

ОБ ОПТИМАЛЬНОМ УПРАВЛЕНИИ ОТБойНЫМ ЩИТОМ В ПЕРЕГРУЗОЧНОМ УЗЛЕ ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА

Поставлено задачу оптимального керування відбійним щитом у перевантажувальному вузлі стрічкового конвейера за допомогою електропривода. На основі методу динамічного програмування Белмана отриманий алгоритм оптимального керування відбійним щитом.

ON THE OPTIMUM CONTROL IN THE PNEUMATIC PANEL OF BELT CONVEYER SHIFTING UNIT

The main task concerns the problem of the pneumatic panel optimum control in the shifting unit of the belt conveyer by means of electric drive. On the basis of dynamic programming method provided by Belman, the algorithm was obtained for the optimum control of the pneumatic panel.

При транспортировании мягких горных пород (глина, марганец) и мелкокусковых грузов для больших скоростей конвейера получили широкое применение перегрузочные узлы с отбойным щитом. Однако опыт эксплуатации таких перегрузочных узлов показал, что при определенных условиях на отбойном щите образуется подпорный клин [1,2] (рис. 1). При колебаниях грузопотока (производительности) величина подпорного клина может принимать опасные размеры, в результате чего в перегрузочном узле может произойти завал, вызывающий разрушение конвейерного оборудования.

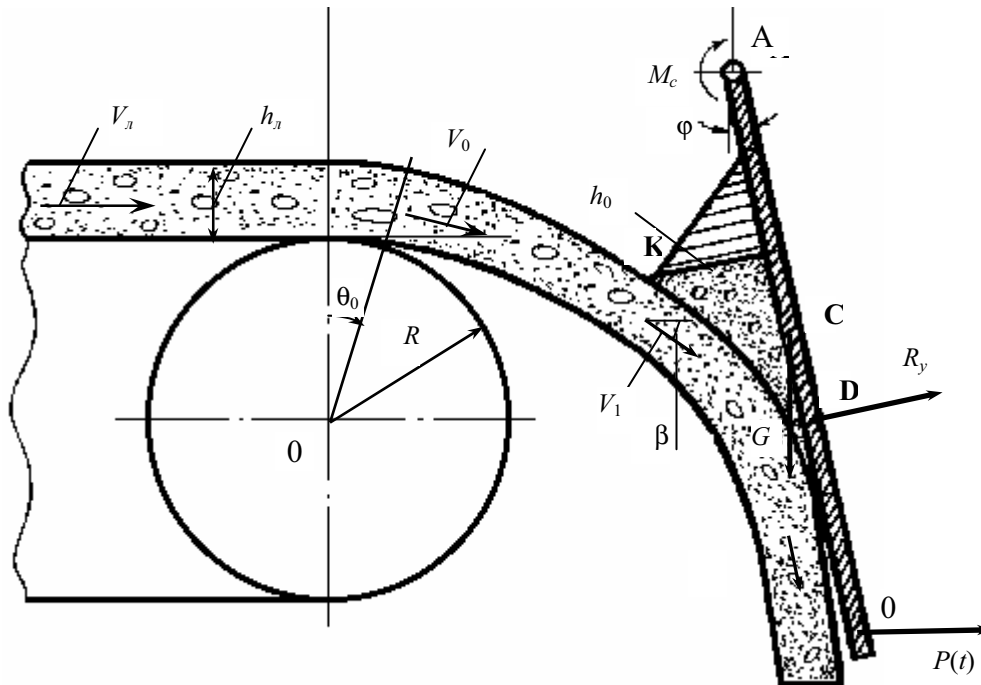


Рис.1 – Расчетная схема определения параметров подпорного клина при взаимодействии сыпучего груза с отбойным щитом

Для устранения этой опасности был предложен способ регулирования величины подпорного клина с помощью подвешенного на шарнире отбойного щита,

который под действием потока сыпучего груза (пассивный способ) вращается вокруг точки подвеса.

Отбойный щит под действием потока сыпучего груза отклоняется от вертикальной оси на некоторый угол φ (см. рис. 1). Чем больше производительность конвейера, тем на больший угол отклоняется отбойный щит и тем меньше величина подпорного клина h_0 .

Величина угла φ зависит от производительности конвейера, веса отбойного щита, а также от положения точек подвеса и центра тяжести отбойного щита. Поэтому при пассивном способе регулирования отбойным щитом для каждого перегрузочного узла в зависимости от скорости конвейера и физико-механических свойств груза необходимо подобрать определенный вес отбойного щита и центр его тяжести.

При управлении отбойным щитом, подвешенным на шарнире, с помощью привода (активный способ управления) для любого перегрузочного узла можно применять отбойный щит с неизменным весом и одной и той же точкой его подвеса и центра тяжести. Поэтому способ управления отбойным щитом с помощью привода является более перспективным.

Но для эффективного управления отбойным щитом с помощью привода необходимо минимизировать время поворота отбойного щита при ограничениях, накладываемых на приводные усилия.

Такое управление называется оптимальным. Реализовать такое управление можно с помощью электропривода с частотным управлением. При этом оптимальное управление осуществляется с помощью ЭВМ.

В статье рассматривается вопрос об оптимальном управлении отбойным щитом с помощью электропривода.

Задачу управления отбойным щитом с помощью электропривода можно сформулировать следующим образом. При изменении производительности конвейера Q необходимо повернуть отбойный щит вокруг точки подвеса на такой угол φ^* , при котором величина подпорного клина не превышала бы некоторого значения h_0^* . При этом необходимо задать такой закон управляющей силы $P(t)$, при котором время поворота щита на угол φ^* было минимально (с целью уменьшения вероятности завалов). Кроме того, величина управляющей силы $P(t)$ не должна превышать максимального усилия привода.

При управлении отбойным щитом управляемым параметром является угол поворота отбойного щита φ , от которого зависит высота подпорного клина h_0 ; управляющим параметром является сила $P(t)$, действующая на отбойный щит со стороны привода; возмущающим параметром является производительность конвейера Q (или погонная нагрузка на ленту q_l).

Запишем уравнение движения отбойного щита при воздействии на него управляющей силы $P(t)$ (см. рис. 1)

$$J \frac{d^2\varphi}{dt^2} = M_\partial + M_\epsilon + M_z + M_c, \quad (1)$$

где J – момент инерции щита относительно оси вращения, кг·м²; M_δ – момент управляющей силы, действующей на щит, Н·м; M_g – момент силы веса щита, Н·м; M_e – момент сил, действующих на щит со стороны струи сыпучего груза, Н·м; M_c – момент сил сопротивления, действующих на щит в точке поворота, Н·м.

Подставляя выражение моментов сил в формулу (1), получим

$$J \frac{d^2\varphi}{dt^2} = PL_p + GL_c \sin \varphi - R_y L_r, \quad (2)$$

где P, L_p – величина управляющей силы и ее плечо относительно точки поворота щита соответственно; G, L_c – сила веса и ее плечо соответственно; R_y, L_r – нормальная составляющая силы, действующая на щит со стороны струи сыпучего груза, и ее плечо соответственно.

В уравнении (2) моментом сил сопротивления M_c пренебрегаем из-за его малости по сравнению с другими моментами сил, действующими на щит.

Нормальная составляющая силы R_y , действующей на щит со стороны струи сыпучего груза, зависит от Q, φ и определяется по формуле

$$R_y = \frac{\gamma}{g} Q V_1 \cos(\varphi + \beta) - G \sin \varphi, \quad (3)$$

где V_1 – скорость потока сыпучей среды в момент входа в поворотную зону, м/с; β – угол между вектором скорости на входе в поворотную зону и горизонталью, рад; γ – удельный вес груза, Н/м³.

Скорость V_1 , угол β и вес G зависят от производительности конвейера Q , угла поворота отбойного щита φ , скорости и угла отрыва сыпучего груза от барабана конвейера V_0 и θ_0 . В свою очередь, V_0 и θ_0 зависят от скорости ленты конвейера V_n , толщины слоя груза на ленте h_n и радиуса барабана R .

При этом угол поворота щита φ изменяется в пределах

$$0 \leq \varphi \leq \varphi^*. \quad (4)$$

Предельный угол φ^* поворота щита при заданной производительности Q или погонной нагрузке q_2 однозначно определяется допустимой высотой подпорного клина h_0^* . Угол φ^* определяется из условия встречи потока сыпучей среды с подпорным клином.

Кроме того, должны выполняться условия:

$$\begin{aligned} \text{при } t = 0 \quad \varphi = \varphi^0 \quad \text{и} \quad \omega = 0; \\ \text{при } t = T \quad \varphi = \varphi^* \quad \text{и} \quad \omega = 0, \end{aligned} \quad (5)$$

где φ° – угол поворота отбойного щита в начальный момент времени, рад; ω – угловая скорость вращения отбойного щита ($\dot{\varphi} = \omega$), с^{-1} ; T – время поворота щита из начального в конечное состояние, с.

Другими словами, щит должен переместиться с неподвижного начального состояния в неподвижное конечное состояние.

Как было сказано выше, время, за которое щит повернется с начального положения в конечное, должно быть минимальным, т.е. оно является критерием эффективности управления отбойным щитом.

Это время определяется из уравнения

$$\varphi(T) = \varphi^* . \quad (6)$$

Кроме того, на величину управляющей силы P накладываются ограничения

$$P(t) \leq P_{\max} , \quad (7)$$

где P_{\max} – максимальное допустимое усилие привода, Н.

В случае, если управление отбойным щитом осуществляется электродвигателем, то управляющая сила является функцией угловой скорости или частоты вращения вала двигателя, называемой характеристикой двигателя

$$P = P(\omega)$$

или

$$P = P(n) , \quad (8)$$

где n – частота вращения электродвигателя.

При этом должно выполняться условие

$$n < n_c$$

или

$$\omega < \omega_c ,$$

где n_c – синхронная частота вращения электродвигателя, с^{-1} ; ω_c – синхронная угловая скорость электродвигателя, с^{-1} .

Следовательно, задачу оптимального управления отбойным щитом в математической форме можно сформулировать следующим образом. По заданным конструктивным параметрам перегрузочного узла и отбойного щита при изменении погонной нагрузки конвейера q_2 найти закон управления – силу $P(t)$, в частности, для электропривода $P = P(n)$, при котором отбойный щит повернулся бы на угол φ^* за минимальное время, т.е. время поворота отбойного щита T , определяемое из уравнения (6), должно быть минимальным. При этом должны выполняться условия (4), (5) и (7).

Сформулированная задача оптимального управления называется задачей о быстродействии [3].

Для разработки алгоритма оптимального управления отбойным щитом применим метод динамического программирования Белмана [4,5].

Для этого разобьем допустимую область возможных характеристик электродвигателя $P(\omega)$ (рис. 2) на прямоугольники вертикальными и горизонтальными прямыми, находящимися на одинаковом расстоянии друг от друга.

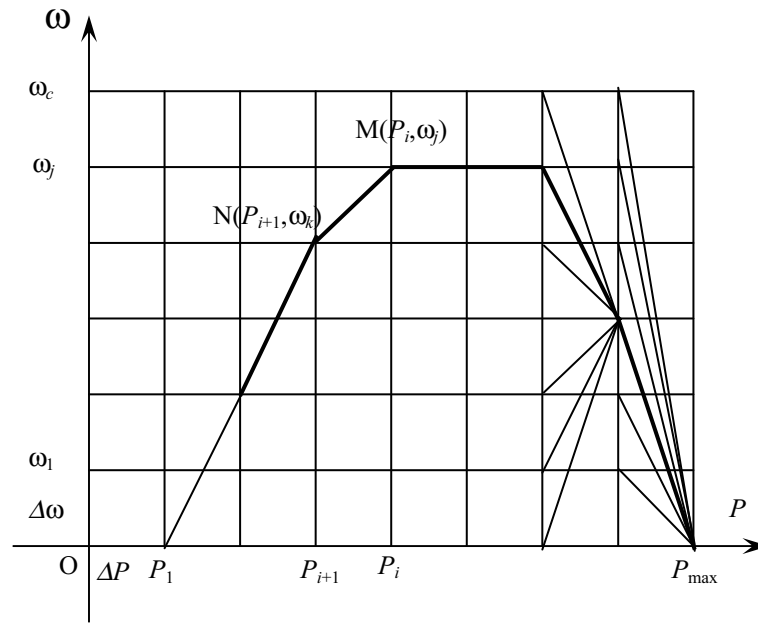


Рис. 2 – Аппроксимированная кусочно-линейная характеристика электродвигателя

Эти расстояния от оси скоростей $O\omega$ и оси сил OP соответственно определяются из выражений

$$\Delta\omega = \frac{\omega_c}{m}; \tag{9}$$

$$\Delta P = \frac{P_{\max}}{n}, \tag{10}$$

где m, n – количество отрезков, отсекаемых прямыми, параллельными осям OP и $O\omega$.

Произвольную характеристику электропривода аппроксимируем кусочно-линейными функциями. В результате формулу характеристики можно записать в виде

$$P[\omega(t)] = \sum_{i=0}^n (q_i \omega + N_i) [\sigma_0(t - t_{i+1}) - \sigma_0(t - t_i)], \tag{11}$$

$(i = 0, 1, \dots, n-1)$

где ω – угловая скорость отбойного щита в момент времени t , с^{-1} ; q_i, N_i – параметры i -го линейного участка характеристики, Н·с, Н; t_i – момент перехода с i -го линейного участка на $(i+1)$ -й линейный участок характеристики, с; $\sigma_0(t)$ – единичная функция Хевисайда.

Найдем решение уравнения (2) на i -ом линейном участке характеристики в предположении, что в течении времени на этом участке момент силы от потока сыпучей среды и момент силы от веса отбойного щита не изменяются и равны

$$\begin{aligned} M_R &= R_{yi}L_r; \\ M_G &= GL_c \sin \varphi_i, \end{aligned} \quad (12)$$

где R_{yi} – сила, действующая на отбойный щит со стороны потока сыпучей среды в начале i -го линейного участка характеристики, Н; φ_i – угол поворота отбойного щита в начале i -го линейного участка характеристики, рад.

Согласно формуле (3) R_{yi} определяется из выражения

$$R_{yi} = \frac{\gamma}{g} V_1 \cos(\varphi_i + \beta_i) - G \sin \varphi_i, \quad (13)$$

где β_i – угол между вектором скорости потока сыпучей среды V_1 и горизонталью в момент встречи его с отбойным щитом, град.

Следовательно, в силу выше указанных предположений, уравнение (2) на i -ом линейном участке характеристики (при $t_i < t < t_{i+1}$) заменится на уравнение

$$J \frac{d\omega}{dt} = (q_i \omega + N_i)L_p + R_{yi}L_r - GL_c \sin \varphi_i, \quad (14)$$

где t_i, t_{i+1} – моменты времени в начале и в конце i -го линейного участка характеристики, с.

При этом должны выполняться условия:

$$\begin{aligned} \text{при } t = t_i \quad \varphi &= \varphi_i, \quad \omega = \omega_j; \\ \text{при } t = t_{i+1} \quad \varphi &= \varphi_{i+1}, \quad \omega = \omega_k, \end{aligned} \quad (15)$$

где ω_j – угловая скорость отбойного щита в момент времени t_i , с^{-1} ; φ_{i+1}, ω_k – угол и угловая скорость отбойного щита в момент времени t_{i+1} , рад, с^{-1} .

Кроме того, согласно (5), в начале и в конце поворота отбойного щита должны выполняться условия:

$$\begin{aligned} \text{при } t = t_0 = 0 \quad \varphi_0 &= \varphi^0, \quad \omega_0 = 0; \\ \text{при } t = t_n \quad \varphi_n &= \varphi^*, \quad \omega_n = 0. \end{aligned} \quad (16)$$

Решая уравнение (14) при условиях (15), получим:

$$\varphi_{i+1} = \frac{\omega_j - \tilde{\omega}_i}{\lambda} e^{\lambda_i(t_{i+1}-t_i)} + \tilde{\omega}_i(t_{i+1} - t_i) - \frac{\omega_j - \tilde{\omega}_i}{\lambda} + \varphi_i; \quad (17)$$

$$\omega_k = (\omega_i - \tilde{\omega}_i) e^{\lambda_i(t_{i+1}-t_i)} + \tilde{\omega}_i, \quad (18)$$

где

$$\tilde{\omega}_i = \frac{GL_c \sin \varphi_i - R_{yi} L_r - N_i L_p}{q_i L_p}; \quad \lambda_i = \frac{q_i L_p}{J}.$$

Зная ω_k и ω_i , из выражения (18), определим момент времени в конце поворота отбойного щита на i -ом линейном участке характеристики t_{i+1}

$$t_{i+1} = t_i + \ln \left| \frac{\omega_k - \tilde{\omega}_i}{\lambda_i (\omega_j - \tilde{\omega}_i)} \right|. \quad (19)$$

Формулы (17)-(19) определяют угол поворота φ_{i+1} и момент времени t_{i+1} в конце i -го линейного участка характеристики по известным значениям параметров φ_i , ω_j , t_i и ω_k в начале и конце i -го линейного участка характеристики.

Время, за которое отбойный щит поворачивается на i -ом линейном участке характеристики, согласно (19) равно

$$\Delta t_i = t_{i+1} - t_i = \ln \left| \frac{\omega_k - \tilde{\omega}_i}{\lambda_i (\omega_j - \tilde{\omega}_i)} \right|. \quad (20)$$

Кроме того, зная координаты узловых точек начала $M(P_i, \omega_j)$ и конца $N(P_{i+1}, \omega_k)$ i -го линейного участка характеристики (см. рис. 2), можно определить параметры q_i , N_i , являющиеся функциями целочисленного аргумента, по формулам

$$\begin{aligned} q_i(j, k) &= \frac{(k - j)\Delta\omega}{\Delta P}; \\ N_i(j, k) &= (i + 1)(\Delta P + q_i \Delta\omega), \\ &(j = 0, 1, \dots, m, \quad k = 0, 1, \dots, m) \end{aligned} \quad (21)$$

где q_i – тангенс угла наклона к оси OP i -го линейного участка характеристики, Н/с; N_i – координата пересечения i -го линейного участка характеристики с осью OP , Н; j, k – номера узловых точек по оси $O\omega$, совпадающих началом и концом i -го линейного участка характеристики.

Алгоритм определения характеристики, при которой время поворота отбойного щита из начального положения при $\varphi = \varphi^0$ в конечное при $\varphi = \varphi^*$ было бы минимальным, разбивается на две части.

В первой части решается задача управляемости системы, т.е. определяются все аппроксимированные кусочно-линейные характеристики электропривода (см. рис. 2), при которых отбойный щит, находящийся в начальном неподвижном состоянии при $\varphi = \varphi^0$ повернется в неподвижное состояние при $\varphi = \varphi^*$. При этом должны выполняться ограничения на величину силы P ($P \leq P_m$) и на величину угловой скорости ω ($\omega < \omega_c$).

Для этого для каждой возможной аппроксимированной кусочно-линейной характеристики с узловыми точками, образованными на пересечении прямых, параллельных оси OP и $O\omega$, согласно формулам (17)-(19) определяют φ и ω в конце последнего линейного участка характеристики. Причем первый линейный участок начинается с правой крайней точки с координатами $(P_m, 0)$, а последний заканчивается в любой точке на оси OP слева от начальной точки $(P_m, 0)$, т.е. в точках, для которых угловая скорость равна нулю.

А затем оставляются те аппроксимированные характеристики, для которых в конечной точке выполняется неравенство

$$|\varphi - \varphi^*| < \varepsilon, \quad (22)$$

где ε – некоторая положительная малая величина ($\varepsilon = 0,01$).

Во второй части алгоритма для оставленных аппроксимированных характеристик применяют численный метод Белмана поиска характеристики с минимальным временем T [5].

Для этого из оставшихся аппроксимированных характеристик на каждом $(n-i)$ -ом линейном участке характеристики, начиная с последнего участка характеристики слева направо, определяют те, для которых время поворота минимально:

$$T_{i+1} = \min_{k_{i+1}} (T_i + \Delta t_{n-1}), \quad (23)$$

$$(i = 0, 1, \dots, n-1)$$

где T_i – минимальное время поворота щита в начале $(n-i)$ -го линейного участка характеристики ($T_0 = 0$), с; k_{i+1} – всевозможные варианты оставшихся аппроксимированных характеристик на $n-(i+1)$ -ом шаге.

Следовательно, получен алгоритм оптимального управления отбойным щитом в перегрузочном узле ленточного конвейера, который позволяет за минимальное время повернуть отбойный щит на угол, при котором подпорный клин не превышает опасной величины (высоты).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сакович В.М. Исследование процесса загрузки ленточных конвейеров / В.М. Сакович, В.П. Кукса // Горные строительные и дорожные машины. – К.: Техніка, 1968. – Вып.7. – С.98-104.
2. Сакович В.М. Движение груза в пересыпных устройствах ленточных конвейеров / В.М. Сакович, В.П. Кукса // Горные, строительные и дорожные машины. – К.: Техніка, 1968. – Вып.7. – С.78-86.
3. Болтянский В.Г. Математические методы оптимального управления. – М.: Наука, 1966. – 308 с.
4. Вентцель Е.С. Исследование операций. – М.: Сов. радио, 1972. – 552с.
5. Моисеев Н.Н., Иванилов Ю.П., Столяров Е.Н. Методы оптимизации. – М.: Наука, 1978. – 352 с.