Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института, том XXIX, вып. I, 1953 г.

РЕГУЛИРОВАНИЕ НАГРУЗКИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ВРУБОВЫХ МАШИН И УГОЛЬНЫХ КОМБАЙНОВ

(Уравнение движения машин)

Канд. техн. наук М. Я. Дурнев

Теоретическими и экспериментальными исследованиями установлено, что наибольшая производительность врубовых машин и угольных комбайнов может быть достигнута автоматическим выравниванием нагрузки их электродвигателей при помощи соответствующих автоматических регуляторов. Выравнивание нагрузки электродвигателей должно производиться путем изменения скорости подачи машин при постоянной скорости резания [1, 2, 5].

Выбор структурной схемы регулятора, его отдельных элементов и параметров этих элементов определяется свойствами регулируемого объекта. Для определения свойств регулируемого объекта необходимо в первую очередь рассмотреть характер изменения нагрузки на электродвигатель в процессе регулирования, а затем найти уравнение движения машины.

При изменении нагрузки электродвигателя в процессе работы регулятор будет изменять скорость подачи путем изменения передаточного числа между валом двигателя и валом барабана подачи до тех пор, пока мощность двигателя не восстановится до номинальной величины. Мощность, потребляемая электродвигателем врубовой машины или комбайна, определяется по экспериментальной формуле

$$P = A + Bv_{\text{п}}, \tag{1}$$

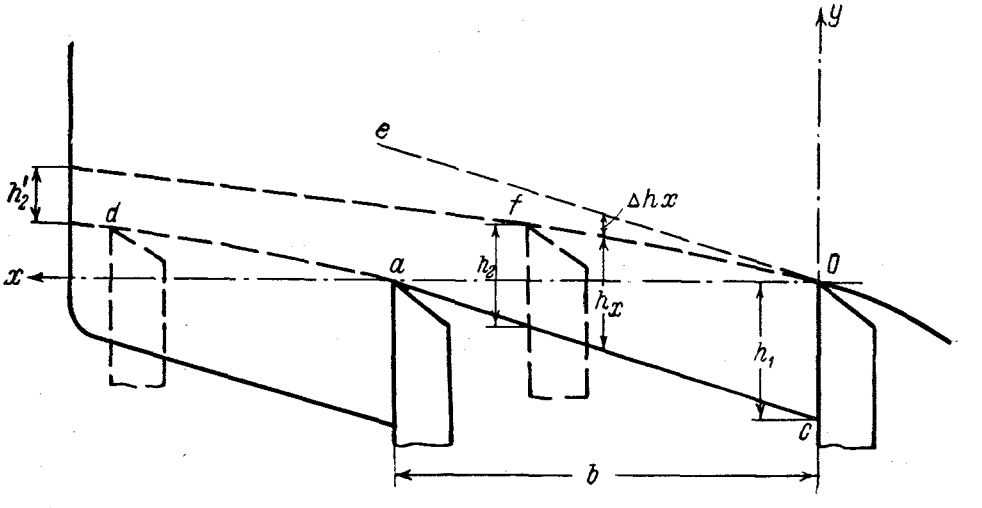
где A и B — коэффициенты, зависящие при данной конструкции машин от физико-механических свойств полезного ископаемого.

Составляющая мощности, расходуемая на резание угля, будет, очевидно, пропорциональна глубине срезанной стружки, а следовательно, и скорости подачи, так как глубина срезанной стружки пропорциональна скорости подачи $h = v_{\text{п}}$ и для случая плоского бара определяется формулой [5]

$$h = \frac{b}{v_{\text{р}}} v_{\text{п}}, \tag{2}$$

где b — расстояние между зубками одинакового положения;
$v_{\text{р}}$ — скорость резания;
$v_{\text{п}}$ — скорость подачи.

При экспериментальном исследовании зависимости P от $v_п$ замеры мощности производились при определенных постоянных значениях скорости подачи $v_п$. В процессе регулирования скорость подачи будет непрерывно меняться и, как будет показано ниже, в этом случае формула (1) не совсем точно отражает зависимость между P и $v_п$. Предположим, мы мгновенно уменьшили скорость подачи до нуля. Согласно формулам (1) и (2) составляющая мощности, расходуемая на резание угля, должна быть равной нулю, поскольку она пропорциональна скорости подачи. Однако в действительности глубина стружки в течение $T = \frac{b}{v_р}$, после того как скорость подачи $v_р$ стала равной нулю, не будет равна нулю. Следовательно, в течение этого времени будет расходоваться составляю-



Выемка коротких столбов заходками

щая мощности двигателя на резание угля, уменьшаясь постепенно до нуля по мере изменения глубины стружки.

Для определения зависимости $P = f(v_п)$ в процессе регулирования, т. е. в процессе изменения $v_п$, воспользуемся формулой

$$P = A + Bh, \tag{3}$$

вытекающей из выражений (1) и (2).

Определив зависимость изменения глубины стружки от изменения скорости подачи в процессе регулирования, мы тем самым найдем зависимость $P = f(v)$ в процессе регулирования.

Рассмотрим случай уменьшения скорости подачи, а следовательно, и глубины стружки в процессе регулирования. Глубина стружки перед началом процесса регулирования пусть равна h_1, а в конце процесса регулирования она должна быть h_2. Как показано на рисунке, процесс регулирования закончится за время перемещения зубка на расстояние b. В действительности регулирование глубины стружки при отклонении нагрузки двигателя должно происходить за время, в течение которого зубок переместится на расстояние, равное нескольким b.

Глубина стружки в процессе регулирования будет равна

$$h_x = h_1 - \Delta h_x. \tag{4}$$

Для определения величины Δh_x проведем координатные оси xY через вершину *любого* зубка в момент начала регулирования. В процессе регулирования вершина зубка будет двигаться по некоторой кривой Of. Если бы не происходило процесса регулирования, движение зубка обозначилось бы прямой Oe.

Путь, проходимый вершиной зубка в направлении оси OY при движении по прямой Oe, будет равен

$$y_1 = v_{1п} t,$$

где $v_{1п}$ — скорость подачи до начала регулирования;

t — время от начала регулирования

Путь, проходимый вершиной зубка в направлении оси при движении по кривой Of, равен

$$y_2 = \int_0^t v'_{xп}\, dt,$$

где $v'_{xп}\, dt$ — скорость подачи в процессе регулирования.

Величина Δh_x будет, очевидно, равна

$$\Delta h_x = y_1 - y_2 = v_{1п} t - \int_0^t v'_{xп}\, dt.$$

Отсюда получаем выражение для h'^{o}

$$h'_x = h_1 - \Delta h_x = b\,\frac{v_{1п}}{v_р} - \left(v_{1п}\, t - \int_0^t v'_{xп} dt\right).$$

После перемещения зубка на расстояние b глубина стружки будет равна

$$h' = b\,\frac{v_{1п}}{v_р} - \left(v_{1п}\, T - \int_0^T v'_{xп}\, dt\right),$$

где

$$T = \frac{b}{v_р}.$$

Окончательно получаем

$$h' = b\,\frac{v_{1п}}{v_р} - b\,\frac{v_{1п}}{v_р} + \int_0^T v'_{xп}\, dt = \int_0^T v'_{xп} dt. \qquad (5)$$

Величина h_x'' при перемещении зубка на отрезке b—$2b$ будет равна

$$h''_x = h' - \Delta h''_x.$$

Соответственно величина $\Delta h_x''$ равна

$$\Delta h''_x = y_2 - y_3,$$

$$y_2 = \int_T^t v'_{xп} dt, \qquad y_3 = \int_T^t v''_{xп} dt,$$

$$\Delta h''_x = \int_T^t v'_{xп} dt - \int_T^t v''_{xп} dt.$$

Подставляя в уравнение для h_x'' значение h_x' и $\Delta h_x''$, получим

$$h_x'' = \int_0^T v'_{x\text{п}}dt - \left(\int_T^t v'_{x\text{п}}dt - \int_T^t v''_{x\text{п}}dt\right). \qquad (6)$$

Вообще при движении зубков на отрезке $(n-1)b - nb$ глубина стружки будет определяться уравнением

$$h_x^n = \int_{(n-2)T}^{(n-1)T} v_{x\text{п}}^{n-1}dt - \left(\int_{(n-1)T}^{t} v_{x\text{п}}^{n-1}dt - \int_{(n-1)T}^{t} v_{x\text{п}}^{n}dt\right)$$

или после преобразования

$$h_x^n = \int_{(n-2)T}^{(n-1)T} v_{x\text{п}}^{n-1}dt + \left(\int_{(n-1)T}^{t} v_{x\text{п}}^{n}dt - \int_{(n-1)T}^{t} v_{x\text{п}}^{n-1}dt\right). \qquad (7)$$

При этом

$$v_{x\text{п}}^{n-1} > v_{x\text{п}}^{n}.$$

В этих формулах

$$v_{x\text{п}} = \psi(t),$$

причем

$$v'_{x\text{п}} = \psi(t) \quad t = 0 \div T;$$

$$v''_{x\text{п}} = \psi(t) \quad t = T \div 2T;$$

. . . . . .

$$v_{x\text{п}}^{n} = \psi(t) \quad t = (n-1)T \div nT.$$

Предположим, что при глубине стружки h_2 нагрузка двигателя возвратится к номинальной величине. При этом будет иметь место некоторая определенная скорость подачи $v_{2\text{п}}$. Вершина зубка будет двигаться по траектории (прямая линия), определяемой данной скоростью подачи, в то время как точка f_1 (точка выхода передней грани зубка из угля) будет перемещаться по некоторой кривой f_1ad, очертание которой определяется предшествующим значением скорости подачи за период $T = \frac{b}{v_{\text{р}}}$ до окончания процесса регулирования. Это переменное значение скорости подачи $v_{x\text{п}}$ будет больше $v_{2\text{п}}$, так как в процессе регулирования скорость подачи все время уменьшается. Поэтому при движении зубка на отрезке будет происходить дальнейшее уменьшение глубины стружки и, как следствие этого, дальнейшее уменьшение мощности двигателя до величины, меньшей номинальной. Следовательно, неизбежно будет происходить перерегулирование.

В случае увеличения скорости подачи и соответственно глубины стружки в процессе регулирования, аналогично предыдущему, получим

$$h_x^n = \int_{(n-2)T}^{(n-1)T} v_{x\text{п}}^{n-1}dt + \left(\int_{(n-1)T}^{t} v_{x\text{п}}^{n}dt - \int_{(n-1)T}^{t} v_{x\text{п}}^{n-1}dt\right). \qquad (8)$$

В этом случае

$$v_{x\text{п}}^{n-1} < v_{x\text{п}}^{n},$$

т. е. тоже произойдет неизбежное перерегулирование.

Зависимость $P_x = f(v_{x\text{п}})$ в процессе регулирования может быть определена выражением

$$P_x = A + B_1 \left[\int_{(n-2)T}^{(n-1)T} v_{x\text{п}}^{n-1} dt + \left(\int_{(n-1)T}^{t} v_{x\text{п}}^{n} dt - \int_{(n-1)T}^{t} v_{x\text{п}}^{n-1} dt \right) \right]. \qquad (9)$$

Величина перерегулирования ΔP_x определится величиной приращения стружки $\Delta h_{\text{п}}$ (положительного или отрицательного знака), которая может быть найдена (см. рисунок) по очевидной формуле

$$\Delta h_{\text{п}} = \int_0^T v_{2\text{п}} dt - \int_0^T v_{x\text{п}}^{n-1} dt = \int_0^T (v_{2\text{п}} - v_{x\text{п}}^{n-1})\, dt. \qquad (10)$$

Отсюда ΔP_x получим из формулы

$$\Delta P_x = B_1 \Delta h_{\text{п}}. \qquad (11)$$

Для уменьшения величины ΔP_x необходимо уменьшить $\Delta h_{\text{п}}$, т. е. разность $v_{2\text{п}} - v_{x\text{п}}^{n-1}$.

При

$$(v_{2\text{п}} - v_{x\text{п}}^{n-1}) \to 0, \quad \Delta h_{\text{п}} \to 0 \text{ и } \Delta P_x \to 0.$$

Чтобы разность $(v_{2\text{п}} - v_{x\text{п}}^{n-1})$ стремилась к нулю, необходимо, чтобы при приближении значения $h_x \to h_2$ процесс изменения скорости подачи происходил достаточно медленно.

Избежать перерегулирования при реагировании регулятора на любое малое отклонение нагрузки электродвигателя невозможно, но его можно практически свести к нулю (сделать величиной бесконечно малой), если скорость регулирования будет стремиться к нулю при стремлении к нулю отклонения нагрузки электродвигателя от установленной величины. Это будет автоматически достигаться регуляторами, скорость регулирования которых пропорциональна величине отклонения регулируемого параметра.

Для регулирования нагрузки электродвигателей врубовых машин и угольных комбайнов наиболее целесообразно применение регуляторов, у которых скорость регулирования пропорциональна величине отклонения регулируемого параметра. Действительно, при больших перегрузках, которые могут вызвать опрокидывание двигателя и вызывают его усиленный нагрев, необходима максимально возможная скорость регулирования.

При малых отклонениях нагрузки от номинальной величины, которые наиболее часто имеют место в работе и не могут оказать серьезного влияния на нагрев двигателя, скорость регулирования должна быть также незначительной. Это дает возможность избежать перерегулирования и, следовательно, исключить колебательный процесс регулирования. При колебательном процессе регулирования будет происходить усиленный износ регулятора и машины вследствие неравномерности движения.

Таким образом, скорость регулирования у регуляторов нагрузки электродвигателей врубовых машин и угольных комбайнов должна быть пропорциональна величине отклонения регулируемого параметра.

В этом случае при малых отклонениях мощности электродвигателя от установленной величины $(v_{2\text{п}} - v_{x\text{п}}^{n-1}) \to 0$, т. е. $v_{2\text{п}} \approx v_{x\text{п}}^{n-1}$, , мощность

электродвигателя с достаточной степенью точности будет определяться по уравнениям

$$P_x = A + B' h_{2x\text{п}}, \tag{12}$$

$$P_x = A + B v_{2x\text{п}}, \tag{13}$$

где $v_{2x\text{п}}$ и $h_{2x\text{п}}$ — соответственно скорость подачи и глубина стружки, незначительно отличающиеся от величин, которые устанавливаются по окончании процесса регулирования.

Опытное определение зависимости $P = f(v_\text{п})$ проводилось на врубовых машинах и угольных комбайнах, оборудованных асинхронными короткозамкнутыми двигателями. Замерялась мощность на зажимах асинхронного электродвигателя, где она пропорциональна моменту сопротивления на валу двигателя $P = M_\text{с}$. Поэтому момент сопротивления будет определяться по уравнению

$$M_\text{с} = A_1 + B_1 v_{2x\text{п}}. \tag{14}$$

Определив выражение для момента сопротивления в процессе регулирования, можно найти уравнение движения машины:

$$I \frac{d\omega}{dt} = M_\text{д} - M_\text{с}, \tag{15}$$

где I — приведенный к валу двигателя момент инерции системы;
ω — угловая скорость вращения двигателя;
$M_\text{д}$ — момент, развиваемый двигателем;
$M_\text{с}$ — момент сопротивления.

Для исследования движения машины в процессе регулирования необходимо, в соответствии с выводами Ляпунова [4], провести линеаризацию дифференциального уравнения движения (15) при помощи ряда Тейлора. Разложение уравнений для $M_\text{д}$ и $M_\text{с}$ в ряд Тейлора необходимо произвести в окрестности состояния равновесия. Равновесным состоянием для электродвигателя машины является работа его при номинальном режиме, т. е. при $M_\text{нд}$ и $\omega_\text{н}$.

В зависимости от изменения условий работы машины (изменение крепости зарубки, затупление зубков и т. д.) это равновесное состояние двигателя будет наступать при различных значениях $v_\text{ц}$.

Обозначим через $v_{2\text{п}}$ значение скорости подачи, соответствующее условию $M_\text{с} = M_\text{нд}$. Уравнение для $M_\text{д} = f(\omega)$, принимая механическую характеристику асинхронного двигателя на участке $\omega_\text{с} - \omega_\text{оп}$ прямолинейной, будет иметь вид:

$$M_\text{д} = \frac{M_\text{оп}\omega_\text{с}}{\omega_\text{с} - \omega_\text{оп}} - \frac{M_\text{оп}}{\omega_\text{с} - \omega_\text{оп}}\omega. \tag{16}$$

Так как мы рассматриваем движение машины при малых отклонениях от положения равновесия, $M_\text{с}$ можно определить по формуле (14).

Произведя разложение в ряд Тейлора уравнений (14) и (16) в окрестности нового состояния равновесия $\omega = \omega_\text{н}$, $v_\text{п} = v_{2\text{п}}$, получим

$$M_\text{д} = M_\text{нд} + \left(\frac{dM_\text{д}}{d\omega}\right)_{\substack{\omega=\omega_\text{н} \\ v_\text{п}=v_{2\text{п}}}} \Delta\omega, \tag{17}$$

$$M_\text{с} = M_\text{нс} + \left(\frac{dM_\text{с}}{dv_\text{п}}\right)_{\substack{v_\text{п}=v_{2\text{п}} \\ \omega=\omega_\text{н}}} \Delta v_\text{п}, \tag{18}$$

где $M_{нд}$ и $M_{нс}$ — моменты, соответствующие установившемуся режиму;

$$\Delta\omega = \omega - \omega_н;$$

$$\Delta v_п = v_п - v_{2п}.$$

В установившемся режиме $M_{нд} = M_{нс}$.
Значения

$$\left(\frac{dM_д}{d\omega}\right)_{\substack{\omega=\omega_н \\ v_п=v_{2п}}} \text{ и } \left(\frac{dM_c}{dv_п}\right)_{\substack{v_п=v_{2п} \\ \omega=\omega_н}}$$

определяются из уравнений (14), (16) и будут равны

$$\left(\frac{dM_д}{d\omega}\right)_{\substack{\omega=\omega_н \\ v_п=v_{2п}}} = -\frac{M_{оп}}{\omega_c - \omega_{оп}}; \qquad \left(\frac{dM_c}{dv_п}\right)_{\substack{v_п=v_{2п} \\ \omega=\omega_н}} = B_1.$$

Подставив значения $M_д$ и M_c из формул (14), (16) в уравнение движения машины (15), получим

$$I\frac{d\omega}{dt} = \left(\frac{dM_д}{d\omega}\right)_{\substack{\omega=\omega_н \\ v_п=v_{2п}}} \Delta\omega - \left(\frac{dM_c}{dv_п}\right)_{\substack{v_п=v_{2п} \\ \omega=\omega_н}} \Delta v_п, \tag{19}$$

т. е. уравнение динамики объекта, выраженное в приращениях данных координат.

Учитывая, что $\omega = \omega_н + \Delta\omega$,

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{d(\omega_н + \Delta\omega)}{dt} = \frac{d\Delta\omega}{dt}.$$

Безразмерная форма уравнений обычно используется для исследования процессов регулирования. Для этого введем относительное отклонение скорости ψ и относительное отклонение регулируемой координаты μ:

$$\psi = \frac{\Delta\omega}{\omega_н}; \qquad \mu = \frac{\Delta v_п}{v_{пм}}, \tag{20}$$

где $v_{пм}$ — максимальная скорость подачи.

На основании уравнения (19) и соотношений (20) получаем безразмерную форму уравнения динамики объекта

$$I\omega_н\psi' = \left(\frac{dM_д}{d\omega}\right)_{\substack{\omega=\omega_н \\ v_п=v_{2п}}} \omega_н\psi - \left(\frac{dM_c}{dv_п}\right)_{\substack{v_п=v_{2п} \\ \omega=\omega_н}} v_{пм}\mu. \tag{21}$$

Уравнение движения машины по предложению Стодола [4] обычно записывается в виде

$$T_а\psi' + K_c\psi = -\mu, \tag{22}$$

где (в нашем случае)

$$T_а = \frac{I\omega_н}{v_{пм}\left(\frac{dM_c}{dv_п}\right)_{\substack{v_п=v_{2п} \\ \omega=\omega_н}}};$$

$$K_c = -\frac{\omega_н\left(\frac{dM_д}{d\omega}\right)_{\substack{\omega=\omega_н \\ v_п=v_{2п}}}}{v_{пм}\left(\frac{dM_c}{dv_п}\right)_{\substack{v_п=v_{2п} \\ \omega=\omega_н}}}.$$

Коэффициент T_a имеет размерность времени и называется постоянной времени машины.

Коэффициент K является безразмерной величиной и называется коэффициентом самовыравнивания. Он будет всегда величиной положительной, так как $\left(\frac{dM_c}{dv_п}\right) > 0$, а $\left(\frac{dM_д}{d\omega}\right) < 0$ при любых значениях ω и $v_п$.

При положительном самовыравнивании у регулируемого объекта наличие обратной связи у регулятора непрямого действия по условиям устойчивости не обязательно [3].

Это обстоятельство в значительной степени упрощает конструкцию регулятора, его настройку, эксплуатацию и позволяет достичь астатического регулирования, при котором будет иметь место наибольшая точность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Автоматика и телемеханика в горном деле, ч. I. Известия АН СССР, ОТН 1939.
2. Экспериментальное исследование процессов регулирования. Институт горной механики им. акад. М. М. Федорова, АН УССР, 1948.
3. Блох З. Ш., Регулирование машин. Изд. технико-теоретической литературы, 1950.
4. Воронов А. А. Элементы теории автоматического регулирования. Воениздат, 1950.
5. Терпигорев А. М., Демидов П. Н., Протодьяконов М. М. Горные машины для выемки пластовых полезных ископаемых. Углетехиздат, 1949.

Поступило 27/III 1952 г.