УДК 622.67

С.В.НУСС
Пермский государственный технический университет

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СВЯЗИ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ ПО СИСТЕМЕ АСИНХРОННОГО ВЕНТИЛЬНОГО КАСКАДА РУДНИЧНОЙ ПОДЪЕМНОЙ УСТАНОВКИ

Работа посвящена методике исследования электромеханической системы с упругой связью рудничной подъемной установки и электропривода по системе асинхронного вентильного каскада. Проведен анализ динамических свойств и электромеханической связи применительно к скиповой подъемной установке, оснащенной электроприводом по системе асинхронного вентильного каскада. Получено выражение для определения коэффициента электромеханической связи и приведены результаты применительно к конкретной установке.

The question of analysis of electromechanical system with elasticity coupling of mine hoisting plant with electric drive to the system of the asynchronous rectifier stage has been studied. The analysis of dynamic properties and electromechanical connection with reference elevating installation equipped by the electric drive on system asynchronously the cascade is carried out. Expression for analysis of electromechanical coupling coefficient was revised and the results to the specific plant are given.

Силовая схема рудничной подъемной установки включает регулируемый электропривод, подъемную машину, канаты и концевые грузы (подъемные сосуды). Эти элементы в совокупности образуют электромеханическую систему. Динамические процессы, протекающие в этой системе, зависят от характеристик и параметров всех элементов.

Электромеханическая система может быть представлена в виде двух частей: электрической части, характеризующей динамику электромагнитных процессов, протекающих в электроприводе, и механической части, характеризующей динамику механических процессов. Между электрическими и механическими процессами, протекающими в электромеханической системе, существует взаимосвязь*.

Механическая часть электромеханической системы рудничной подъемной установки представляет собой достаточно сложную динамическую систему, включающую сосредоточенные вращающиеся и линейно перемещающиеся массы и упругие весомые связи (канаты) между сосредоточенными массами.

В наибольшей степени взаимосвязь между электрической и механической частями проявляется и влияет на динамику электромеханических процессов и на дополнительные динамические нагрузки, на элементы электромеханической системы, в том случае, когда груженый подъемный сосуд находится в крайнем нижнем положении.

В этом случае, как показано в работе В.Е.Каторикова**, механическую часть можно привести к двухмассовой системе, в которой ведущая сосредоточенная масса m_1 и ведомая сосредоточенная масса m_2 связаны невесомой упругой связью, жесткость которой C_k равна жесткости груженой ветви каната. При этом масса груженой ветви каната учитывается в массах m_1 и m_2 с использованием коэффициента приведения, зависящего от длины каната H_k.

* *Ключев В.И.* Ограничение динамических характеристик нагрузок электропривода. М.: Энергия, 1971.

** *Каторикова В.Е.* Динамические режимы рудничного подъема / В.Е.Каторикова, А.Д.Динкель. М.: Недра, 1995.

Исходя из такого представления механической части, динамические процессы в ней описываются следующей системой уравнений:

$$\left.\begin{aligned} m_1\frac{d^2h_1(t)}{dt^2} &= F_{дв}(t)-C_k[h_1(t)-h_2(t)]-F_{в1}(t);\\ m_2\frac{d^2h_2(t)}{dt^2} &= C_k[h_1(t)-h_2(t)]-F_{в2}(t), \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

где C_k – жесткость каната, $C_k = E_k S_k / H_k$; $F_{дв}(t)$ – движущие усилия, развиваемые электродвигателем; $h_1(t), h_2(t)$ – перемещение соответствующих масс.

Применительно к рудничной подъемной установке возмущающими воздействиями на механическую часть являются: тормозное усилие, развиваемое механическим тормозом $F_{в1}(t)$, и усилие от загружаемого или разгружаемого груза $F_{в2}(t)$.

Электрическая часть электромеханической системы, динамическая характеристика которой отражает зависимость движущего усилия, создаваемого электромагнитным моментом электродвигателя, от выпрямленного напряжения инвертора в электроприводе по системе асинхронного вентильного каскада в общем случае является нелинейной, в силу того, что параметры электропривода зависят от скорости. Тогда динамические процессы в электрической части описываются следующим нелинейным дифференциальным уравнением:

$$T_\Sigma(\upsilon_1)\frac{dI_d(t)}{dt} + I_d(t) = \frac{1}{K_F R_\Sigma(\upsilon_1)} \times$$

$$\times[-E_{du}(t) + K_\upsilon \upsilon_1(t)], \quad (2)$$

где $\upsilon_1(t)$ – скорость перемещения массы m_1, $\upsilon_1(t) = dh_1(t)/dt$; $T_\Sigma(\upsilon_1), R_\Sigma(\upsilon_1)$ – электромагнитная постоянная и суммарное активное сопротивление цепи выпрямленного тока; K_υ – коэффициент пропорциональности между скоростью перемещения массы m_1 и выпрямленной ЭДС ротора.

Электромагнитная постоянная $T_\Sigma(\upsilon)$ и $R_\Sigma(\upsilon)$ суммарное активное сопротивление цепи выпрямленного тока при $\upsilon(t) = 0$ в электроприводе по системе асинхронного вентильного каскада описываются следующими выражениями:

$$T_\Sigma(\upsilon) = \frac{T_{\Sigma 0}}{1-(\rho_{1д}+\chi_д)\upsilon(t)/\upsilon_м}; \quad (3)$$

$$R_\Sigma(\upsilon) = R_{\Sigma 0}[1-(\rho_{1д}+\chi_д)\frac{\upsilon(t)}{\upsilon_м}], \quad (4)$$

где $\rho_{1д}, \chi_д$ – значения активного сопротивления обмотки статора и индуктивного сопротивления электродвигателя, выраженные в относительных единицах и приведенные к цепи выпрямленного тока; $\upsilon_м$ – максимальная скорость движения подъемных сосудов.

Движущее усилие, развиваемое электродвигателем,

$$F_{дв}(t) = K_F I_d(t), \quad (5)$$

где K_F – коэффициент пропорциональности между движущим усилием и выпрямленным током ротора.

Для выявления степени взаимосвязи между электрическими и механическими процессами в электромеханической системе необходимо провести анализ динамики процессов при воздействии на систему возмущения усилия $F_{в1}(p)$, приложенного к валу электродвигателя.

Согласно структурной схеме, передаточная функция электромеханической системы относительно движущего усилия и усилия в верхнем сечении каната запишутся в следующем виде:

$$W_{Fд} = \frac{F_д(p)}{F_{в1}(p)} = \frac{(m_2/C_k)p^2+1}{Q(p)}; \quad (6)$$

$$W_{Fk} = \frac{F_k(p)}{F_{в1}(p)} = \frac{(m_2/C_k)p(T_\Sigma p+1)}{Q(p)}, \quad (7)$$

где $Q(p) = a_4p^4 + a_3p^3 + a_2p^2 + a_1p + 1;$

$$a_1 = \frac{m_1+m_2}{K}; \qquad a_2 = \frac{T(m_1+m_2)}{K} + \frac{m_1}{C_k};$$

$$a_3 = \frac{m_1m_2}{KC_k}; \quad a_4 = \frac{Tm_1m_2}{KC_k}; \quad K = \frac{K_\upsilon K_E}{R_\Sigma}.$$

Исходя из выражений (3)-(7), представленных в операторной форме, составлена

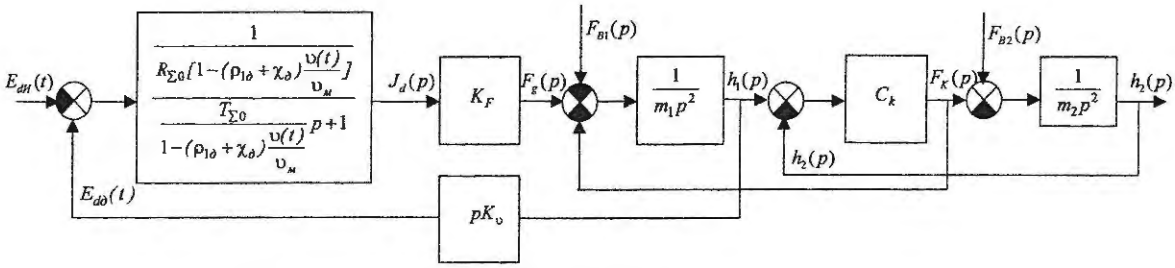


Рис.1. Структурная схема электромеханической системы рудничной подъемной установки

структурная схема электромеханической системы (рис.1).

В электромеханической системе электропривод, как активный элемент, оказывает демпфирующее воздействие на динамические процессы, протекающие в системе. Эффективность этого воздействия зависит от значений параметров отдельных элементов и их соотношений.

Для оценки динамических и частотных свойств электромеханической системы, а также установления степени демпфирующего воздействия целесообразно использовать амплитудно-частотные характеристики этой системы:

$$A_{F\text{д}}(\omega)=\sqrt{\frac{(1-(m_2/C_k)\omega^2)^2}{(a_4\omega^4-a_2\omega^2+1)^2+(a_3\omega^3-a_1\omega)^2}}; \quad (8)$$

$$A_{F\text{к}}(\omega)=\sqrt{\frac{(m_2^2\omega^2/K^2)(T_\Sigma^2\omega^2+1)}{(a_4\omega^4-a_2\omega^2+1)^2+(a_3\omega^3-a_1\omega)^2}}. \quad (9)$$

Для количественной оценки существенности электромеханической связи и проявления демпфирующих свойств электропривода используется коэффициент электромеханической связи, отражающий соотношение амплитуд колебаний движущего усилия $A_{F\text{д}}(\omega)$ и усиления в упругой связи $A_{Fk}(\omega)$ в зависимости от частоты,

$$K_{\text{э.с}}=\frac{A_{F\text{д}}(\omega)}{A_{Fk}(\omega)}=\frac{K}{m_2\omega}\sqrt{\frac{(1-(m_2/C_k)\omega^2)^2}{[T_\Sigma(\upsilon)]^2\omega^2+1}}. \quad (10)$$

На основании вышеизложенного проведен анализ динамических свойств и электромеханической связи применительно к скиповой подъемной установке, оснащенной электроприводом по системе асинхронного вентильного каскада. Исходные технические данные следующие: $R_{\Sigma 0}=0{,}35$ Ом; $T_{\Sigma 0}=0{,}1$ с; $\rho_{1\text{д}}+\chi_{\text{д}}=0{,}45$; $\upsilon_{\text{м}}=12$ м/с; $m_1=5{,}6\cdot10^3$ кГ·м/с^2; $m_2=2{,}4\cdot10^3$ кГ·м/с^2; $H_k=600$ м; $C_k=2\cdot10^4$ кГ/м; $K_F=6{,}3\cdot10^3$ кГ/А; $K_\upsilon=119$ В·с/м.

Как видно из графиков амплитудно-частотных характеристик рассматриваемой электромеханической системы (рис.2), рассчитанных по (8) и (9), амплитуда колебаний движущего усилия и усилия в упругой связи имеют явные максимумы. Они в значительной степени зависят от $T_{\Sigma 0}$, что является следствием демпфирующего действия электропривода, и при прочих равных условиях оно тем эффективнее, чем меньше $T_{\Sigma 0}$.

В электрической системе рудничной подъемной установки могут возникнуть колебания с частотой, равной частоте собственных колебаний механической части,

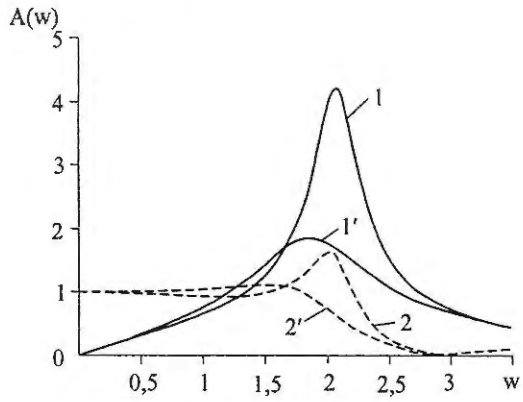


Рис.2. Амплитудно-частотные характеристики электромеханической системы
1, 2 – при $T_\Sigma=0{,}05$ с; 1′, 2′ – при $T_\Sigma=0{,}1$ с

$$\omega_c = \sqrt{C_k \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2}}. \qquad (11)$$

В силу того, что возмущения не имеют гармонической составляющей, оценку существенности электромеханической связи по коэффициенту электромеханической связи можно осуществлять при частоте собственных колебаний механической части. Область электромеханической связи, где в наибольшей степени проявляется демпфирующая способность электропривода, определяется пределами значений $0{,}2 < K_{э.с} < 5$.

По (10), (11) с учетом (5) и (6), в соответствии с техническими данными подъемной установки, рассчитаны зависимости $K_{э.с} = f(H_k)$ при граничных значениях $\upsilon/\upsilon_м = 0$ и $\upsilon/\upsilon_м = 1$. Из зависимостей, приведенных на рис.3, следует, что по мере перемещения подъемного сосуда по стволу, значение $K_{э.с}$ уменьшается и выходит за нижнюю границу области существенной электромеханической связи. Кроме того, необходимо отметить, что $K_{э.с}$ в значительной степени зависит от скорости перемещения массы m_1 в момент приложения возмущения.

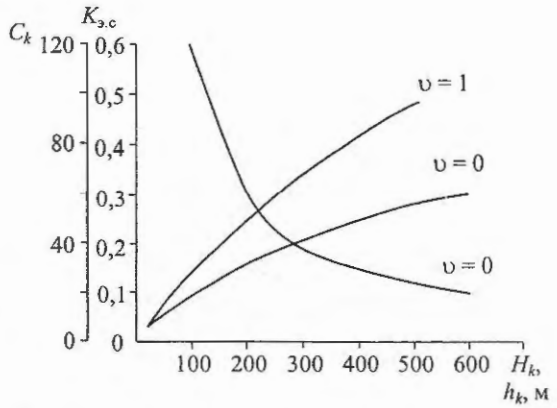


Рис.3. Графики зависимости $K_{э.с} = f(H_k)$ и $C_k = f(h_k)$

В заключение можно отметить, что при построении и оптимизации параметров системы автоматического регулирования координат электропривода с целью достижения наилучших динамических режимов, необходимо стремиться к тому, чтобы $K_{э.с}$ находился в пределах области существенной электромеханической связи во всем диапазоне регулирования скорости и перемещения подъемного сосуда.

Научный руководитель д.т.н. проф. *А.Д.Динкель*