

УДК 622.232.72

И. А. Горобец, канд. техн. наук, доцент
ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ», ДНР
E-mail: gorobets.ascon@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ПИКОВЫХ НАГРУЗОК ПРИВОДА ГОРНЫХ МАШИН

Описана необходимость учёта пиковых механических нагрузок в электромеханической структуре трансмиссии горного комбайна. Определены параметры механической характеристики приводных электродвигателей горных машин. Приведены условия проведения экспериментальных исследований для подтверждения результатов теоретических изысканий. Дан анализ результатов проведенных экспериментальных исследований. Даны рекомендации по использованию значений пиковых нагрузок в приводах горных машин.

Ключевые слова: нагрузка, привод, двигатель, момент, комбайн

I. Gorobets

INVESTIGATION OF PEAK LOADS OF MINING MACHIN TRANSMISSION

The necessity of taking into account peak mechanical loads in the electromechanical structure of the transmission of a mining machines is described. The parameters of the mechanical characteristics of the drive electric motors of mining machines are determined. The conditions for conducting experimental investigation to confirm the results of theoretical research are given. The analysis of the results of the conducted experimental investigation is given. Recommendations on the use of peak load values in the transmission of mining machines are given.

Keywords: load, transmission, motor, torque, shearer

1. Введение

Дальнейшее совершенствование конструкции горных машин связано с эффективным использованием эксплуатационной части жизненного цикла как самого изделия, так и его сборочных единиц. Для этого на стадии проектирования изделий горного машиностроения необходимо учитывать все возможные типы нагрузок, воздействующие на объект эксплуатации. Одной из важных составляющих нагруженности элементов изделия является учёт характера изменений и величины пиковых нагрузок, существенно снижающих потенциал долговечности объекта в рамках эксплуатационной части его жизненного цикла. Такие пиковые нагрузки, возникающие на исполнительном органе горной машины в процессе ее эксплуатации, существенно зависят от механических характеристик и потенциала, как привода изделия, так и его трансмиссии.

В качестве привода горных машин, как правило, используются электрические двигатели [1, 2, 3], в связи с этим для определения влияния пиковых нагрузок на проектируемый объект уместно рассматривать зависимость параметров максимальных нагрузок на исполнительном органе от параметров электромеханической системы проектируемого изделия. К электромеханическим параметрам горной машины, влияющим на эффективность расчётной эксплуатационной величины жизненного цикла, можно отнести как параметры электромеханического привода самого объекта, включающие коэффициент жёсткости трансмиссии, маховый момент ротора электрического двигателя и параметры его механической характеристики, так и параметры внешней среды, с которой взаимодействует исполнительный орган горного комбайна. К параметрам внешней среды относятся: твёрдость, пластичность, сыпучие характеристики, упругонапряжённые характеристики выгружаемого исполнительным органом угля, а также изменения напряжения питающей двигатель электрической сети и т. д.

Одной из конструктивных особенностей горных машин, является ограничение габаритов корпусной части объекта [1, 2, 3]. Наибольшую актуальность такие ограни-

чения имеют при проектировании горных комбайнов для выемки тонких пологих пластов, рис. 1, где габариты по высоте, как правило, не превышают 400-450мм, а мощность используемого электрического двигателя превышает 160 кВт. В некоторых конструкциях горных машин используются несколько приводных двигателей, например, как в машинах К-103 и УКД-300 (используется 2 двигателя). Работа двигателей многодвигательного привода осуществляется по двум различным схемам – на суммирующий и на индивидуальный вал. Таким образом, привод исполнительного органа очистных комбайнов представляет собой сложную электромеханическую систему, параметры которой предопределяются механической и электрической частями.

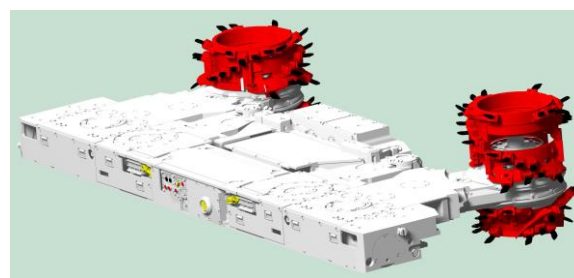


Рисунок 1. Вид очистных комбайнов со шнековым и барабанным исполнительными органами.

В связи с перечисленными конструктивными и эксплуатационными особенностями горных комбайнов, актуальным является вопрос определения величины пиковых нагрузок на электромеханический привод проектируемого изделия.

Целью исследований является определение пиковых значений внешней механической нагрузки горного комбайна для возможности учёта нагруженности электромеханического привода изделия на стадии ее проектирования.

2. Основное содержание и результаты

Выполнение поставленной цели исследований основывается на проведении теоретических и специальных экспериментальных исследований по определению величины пиковых механических нагрузок, воздействующих на электромеханическую систему горного комбайна.

Для проведения теоретических исследований были использованы методики, изложенные в [4, 5]. При моделировании рабочего процесса и дальнейшего теоретического исследования величины пиковой механической нагрузки на электромеханическую систему горного комбайна плавно изменяющаяся механическая характеристика электрического двигателя была линеаризована и представлена кусочно-ломанными отрезками прямой.

В качестве объекта исследований использовался очистной комбайн для выемки тонких пологих пластов модели КА-80. В настоящее время, в качестве электрических двигателей привода исполнительного органа используются асинхронные, короткозамкнутые двигатели с двухбелочей клеткой номинальным напряжением 660 или 1140 В. Рассмотрим возможные случаи конструктивного исполнения очистного комбайна с электродвигателями типов: ЭКВ 3,5-125У5 и ЭКВ-160У5. Для определения механической нагруженности электромеханического привода горного комбайна восполь-

зуюемся механическими характеристиками приводных электродвигателей. Кривые механических характеристик электрических двигателей линеаризуем при помощи методик [4, 5], см. рис.2. Для проведения теоретических расчётов воспользуемся исходными данными - номинальными значениями крутящих моментов электрических двигателей: $M_{H}^I=830$ Нм, для электродвигателя модели ЭКВ-3,5-125У5 и $M_{H}^{II}=970$ Нм для электродвигателя модели ЭКВ-3,5-160У5, соответственно.

При проведении теоретических исследований в качестве исходных данных так же использовались: передаточное число трансмиссии очистного комбайна $U_{TP}=26,55$; диаметр исполнительного органа по вершинам резцов $D_{uo}=1,0$ м; приведенный коэффициент жёсткости трансмиссии $K_c=3600$ Нм/рад; приведенный коэффициент жёсткости внешнего сопротивления – разрушаемого угольного массива.

Для определения приведенного коэффициента жёсткости трансмиссии очистного комбайна КА-80 с участием автора проводились стендовые экспериментальные исследования в условиях предприятия-изготовителя ОАО «Донецкий завод «Эксперимент». Методикой проведения экспериментальных исследований по определению приведенного коэффициента жёсткости трансмиссии очистного комбайна предполагались измерения угла закручивания вала электродвигателя в зависимости от величины приложенного крутящего момента при застопоренном исполнительном органе горного комбайна [6].

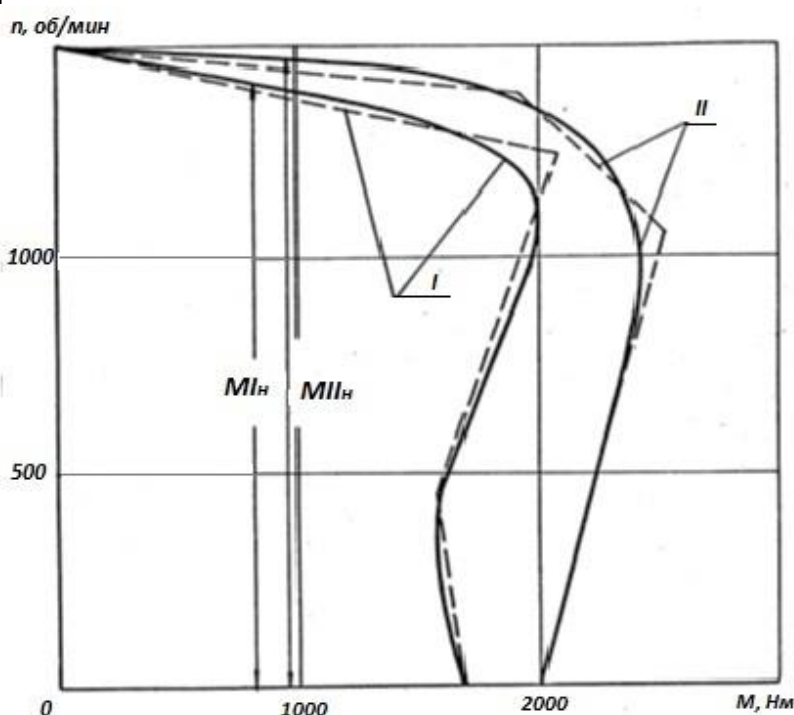


Рисунок 2. Графики механических характеристик (сплошная линия) электродвигателей ЭКВ 3,5-125У5(1) и ЭКВ 3,5 – 160У5(2) и их кусочная линеаризация (пунктирная линия)

Для определения значения коэффициента жёсткости внешнего сопротивления, приведенного к валу двигателя [7], необходимо задаться коэффициентом жёсткости внешнего сопротивления на исполнительном органе. В результате специально проведенных экспериментальных исследований в условиях выемки очистными комбайнами угольных пластов сложного строения, установлена величина коэффициента жёсткости внешней среды, равная $K_y^{uo} = (7,7 - 20) \cdot 10^5$ Н/м.

Определим граничные значения приведенных к валу электродвигателя коэффициентов жёсткости внешней среды K_y . Для этого используем в качестве исходных данных величины передаточного числа трансмиссии горного комбайна U_{mp} и диаметр его исполнительного органа D_{uo} .

$$K_y = 0,25K_y^{uo} D_{uo}^2 U_{mp}^2$$

Приведенный к валу электродвигателя коэффициент жёсткости системы определим по зависимости [6]

$$K = K_c / (K_c / K_y + 1)$$

Таким образом, приведенный к валу электродвигателя коэффициент жёсткости системы находится в пределах $K = 254 \dots 593$ Нм/рад.

Величину крутящих моментов в трансмиссии очистного комбайна произведём для верхних границ линеаризованных участков механической характеристики электродвигателя, рис. 2.

Для первого участка отрезка линеаризованной механической характеристики электродвигателя значение момента сил сопротивления определяется из выражения [4,5]

$$M_C^I = M_H^I + \frac{0,105Kn_c(1-S_H^I) \left[\gamma_2^2 (e^{\gamma_1 t_1^I} - 1) - \gamma_1^2 (e^{\gamma_2 t_1^I} - 1) \right]}{\gamma_1 \gamma_2 (\gamma_2 - \gamma_1)}$$

где $n_c=1500$ об/мин – синхронная частота вращения ротора электродвигателя; S_H – номинальное скольжение, γ_1, γ_2 – корни характеристического уравнения; t_1^I – время опрокидывания ротора электродвигателя от начала момента роста нагрузки на I участке.

Корни характеристического уравнения γ_1 и γ_2 определяются из выражения [4,5]

$$\gamma = \frac{-\frac{M_H^I}{S_H^I} \pm \sqrt{\left(\frac{M_H^I}{S_H^I}\right)^2 - 4 \cdot 0,105n_c^2 \frac{GD^2}{375} K}}{2n_c \frac{GD^2}{375}}$$

значение времени t_1^I определяется из выражения [4,5]

$$t_1^I = \frac{1}{\gamma_1} \ln \frac{\gamma_2 - \gamma_1}{\gamma_2 (S_H^I - 1)} \left(\frac{M_{max}^I}{M_H^I} S_H^I - 1 \right)$$

где GD^2 – маховый момент ротора двигателя; S_H – номинальное скольжение; M_{max}^I, M_H^I – максимальный и номинальный моменты на 1 участке, соответственно.

Для второго участка. Значение момента сил сопротивления в конце участка 2 определяется из выражения [4, 5]

$$M_{C2}^I = M_{C1}^I - n_{onp}^I \cdot 0,105K / (l_{1}^2 + \omega_1^2) x$$

$$x \left\{ \frac{e^{\alpha_1 t_2^I} \left[(A\alpha_1 + \alpha_1^2 - \omega_1^2) \sin \omega_1 t_2^I - (2\alpha_1 + A)\omega_1 \cos \omega_1 t_2^I \right] + 2\alpha_1 + A}{\omega_1} \right\},$$

где $n_{onp}^I = 1190$ об/мин – частота вращения ротора электродвигателя, соответствующая границе участков 1 и 2; K - коэффициент жёсткости системы, t_2^I – время опрокидывания двигателя на участке 2;

$$A = -375(M_{max}^I - M_{C1}^I) / (n_{onp}^I GD^2);$$

$$\alpha = 375 / (2n_{onp}^I GD^2);$$

$$m_1 = n_{onp}^I (M_{onp}^I - M_{23}^I) / (n_{onp}^I - n_{23}^I),$$

где M_{23}^I и n_{23}^I – соответственно момент, развиваемый двигателем, и частота вращения его ротора на границе участков 2 и 3, n_{onp}^I – частота вращения ротора электродвигателя, соответствующая границе участков 1 и 2.

$$\omega_1 = \frac{\sqrt{4 \cdot 0,105 \cdot K (n_{onp}^I)^2 \frac{GD^2}{375} - m_1^2}}{2n_{onp}^I \frac{GD^2}{375}}$$

Значение времени опрокидывания на участке 2 определяется из уравнения

$$\left(\frac{\omega_1 + \alpha_1^2}{2} + \alpha_1 A \right) (t_2^I)^2 + A t_2^I - \frac{M_{onp}^I - M_{23}^I}{m_1} = 0.$$

Для третьего участка отрезка линеаризованной механической характеристики значение максимального момента в трансмиссии определяется из выражения [4, 5]

$$M_{Cmax}^I = M_{C2}^I + n_{23}^I \cdot 0,105K \cdot l / (\alpha_2^2 + \omega_2^2) x$$

$$x \left\{ \frac{e^{\alpha_2 t_3^I} \left[\omega_2 (2\alpha_2 + B) \cos \omega_2 t_3^I - (B\alpha_2 + \alpha_2^2 - \omega_2^2) \sin \omega_2 t_3^I \right] + 2\alpha_2 - B}{\omega_2} \right\},$$

где

$$\alpha_2 = - \frac{m_2}{2n_{23}^I \frac{GD^2}{375}};$$

$$m_2 = M_{пуск}^I - M_{23}^I.$$

Здесь $M_{пуск}^I = 1670$ Нм – значение пускового момента электродвигателя

$$\omega_2 = \frac{\sqrt{4 \cdot 0,105 \cdot K (n_{23}^I)^2 \frac{GD^2}{375} - m_2^2}}{2n_{23}^I \frac{GD^2}{375}};$$

$$B = 375(M_{23}^I - M_{C23}^I)/(n_{23}^I GD^2) .$$

Значение времени t_3^I определяется из выражения [4]

$$t_3^I = \frac{1}{\omega_2} \arctg[\omega_2 / (\alpha_2 + B)]$$

Общее время опрокидывания электродвигателя определится суммой времён:

$$t_{опр}^I = \sum t_i^I = t_1^I + t_2^I + t_3^I$$

По указанной методике определяются также параметры механической характеристики электродвигателя ЭКВ 3,5-160У5, рис. 2.

При проведении расчётов использовались следующие данные механических параметров электродвигателя ЭКВ 3,5-125У5: $M_{max}^I = 1900$ Нм; $S_H^I = 0,05$; $GD^2 = 47$ Нм; электродвигателя ЭКВ 3,5-160У5: $M_{max}^{II} = 2410$ Нм; $S_H^{II} = 0,05$; $GD^2 = 47$ Нм.

Результаты расчётов пиковых параметров механических характеристик электродвигателей сведены в табл. 1.

Таблица.1. Результаты расчёта максимальных нагрузок привода комбайна КА-80

Параметр	Двигатель ЭКВ 3,5-125У5		Двигатель ЭКВ 3,5-160У5	
	$K=254$ Нм/рад	$K=593$ Нм/рад	$K=254$ Нм/рад	$K=593$ Нм/рад
M_{C1} , Нм	2360	2860	2320	2780
M_{C2} , Нм	3860	5050	3610	4560
M_{C3} , Нм	4000	5230	4790	5920
$t_{опр}$, с	0,129	0,0775	0,135	0,075

Для подтверждения теоретических исследований определения пиковых параметров механических характеристик электромеханических структур горных комбайнов были проведены (с участием автора) шахтные экспериментальные исследования на базе угольного пласта С₅ шахты «Терновская» ПО «Павлоградуголь». Угольный пласт С₅ характеризуется сложным строением, а средняя сопротивляемость угля резанию находилась в пределах 2000...2500 Н/м. В качестве объекта исследований использовался очистной комбайн КА-80, оснащённый электродвигателем ЭКВ 3,5-125У5.

В результате проведенных экспериментальных исследований установлена величина среднего времени опрокидывания электродвигателя, равная 0,12 с. При этом, мощность (следовательно, и крутящий момент) опрокидывания электродвигателя очистного комбайна превысила номинальную в 2 раза, рис. 3.

3. Заключение

Исследованы значения пиковых нагрузок электромеханической системы привода горных комбайнов на основе линеаризации кривой механической характеристики применяемых в трансмиссии изделий асинхронных электродвигателей. Определены теоретические значения времени опрокидывания и максимальных крутящих моментов электроприводов очистных комбайнов. Для подтверждения теоретических изысканий проведены специальные шахтные экспериментальные исследования, результаты которых подтвердили основные параметры теоретических расчётов пиковых нагрузок электромеханических систем привода горных комбайнов.

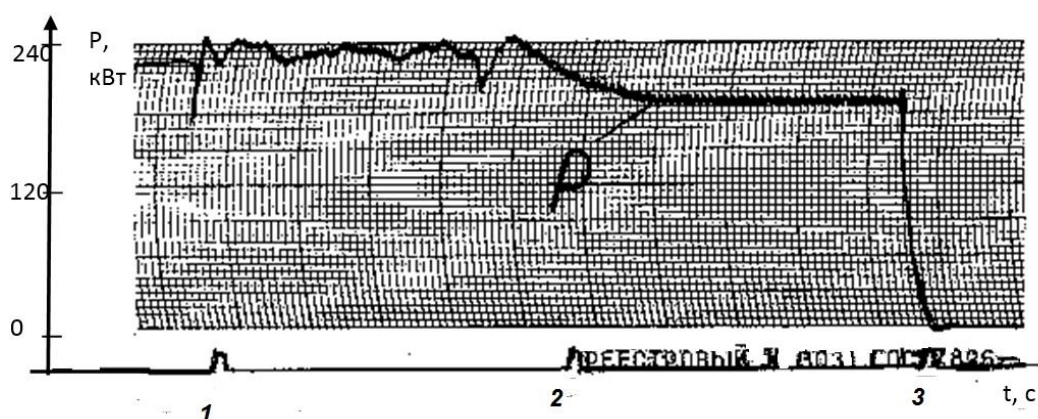


Рисунок 3. Фрагмент диаграммы мгновенной мощности электродвигателя ЭКВ 3,5 -125У5 очистного комбайна КА-80

Разработанная математическая модель определения пиковых нагрузок электро-механической системы может использоваться на стадии проектирования конструкций трансмиссий и привода горных машин, позволит выполнить теоретические исследования эффективности эксплуатационной части жизненного цикла изделия, а также выявить новые направления улучшения параметров электро-механического привода горных комбайнов.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Казаченко, Г. В. Горные машины. В 2 частях. Ч. 2. Машины и комплексы для добычи полезных ископаемых: учебное пособие / Г. В. Казаченко, В. Я. Прушак, Г. А. Басалай; под редакцией В. Я. Прушака. – Минск: Вышэйшая школа, 2018. – 232 с.
2. Гилёв, А. В. Горные машины и оборудование подземных разработок: учебное пособие к практическим занятиям / А. В. Гилёв, В. Т. Чесноков, В. А. Карепов, Е. Г. Малиновский. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2014. – 128 с.
3. Ефременков, А. Б. Горные машины и оборудование. Введение в специальность. Часть 1: учебное пособие / А. Б. Ефременков, А. А. Казанцев, М. Ю. Блащук. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009 – 152 с.
4. Альшиц, Я. И. Горные машины / Я. И. Альшиц, Б. А. Верклов, А. Н. Вороницкий и др. – М.: Госгортехиздат, 1961. – 492с.
5. Малеев, Г. В. Проектирование и конструирование горных машин и комплексов / Г. В. Малеев, В. Г. Гуляев, Н. Г. Бойко и др. – М.: Недра, 1988. – 368с.
6. Бойко, Н. Г. Динамические характеристики системы привода исполнительного привода очистного комбайна КА-80 / Н. Г. Бойко, А. В. Болтян, Н. Г. Нечпаев, В. Г. Шевцов, И. А. Горобец // Разработка месторождений полезных ископаемых: Респ. межвед. науч.-техн. сб. – Киев: Техника, 1985. – Вып. № 70. – С. 35-42.
7. Тагиева, Р. Ф. Обработка экспериментальных данных. В 2 частях. Ч.2: учебное пособие / Р. Ф. Тагиева, А. Н. Титов. – Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2018. – 136 с.

Поступила в редколлегию 02.02.2023 г.