СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ДРОБЛЕНИЯ В КОНУСНОЙ ДРОБИЛКЕ ПРИ НЕКОНТРОЛИРУЕМЫХ ВОЗМУЩЕНИЯХ

М. Б. Карелин

Харьков

Рассматриваются вопросы автоматической оптимизации процесса дробления нерудных материалов в конусных дробилках конечных стадий, производящих заполнители для бетонов. Подобные задачи характерны для многих систем управления сложными технологическими процессами.

Для рассматриваемого класса объектов выбор универсального критерия эффективности и построение системы автоматической оптимизации, обеспечивающей поддержание оптимального значения выбранного критерия при неконтролируемых возмущениях, представляет значительный теоретический и практический интерес.

Для процессов стохастической природы, к которым относятся процессы дробления, при решении задачи оптимального управления целесообразно рассматривать систему вида [1]

$$\frac{dy}{dt} = f(Y,\ X,\ U), \tag{1}$$

где $Y = (Y_1, \ldots, Y_n)$;

n — мерный вектор выходных величин:

$$X = (X_1, \ldots, X_{n_1});$$

n_1 — мерный вектор возмущений;

$$U = (U_1, \ldots, U_{n_2});$$

n_2 — мерный вектор управляющих воздействий.

В задаче оптимального управления процессом дробления, описываемом системой (1), управление $U(t)$ выбирается таким, чтобы решение системы (1) оптимизировало некоторый функционал

$$\int F\{U(t),\ X(t),\ Y(t)\}\,dt. \tag{2}$$

Очевидно, что при некотором известном критерии эффективности процесса дробления E, функционально связанном с вектором $Y(t)$, задача управления процессом (1) сводится к оптимизации функционала

$$\int E\{X(t),\ U(t)\}\,dt. \tag{3}$$

Из математической постановки задачи оптимизации как вариационной задачи вытекает необходимость получения единственной функции цели, экстремума которой мы стремимся достигнуть. В качестве критерия эффективности, функционально связанного с относительным выходом товарных фракций щебня, принимаем удельный доход E, что наиболее полно согласуется с функцией цели всего предприятия:

$$E = 0{,}01 \sum_{i=1}^{n} \varphi_i Y_i - \sum_{j=1}^{m} З_j = 0{,}01 \sum_{i=1}^{n} K_i Ц_i Y_i - \sum_{j=1}^{m} З_j, \qquad (4)$$

где E — удельный доход, *руб/м*³;

Y_i — относительный выход контролируемых товарных фракций щебня, %;

n — количество контролируемых товарных фракций;

φ_i — весовые коэффициенты;

K_i — коэффициенты спроса на щебень контролируемых товарных фракций;

$Ц_i$ — отпускная цена на продукцию контролируемых товарных фракций, *руб/м*³;

$З_j$ — эксплуатационные затраты на единицу продукции, *руб/м*³;

m — количество видов затрат, связанных с выпуском данного вида продукции.

Пренебрегая некоторыми колебаниями в расходе электроэнергии при регулировании разгрузочной щели дробилки, можно принять, что сумма эксплуатационных затрат (себестоимость) сохраняет постоянное значение $\sum_{j=1}^{m} З_j = C$ и может быть заранее учтена. Тогда выражение для критерия эффективности примет вид

$$E = 0{,}01 \sum_{i=1}^{n} K_i Ц_i Y_i. \qquad (5)$$

Таким образом, получение продукта дробления определенного качества можно характеризовать некоторой целевой функцией E.

Одним из главных возмущающих воздействий, оказывающих существенное влияние на гранулометрический состав продукта дробления конусных дробилок, является прочность поступающей на дробление горной массы [2]. Конструктивные особенности современной конусной дробилки с устройством дистанционного изменения разгрузочной щели позволяют компенсировать влияние возмущающих воздействий и абразивного износа на качественные показатели дробленого щебня.

Проведенные исследования позволили аппроксимировать статические характеристики выхода товарных фракций и критерия эффективности процесса дробления степенными полиномами второго порядка:

$$E = a_0 + a_1 U + a_2 U^2 + a_3 X + a_4 UX + a_5 X^2, \qquad (6)$$

где E — критерий эффективности процесса дробления;

U — управляющее воздействие (величина разгрузочной щели дробилки);

X — возмущающее воздействие (прочность материала);

$a_0, \ldots, a_l$ — коэффициенты уравнения статической характеристики.

Характеристика объекта предполагается плавной одномодальной (с одним экстремумом).

Дифференцируемая функция нескольких независимых переменных

$$E = E(X, U), \qquad (7)$$

имеет экстремум, если в точке экстремума ее частные производные равняются нулю

$$\frac{\partial E}{\partial X} = 0; \quad \frac{\partial E}{\partial U} = 0. \tag{8}$$

Определим из (6) значения управляющего U_0 и возмущающего воздействия X_0, при которых критерий эффективности принимает максимальное значение E_0.

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial U} &= a_1 + 2a_2U + a_4X = 0; \\ \frac{\partial E}{\partial X} &= a_3 + a_4U + 2a_5X = 0. \end{aligned} \tag{9}$$

Решение системы уравнений (9) позволяет определить значения X_0 и U_0, при которых критерий эффективности E_0 принимает максимальное значение:

$$X_0 = \frac{a_1a_4 - 2a_2a_3}{4a_2a_5 - a_4^2}; \tag{10}$$

$$U_0 = \frac{a_3a_4 - 2a_1a_5}{4a_2a_5 - a_4^2}. \tag{11}$$

Экспериментальные исследования проводились на дробилке КМД-1650, перерабатывающей гранитные породы Власовского месторождения (УССР). Контроль прочности поступающей на дробление горной массы определялся по известной методике [3]; контроль процентного выхода товарных фракций щебня — ситовым методом. Аппроксимация экспериментальных данных произведена методом наименьших квадратов на ЭЦВМ «Урал 4». Получено следующее выражение для критерия эффективности процесса дробления в конусной дробилке:

$$\begin{aligned} E = -0{,}965 + 0{,}567U - 0{,}231 \cdot 10^{-1} \cdot U^2 + 0{,}243 \cdot 10^{-2} \cdot X - \\ - 0{,}282 \cdot 10^{-4}UX - 0{,}71 \cdot 10^{-6} \cdot X^2. \end{aligned} \tag{12}$$

В соответствии с (10) и (11) определены следующие значения X_0 и U_0, при которых критерий эффективности E_0 принимает максимальное значение

$$X_0 = 1750 \ кГ/см^2; \ U_0 = 11 \ мм. \tag{13}$$

Задача регулирования состоит в следующем: при произвольном, не зависящем от нас, изменении основного возмущения и при медленном изменении формы экстремальной характеристики выбираются такие значения регулирующего воздействия, при которых точка, характеризующая состояние системы, все время находилась на гребне экстремального холма.

Конусная дробилка как объект регулирования OP находится под воздействием внешнего возмущения X, характеризующего прочность дробимого материала, величина которого неизвестна и в общем случае является случайной функцией времени. Отсутствие методов и приборов автоматического контроля прочности поступающей на дробление горной массы в темпе с процессом существенно сдерживает построение систем автоматической оптимизации. Рассмотрение прочности как некоторого случайного временного процесса $X(t)$ позволит, очевидно, теоретически представить характер установившегося случайного процесса изменения критерия эффективности.

На современных камнедробильных заводах и обогатительных фабриках горная масса из карьера обычно доставляется автосамосвалами, обслуживающими различные экскаваторы. Сделаем допущения: прочность

горной массы в пределах грузоподъемности одной автомашины не изменяется и усреднение материала в приемной яме питателем несущественно. Время проработки горной массы одной автомашины имеет случайную длительность, обусловленную неравномерной скоростью подачи материала питателем в дробилку первой стадии при регулировании ее загрузки.

Предположим, что случайная функция X (прочность) принимает случайные значения, остающиеся постоянными в случайных по длительности промежутках времени. Причем вероятность $p(\tau)$ изменения значения функции $X(t)$ в любом интервале t, $t+\tau$ зависит только от длительности интервала τ и не зависит от поведения функции $X(t)$ вне этого интервала, т. е. не зависит от выбранного момента t начала интервала. Случайную функцию $X(t)$ будем рассматривать как стационарную случайную функцию в узком смысле, поскольку значения, которые случайная функция $X(t)$ может принимать, и вероятность изменения этих значений не зависят от времени t. Тогда корреляционная функция случайного стационарного процесса $X(t)$ может быть представлена в виде [4]

$$R_x(\tau) = D_x e^{-\alpha|\tau|}, \tag{14}$$

где D_x — дисперсия функции $X(t)$;

α — математическое ожидание числа перемен уровней случайного процесса $X(t)$ в единицу времени.

Для определения спектральной плотности $S_x(\omega)$ применим к выражению (14) комплексную форму преобразования Фурье

$$S_x(\omega) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau)\, e^{-j\omega\tau} d\tau. \tag{15}$$

Подставляя (14) в (15) и вычисляя интеграл (15), получим выражение для спектральной плотности, соответствующее корреляционной функции (14):

$$S_x(\omega) = \frac{D_x}{\pi}\cdot\frac{\alpha}{\alpha^2+\omega^2}. \tag{16}$$

Определим корреляционную функцию $R_E(\tau)$, спектральную плотность $S_E(\omega)$ и дисперсию D_E установившегося случайного процесса на выходе конусной дробилки, передаточная функция которой, согласно [5],

$$W(p) = \frac{K}{1+pT}. \tag{17}$$

Известно [4], что:

$$R_E(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S_E(\omega)\, e^{j\omega\tau} d\omega; \tag{18}$$

$$S_E(\omega) = |W(j\omega)|^2 S_x(\omega); \tag{19}$$

$$D_E = \int_{-\infty}^{\infty} S_E(\omega)\, d\omega. \tag{20}$$

Подставляя (16) и (17) в (19), получим

$$S_E(\omega) = \frac{D_x \alpha K^2}{\pi(1+\omega^2T^2)(\alpha^2+\omega^2)}. \tag{21}$$

После подстановки (21) в (18) и (20)

$$R_E(\tau) = \frac{D_x \alpha K^2}{\pi}\int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{j\omega\tau} d\omega}{(1+\omega^2T^2)(\alpha^2+\omega^2)}; \tag{22}$$

$$D_E = \frac{D_x \alpha K^2}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\omega}{(1+\omega^2 T^2)(\alpha^2+\omega^2)}. \qquad (23)$$

Интегрирование выражений (22) и (23) производим по методу вычетов.

Известно, что

$$\int_c \frac{f(\omega)}{g(\omega)} \cdot d\omega = 2\pi j \Sigma \operatorname{Res} = 2\pi j \sum \frac{f(\omega_m)}{g'(\omega_m)}, \qquad (24)$$

где $\Sigma \operatorname{Res}$ — сумма вычетов функции $\frac{f(\omega)}{g(\omega)}$ относительно особых точек — полюсов $\omega_1, \omega_2, \ldots, \omega_n$.

Пусть

$$\omega_1 = +j\frac{1}{T}; \quad \omega_2 = +j\alpha, \qquad (25)$$

тогда

$$\frac{1}{T^2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\omega}{\left(\frac{1}{T^2}+\omega^2\right)(\alpha^2+\omega^2)} = \frac{1}{T^2} 2\pi j \left[\frac{1}{2\omega(\alpha^2+\omega^2)} + \frac{1}{\left(\frac{1}{T^2}+\omega^2\right)2\omega}\right] =$$

$$= \frac{1}{T^2} \cdot 2\pi j \left[\frac{1}{2j\frac{1}{T}\left(\alpha^2 - \frac{1}{T^2}\right)} + \frac{1}{2j\alpha\left(\frac{1}{T^2}-\alpha^2\right)}\right] = \frac{\pi}{1-\alpha^2 T^2}\left[\frac{1}{\alpha} - T\right] = \frac{\pi}{\alpha(1+\alpha T)}, \qquad (26)$$

$$\frac{1}{T^2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{j\omega\tau} \cdot d\omega}{\left(\frac{1}{T^2}+\omega^2\right)(\alpha^2+\omega^2)} = \frac{\pi}{1-\alpha^2 T^2}\left[\frac{e^{-\alpha\tau}}{\alpha} - T \cdot e^{-\frac{\tau}{T}}\right]. \qquad (27)$$

После подстановки (26) и (27) соответственно в (23) и (22), получим

$$D_E = \frac{D_x K^2}{1+\alpha T} = \frac{D_x K^2 T_1}{T_1 + T}; \qquad (28)$$

$$R_E(\tau) = \frac{D_x K^2 T}{1-\alpha^2 T^2}\left[\frac{e^{-\alpha\tau}}{\alpha} - Te^{-\frac{\tau}{T}}\right] = \frac{D_x K^2 T_1}{T_1^2 - T^2}\left[T_1 e^{-\frac{\tau}{T_1}} - Te^{-\frac{\tau}{T}}\right]; \qquad (29)$$

$$\rho_E(\tau) = \frac{R_E(\tau)}{D_E} = \frac{1}{T_1 - T}\left[T_1 e^{-\frac{\tau}{T_1}} - Te^{-\frac{\tau}{T}}\right], \qquad (30)$$

где $\alpha = \frac{1}{T_1}$; $\rho_E(\tau)$ — нормированная корреляционная функция.

Покажем возможность априорной оценки величины α, исходя из следующих теоретических рассуждений.

Пусть Q — сменная производительность технологической линии завода, $м^3$; n — количество рейсов автомашин, обеспечивающих непрерывную подачу горной массы из карьера; q — средняя грузоподъемность машин, $м^3$; t — продолжительность работы, $ч$.

Тогда время проработки горной массы одной машины можно выразить так:

$$T_1 = \frac{t}{n} = \frac{tq}{Q}. \qquad (31)$$

Следовательно, выражение для априорной оценки α примет вид

$$\alpha = \frac{Q}{tq}. \qquad (32)$$

На основе проведенных исследований разработана поисковая система автоматической оптимизации процесса дробления в конусной дробилке, блок-схема которой приведена на рисунке.

Для контроля фракционного состава дробленого материала и построения системы автоматической оптимизации разработан электронный гранулометр [6]. Прибор содержит пьезодатчик гранулометрического анализа и электронный блок, осуществляющий амплитудную селекцию и интегрирование по каналам поступающих после пьезодатчика импульсов, пропорциональных массам падающего щебня.

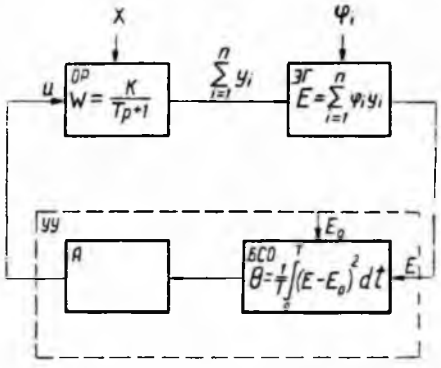


Рис. Блок-схема системы автоматической оптимизации процесса дробления в конусной дробилке.

Электронный гранулометр с помощью пробоотборника производит с необходимой частотой Δt периодический отбор и статистический анализ представительных проб по фракционному составу без операций грохочения и взвешивания, что ускоряет процесс анализа и уменьшает время транспортного запаздывания. Для получения обобщенного регулируемого параметра E в электронный блок гранулометра вводятся весовые коэффициенты φ_i.

При дискретной регистрации непрерывной случайной функции два соседних наблюдения можно считать независимыми, если они разделены интервалом времени $\Delta t = \tau_0$, где τ_0 — время корреляции, определяемое по автокорреляционной функции исследуемой переменной.

Определим интервал опробования Δt при контроле крупности щебня электронным гранулометром. Принимаем, что время затухания корреляционной функции (30) наступает при 5% величине первоначального значения функции.

Для конусных дробилок $T_1 \gg T$ ($T_1 \approx 5 \div 10$ *мин*, $T \approx 2 \div 3$ *сек*), что позволяет упростить выражение (30)

$$\rho_E(\tau_0) = e^{-\frac{\tau_0}{T_1}} = 0{,}05; \tag{33}$$

$$\Delta t = \tau_0 = T_1 \cdot 2{,}3 \cdot \lg 0{,}05 \approx 3T_1 = 3\frac{tq}{Q}. \tag{34}$$

Выражение (34) позволяет сделать важный вывод: интервал опробования Δt пропорционален средней грузоподъемности автомашины, доставляющей горную массу из карьера.

Для Власовского карьероуправления произведена оценка Δt при следующих исходных данных: $Q = 700$ *м*^{3}; $q = 25$ $m \approx 15$ *м*^{3} (гранит); $t = 8$ *ч*.

$$\Delta t = 3\frac{8 \cdot 15 \cdot 60}{700} = 31 \text{ мин}. \tag{35}$$

Принимаем интервал опробования $\Delta t = 30$ *мин*.

Задача оптимизации состоит в том, чтобы при воздействии на систему неконтролируемого возмущения X, являющегося случайной функцией времени, обеспечить такое управление величиной разгрузочной щели U, чтобы можно было минимизировать среднеквадратичное откло-

нение за определенное время T удельного дохода E от желаемого значения E_0 для оптимальных условий дробления.

$$\Theta = \lim \frac{1}{T} \int_0^T (E - E_0)^2 \, dt. \tag{36}$$

Условимся считать, что система оптимизации отыскала экстремум в том случае, если $-\varepsilon \leqslant \Theta \leqslant \varepsilon$, где ε — точность отыскания экстремума.

Особенностью рассматриваемой системы автоматической оптимизации является использование в качестве минимизируемой величины Θ, формируемой на основе критерия качества, определяющего оптимальный режим работы системы. Поэтому характеристика системы по отношению Θ всегда имеет экстремум, даже в случае линейных характеристик объекта.

Исходя из технических условий эксплуатации конусных дробилок и производственного плана предприятия по выпуску товарных фракций щебня, на систему автоматической оптимизации процесса дробления накладываются ограничения вида

$$a \leqslant U \leqslant b; \tag{37}$$

$$d_i \leqslant Y_i \leqslant C_i, \quad i = 1, \ldots, n; \tag{38}$$

при производительности не ниже заданной

$$Q \geqslant Q_3. \tag{39}$$

В ряде случаев ограничение накладывается только на выпуск наиболее ценной мелкой фракции щебня, пользующейся повышенным спросом:

$$d_1 \leqslant Y_1. \tag{40}$$

Данные о величине удельного дохода E поступают на блок статистической обработки (БСО) управляющего устройства (УУ). Использование в системе блока БСО вызвано необходимостью накопления данных с целью уменьшения влияния случайной помехи, накладывающейся в процессе поиска на показатель качества оптимизируемой системы. Накопление во время поиска при наличии помех играет роль фильтрации, позволяющей улучшить соотношение полезный сигнал — помеха и тем самым понизить вероятность ошибки при принятии решения о направлении рабочего шага.

Управляющая часть системы автоматического поиска A предназначена для поддержания по возможности наименьшей величины Θ на выходе системы и изменения значения U в некоторые дискретные моменты времени. Управляющие сигналы U формируются двух классов — сигналы, предназначенные для извлечения информации о неизвестном параметре X и сигналы, предназначенные для управления. Система автоматической оптимизации производит n наблюдений величины Θ при фиксированном управляющем воздействии $U = U_k - \delta$, что дает некоторую выборку $\Theta_i = \Theta(t_i)$ $i = 1, 2, \ldots, n$. Затем происходит скачкообразное изменение управляющего воздействия на величину 2δ и производится следующая серия из n наблюдений, но уже для фиксированного управляющего воздействия $U = U_k + \delta$.

По этим наблюдениям (измерениям) в общем количестве $2n$ выбирается величина ΔU, на которую надо изменить управляющее воздействие на входе объекта, чтобы величина Θ приняла наименьшее значение. Величина рабочего шага определяется по алгоритму

$$\Delta U = U_{k+1} - U_k = \frac{\bar{\Theta}_1 + \bar{\Theta}_2}{2} \operatorname{sign}(\bar{\Theta}_1 - \bar{\Theta}_2), \tag{41}$$

где величины $\bar{\theta}_1$ и $\bar{\theta}_2$ выражаются в следующем виде:

$$\bar{\theta}_1 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} |U_k - \delta + X|; \quad \bar{\theta}_2 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} |U_k + \delta + X|. \qquad (42)$$

Переход системы из одного состояния в другое происходит через фиксированный интервал времени

$$T_{\text{р. ш}} = 2(n\Delta t + t_1), \qquad (43)$$

где $T_{\text{р. ш}}$ — интервал времени между рабочими шагами;

t_1 — время пробного шага с учетом времени переходного процесса, вызванного этим шагом.

ВЫВОДЫ

1. При построении систем автоматической оптимизации необходимо определить универсальный критерий эффективности технологического процесса. В качестве такого критерия целесообразно принять удельный доход, что наиболее полно согласуется с функцией цели всего предприятия.

2. Для многих технологических процессов статическая характеристика критерия эффективности имеет экстремальный характер и хорошо аппроксимируется степенными полиномами. Обработка экспериментальных данных на ЭЦВМ методом наименьших квадратов позволяет определить коэффициенты полинома.

3. В ряде случаев при неконтролируемых возмущениях на входе возможен вероятностный анализ влияния основного возмущения на характер установившегося случайного процесса изменения критерия эффективности.

4. Для контроля гранулометрического состава продукта дробления конусных дробилок разработан электронный гранулометр, осуществляющий статистический анализ представительных проб по фракционному составу без операций грохочения и взвешивания. Предложена методика определения интервала опробования.

5. Для неконтролируемых возмущений на входе конусной дробилки разработана поисковая система автоматической оптимизации процесса дробления с применением электронного гранулометра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. С. Понтрягин. Оптимальные процессы регулирования. Успехи математических наук, т. XIV, вып. I, 1959.

2. М. А. Субботин, В. Г. Сохин, В. Е. Воскресенский. Автоматическое управление режимом работы конусной дробилки. Сб. трудов ВНИИНеруда «Нерудные строительные материалы», вып. 22, 1966.

3. ГОСТ 8269—64. Щебень из естественного камня, гравий и щебень из гравия для строительных работ. Методы испытаний, М., 1965.

4. Н. А. Лифшиц, В. Н. Пугачев. Вероятностный анализ систем автоматического управления. Изд-во «Советское радио», 1963.

5. В. А. Олейников, О. Н. Тихонов. Автоматическое управление технологическими процессами в обогатительной промышленности. Изд-во «Недра», 1966.

6. М. Б. Карелин, Г. А. Рабинович, А. Я. Ситковский. Электронный метод анализа зернового состава продуктов дробления. «Механизация и автоматизация управления», 1966, № 6.