

УДК 621.313.333

**С.В. Дубинин, А.Н. Бурлака**Донецкий национальный технический университет, г. Донецк  
кафедра «Горная электротехника и автоматика им. Р.М. Лейбова»E-mail: [geantu@mail.ru](mailto:geantu@mail.ru)**ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО  
ЭЛЕКТРОПРИВОДА НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ТОРМОЗА  
СКОЛЬЖЕНИЯ****Аннотация**

*Дубинин С.В., Бурлака А.Н. Исследование переходных процессов автоматизированного электропривода на основе электромагнитного тормоза скольжения. Выполнен анализ влияния параметров автоматической системы управления электроприводом на характер переходных процессов автоматизированного электропривода машина. В функции предложенной системы управления входит минимизация динамических перегрузок в системе при оптимальных пусковых характеристиках электропривода.*

**Ключевые слова:** *электромагнитный тормоз скольжения, планетарный редуктор, пусковой момент, математическая модель, динамические нагрузки, дифференциальные уравнения.*

**Общая постановка проблемы.**

К автоматизированному электроприводам горных машин предъявляются повышенные требования к удельной мощности для использования его в условиях добычного участка. Таким требованиям соответствует автоматизированный асинхронный электропривод на основе дифференциального редуктора и электромагнитного тормоза скольжения ЭМТ. Величина динамических нагрузок при переходных процессах пуска и экстренного торможения электропривода во многом определяют срок службы и надежность горной машины.

**Постановка задач исследования.**

На основании результатов исследования динамических процессов в системе автоматизированный электропривод - горная машина необходимо решить задачу выбора рациональных параметров системы для обеспечения:

- 1) необходимых пусковых характеристик электропривода;
- 2) минимизацию динамических нагрузок в системе в случае аварийного торможения электропривода.

**Решение задач и результаты исследований.**

Электроприводы с электромагнитными муфтами и тормозами скольжения относятся к числу регулируемых. В горном производстве эти приводы служат для регулирования скорости перемещения скребковой цепи конвейера, управления скоростью подачи угольного комбайна и др. [1,2]. При пуске привода двигатель запускается вхолостую. Мягкие механические характеристики муфт позволяют выравнять нагрузки между двигателями в машинах с двумя или несколькими приводами. Изменяя напряжение возбуждения обмоток муфт, можно менять продолжительность пуска и скорость привода, поддерживать режим работы горной машины в соответствии с требованиями к технологическому процессу. Электромагнитные муфты скольжения (ЭМС) и тормоза (ЭМТ) обеспечивают возможность автоматического регулирования момента и скорости вращения выходного вала электропривода. Наиболее перспективными для горной промышленности являются приводы с ЭМТ. Они имеют более высокую энерговооруженность (до 300 кВт) за счет возможности водяного охлаждения неподвижной активной части ЭМТ. Однако, использование ЭМТ в

качестве регулирующего органа требует применение более сложного дифференциального планетарного редуктора. Совместная работа горных машин с приводами на основе ЭМТ сопровождается переходными процессами, особенности которых необходимо учитывать при разработке автоматических систем управления (САУ). Кинематическая схема привода ВСПК (производство завода «Свет Шахтера») для вынесенной системы подачи комбайна и скребкового конвейера (Рис. 1) содержит асинхронный электродвигатель, электромагнитный тормоз скольжения, планетарный дифференциальный редуктор.

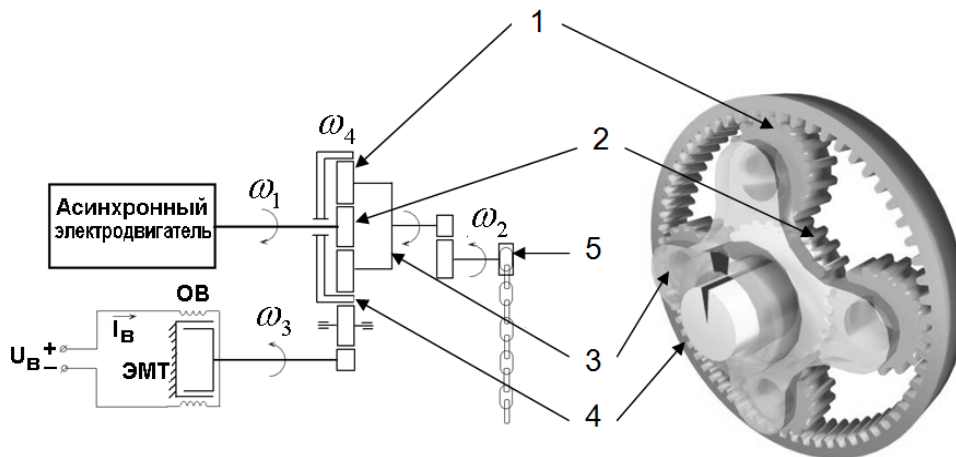


Рисунок 1 – Кинематическая схема электропривода ВСПК на основе ЭМТ:  $\omega_1$ - угловая скорость асинхронного двигателя,  $\omega_2$ - угловая скорость приводной звездочки ( $\omega_{зв}$ ).

Механическая система планетарного редуктора, состоит из нескольких планетарных шестерён (1), вращающихся вокруг центральной, солнечной, шестерни (2). Планетарные шестерни фиксируются вместе с помощью водила(3). Планетарная передача содержит дополнительную внешнюю кольцевую шестерню – эпицикл(4), имеющую внутреннее зацепление с планетарными шестернями и внешнее - с валом электромагнитного тормоза ЭМТ. При заторможенном вале ЭМТ вращение с вала электродвигателя через солнечную шестерню 2 передается сателлитам 1 с водилом 3 на приводную звездочку 5. При заторможенной звездочке 5 вращение с вала электродвигателя через солнечную шестерню 2 передается сателлитам 1, эпициклу 4 и валу ЭМТ. Для теоретического анализа данной системы принимаем следующие допущения:

-система состоит из четырех сосредоточенных масс: асинхронный двигатель с валом солнечной шестерни (приведенный момент инерции  $j_1$ ), водило с сателлитами и валом приводной звездочки (приведенный момент инерции  $j_2$ ), электромагнитный тормоз (приведенный момент инерции  $j_3$ ), эпицикл (приведенный момент инерции  $j_4$ );

- рассматриваем систему как единое тело, совершающее вращательное движение, которое будет описываться системой уравнений, полученных на основе структурно-матричного метода [3]:

$$\frac{d\omega_1}{dt} = \frac{M_{B1} - (M_{Y1} + M_{D1})/u_{12}}{J_1}; \quad \frac{d\omega_2}{dt} = \frac{-M_{B2} + M_{Y2} + M_{D2}}{J_2}; \quad (1)$$

$$\frac{d\omega_4}{dt} = \frac{-M_{B4} + M_{Y1} + M_{D1} - M_{Y2} - M_{Y3} - M_{D2} - M_{D3}}{J_1};$$

$$\frac{dM_{Y1}}{dt} = c_1 \left( \frac{\omega_1}{u_{12}} - \omega_2 \right); \quad \frac{dM_{Y2}}{dt} = c_2 (-\omega_2 + \omega_4); \quad \frac{dM_{Y3}}{dt} = c_3 (-\omega_3 u_{32} - \omega_4); \quad (2)$$

где  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  – угловые скорости входного, выходного звеньев;  $M_{B1}, M_{B2}, M_{B3}$  – моменты, приложенные к основным звеньям передачи;  $M_{y_i}$  и  $M_{d_i}$  – потенциалы упругих и диссипативных элементов соответственно;  $u_{12}$  – передаточное число, определяемое при заторможенном ЭМТ и передаче движения от входного звена 1 к выходному звену 2;  $u_{32}$  – передаточное число, определяемое при заторможенном звене 1 и передаче движения от входного звена 3 к выходному звену 2. При этом:

$$M_{D1} = \mu_1 \left( \frac{\omega_1}{u_{12}} - \omega_2 \right); \quad M_{D2} = \mu_2 (-\omega_2 + \omega_4); \quad (3)$$

$$M_{D3} = \mu_3 (-\omega_3 u_{32} - \omega_4); \quad M_{B3} = (M_{Y3} + M_{D3}) \mu_{32}$$

где  $c_j$  – жесткости упругих элементов;  $\mu_k$  – коэффициенты диссипации.

Передаточные числа  $u_{12}$  и  $u_{32}$  определяются исходя из известной формулы Виллиса для планетарных передач.

Исследованиями [4] установлено, что для применяемых в горных машинах типов асинхронных двигателей в рабочем режиме их динамическая механическая характеристика может быть описана дифференциальным уравнением вида

$$S = v \left( M_o(t) + T_s \frac{dM_o(t)}{dt} \right), \quad (4)$$

где  $v = \frac{S_k}{2M_{max}}$ ,  $T_s = \frac{1}{\omega_1 S_k}$ ,  $S_k$  – критическое скольжение,  $M_{max}$  – максимальный момент двигателя.

Электромагнитный момент ЭМТ описывается выражением [1]:

$$M_T = M \cdot \sqrt{\arctan(a \cdot i_{og})} \cdot \frac{1 - \omega_3/\omega_0}{1 - b \cdot \omega_3/\omega_0} \quad (5)$$

где  $M$  – максимальный электромагнитный момент ЭМТ;  $\omega_0$  – максимальная частота вращения вала ЭМТ;  $i_{og}$  – ток возбуждения ЭМТ;  $a, b$  – коэффициенты, которые учитывают конструктивные параметры ЭМТ;

Изменение тока возбуждения ЭМТ описывается выражением:

$$\frac{di_{og}}{dt} = \frac{U_m - R \cdot i_{og}}{L}, \quad (6)$$

где  $U_m$  – напряжение, подаваемое на обмотку возбуждения ЭМТ;  $R, L$  – соответственно сопротивление и индуктивность обмотки возбуждения ЭМТ.

Рассмотрим процессы при следующих характерных режимах работы электропривода с ЭМТ:

- переходный процесс запуска электропривода при заторможенной приводной звездочке;

- переходный процесс при экстренном торможении приводной звездочки.

Переходный процесс запуска электропривода исследовался при следующей последовательности операций управления: холостой запуск асинхронного двигателя при обесточенной обмотке возбуждения ЭМТ; периодическая подача напряжения на обмотку возбуждения и соответствующее изменение пускового момента на приводной звездочке.

В зависимостях, полученных путем компьютерного моделирования процесса пуска электропривода ВСПК (Рис. 2), можно выделить три характерных периода. За период  $T_1$  холостого пуска асинхронного двигателя наблюдается появление динамического момента на

приводной звездочке (кривая -1) за счет ускорения инерционных масс эпицикла и ЭМТ. Амплитуда динамического момента при холостом запуске не превышает 1,5Мн. При достижении максимальной скорости ЭМТ момент на приводной звездочке снижается практически до нуля.

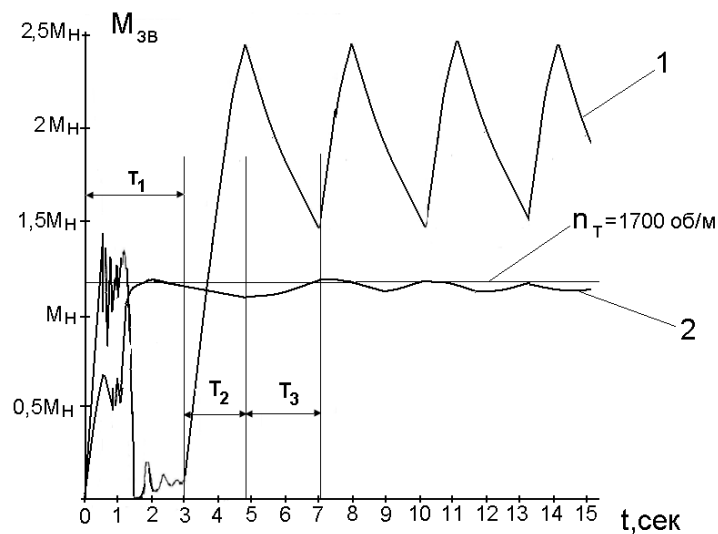


Рисунок 2 – Процесс запуска электропривода при заторможенной приводной звездочке: Мн – номинальный момент на приводной звездочке, 1- момент на приводной звездочке  $M_{3B}$  ( $M_{B2}$ ), 2 – частота вращения вала ЭМТ( $n_T$ )

В начале периода  $T_2$  на обмотку возбуждения ЭМТ подается напряжение, и на приводной звездочке появляется пусковой момент, возрастающий в конце периода до 2,5Мн. В течении периода  $T_3$  напряжение с обмотки ЭМТ снимается и происходит снижение момента на приводной звездочке. Величина амплитуды пускового динамического момента электропривода может значительно превышать статический момент, соответствующий критическому моменту асинхронного двигателя. Такое превышение момента обеспечивается накопленной кинетической энергией вращающихся масс приведенных к ротору электродвигателя. Кратность превышения зависит от величины напряжения  $U_{об}$  подаваемого на обмотку ЭМТ (Рис 3). Регулируя величину  $U_{об}$  можно в определенных пределах регулировать величину пускового момента электропривода. Этот эффект можно использовать для повышения эффективности запуска скребкового конвейера с заштыбованной цепью.

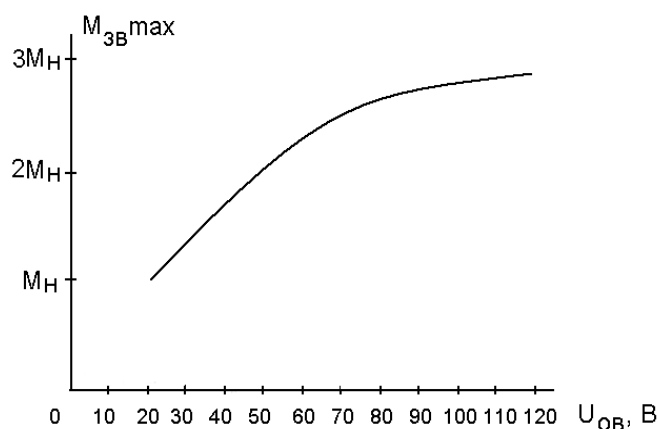


Рисунок 3 – Зависимость максимального пускового момента электропривода  $M_{3B,max}$  от величины напряжения  $U_{об}$  возбуждения ЭМТ

При экстренном торможении выходного вала максимальное значение динамического момента зависит от интенсивности снижения угловой скорости приводной звездочки. При времени снижения угловой скорости приводной звездочки  $\omega_{зв}$  до нуля за 0,2 с, максимальное значение динамического момента достигает 6Мн (кривая 1 на Рис. 4а).

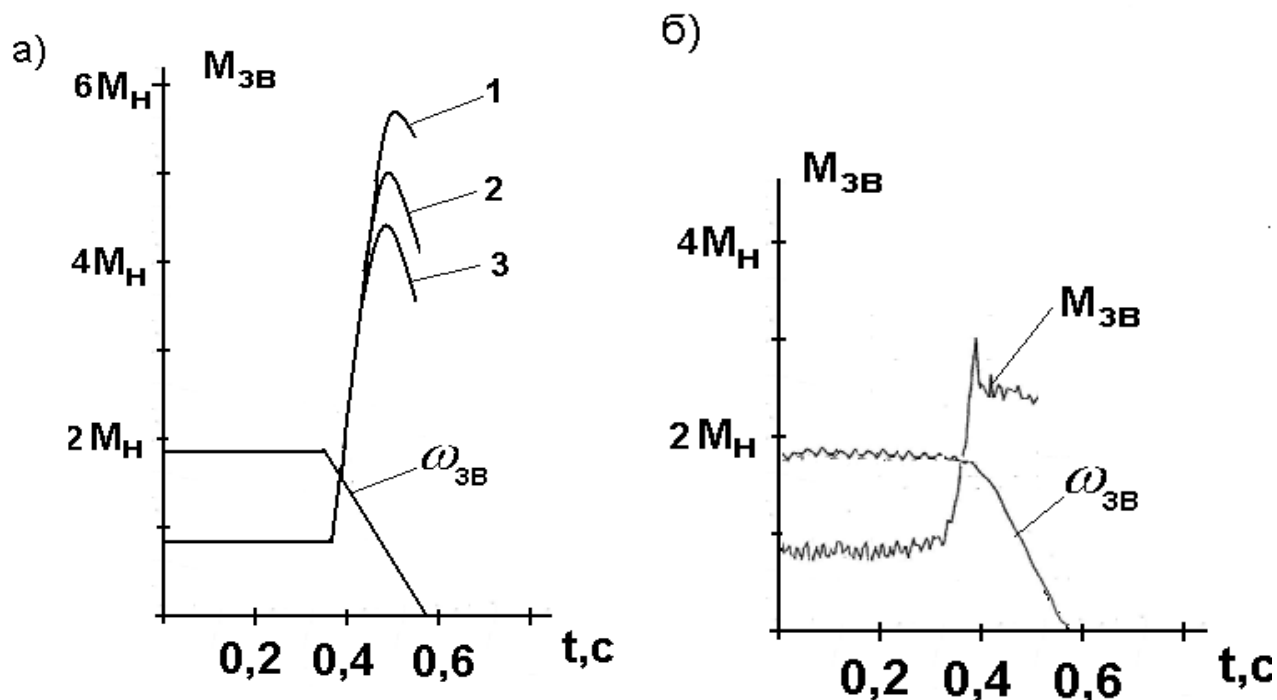


Рисунок 4 – Процесс экстренного торможения выходного вала электропривода

Амплитуду динамического момента можно существенно уменьшить путем отключения напряжения  $U_{ов}$  ЭМТ после появления перегрузки ( кривая 2 Рис.4а). Еще большего эффекта можно достигнуть при одновременном отключении электродвигателя и ЭМТ (кривая 3, Рис.4а).

Однако, при времени полного торможения приводной звездочки менее 0,5 с динамический момент превышает предельно допустимое значение с точки зрения механического повреждения редуктора или горной машины.

Поэтому, для эффективной защиты электропривода и горной машины от динамических перегрузок было рекомендовано установить фрикционную муфту момента на последнюю ступень редуктора.

На Рис. 4б приведена экспериментальная осциллограмма момента на приводной звездочке при экстренном торможении электропривода снабженного фрикционной муфтой.

Из осциллограммы следует, что величина динамического момента при экстренном торможении электропривода не превышает  $3M_n$ .

#### Выводы.

1. Проанализированы особенности переходных процессов автоматизированного электропривода на основе дифференциального редуктора и ЭМТ.
2. В процессе управляемого пуска электропривода достигается облегченный холостой запуск электродвигателя и повышение пускового момента за счет динамических свойств дифференциального редуктора с ЭМТ.
3. Эффективное снижение динамических перегрузок при экстренном торможении электропривода обеспечивается одновременным защитным отключением ЭМТ и

електродвигателя, а при времени торможения менее 0,5 с защитными свойствами фрикционной муфты момента, установленной на последней ступени редуктора.

### Литература

1. Серов Л.А. – Устройства управления и системы регулирования угледобывающих машин – М.: Недра, 1995. – 167 с.: ил.
2. Леусенко А.В., Высоцкий Г.В., Эйдерман Б.А. – Скребокковые конвейеры. справочное пособ. – М.: Недра, 1993.
3. Тарасик В.П. Математическое моделирование технических систем: Учебник для вузов. – М.: ДИЗАЙНПРО, 2004. – 640 с.: ил.
4. Бойко Н.Г. – Динамика привода исполнительного органа очистных комбайнов и его характеристики при случайном возмущении: Наукові праці ДонНТУ, серія: Гірничо-електромеханічна, випуск 17(157), 2009г.

### Abstract

**Dubinin S.V., Burlaka A.N. Research of automated electric drive transients on the electromagnetic brake of sliding basis.** The analysis of influence an automatic control system parametres by the electric drive on the automated electric drive transients character is made. As the offered control system minimisation of dynamic overloads in system enters at optimum starting characteristics of the electric drive.

**Keywords:** an electromagnetic brake of sliding, a planetary reducer, the starting moment, mathematical model, dynamic loadings, the differential equations.

### Анотація

**Дубинін С.В., Бурлака О.Н. Дослідження перехідних процесів автоматизованого електропривода на основі електромагнітного гальма ковзання.** Виконаний аналіз впливу параметрів автоматичної системи керування електроприводом на характер перехідних процесів автоматизованого електропривода. У функції запропонованої системи автоматичного керування входить мінімізація динамічних перевантажень у системі при оптимальних пускових характеристиках електропривода.

**Ключові слова:** електромагнітне гальмо ковзання, планетарний редуктор, пусковий момент, математична модель, динамічні навантаження, диференціальні рівняння.

Здано в редакцію:  
02.04.10

Рекомендовано до друку:  
к.т.н., доц. Маренич К.М.