокого быстродействия тиристорных электроприводов, не представляется возможным создание без специальных мер достаточно надежной аварийной защиты от схода скипов с направляющих наклонного моста при наездах на случайные препятствия: рассыпавшиеся руда или кокс, деформированные элементы фермы. Как показывает статистика, подобные аварии случаются нередко, из-за чего доменный цех недодает значительную часть своей продукции.

Предусмотренная в электроприводах максимальная токовая защита, защищающая силовую часть от коротких замыканий, не защищает электромеханическую систему (ЭМС) от технологических или аварийных перегрузок, поскольку ток двигателя при этом обычно значительно меньше тока короткого замыкания. Для реализации защиты от перегрузок необходимо создание специального токового реле, которое срабатывало бы в самом начале развития механической перегрузки, то есть при небольших токах, но не реагировало бы на повышенные токи в пуско-тормозных режимах привода. Учитывая, что наезды скипов могут происходить в случайные моменты времени, такой аппарат должен находиться в режиме ожидания и, в случае развития аварии, срабатывать самостоятельно.

Сравнительный анализ возможных принципов построения токовой упреждающей защиты показывает, что наиболее эффективной является защита с помощью токового реле, реагирующего не на значение тока, а на интенсивность его изменения. Высокая интенсивность изменения тока характерна при резких изменениях механической нагрузки, малую интенсивность протекания пуско-тормозных режимов можно обеспечить с помощью задатчика интенсивности. Очевидно, что, за счет высокой разницы между скоростями изменения тока в аварийном и безаварийном режимах работы скипового подъемника, можно обеспечить четкое срабатывание защиты при стопорении скипов без ее реагирования на пуско-тормозные режимы привода.

**Постановка задачи исследования.** Исходя из общих позиций, покажем адекватность путей реализации упреждающей токовой защиты для системы Г-Д, принципы которой были заложены в работе [1], и системы ТПЧ-АД.

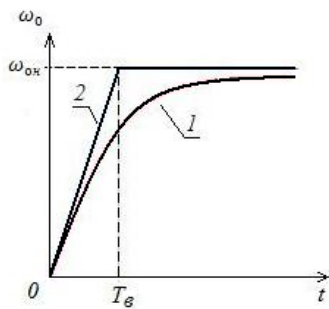


Рисунок 1 – Изменение управляющего воздействия на двигатель при разгоне системы Г-Д

**Материалы и результаты исследования.** В системе Г-Д роль задатчика интенсивности выполняет обмотка возбуждения генератора. При скачкообразной подаче на нее номинального напряжения скорость идеального холостого хода двигателя изменяется по закону приближенно описываемому экспоненциальной функцией вида (рис. 1, кривая 1)

$$\omega_o = \omega_{он} (1 - e^{-\frac{t}{T_b}}), \tag{1}$$

где  $\omega_o$ ,  $\omega_{он}$  – текущая и номинальная скорости идеального холостого хода двигателя;

$T_b$  – электромагнитная постоянная времени цепи возбуждения генератора, определяющая темп разгона.

Функцию (1) можно заменить разложением ее в степенной ряд [2]:

$$\omega_o = \omega_{он} \left( 1 - 1 + \frac{t}{1!T_b} - \frac{t^2}{2!T_b^2} + \frac{t^3}{3!T_b^3} - \dots + \frac{t^n}{n!T_b^n} \right) \tag{2}$$

При  $t < T_b$ , исключив из (2) малые высших порядков, можно приближенно записать:

$$\omega_o \approx \omega_{он} \frac{t}{T_b} = \epsilon_p t, \tag{3}$$

где  $\epsilon_p$  - ускорение двигателя при разгоне.

При  $t > T_b$  можно принять  $\omega_o = \omega_{он}$ . Следовательно, в первом приближении экспоненциальная функция 1 на рисунке заменяется ломанной 2, адекватной выходному сигналу задатчика интенсивности.

Далее, приняв равенство (3) в качестве закона изменения во времени управляющего воздействия на двигатель, определим применительно к частотно-управляемому асинхронному электроприводу законы изменения во времени электромагнитного момента (тока) при пуске (электромагнитными переходными процессами пренебрегаем).

Имея в виду, что на наклонном подъемнике характер момента сопротивления  $M_c$  на валу двигателя – активный, а жесткость механической характеристики привода – конечная, пуск электропривода происходит в три этапа (рис. 2):

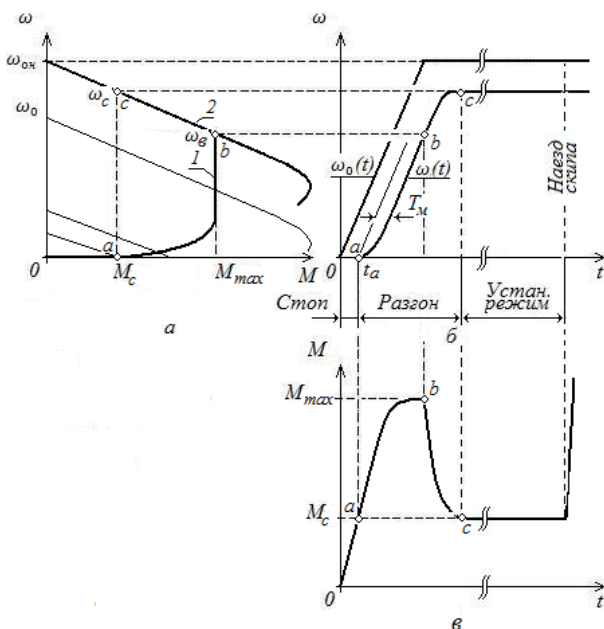


Рисунок 2. Переходные процессы системы ППЧ-АД при разгоне от задатчика интенсивности с последующим наездом скипа на препятствие

- на первом этапе (участки 0-а) двигатель застопорен механическим тормозом, уравнивающим момент сопротивления, и при подаче на него управляющего воздействия остается неподвижным, а электромагнитный момент изменяется по линейному закону:

$$M = \omega_o \cdot \beta = \epsilon_p \cdot \beta \cdot t. \tag{4}$$

Продолжительность этапа определяется достижением равенства  $|M|=|M_c|$ :

$$t_a = \frac{M_c}{\epsilon_p \cdot \beta}; \tag{5}$$

- на втором этапе момент  $M$  превышает момент сопротивления  $M_c$ , двигатель растормаживается и разгоняется на участке a-b динамической механической характеристики 1 (см. рис. 2 а). Этап описывается системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \beta(\omega_o - \omega) &= M \\ M &= M_c + \mathfrak{J}_\Sigma \frac{d\omega}{dt} \end{aligned} \right\} \tag{6}$$

где  $\mathfrak{J}_\Sigma$  - приведенный к электродвигателю суммарный момент инерции ЭМС подъемника;

$\omega$  – угловая скорость двигателя;

- на третьем этапе двигатель завершает разгон на рабочей статистической характеристике 2 (там же, участок  $b-c$ ), так как в точке  $b$  задатчик интенсивности входит в зону насыщения. Здесь электропривод становится неуправляемым и скорость двигателя увеличивается по экспоненциальному закону (кривая  $b-c$  на рис.2 б)

$$\omega = \omega_c + (\omega_b - \omega_c)e^{-\frac{t}{T_m}}, \quad (7)$$

где  $\omega_b$  и  $\omega_c$  - скорости в точках  $b$  и  $c$  характеристики 2;

$T_m$  – электромеханическая постоянная времени привода.

В уравнении (7) начало отсчета времени приходится на начало третьего этапа (точка  $b$ ).

Для нахождения временной функции скорости на втором этапе разгона (кривая  $a-b$  на рис. 2 б) следует в систему уравнений (6) ввести функцию (3) задания темпа разгона и время запаздывания трогания машины по (5). Если начало отсчета времени отнести к началу второго этапа (точка  $a$ ), то в итоге получим дифференциально-интегральное уравнение вида

$$\varepsilon_p t = \omega + T_m \frac{d\omega}{dt}. \quad (8)$$

Левая часть уравнения (8) отображает внешнее воздействие, правая – отклик на него. Вид правой части указывает на принадлежность электромеханической системы к аperiodическому звену первого порядка. Следовательно, общее решение данного уравнения представляется в виде

$$\omega = \omega_{пр} + \omega_{св} = \omega_{пр} + Ae^{-\frac{t}{T_m}}, \quad (9)$$

где  $\omega_{пр}$  и  $\omega_{св}$  - принужденная и свободная составляющие скорости двигателя;

$A$  – постоянная интегрирования.

Принужденная составляющая определяется из условия достижения равноускоренного движения в результате затухания свободной составляющей. Введя в уравнение (8) величину  $\frac{d\omega}{dt} = \varepsilon_p$ , получим:

$$\varepsilon_p (t - T_m) = \omega_{пр}. \quad (10)$$

После подстановки равенства (10) в уравнение (9) будем иметь:

$$\omega = \varepsilon_p (t - T_m) + Ae^{-\frac{t}{T_m}}. \quad (11)$$

Постоянная  $A$  определяется из условия:  $t=0, \omega=0$ . Введя его в (11) находим:

$$A = \varepsilon_p \cdot T_m. \quad (12)$$

В результате подстановки (12) в общее решение (9), окончательно получаем:

$$\omega = \varepsilon_p t - \varepsilon_p T_m \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_m}} \right). \quad (13)$$

По уравнениям (13) и (7), описывающим соответственно второй и третий этапы разгона электропривода, может быть построена кривая  $\omega(t)$ , показанная на рис. 2 б. Здесь же приведена зависимость  $\omega_o(t)$ , формируемая задатчиком интенсивности по уравнению (3). Видно, что заданный темп разгона двигателя поддерживается практически на всем протяжении переходного процесса. Изменения значений ускорения, а, следовательно, и момента (тока) имеют место лишь в начале и конце разгона.

Так как защита должна реагировать не на величину, а на ее изменения во времени, найдем с помощью функций (13) и (7) временные зависимости момента.

Электромагнитный момент определяется вторым равенством системы уравнений (6) – уравнением движения. Для нахождения производной  $\frac{d\omega}{dt}$  для второго этапа разгона (участок  $a-b$  на рис. 2 б) продифференцируем уравнение (13):

$$\frac{d\omega}{dt} = \varepsilon_p \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_m}} \right). \quad (14)$$

Подставив (14) в уравнение движения, получим:

$$M = M_c + \mathfrak{Z}_\Sigma \varepsilon_p \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_M}} \right), \quad (15)$$

чему соответствует одноименный участок *a-b* на рис. 2 в.

Найдя производную скорости по уравнению (7) и подставив ее в уравнение движения, получим функцию момента для третьего этапа разгона:

$$M = M_c + \mathfrak{Z}_\Sigma \varepsilon_p e^{-\frac{t}{T_M}}. \quad (16)$$

Сравнивая (15) и (16), можно видеть, что темпы изменения момента на втором и третьем этапах разгона одинаковы, причем максимальные значения ускорения будут в начале этапов:

- второго, по (15),

$$\left( \frac{dM}{dt} \right)_{\max 2} = \frac{\mathfrak{Z}_\Sigma \varepsilon_p}{T_M}; \quad (17)$$

- третьего, по (16),

$$\left( \frac{dM}{dt} \right)_{\max 3} = -\frac{\mathfrak{Z}_\Sigma \varepsilon_p}{T_M}. \quad (18)$$

Следовательно, настроив задатчик интенсивности на ограничение величины  $\varepsilon_p$ , можно получить достаточно малые значения производных (17) и (18), при которых аварийная защита не срабатывала бы.

При стопорении скипа динамическая модель ЭМС подъемника принимает вид, показанный на рис. 3,

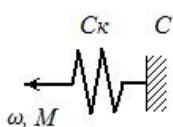


Рисунок 3. Динамическая модель ЭМС при стопорении скипа

где *C* – скип, *C<sub>к</sub>* – приведенная к двигателю крутильная жесткость тягового каната,  $\omega$  и *M* – угловая скорость и момент двигателя.

Пренебрегая наклоном механической характеристики электропривода, можно записать закон возрастания момента двигателя после стопорения скипа:

$$M = M_c + C_k \int_0^t \omega \cdot dt,$$

откуда производная момента

$$\left( \frac{dM}{dt} \right)_{\text{стоп}} = C_k \omega. \quad (19)$$

Для сравнения значений производных момента при безаварийном разгоне и аварийном стопорении обратимся к численному примеру. Для подъемника, рассмотренного в [1], величины, входящие в равенства (17), (18) и (19) имеют значения:  $\varepsilon_p = 5 \text{ с}^{-1}$ ;  $\mathfrak{Z}_\Sigma = 145 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ ;  $T_M = 0,145 \text{ с}$ ;  $C_k = (5,5 \dots 10) \cdot 10^3 \text{ Н}\cdot\text{м}$  (соответственно местонахождению скипа на трассе движения);  $\omega = 50 \text{ с}^{-1}$ .

Подставив данные в указанные выражения, находим:

$$\text{- при разгоне двигателя } \left( \frac{dM}{dt} \right)_{\max 2,3} = \pm 5 \cdot 10^3 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{с};$$

$$\text{- при стопорении скипа } \left( \frac{dM}{dt} \right)_{\text{стоп}} = (2,75 \dots 5) \cdot 10^5 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{с}.$$

Можно видеть, что производная момента, а, следовательно, и тока двигателя при стопорении скипа почти на два порядка превышает производные этих величин при безаварийном пуске привода, чем обеспечивается требуемая четкость срабатывания упреждающей токовой защиты, действующей на экстренное отключение двигателя.

**Выводы.** Дано теоретическое обоснование общего подхода к реализации упреждающей токовой защиты электромеханической системы доменного скипового подъемника от аварийных механических перегрузок, вызванных наездами скипов на непредвиденные препятствия, при оборудовании механизма электроприводом по системе Г-Д, ТП-Д или ТПЧ-АД. Защита базируется на избирательном ее реагировании на интенсивность изменения момента (тока) двигателя в пуско-тормозных режимах и набросах механической нагрузки.

## Список литературы

1. Борисенко В.Ф. Электромеханические системы транспортирующих механизмов / В. Ф. Борисенко, А. А. Чепак, В. А. Сидоров и др. – Донецк : «Вебер» (Донецкое отд.), 2007. – 332 с.
2. Бронштейн И.Н. Справочник по математике / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев – М.: «Наука», 1967. – 608 с.

Надійшла до редколегії 8.04.2009

Рецензент: П.Х.Коцегуб

**РАКАН АЛЬ-СЛИХАТ, А. А. ЧЕПАК,  
В. Ф. БОРИСЕНКО**

Донецкий национальный технический университет

**К созданию упреждающей токовой защиты от схода скипов с направляющих доменного скипового подъемника при оборудовании частотно-управляемым асинхронным электроприводом.** Рассматривается возможность реализации упреждающей токовой защиты от механических перегрузок доменного скипового подъемника с частотно-управляемым асинхронным электроприводом.

*Доменная печь, скиповый подъемник, механические перегрузки, упреждающая токовая защита*

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

Донецкий национальный технический университет

**До утворення випереджувачого струмового захисту від сходу скипів з напрямлячів доменного скіпового підйомника при обладнанні частотно-керуванім асинхронним електроприводом.** Розглядається можливість реалізації випереджувачого струмового захисту від механічних перевантажень доменного скіпового підйомника з частотно-керуванім асинхронним електроприводом.

*Доменна піч, скіповий підйомник, механічні перевантаження, випереджувачий струмовий захист*