

## АВТОМАТИЧЕСКОЕ ОГРАНИЧЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОДЪЕМА МОСТОВОГО КРАНА

В.М. Завьялов, А.В. Гусев\*

Кузбасский государственный технический университет, г. Кемерово

\*ОАО «Кокс», г. Кемерово

E-mail: zvm.eav@kuzstu.ru

Предложено ограничивать динамические нагрузки, возникающие в канате мостового крана при отрыве груза от поверхности, за счет использования синергетического регулятора упругого момента. Выявлены условия, необходимые для ограничения динамических усилий в канате при выборе зазора. Приведены результаты компьютерного моделирования процесса отрыва груза от поверхности с автоматическим ограничением динамических нагрузок.

### Ключевые слова:

Мостовой кран, привод подъема, динамические нагрузки, управление, выбор зазора.

### Key words:

Travelling crane, lift drive, dynamic loads, control, controlled gap reduction.

### Введение

Крановые механизмы являются неотъемлемой частью большинства технологических процессов. От их производительности и надежности зачастую зависит эффективность производства в целом, поэтому улучшение этих показателей является важной задачей для промышленности.

При эксплуатации крановых механизмов около 80 % их поломок происходит в результате действия динамических нагрузок на механические элементы [1]. Основной причиной возникновения динамических нагрузок, действующих на электропривод подъема крановых механизмов, является процесс отрыва груза от поверхности, которому предшествует выбор зазора в механической передаче при наличии слабину каната.

Одним из основных направлений повышения эксплуатационной надежности крановых механизмов является снижение динамических нагрузок, действующих на их механические элементы. Этого можно добиться, используя регулируемый электропривод, формирующий электромагнитный момент двигателя, препятствующий развитию переходных процессов колебательного характера и способствующий ограничению динамических усилий в канате при отрыве груза от поверхности.

Структуру системы управления такого электропривода будем рассматривать в соответствии с подходом [2], в котором электрическая подсистема электропривода на базе асинхронного двигателя с автономным инвертором напряжения рассматривается как безынерционный источник момента, а управление динамическим состоянием механической подсистемы осуществляется посредством синергетического регулятора упругого момента.

### Математическая модель

Примем, что конструкция моста крана имеет достаточно большую механическую жесткость. Модель привода подъема в этом случае, как отмечается в [1], можно представить в виде двухмассовой механической системы:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\omega}_1 &= \frac{1}{J_1}(M - M_{12} - M_{c1}); \\ \dot{\omega}_2 &= \frac{1}{J_2}(M_{12} - M_{c2}); \\ \dot{\varphi}_1 &= \omega_1; \\ \dot{\varphi}_2 &= \omega_2, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $\omega_1, \omega_2, J_1, J_2$  – угловые скорости и моменты инерции первой и второй масс;  $M$  – момент развиваемый двигателем;  $M_{12}$  – упругий момент;  $M_{c1}, M_{c2}$  – моменты сопротивления действующие на первую и вторую массы;  $\varphi_1, \varphi_2$  – положения первой и второй масс. К первой массе относится ротор двигателя и элементы механической передачи, а ко второй – поднимаемый груз. В данной модели все переменные и параметры приведены к валу двигателя.

Процесс отрыва груза от поверхности вносит нелинейность в систему (1), которая отражается при описании упругого момента. Примем, что при  $\varphi_1=0$  и  $\varphi_2=0$  будет такое состояние механической подсистемы привода подъема, когда слабину каната выбрана, но натяжение каната отсутствует. Упругий момент в зависимости от состояния системы будет либо равен нулю ( $M_{12}=0$  при  $\varphi_1 < \varphi_2$ ), что соответствует провисанию каната и равносильно наличию зазора в механической подсистеме, либо будет определяться выражением  $M_{12}=C_{12}(\varphi_1 - \varphi_2)$  при  $\varphi_1 > \varphi_2$ , что соответствует процессу отрыва груза от поверхности и подъема.

Момент сопротивления, создаваемый грузом, также будет зависеть от состояния механической подсистемы. До отрыва груза от поверхности он будет равен упругому моменту:

$$M_{c2} = M_{12} \text{ при } \varphi_2 = 0 \text{ и } M_{12} < mg/i,$$

где  $m$  – масса груза;  $g$  – ускорение свободного падения;  $i$  – коэффициент передачи редуктора и полиспаста.

После отрыва груза от поверхности, в процессе подъема, момент сопротивления будет иметь постоянную величину, определяемую как:

$$M_{c2} = mg/i \text{ при } \varphi_2 > 0.$$

### Система управления

Для уменьшения уровня динамических нагрузок, действующих на элементы механической передачи привода подъема, система управления должна обеспечивать плавное изменение упругого момента, по возможности, исключая колебательность переходных процессов. Этого можно добиться, вводом в систему управления регулятора упругого момента (РУМ), рис. 1.

Данный регулятор получает задание от регулятора скорости (РС) и формирует задание безынерционному источнику момента (БИМ), в качестве которого может выступать, например, асинхронный двигатель с преобразователем частоты, имеющим функцию прямого управления моментом [2].

Примем в качестве алгоритма управления РУМ зависимость, полученную на базе синергетической теории управления [2]:

$$M = M_{12} + \frac{J_1}{J_2}(M_{12} - M_C) - J_1 \left( \frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} \right) (\omega_1 - \omega_2) - \frac{J_1}{T_1 T_2 C_{12}} (M_{12} - M_{12}^*), \quad (2)$$

где  $M_{12}^*$  – задание для регулятора упругого момента;  $M$  – требуемое значение электромагнитного момента двигателя;  $T_1, T_2$  – постоянные времени регулятора.

Рассмотрим, как будет обрабатывать задание данный регулятор в процессе отрыва груза от поверхности с учетом нелинейности.

При наличии механического зазора, вызванного слабиной каната, учитывая, что  $\omega_2=0$ ,  $M_{12}=0$  и  $M_C=0$ , выражение (2) будет выглядеть следующим образом:

$$M = -J_1 \left( \frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} \right) \omega_1 + \frac{J_1}{T_1 T_2 C_{12}} M_{12}^*.$$

Очевидно, что в начальный момент времени  $\omega_1=0$ , в результате чего будет формироваться положительный момент, ротор двигателя начнет разгоняться. Его скорость будет стремиться к значению, определяемому выражением:

$$\omega_1 = M_{12}^* \frac{1}{(T_1 + T_2) C_{12}}.$$

Таким образом, задавая значение  $M_{12}^*$ , можно устанавливать значение угловой скорости, до которой разгонится вал двигателя при выборе зазора.

После выбора зазора начинается стадия отрыва груза от поверхности, на которой  $\omega_2=0$ , а  $M_{12}=M_C \neq 0$ . На этой стадии кинетическая энергия, запасенная в жестко связанных с ротором двигателя элементах, будет перетекать в энергию упругого

напряжения каната. В результате начнет расти упругая сила в канате; при достижении ее значения силы тяжести поднимаемого груза произойдет отрыв груза от поверхности. При больших скоростях ротора двигателя в момент окончания выбора зазора возможны существенные рывки, характеризующиеся превышением допустимого по нормам значения упругой силы в канате, способствующих интенсивному накоплению усталостных повреждений, и, в результате, разрыву каната. С другой стороны, малые скорости на этапе выбора зазора негативно отразятся на производительности погрузочных работ.

### Условия ограничения динамических нагрузок

Исходя из сказанного выше, целесообразно определить максимально-допустимое значение скорости в процессе выбора зазора, при котором мгновенное значение силы натяжения каната в процессе отрыва груза гарантированно не будет превышать некоторого заданного допустимого значения. Определим это значение при наиболее неблагоприятных условиях, когда масса груза такова, что при максимальном значении силы натяжения каната груз не оторвется от поверхности. Очевидно, что если момент сопротивления, создаваемый грузом, будет меньше максимума упругой силы каната, отрыв груза от поверхности произойдет до достижения максимума упругой силы, и часть кинетической энергии первой массы посредством упругой связи перейдет в кинетическую энергию второй массы, снизив тем самым максимальное значение упругого момента в процессе отрыва груза.

Итак, рассчитаем максимально допустимую угловую скорость ротора при выборе зазора для наиболее неблагоприятных условий. Будем считать, что в момент окончания выбора зазора система управления автоматически сформирует максимально допустимый, с учетом ограничений, тормозной электромагнитный момент двигателя  $M_{Tmax}$ . В результате, при достижении максимально допустимой упругой силы в канате он удлинится на длину  $\Delta S_{max}$ , а вал двигателя повернется на угол  $\Delta \varphi_{max}$ . В единицах измерения, приведенных к валу двигателя, этот угол будет определяться зависимостью:

$$\Delta \varphi_{max} = \frac{M_{12max}}{C_{12}},$$

где  $M_{12max}$  – упругий момент, эквивалентный максимально допустимой силе натяжения каната, приведенной к валу двигателя.

Исходя из закона сохранения энергии, пренебрегая диссипативными силами внутри механической передачи, кинетическая энергия, накопленная

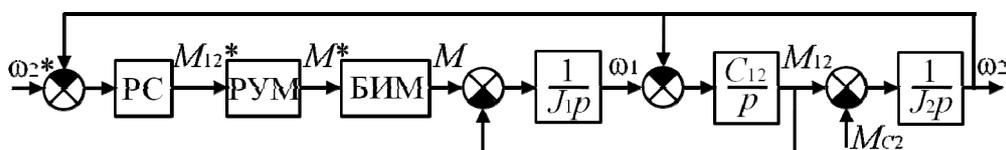


Рис. 1. Структурная схема электропривода подъема кранового механизма

в элементах жестко связанных с валом двигателя, присутствующая на момент окончания выбора зазора, частично пойдет на создание потенциальной энергии натяжения каната, а частично на работу, совершаемую тормозным моментом двигателя:

$$\frac{J_1 \omega_{1\max}^2}{2} = \frac{C_{12} \Delta \varphi_{\max}^2}{2} + M_{T\max} \Delta \varphi_{\max}.$$

Из этого выражения найдем угловую скорость вала двигателя при выборе зазора  $\omega_{1\max}$ , обеспечивающую ограничение упругого момента на уровне  $M_{12\max}$ :

$$\omega_{1\max} = \sqrt{\frac{C_{12}}{J_1} \Delta \varphi_{1\max}^2 + \frac{2}{J_1} M_{T\max} \Delta \varphi_{\max}}. \quad (3)$$

Для использования зависимости (3) с целью автоматического ограничения динамических нагрузок в приводе подъема кранового механизма необходимо формировать задание на входе РУМ в функции упругого момента:

$$\begin{aligned} M_{12}^* &= (T_1 + T_2) C_{12} \omega_{1\max} && \text{при } M_{12} = 0; \\ M_{12}^* &= M_{12PC}^* && \text{при } M_{12} \neq 0, \end{aligned}$$

где  $M_{12PC}^*$  – задание упругого момента, формируемое регулятором скорости.

### Результаты исследований

Анализ полученных уравнений проводился методом компьютерного моделирования на базе нелинейной модели механической подсистемы привода подъема крана (1), с параметрами, соответствующими мостовому крану двухбалочному опорному грузоподъемностью 3,2 т с высотой подъема до 16 м. При моделировании использовалось ограничение момента двигателя на уровне  $\pm 200$  Н·м. Максимально допустимое значение упругого момента было принято 150 Н·м, исходя из чего, в соответствии с (3) была рассчитана максимально-допустимая скорость ротора при выборе зазора  $\omega_{1\max} \approx 16,68$  рад/с, для достижения которой необхо-

димо формировать в системе управления задание упругого момента на уровне  $M_{12}^* \approx 497$  Н·м. После выбора зазора задание упругого момента снижалось до 50 Н·м. Постоянные времени регулятора упругого момента были приняты  $T_1 = T_2 = 0,01$  с.

На рис. 2 приведены графики переходного процесса, при условии, что момент сопротивления, создаваемый грузом, больше заданного значения упругого момента, в результате чего привод не в состоянии оторвать груз от поверхности. Это соответствует наиболее неблагоприятным условиям. Как видно из графиков, упругий момент в максимуме достигает 150 Н·м, что соответствует условию ограничения усилия в канате. Момент электродвигателя автоматически формирует максимальный, с учетом ограничений, тормозной момент, что и способствует ограничению упругого момента.

Скорость первой массы после выбора зазора снижается до нуля, а упругий момент поддерживается на уровне 50 Н·м, что обусловлено работой алгоритма управления (2).

На рис. 3 приведены графики, когда масса груза создает момент меньший, чем заданный упругий момент, в результате чего после выбора зазора груз отрывается от поверхности. В этом случае максимальное значение упругого момента меньше заданного ограничения в 150 Н·м. Это объясняется тем, что до достижения максимума упругого момента начинает разгоняться груз, в результате чего часть кинетической энергии накопленной в первой массе переходит в кинетическую энергию второй массы.

Следует отметить, что при выборе зазора и подъеме груза работает один и тот же алгоритм управления (2). Значение упругого момента не превышает максимально допустимой величины, принятой изначально. Колебательность переходных процессов практически отсутствует. Исходя из этого, можно говорить об автоматическом ограничении динамических нагрузок в электроприводе подъема

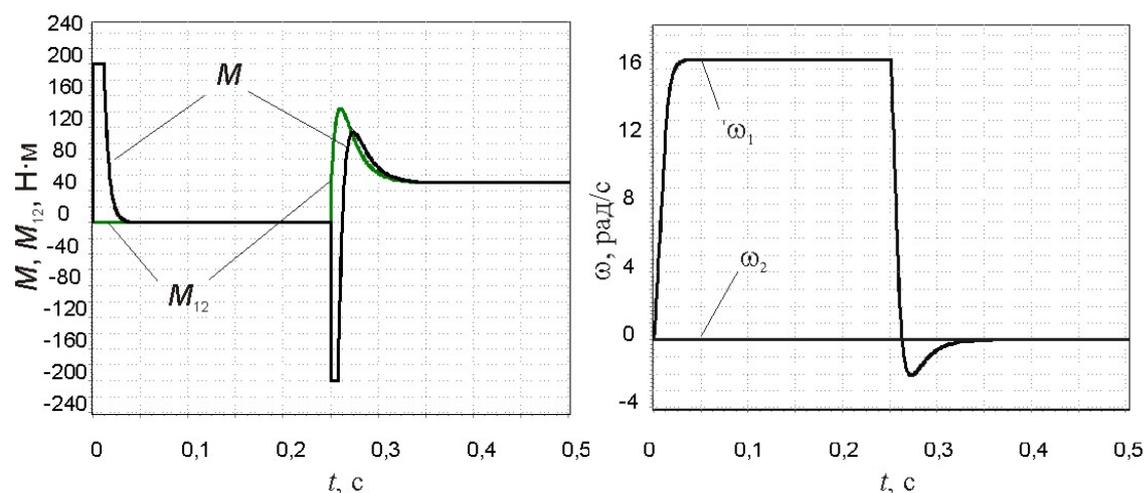


Рис. 2. Выбор зазора без отрыва груза от поверхности

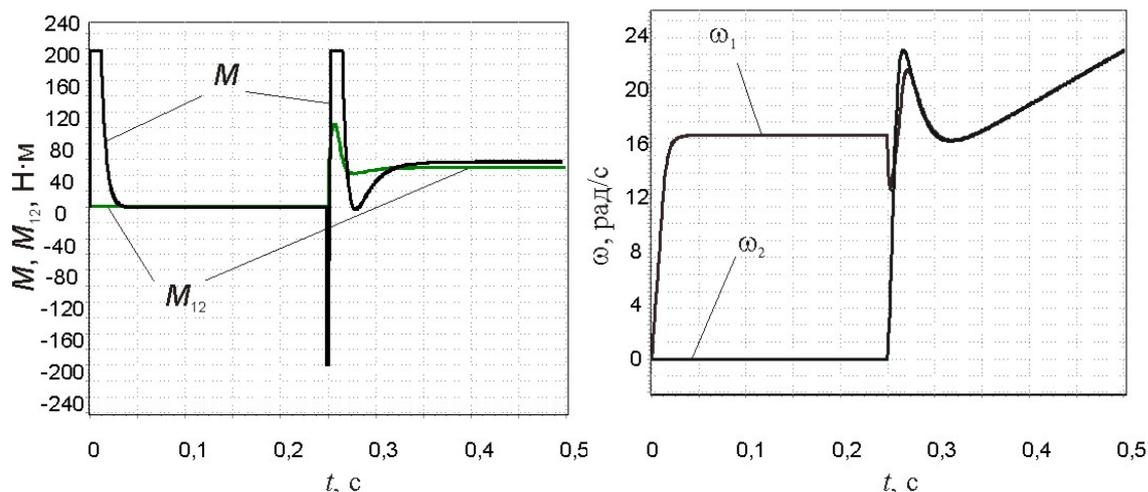


Рис. 3. Выбор зазора с отрывом груза от поверхности

мостового крана при максимально возможной скорости выбора зазора для наиболее неблагоприятных условий.

Проведенные исследования показали, что алгоритм управления упругим моментом можно использовать в электроприводе подъема кранового механизма, несмотря на нелинейность процесса отрыва груза от поверхности. При этом обеспечивается автоматическое ограничение динамических нагрузок при выборе зазора, что способствует повышению ресурса механической подсистемы привода.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров М.П., Колобов Л.Н., Лобов Н.А. и др. Грузоподъемные машины. – М.: Машиностроение, 1986. – 400 с.

#### Выводы

Определена зависимость, позволяющая рассчитать максимально допустимую скорость вала двигателя электропривода подъема к моменту окончания выбора зазора с учетом ограничений на усилие в канате.

Предложен алгоритм управления электроприводом подъема кранового механизма, обеспечивающий автоматическое ограничение динамических нагрузок при максимально возможном быстродействии в рамках неопределенности по отношению к массе груза с исключением колебательной составляющей переходного процесса.

2. Завьялов В.М. Снижение динамических нагрузок в трансмиссиях горных машин. – Кемерово, КузГТУ, 2008. – 172 с.

Поступила 17.01.2011 г.