

УДК 622.015.002.5

Р.Ю. Подэрни, Р.А. Бочаров, М.С. Холиков

**СИЛОВОЙ И КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ
ПАРАМЕТРОВ ПРИВОДОВ РАБОЧЕГО
ОБОРУДОВАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ДРАГЛАЙНОВ**

Выполнен анализ влияния кинематических и силовых параметров приводов рабочего оборудования драглайна на его забойную производительность

Ключевые слова: карьерный драглайн, поворотное и траекторное движение ковша, забойная производительность, угол поворота драглайна.

В общей технологии открытых горных работ при разработке месторождений, сложенных мягкими породами, одними из основных производственных процессов являются вскрышные и перевалочные работы с применением драглайна.

Экскаватор – драглайн (см. рис. 1) это полноповоротная выемочная горная машина, предназначенная для работы на карьерах и разрезах по бестранспортной системе разработки, при работе на отвалах и при пере экскавации горной массы. В технической литературе имеются многочисленные сведения о результатах теоретических исследований [1] и опытно – промышленных работах [4] по оценке производительности драглайнов. Однако предлагаемые методы расчета производительности, как правило, не позволяют получить результат, адекватный промышленным данным.

Считается, что при отработке уступа забойная производительность карьерного драглайна зависит от многих взаимосвязанных между собой факторов, например, трудности разработки горной массы, которая оценивается категорией породы или ее прочностью. При разработке, например, влажной глинистой породы, которая налипает на ковш, уменьшается объем последнего, и увеличивается продолжительность цикла из-за более длительной разгрузки ковша. В зимних условиях плохо раздробленный мерзлый грунт также снижает коэффициент наполнения ковша.

Забойная производительность драглайна [3] обычно определяется по формуле

$$Q = \frac{3600}{T_{цз}} \frac{K_n}{K_p} (1 + R_{вол}) E, \text{ м}^3 / \text{час} \quad (1)$$

где E – вместимость ковша, м^3 ; $R_{вол}$ – отношение объема призмы волочения к объему ковша; $T_{цз}$ – продолжительность цикла поворота верхнего строения драглайна на произвольный угол – φ_3 , с; K_n – коэффициент наполнения ковша; K_p – коэффициент разрыхления породы в ковше.

Для реализации рабочего цикла современные карьерные драглайны имеют механизм поворота с индивидуальным приводом, состоящим из двух или более самостоятельных механизмов, работающих на один зубчатый венец.



Рис. 1. Мощный экскаватор – драглайн

$\varphi_n=135^\circ$, с, здесь: t_q – длительность черпания, с; t_{nz}, t_{mn} – длительность поворота верхнего строения драглайна с грузным и порожним ковшем, соответственно, с.

Забойная производительность драглайна (1) с учетом результата (2) будет иметь вид $Q = 11,1610^3 \frac{E}{T_{цн}} \frac{K_n}{K_p} \frac{1 + R_{гол}}{1 + 2,1 \varphi_3 / \varphi_n}, м^3 / час$ (3)

При определении мощности необходимо учесть, что электродвигатели механизмов поворота драглайна работают со знакопеременной нагрузкой. При этом средневзвешенную мощность электродвигателей следует определять для условий разгона и торможения платформы с грузным и порожним ковшем.

При известном моменте инерции вращающихся частей драглайна средневзвешенную мощность двигателя механизма поворота определяют из уравнения кинетической энергии системы «двигатель – платформа» для периодов ее разгона и торможения с грузным и порожним ковшем.

Работа сил инерции при разгоне платформы драглайна равна запасу кинетической энергии его вращающихся частей:

$$A = 0,5I\omega^2, Нм \quad (4)$$

где I – суммарный момент инерции платформы с грузным (или порожним) ковшем, $кг м^2$; ω – угловая скорость вращения платформы, $рад/с$.

В качестве двигателей механизма поворота драглайнов используют двигатели постоянного тока с независимым возбуждением, которые при торможениях платформы обычно работают в режимах динамического торможения или противовключения тока. Известно, что режим противовключения является наиболее тяжелым с точки зрения нагрева двигателя. Поэтому при определении работы сил инерции при торможениях следует ориентироваться на данный режим.

Средневзвешенная мощность двигателей механизма поворота составит [3]

$$N_n = \frac{k_n \omega^2 (I_z + I_n)}{2(t_{nz} + t_{mn})} \left(\frac{1}{\eta_n} + 3\eta_n \right), Вт \quad (5)$$

где k_n – коэффициент, учитывающий увеличение момента инерции поворотной

Известно, что поворот драглайна с грузным ковшем и возврат в забой занимает до 70% длительности рабочего цикла [4]. Следовательно, продолжительность цикла поворота верхнего строения драглайна в конкретном забое на угол – φ_3 следует определять по формуле

$$T_{цз} = \frac{T_{цн}}{3,1} \left(1 + 2,1 \frac{\varphi_3}{\varphi_n} \right), с \quad (2)$$

где $T_{цн} = t_q + t_{nz} + t_{mn}$ – продолжительность цикла поворота верхнего строения драглайна на паспортный угол,

платформы драглайна за счет момента инерции якоря электродвигателей $k_{я} = 1,1$ [3]; η_n – КПД трансмиссии многодвигательного механизма поворота; $I_r I_{п}$ – моменты инерции поворотной платформы драглайна с груженым и порожним ковшем.

Уравнение (5) с учетом того, что практически $t_{пр} \approx t_{пп}$ и $k_{я} = 1,1, \eta_n = 0,8$, после некоторых алгебраических преобразований принимает вид:

$$N_n = \frac{(I_z + I_n)\omega^2}{t_{nz}}, \text{ Вт} \quad (6)$$

В выражении (6) длительность поворота верхнего строения драглайна с груженым ковшем – t_{nz} с учетом уравнения (2) составляет:

$$t_{nz} = 210^{-3} T_{уп} \varphi_3, \text{ с} \quad (7)$$

В свою очередь момент инерции поворотной платформы драглайна с груженым ковшем определится как:

$$I_z = k_z (m_k + m_n) R^2, \text{ кгм}^2 \quad (8)$$

где k_z – коэффициент, учитывающий момент инерции вращающихся частей драглайна (поворотной платформы, стрелы с блоками, ковша с породой и без нее относительно оси вращения платформы) при повороте с груженым ковшем $k_z = 1,74$ [3]; m_k – масса ковша и породы, соответственно, кг; R – радиус инерции маховых масс поворотной части драглайна, м.

В начале поворота драглайна на выгрузку с груженым ковшем (в конце черпания) машинист осуществляет синхронизацию поворотного и траекторного движения ковша во взаимно перпендикулярных плоскостях. При этом радиус инерции маховых масс поворотной части драглайна равен $R = r$. Здесь r – наименьший радиус выгрузки (наименьший радиус положения ковша драглайна в конце черпания), определяемый суммой радиусов вращения хвостовой части подкрановых балок и оси пят стрелы [2]. В момент разгрузки ковша $R = R_q$. Здесь R_q – наибольший радиус черпания или выгрузки драглайна [2].

Учитывая то, что радиус инерции маховых масс драглайна принимает максимальное значение $R = R_q$ одновременно с достижением величины угла поворота – φ_x , после которого радиус инерции не зависит от конечного угла поворота драглайна – φ_3 (см. рис. 2), то есть:

$$R(\varphi) = r + \frac{R_q - r}{\varphi_3} \varphi, \text{ м} \quad \text{при} \quad 0 \leq \varphi \leq \varphi_x \quad (9)$$

$$R = R_q, \text{ м} \quad \text{при} \quad \varphi_x \leq \varphi \leq \varphi_3 \quad (10)$$

При повороте платформы драглайна с груженым ковшем на разгрузку требуется «травление» тягового каната, поэтому работа тягового механизма протекает при повышенных скоростях, превышающих номинальную на 10 – 20% [3], то есть скорость движения тягового каната при повороте драглайна на выгрузку составит

$$\mathcal{G}_m = (1,1 \div 1,2) \mathcal{G}_{m0}, \text{ м/сек} \quad (11)$$

где \mathcal{G}_{m0} – средняя скорость подтягивания ковша драглайна, м/сек.

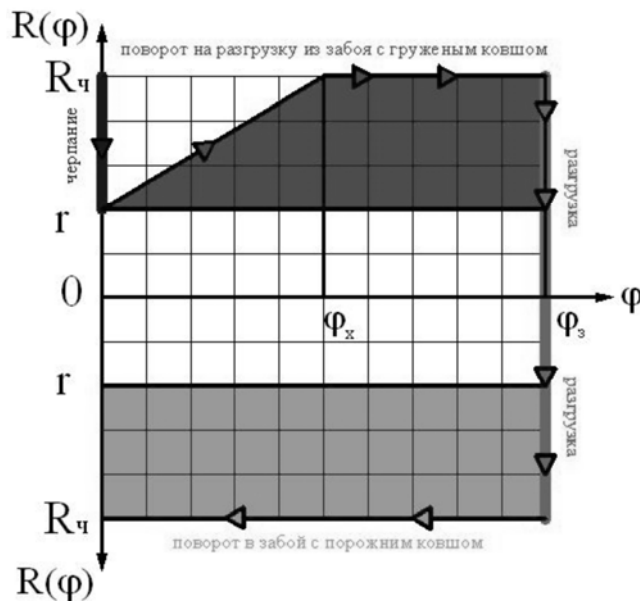


Рис. 2. Зависимость радиуса инерции $-R(\varphi)$ от угла поворота драглайна $-\varphi$ при синхронизации поворотного и траекторного движений

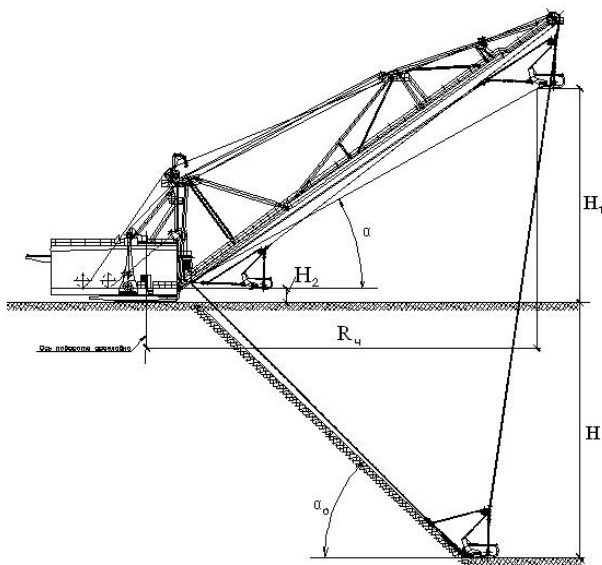


Рис. 3. Расчетная схема определения кинематики траекторного и поворотного движения ковша драглайна

здесь n - число оборотов поворотной платформы драглайна при установившемся движении в минуту, *об/мин* [2].

Угол $-\alpha$, образованный наклоном касательной траектории движения ковша в вертикальной плоскости к горизонтали, в соответствии с расчетной схемой (см. рис. 3) определяется из выражения

$$\alpha = \arctg \frac{H_1 - H_2}{R_{\text{ч}}}, \text{ рад} \quad (12)$$

Соответственно скорость траекторного движения ковша в горизонтальной плоскости с учетом уравнения (12) составит:

$$g_2 = g_m \cos \arctg \frac{H_1 - H_2}{R_{\text{ч}}}, \text{ м/сек} \quad (13)$$

Длительность достижения радиусом инерции величины наибольшего радиуса выгрузки ковша драглайна $-R_{\text{ч}}$ при его траекторном движении в горизонтальной плоскости определится как частное от деления $R_{\text{ч}} / g_2$. С другой стороны длительность достижения радиусом инерции величины наибольшего радиуса выгрузки ковша драглайна $-R_{\text{ч}}$ при его поворотном движении определяется как частное от деления φ_x / ω . С учетом синхронизации двух движений ковша и с учетом того, что $\omega = \pi n / 30$ (рад/с) угол поворота $-\varphi_x$, после которого радиус инерции R не зависит от конечного угла поворота драглайна, составит:

$$\varphi_x = \frac{30 \pi R_{\text{ч}}}{g_m \cos \arctg(H_1 - H_2) / R_{\text{ч}}}, \text{ рад} \quad (14)$$

Момент инерции драглайна при поворотном движении порожнего ковша в забой определится как:

$$I_n = k_n m_k R_q^2, \text{ кгм}^2 \quad (15)$$

где k_n – коэффициент, учитывающий момент инерции вращающихся частей драглайна (поворотной платформы, стрелы с блоками, порожнего ковша относительно оси вращения платформы) при повороте в забой

$$k_n = 3,75 \text{ [3];}$$

Суммируя уравнения (8) и (15) с учетом того, что $m_k = k_k m_n$, а $m_n = \rho E$ имеем:

$$I_z + I_n = \rho E R_q^2 [k_z (1 + k_k) + k_n k_k], \text{ кгм}^2 \quad (16)$$

где k_k – коэффициент, характеризующий отношение масс ковша и породы $k_k = 0,4$; ρ – плотность породы, кг/м^3 .

Подставляя в (6) уравнение (16) имеем выражение для определения средне-взвешенной мощности механизма поворота драглайна:

$$N_n = \rho E R_q^2 [k_z (1 + k_k) + k_n k_k] \omega^2 t_{nz}^{-1}, \text{ Вт} \quad (17)$$

Мощность, расходуемая на черпание породы драглайном в соответствии с результатами, полученными в работе [3], определяется следующим образом:

$$N_q = [F_k + \rho g E (1 + k_k) (\sin \alpha_o + \mu \cos \alpha_o)] g_{m0}, \text{ Вт} \quad (18)$$

здесь: F_k – сопротивление породы копанию, H , равное:

$$F_k = \frac{E(1 + R_{вол}) K_F}{k_{нум} l K_p}, H \quad (19)$$

где $k_{нум}$ – отношение пути наполнения ковша – l_n к длине ковша – l ; K_F – сопротивление породы копанию, $H/\text{м}^2$; μ – коэффициент трения ковша о породу $\mu = 0,6-1,0$ [4]; α_o – предельный угол откоса $\alpha_o = 30^\circ$

Что касается отношения объема призмы волочения к объему ковша – $R_{вол}$, то оно принимается для легких пород равным: $R_{вол} = 0,4$; для средних пород $R_{вол} = 0,3$; для тяжелых пород $R_{вол} = 0,2$ [3].

Средневзвешенная за цикл мощность механизмов драглайна или, что тоже самое сумма выражений (17) и (18) с учетом (19) после алгебраических преобразований будет иметь вид:

$$N_\Sigma = E \left\{ \left[\frac{(1 + R_{вол}) K_F}{k_{нум} l K_p} + \rho g (1 + k_k) (\sin \alpha_o + \mu \cos \alpha_o) \right] g_{m0} + \right. \\ \left. + \rho [R_q^2 k_z (1 + k_k) + k_n k_k] \omega^2 / t_{nz} \right\}, \text{ Вт} \quad (20)$$

Поделив выражение (20) на цикловую производительность драглайна $E / T_{цз}$ получим энергоемкость работы драглайна за произвольный цикл:

$$H_W = T_{цз} \left\{ \left[\frac{(1 + R_{вол}) K_F}{k_{нум} l K_p} + \rho g (1 + k_k) (\sin \alpha_o + \mu \cos \alpha_o) \right] g_{m0} + \right. \\ \left. + \rho [R_q^2 k_z (1 + k_k) + k_n k_k] \omega^2 / t_{nz} \right\}, H / \text{м}^2 \quad (21)$$

Запишем баланс мощности за цикл работы драглайна в виде:

$$Q_3 H_W \leq N_{nod} + N_m + N_n, \quad (22)$$

где N_{nod}, N_m, N_n – установленная мощность приводов механизмов подъема, тяги и поворота соответственно, Вт.

Переходя к пределу, решим уравнение (22) относительно забойной производительности – Q_3 . Далее поделив результат на сумму установленных мощностей приводов механизмов подъема, тяги и поворота драглайна получим величину забойной производительности, отнесенную к единице установленной мощности приводов драглайна, которая с учетом выражения (21) будет иметь вид:

$$Q_3^* = T_{уз}^{-1} \left\{ \left[(1 + R_{вол}) K_F / k_{нум} K_p + \rho g (1 + k_k) (\sin \alpha_o + \mu \cos \alpha_o) \right] g_{m0} + \right\}^{-1} \frac{m/c}{Bm} \quad (23)$$

$$\left\{ + \rho [R_q^2 k_e (1 + k_k) + k_n k_k] \omega^2 / t_{nz} \right\}$$

Анализ кинематических (уравнений (9), (10), (12), (13) и (14)) и силовых (уравнений (17), (18), (19), (20) и (23)) параметров современных карьерных драглайнов при отработке забоя свидетельствует, что:

- продолжительность цикла поворота верхнего строения драглайна существенно зависит от величины угла поворота – φ_3 машины в конкретном забое;
- синхронизация траекторного и поворотного движения при повороте верхнего строения драглайна с груженым ковшом на выгрузку происходит до угла поворота – φ_x , после которого радиус инерции R не зависит от конечного угла поворота – φ_3 ;
- синхронизации траекторного и поворотного движения при повороте верхнего строения драглайна с порожним ковшом в забой вообще не требуется, так как $R_q = const$;

- величина удельной забойной производительности – $Q_3^* \left(\frac{m/c}{Bm} \right)$ прямо пропорциональна пути наполнения ковша – l_n и обратно пропорциональна сопротивлению породы копанию – K_F и ее плотности – ρ ; квадрату угловой скорости вращения платформы – ω и конечному углу поворота драглайна в забое – φ_3 .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филимонов Н.А. Горные машины для открытых работ: – М: Издательство «Недра», 1967. – 304с.: ил.
2. Экскаваторы для открытых горных работ. Каталог-справочник, НИИИН-ФОРМТЯЖМАШ, М.: 1972., 159с.: ил.
3. Чулков Н.Н., Чулков А.Н. Расчет приводов карьерных машин. — М.: Машиностроение, 1979, — 104 с., ил.
4. Подэрни Р. Ю. Механическое оборудование карьеров: Учебник для вузов. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство МГУ, 2007. – 680 с.: ил. (ГОРНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ). **ГМБ**

Коротко об авторах

Подэрни Р.Ю. - доктор технических наук, профессор, действительный член РАЕН,
 Бочаров Р.А. – горный инженер, аспирант кафедры ГМО,
 Холиков М.С. – инженер-механик, аспирант кафедры ГМО,
 Московский государственный горный университет,
 Moscow State Mining University, Russia, ud@msmu.ru