

ХАРАКТЕРИСТИКИ МОМЕНТОВ ИНЕРЦИИ И СОПРОТИВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ОПРОКИДЫВАТЕЛЕЙ ШАХТНЫХ ВАГОНЕТОК

Резников А.И., студент,
Будишевский В.А., канд. техн. наук, проф.,
Донецкий национальный технический университет

Режим работы электропривода шахтных опрокидывателей характеризуется переменным моментом инерции $J(\alpha)$ и моментом сил сопротивления $M_C(\alpha)$ в функции угла поворота барабана α . Подобные зависимости влияют на выбор мощности двигателя и электромеханические характеристики электропривода опрокидывателя. По этому учёт этих зависимостей является актуальной задачей при проектировании систем электропривода. В данной работе рассматриваются зависимости моментов сил сопротивления $M_C(\alpha)$, момента инерции $J(\alpha)$ высыпающего груза на примере опрокидывателя ОК 3,0-720-90.

При повороте барабана опрокидывателя происходит высыпание груза, изменяются его вес, положение центра тяжести, а также момент инерции. Определим значения указанных величин для углов поворота барабана α от 0° до 180° , причем выберем $\Delta\alpha = 15^\circ$.

С учетом принятых допущений, при повороте барабана от 0° до 45° не происходит изменение веса, положения центра тяжести относительно барабана и момента инерции груза. На рис.1 представлено поперечное сечение кузова вагонетки. Размеры, указанные на чертеже, приведены в табл.1

Таблица 1 - Основные геометрические размеры кузова вагонетки ВГ 3,3-900 (в м)

М	М	М	М	М	М	М	М
1,009	0,939	0,371	0,567	0,071	0,638	1,276	3,038

Площадь поперечного сечения кузова вагонетки состоит из прямоугольника и полукруга.

Вес груза:

$$Q_{гр} = SL_{jn} = 5745 \text{ кг};$$

где: $S = Bh_1 + \frac{\pi R^2}{2}$ - площадь поперечного сечения кузова;

L – длина кузова;

$\rho = 1,7 \cdot 10^3$ - удельный вес породы.

Груз, приходящийся на единицу сечения кузова

$$q_s = \frac{Q_{zp}}{S} = 5164,5 \text{ кг/м}^2$$

Координата центра тяжести груза $u_{gr} = 0,49$ м.

Для вычисления момента инерции груза относительно оси вращения Z воспользуемся известной формулой :

$$J_z = q_s \iint_{(p)} (x^2 + y^2) dP$$

где (p) – область интегрирования (поперечное сечение кузова), ограничена сверху отрезком прямой $y=H$, снизу дугой окружности, $x^2 + (y-l)^2 = R^2$ и двумя абсциссами $x = -R$ и $x = R$

Для $0^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$ момент инерции равен:

$$J_z = q_s \int_{-R}^R dx \int_{l-\sqrt{R^2-x^2}}^H (x^2 + y^2) dy = 2q_s \left[\frac{\pi R^4}{8} + \frac{R^3}{3}(H-l) + \frac{\pi}{4} R^2 l^2 + \right. \\ \left. + \frac{1}{3} R(H^3 - l^3) \right], [\text{кг}]$$

Теоретически при повороте барабана опрокидывателя на угол $\alpha > 45^\circ$ вначале, из-за наличия желоба будет происходить перераспределение массы груза, а затем примерно при $\alpha \approx 75^\circ$ начнётся его высыпание. Поверхность груза при различных α показана на рисунке 2. Для вычисления момента инерции воспользуемся формулой (4), однако теперь область интегрирования (P) ограничена снизу той же дугой окружности, $x^2 + (y-l)^2 = R^2$, сверху – отрезком прямой $y - y_1 = -K(x+R)$, слева – абсциссой $X = -R$, справа – абсциссой $X = R$ для $\alpha < 75^\circ$ и $x = X_2$ для $\alpha > 75^\circ$. Здесь y_4 – ордината верхней точки желоба (при $\alpha \geq 75^\circ$), x_2 – абсцисса точки пересечения прямой (указанной) и дуги $K = \text{tg}(\alpha - 45^\circ)$.

$$J_z = q_s \int_{-R}^R dx \int_{l-\sqrt{R^2-x^2}}^{-K(x+R)+y_1} (x^2 + y^2) dy =$$

$$\begin{aligned}
&= q_s \left\{ \frac{1}{4} \left[\frac{1}{3 \operatorname{tg}^2 \gamma} + \frac{1}{\operatorname{tg} \gamma} \right] (R^4 - x_3^4) + \frac{1}{3} \left[y_4 + \frac{y_4}{\operatorname{tg}^2 \gamma} - \frac{R}{\operatorname{tg} \gamma} - \frac{R}{\operatorname{tg}^3 \gamma} \right] (R^3 - x_3^3) + \right. \\
&+ \frac{1}{2} \left[\frac{y_4^2}{\operatorname{tg} \gamma} - \frac{2Ry_4}{\operatorname{tg}^2 \gamma} - \frac{R^2}{\operatorname{tg}^3 \gamma} \right] (R^2 - x_3^2) + \left. \left[\frac{y_4^3}{3} - \frac{y_4^3 R}{\operatorname{tg} \gamma} + \frac{y_4 R^3}{\operatorname{tg}^2 \gamma} - \frac{1}{3} l^3 - lR^2 \right] \times \right. \\
&\times (R - x_3) + \frac{1}{12} \left[\frac{1}{2} \Pi R^4 - x_3 (2x_3^2 - R^2) \sqrt{R^2 - x_3^2} - R^4 \arcsin \frac{x_3}{R} \right] + \\
&+ \left. \frac{1}{2} \left(l^2 + \frac{1}{3} R^2 \right) \left(\frac{\Pi R^2}{2} - x_3 \sqrt{R^2 - x_3^2} + R^2 \arcsin \frac{x_3}{R} \right) \right\}. \\
x_3 &= \frac{-(y_4 \operatorname{tg} \gamma - l \operatorname{tg} \gamma - R) + \sqrt{(y_4 \operatorname{tg} \gamma - l \operatorname{tg} \gamma - R)^2 - \left[(y_4 \operatorname{tg} \gamma - l \operatorname{tg} \gamma - R)^2 - R^2 \operatorname{tg}^2 \gamma \right] (\operatorname{tg}^2 \gamma + 1)}}{\operatorname{tg}^2 \gamma + 1}
\end{aligned}$$

$$y_3 = y_4 - \frac{R - x_3}{\operatorname{tg} \gamma}$$

Полученная формула позволяет рассчитывать моменты инерции груза при углах поворота барабана $\alpha > 45^\circ$.

Для приведения момента инерции к быстроходному валу редуктора использована формула:

$$J'_{\alpha\delta} = J_{\alpha\alpha} \cdot \frac{1}{i^2},$$

где i – передаточное отношение системы привода.

Определение момента инерции барабана опрокидывателя, вагонетки и передаточных звеньев (ведущая цепь, редуктор), выполнено экспериментально. При этом по результатам осциллограммы найдены потери в роторе при пуске вхолостую и при пуске с опрокидывателем и пустой вагонеткой (за вычетом потерь, обусловленных наличие момента сил сопротивления). Момент инерции механизма

$$I_{\text{мех}} = \left(\frac{W_{Q_{2\text{ПМ}}}}{W_{Q_{2\text{ПХ}}}} - 1 \right) I_{\text{ДВ}}$$

где $I_{\text{мех}}$ – момент инерции опрокидывателя с вагонеткой без груза;
 $I_{\text{ДВ}}$ – момент инерции ротора двигателя;

W_{Q2PM} – потери энергии в роторе, идущие на разгон масс механизма и двигателя; W_{Q2PX} – потери энергии в роторе, идущие при пуске вхолостую.

Моменты инерции опрокидывателей с порожней вагонеткой равны $0,3167 \text{ кГм}^2$ для ОПЗПВ, а у ОК 3.0-360-90 – $0,3077 \text{ кГм}^2$. Таким образом, опрокидыватель ОК в указанном случае имеет приведенный момент инерции на 2,92% меньше, чем ОНВ. Результирующий момент инерции опрокидывателей находится по формуле:

$$J_2 = J'_{2p} + I_{мех}$$

Кривые изменения моментов инерции и функции угла поворота барабана опрокидывателя представлены на рис. 3

При повороте барабана на от 0^0 до 45^0 , момент инерции остаётся постоянным. Увеличение момента инерции при $\alpha=75^0$ обусловлено изменением сечения груза. Максимальное значение момента инерции отличается на 21,52% (ОНЗПВ) и на 22,03% (ОК3.0-360-90) от значения при пуске, конечное значение – соответственно на 23,96% и 24,67%.

Постоянство моментов инерции при пуске и неизменности передаточного отношения системы привода позволяют пользоваться для анализа пусковых процессов уравнением движения:

$$M + M_c = J \frac{dw}{dt}$$

Кроме того, наблюдая за процессами насыпания груза и кинограммой этого процесса, видим, что уравнение движения справедливо для всех этапов анализа, так как угловые скорости высыпавшихся частиц груза и вагонеток одинаковы. Это существенное упрощение уравнения движения позволяет значительно облегчить анализ динамических режимов работы опрокидывателей.

Суммарный статический момент на валу двигателей создаётся моментом от дебалансного веса барабана с вагонетками $M_{дб.}$, моментом от веса груза $M_{гр.}$, моментом сил трения $M_{тр.}$. Найдены значения моментов $M_{дб.}$ и $M_{гр.}$ для опрокидывателя ОК 3.0-720-90.

Аналогичный расчет выполнен для рассматриваемых типов опрокидывателей.

Момент сил трения может быть найден по формуле:

$$M_{тр} = K(N_1 + N_2),$$

где: $K=6 \cdot 10^{-4} \text{ м}$; N_1 и N_2 – силы давления барабана на ролики.

Силы давления на ролики можно приближенно считать равными:

$$N_1 + N_2 = \frac{Q}{\cos \beta}$$

где Q – вес барабана с вагонетками и невысыпавшимся грузом;
 β – угол между линией, соединяющей оси вращения катков и барабана.

При более точных расчетах необходимо учитывать, что это значение уменьшится на величину

$$\frac{Q}{g} \omega^2 r \cdot \cos \alpha - \text{инерциальную силу}$$

Здесь ω – угловая скорость; r – расстояние от центра тяжести до оси вращения; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$;

для нижних положений инерциальную силу можно рассматривать без массы груза (не только потому, что происходит высыпание, но и ввиду пренебрежения слипания частиц и налипания их на днище кузова.)

Таким образом, момент сил трения равен:

$$M_{тр} = K(Q_d + Q_{zp}) \cdot \frac{1}{\cos \alpha}$$

Суммарный момент относительно барабана:

$$M'_c = M_{дб} + M_{zp} - M_{тр}$$

Относительно быстроходного вала редуктора:

$$M_\tau = \frac{M'_c}{\eta \cdot i},$$

где: η – К.П.Д. передачи.

На рис. 4 приведены расчетные кривые изменения моментов сил сопротивления опрокидывателей ОНЗПЗ и ОК 3.0-310-90 для полного цикла работы механизма.

При вращении барабана в направлении разгрузки от 0° до 180° , момент M_c нарастает до максимума при $\alpha \approx 75^\circ$, а затем уменьшается, становясь отрицательным. При $M_{cc} > 0$ двигатель работает в генераторном режиме, передавая энергию неуравновешенного груза в сеть. После насыпания части груза начинает преобладать момент от дебаланса барабана и вагонеток асинхронная машина переходит в двигательный режим и доводит барабан до упора. Излишняя энергия движущихся масс гасится пружинными амортизаторами. При возвращении барабана в исходное положение двигатель также работает в генераторном режиме (ОНВ) или близком к нему (ОК) режиме. Налипание горной массы на днище и стенки вагонеток

приводит к уменьшению значений моментов при возвращении барабана в исходное положение.

Если при работе опрокидывателя происходит частичная или полная заштыбовка катков разгружаемой массой, то увеличиваются максимальные моменты в цикле. Опрокидыватель новой конструкции ОК имеет большой максимальный момент при разгрузке.

Экспериментальная проверка моментов сил сопротивления в статике приведена с помощью динамометрии. Исследования выполнены для опрокидывателей ОК 3.0-360-90 (в условиях шахты «Украина» производственного объединения «Красноармейскуголь») и ОНЗПВ (в условиях шахты «Кировская» производственного объединения «Донецкуголь»).

Неуравновешенные моменты найдены из соотношения:

$$M_{\partial б} + M_{зр} = \frac{1}{2} [F(\alpha + \Delta\alpha) + F(\alpha - \Delta\alpha)]R,$$

где R – радиус барабана.

Момент сил трения равен:

$$M_{тр} = \frac{1}{2} [F(\alpha - \Delta\alpha) - F(\alpha + \Delta\alpha)]R.$$

Результаты испытания показали хорошую сходимость (в пределах 8,5%) расчетных и экспериментальных значений при уровнях загрузки вагонеток близких к теоретическим.

Определение моментов сил сопротивления в динамических режимах работы произведено с помощью тензометрического метода в условиях тех же шахт.

При работе опрокидывателя момент сил сопротивления дважды меняет знак при разгрузке вагонеток. При анализе приписывается знак скорости, если их направления совпадают, в противном случае знак момента противоположен знаку скорости. Скорость двигателя при разгрузке вагонеток имеет положительный знак, при возвращении барабана – отрицательный. Знаки моментов и скоростей проиллюстрированы на рис. 4.

Здесь M_1 – момент двигателя и насосного колеса гидромурфты; M_2 – момент механизма; ω_1 – угловая скорость вращения ротора двигателя; ω_2 – угловая скорость вращения турбины гидромурфты и быстроходного вала редуктора; ω_6 – угловая скорость вращения барабана.

При таких допущениях в уравнении движения барабана перед моментом сил сопротивления должен быть знак плюс.

В результате тензометрических исследований построены зависимости момента сил сопротивления и функции угла поворота барабана $M_2(\alpha_6)$. Эти зависимости показаны на рис. 5.

Полученные динамические зависимости $M_2(\alpha)$ существенно отличаются от расчетных и статических. После пуска двигателя происходит выбор зазоров в системе, пусковое значение момента сил сопротивления мало, затем приходит во вращение барабан. Вагонетки, как правило, загружены с «горкой», приводная цепь крепится с одной стороны барабана, а поэтому из-за конечной жесткости системы и барабана происходит быстрое нарастание момента, причем его значение превышает расчетные для тех же углов поворота α_6 . Затем масса, насыпанная выше уровня борта, пересыпается и разгрузка начинается ранее расчетного угла 75° . Сам процесс разгрузки существенно отличается от расчетного. На основании анализа кинограмм установлено, что при разгрузке угол естественного откоса изменяется в пределах $20-80^\circ$. Выгруженная масса имеет различную влажность, кусковатость и удельный вес отдельных частиц. Зазор между барабаном и кожухом опрокидывателя равен 0.2м, скорость просыпания горной массы через этот зазор меньше скорости поступления массы из вагонетки. Кроме того, собственная скорость свободного скачивания груза по кожуху ниже линейной скорости верхней части рамы барабана. В результате совместного действия этих двух факторов появляется дополнительный реактивный момент, препятствующий движению барабана и уменьшающий активный момент груза. Аналитический расчет этого дополнительного момента весьма затруднителен.

При $\alpha_6 > 120^\circ$ зазор между барабаном и кожухом растёт (изменяется форма кожуха.) Однако полного высыпания груза еще не произошло. При $\alpha_6 \approx 150^\circ$ реактивный момент резко возрастает в связи с тем, что происходит полное высыпание груза, который теперь уже сдвигается в бункер внутренним боком вагонетки и рамы. По мере просыпания горной массы в бункер реактивный момент уменьшается.

При возвращении барабана в исходное положение фактические моменты сил сопротивления отличаются от расчетных из-за неполной выгрузки вагонеток (ввиду недостаточной эффективности существующих средств виброочистки происходит постепенное налипание частиц угля или породы, достигающее до 1/3 объема вагонеток), роста момента сил трения при просыпании груза на катки и др. причин.

Список источников.

1. Пейсахович Г.Я. , Ремизов И.П. Справочник по шахтному транспорту, «Недра», 1977, 624с.

2. Голован А.Т. Основы электропривода. М.-Л. ГЭИ, 1959, 334с.