ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 62-523

В.М. Завьялов, А.В. Гусев

УПРАВЛЕНИЕ СКОРОСТЬЮ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОДЪЕМА МОСТОВОГО КРАНА ПРИ ОГРАНИЧЕНИИ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

Введение

Мостовые краны используются в различных производственных процессах для транспортировки сырья, полуфабрикатов и готовой продукции. Надежность их функционирования непосредственно влияет на эффективность производства в целом. В связи с этим, при их проектировании закладывается четвертый класс надежности [1].

В то же время, при эксплуатации крановых механизмов около 80 % их поломок происходит в результате действий динамических нагрузок на его элементы [2], которые возникают в результате изменения нагрузок электроприводов крановых механизмов и проявляются в виде переходных процессов в их механических подсистемах обладающих упругой податливостью.

Таким образом, одним из основных направлений повышения эксплуатационной надежности крановых механизмов является снижение динамических нагрузок действующих на их элементы. Этого можно добиться, используя регулируемый электропривод, система управлений которого, используя информацию о текущем состоянии нагруженности элементов механических подсистем, будет формировать управляющее воздействие, препятствующее развитию переходных процессов колебательного характера.

В данной работе рассматривается вариант системы управления электроприводом подъема мостового крана, обеспечивающей снижения динамических нагрузок вызванных выбором слабины каната и процессом отрыва груза от земли.

Структура системы управления такого электропривода выбрана в соответствии с подходом изложенном в [3], в котором электрическая подсистема электропривода на базе асинхронного двигателя с автономным инвертором напряжения рассматривается как безынерционный источник момента, а для управления динамическим состоянием механической подсистемы в систему управления введен синергетический регулятор упругого момента.

Математическая модель

Рассмотрим математическую модель электропривода подъема мостового крана на базе асинхронного двигателя. В качестве модели асинхронного двигателя будем использовать общеизвестную модель, полученную на базе уравнений обобщенной электрической машины [4].

В системе координат u-v, вращающейся с произвольной скоростью ω_k эта модель описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} \dfrac{d\psi_{1u}}{dt}=u_{1u}-\dfrac{R_1}{L_1L_2-L_m^2}\left(L_2\psi_{1u}-L_m\psi_{2u}\right)+\omega_k\psi_{1v}; \\ \dfrac{d\psi_{1v}}{dt}=u_{1v}-\dfrac{R_1}{L_1L_2-L_m^2}\left(L_2\psi_{1v}-L_m\psi_{2v}\right)-\omega_k\psi_{1u}; \\ \dfrac{d\psi_{2u}}{dt}=-\dfrac{R_2}{L_1L_2-L_m^2}\left(L_1\psi_{2u}-L_m\psi_{1u}\right)+p(\omega_k-\omega)\psi_{2v}; \\ \dfrac{d\psi_{2v}}{dt}=-\dfrac{R_2}{L_1L_2-L_m^2}\left(L_1\psi_{2v}-L_m\psi_{1v}\right)-p(\omega_k-\omega)\psi_{2u}; \\ M=p\dfrac{L_m}{L_1L_2-L_m^2}(\psi_{1v}\psi_{2u}-\psi_{1u}\psi_{2v}), \end{cases} \quad (1)$$

где u_{1u}, u_{1v} – составляющие вектора напряжения статора; ψ_{1u}, ψ_{1v}, ψ_{2u}, ψ_{2v} – составляющие векторов потокосцеплений статора и ротора соответственно; R_1, R_2 – активные сопротивления статора и ротора; $L_1=L_{\sigma1}-L_m$, $L_2=L_{\sigma2}-L_m$ – полные индуктивности обмоток статора и ротора; $L_{\sigma1}$, $L_{\sigma2}$ – индуктивности рассеяния обмоток статора и ротора; L_m – взаимная индуктивность обмоток статора и ротора; ω – угловая скорость вала двигателя; p – число пар полюсов; M – электромагнитный момент двигателя.

Приняв конструкцию моста абсолютно жесткой, будем рассматривать модель механической подсистемы соответствующую двухмассовой расчетной схеме [2], где в качестве упругой связи выступает канат.

Для удобства синтеза алгоритмов управления и последующего анализа будем использовать все механические координаты и параметры системы, приведенные к валу двигателя. Движение механической подсистемы в этом случае будет описываться уравнениями:

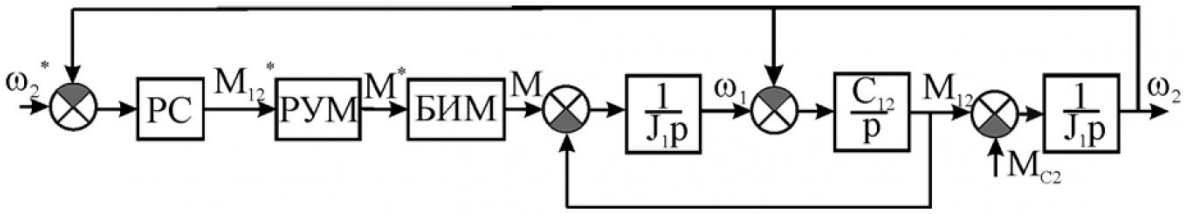

Рис. 1. Структурная схема электропривода подъема мостового крана

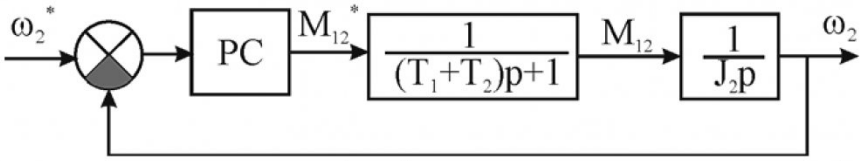

Рис. 2. Структурная схема электропривода подъема мостового крана используемая для настройки регулятора скорости

$$\left.\begin{aligned}
\dot{\omega}_1 &= \frac{1}{J_1}(M - M_{12} - M_{C1});\\
\dot{\omega}_2 &= \frac{1}{J_2}(M_{12} - M_{C2});\\
\dot{\varphi}_1 &= \omega_1;\\
\dot{\varphi}_2 &= \omega_1,
\end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

где ω_1, ω_2, J_1, J_2 – угловые скорости и моменты инерции первой и второй масс; M_{12} – упругий момент; M_{C1}, M_{C2} – моменты сопротивления действующие на первую и вторую массы; φ_1,φ_2 – положения первой и второй масс. К первой массе относится ротор двигателя и элементы механической передачи, а ко второй – поднимаемый груз.

Уравнение для упругого момента является нелинейным, и определяется угловыми положениями масс. Примем, что при φ_1 =0 и φ_2=0 будет такое состояние механической подсистемы привода подъема, когда слабина каната выбрана, но натяжение канта отсутствует. Упругий момент при этом в зависимость 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 системе, либо будет определяться выражением:

$$M_{12}=C_{12}(\varphi_1-\varphi_2) \text{ при } \varphi_1>\varphi_2,$$

что соответствует отрыву и подъему груза.

Помимо этого, упругий момент зависит от длины каната, которая изменяется по мере подъема или опускания груза, в соответствии с выражением:

$$C_{12} = \frac{ES}{l},$$

где E – модуль упругости; S – площадь сечения каната; l – длина каната.

Момент сопротивления создаваемый грузом также будет завесить от состояния механической системы. В процессе до отрыва груза 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, в процессе подъема момент сопротивления будет иметь постоянную величину, определяемую как:

$$M_{C2}=mg/i \text{ при } \varphi_2>0.$$

Приведенные выше зависимости позволяют произвести анализ динамического состояния электропривода подъема кранового механизма с асинхронным двигателем.

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.

Введение в систему управления регулятора упругого момента (РУМ) позволяет непосредственно воздействовать на величину M_{12}. Рассмотрим синтез регуляторов механических координат применительно к структуре системы управления приведенной на рис. 1. В ней электрическая подсистема привода представлена как безынерционный источник момента (БИМ) [3], что позволяет осуществлять синтез регуляторов механической координат, основываясь, только на математической модели механической подсистемы.

Приняв в качестве алгоритма для регулятора упругого момента зависимость, полученную для двухмассовой системы на базе синергетической теории управления [3],

$$M = M_{12} + \frac{J_1}{J_2}(M_{12} - M_C) -$$

$$- J_1\left(\frac{1}{T_1}+\frac{1}{T_2}\right)(\omega_1 - \omega_2) - \frac{J_1}{T_1 T_2 C_{12}}(M_{12} - M_{12}^*) \qquad (3)$$

где M^*_{12} – задание для регулятора упругого момента.

Представим структурную схему системы управления, в виде показанном на рис. 2. На ней РУМ совместно с БИМ, а также первой массы двухмассовой системы имеет вид апериодического звена первого порядка с постоянной времени $T=T_1+T_2$, где T_1, T_2 – настроечные параметры регулятора упругого момента. Это допустимо, так как регулятор упругого момента гарантирует апериодический переходный процесс по отношению к регулируемой величине.

На основании полученной структурной схемы настроим регулятор скорости (РС) на симметричный оптимум для подчиненного регулирования координат [5].

В результате, выбрав в качестве некомпенсируемой инерционности постоянную времени РУМ, получим пропорционально-интегральный регулятор с передаточной функцией:

$$W_{pc} = \frac{J_2}{2(T_1+T_2)}\left(1+\frac{1}{4(T_1+T_2)p}\right).$$

Результаты исследований

Исследования работы полученной системы управления проводились методом компьютерного моделирования. При этом, БИМ был организован путем моделирования асинхронного двигателя, в соответствии с зависимостями (1) и параметрами соответствующими двигателю 4А180М6У3. Напряжение, подводимое к двигателю, формировалось регулятором с градиентным управлением моментом посредством векторной ШИМ [3].

Модель механической подсистемы соответствует (2) с учетом нелинейности формирования упругого момента и момента сопротивления. В модели механической системы использовались параметры привода подъема мостового крана двубалочного опорного грузоподъёмностью 3,2 т. и высотой подъёма до 16 м, с массой поднимаемого груза две тонны.

Результаты моделирования замкнутой системы приведены на рис. 3 и 4 без зазора и на рис. 5 с зазором, вызванным провисанием каната.

Для сравнения, на рис. 6 приведены зависимости, полученные для асинхронного электроприво-

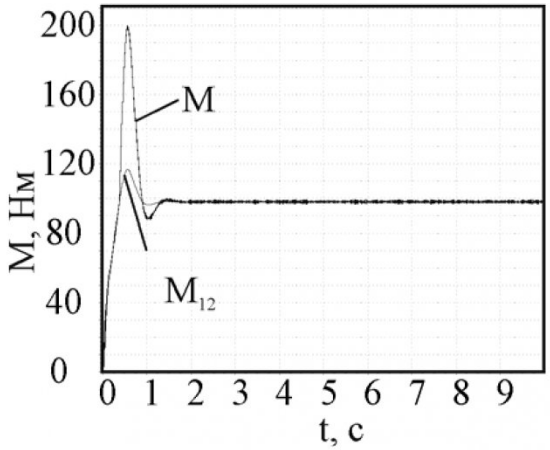

Рис. 3. Момент двигателя и упругий момент в системе без зазора

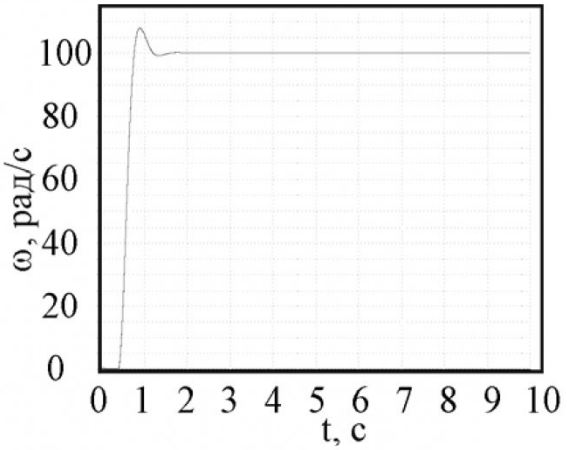

Рис. 4. Приведенная к валу двигателя скорость груза

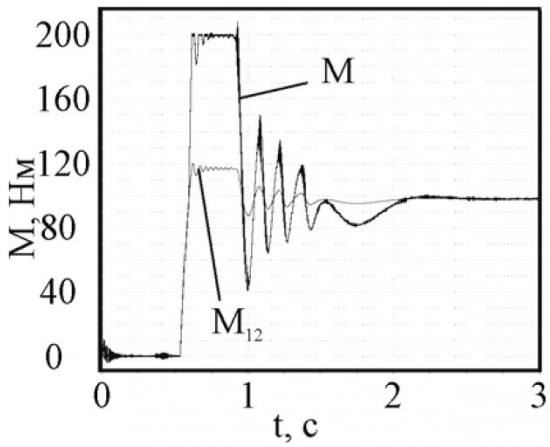

Рис. 5. Момент двигателя и упругий момент при наличии зазора в замкнутой системе

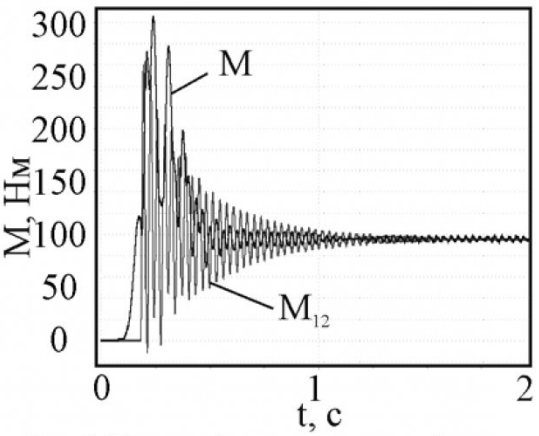

Рис. 6. Момент двигателя и упругий момент при наличии зазора в разомкнутой системе

да с разомкнутой системой частотного управления и S-образным нарастанием частоты при наличии зазора.

При отсутствии зазора, примерно в течении 0,4 с груз неподвижен, что объясняется натяжением каната до отрыва груза от опоры. При этом электромагнитный момент двигателя имеет относительно небольшое превышение над упругим моментом.

Это вызвано тем, что на этом участке $M_{12}=M_C$, в результате чего второе слагаемое в (3) равно нулю, $\omega_1>\omega_2$, в результате чего третье слагаемое в (3) дает отрицательный знак, а коэффициент перед ошибкой регулирования упругого момента мал из-за соотношения параметров системы.

После отрыва груза начинает сказываться компенсационная составляющая, пропорциональная разнице между упругим моментом и моментом сопротивления, в результате чего момент двигателя начинает интенсивно расти.

В конечном итоге, момент двигателя и упругий момент с перерегулированием, величина которого определяется настройкой РС, выходят на значение, равное моменту сопротивления. Приведенная угловая скорость груза также с небольшим перерегулированием выходит на заданный уровень.

При этом колебания упругого момента незначительны.

При наличии зазора в результате удара происходит резкое увеличение момента двигателя, которое ограничивается путем ограничения момента системой управления. При этом так же ограничивается и упругий момент. После разгона двигателя регулятор скорости снижает задание упругого момента, в результате чего он совместно с электромагнитным моментом двигателя стремится к величине соответствующей моменту сопротивления с незначительной колебательностью.

Сравнение работы замкнутой системы управления с разомкнутой, приведенной на рис. 6, показывает, что во втором случае переходный процесс имеет существенно большую как частоту, так и амплитуду колебаний.

Таким образом, анализ полученных результатов показал, что динамическое состояние системы с предложенной системой управления существенно улучшается в сравнении с разомкнутой системой электропривода.

Выводы

Разработанная на базе безынерционного источника момента и градиентного регулятора упругого момента система управления электроприводом подъема мостового крана позволяет снизить колебательность переходных процессов в механической подсистеме и ограничить динамические нагрузки при наличии зазора вызванные провисанием каната.

Использование полученной системы управления позволит повысить эксплуатационную надежность мостовых кранов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Максименко А.Н.,* Диагностика строительных, дорожных и подъемно-транспортных машин: учеб. пособие/ А.Н. Максименко, Г. Л. Антипенко, Г. С. Лягушев. – СПб.: БХВ-Петербург, 2008 г. – 302 с.

2. *Александров М.П.* Грузоподъемные машины: Учебник для вузов по специальности «Подъемно-транспортные машины и оборудование» / М.П. Александров, Л.Н. Колобов, Н.А. Лобов и др.: М.: Машиностроение, 1986 – 400 с.

3. *Завьялов В.М.* Снижение механических нагрузок в трансмиссиях горных машин. Кемерово, КузГТУ, 2008 – 172 с.

4. *Уайт Д.* Электромеханическое преобразование энергии / Д. Уайт, Г. Вудсон. –М.: Энергия, 1964 – 528 с.

5. *Ключев В. И.* Теория электропривода: учеб. для вузов. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2001. –704 с.

Авторы статьи:

Завьялов
Валерий Михайлович
- докт.техн.наук, доцент,
зав.каф. электропривода и
автоматизации КузГТУ.
Тел. 8(3842)39-30-45

Гусев
Алексей Владимирович
- аспирант, каф.электропривода и автоматизации
КузГТУ.
Тел. 8(3842)39-30-45