УДК 533.95

Н.С. ПРЯДКО

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА СТРУЙНОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

На основе стохастической теории управления и результатов экспериментальных исследований предложен метод одномерного оптимального управления процессом струйного измельчения сыпучих материалов при его акустическом мониторинге

На основі стохастичної теорії управління і результатів експериментальних досліджень запропоновано метод одномірного оптимального управління процесом струминного подрібнення сипучих матеріалів при його акустичному моніторингу.

Based on the stochastic control theory and the results of experimental investigations, the method of an one-dimensional optimal control for jet grinding bulk materials with acoustic monitoring is proposed.

Процесс газоструйного измельчения является сложным и довольно энергоемким. В связи с этим актуальной проблемой является определение и поддержание оптимальных режимных параметров для получения максимальной производительности процесса. Проведенные исследования [1 – 3] позволили установить взаимосвязь режимных, технологических параметров и акустических характеристик струйного измельчения. Производительность струйной мельницы при установленных режимных параметрах (давлении и температуры энергоносителя, числе оборотов классификатора) зависит от наполнения струй материалом, т.е. загрузки рабочей зоны материалом. В ходе экспериментальных исследований [4, 5] установлена зависимость величины амплитуды акустических сигналов (АС) от режима измельчения, а именно, амплитуда АС и ее распределение по величине характеризуют степень загрузки струй твердой фазой. Величина амплитуды АС в характерных состояниях струй (загрузка и разгрузка) при измельчении имеет значительные различия – до нескольких порядков, избыточная загрузка струй материалом сопровождается уменьшением амплитуды акустического излучения, что указывает на снижение динамичности измельчения. Изменение размеров частиц в процессе измельчения сопровождается изменением значений амплитуд акустических сигналов при соударениях частиц с волноводом в рабочей зоне мельницы. Максимальные значения амплитуд АС на стадии завершения разгрузки струй коррелируют с параметром дисперсности (удельной поверхности) измельченного продукта [6]. Это позволяет использовать параметры акустоэмиссионного мониторинга для разработки модели управления процессом газоструйного измельчения.

Оптимальное управление при создании модели управления процессом струйного измельчения направлено на обеспечение необходимой загрузки зоны измельчения материалом на основе анализа величины максимальной амплитуды АС в этой зоне. Поскольку акустические сигналы процесса измельчения носят стохастический характер, то для решения задачи оптимального управления можно использовать результаты стохастической теории управления (регулирования) с адаптацией.

Цель данной работы – применение стохастической теории управления для управления процессом струйного измельчения на основе акустического мониторинга рабочей зоны.

В основу этой теории положены допущения о процессе поиска оптимального управления как марковского процесса. В соответствии с этой теорией, оптимальная процедура управления определяется для последовательного процесса с заданным (конечным) числом шагов и квадратичной функцией потерь на каждом шаге. Квадратичные функции потерь приводят к оптимальным процедурам решения, основанным на линейных функциях от управляемых параметров, определяемых в явном виде. При этом в момент выбора значения управления состояние системы может определяться с ошибками либо без ошибок. На данном этапе ограничимся рассмотрением одномерного оптимального управления процессом измельчения без учёта ошибок в определении состояния системы. Такое ограничение правомерно, так как оно отвечает выявленным закономерностям акустического мониторинга, где основным параметром, определяющим загрузку струй материалом, является максимальная величина амплитуды АС.

При одномерном оптимальном управлении процессом струйного измельчения полагаем, что регулируемым органом будет загрузочный бункер, обеспечивающий наполнение струй материалом, а контролируемым параметром, позволяющим реализовать управление, будет величина максимальной амплитуды АС.

Пусть n – заданное натуральное число и $X_n, \ldots , X_{n+1}$ – конечная последовательность $n+1$ значений максимальных амплитуд как случайных величин. Последовательность этих случайных величин можно интерпретировать как состояния измельчительной установки, являющейся в этом случае стохастической системой на разных шагах последовательного n – шагового процесса. Таким образом, X_1 – это начальное состояние системы, а $X_2, \ldots, X_{n+1}$ – состояния системы на последующих шагах.

В соответствии со свойствами случайного марковского процесса, на некотором шаге j ($j=1, \ldots n$) распределение очередного состояния X_{j+1} зависит только от настоящего состояния X_j и от значения u_j некоторой вещественной переменной, называемой управлением. Рассмотренный процесс можно описать следующей системой уравнений:

$$X_{j+1} = \alpha_j X_j + \beta_j + u_j, \quad j = 1,\ldots,n \ , \tag{1}$$

где α_j и β_j – постоянные, $\alpha_j \neq 0$, u_j – значение управления, выбираемое после оценки состояния X_j.

Задача оптимального управления процессом измельчения исходного материала заключается в определении последовательных значений $u_1, \ldots, u_n$ оптимального управления. Рассмотрим дискретный многошаговый процесс решения этой задачи.

При известном начальном состоянии системы $X_1 = x_1$, определим некоторое значение u_1 управления. В условиях неопределенности по отношению плотности распределения величины максимальной амплитуды, будем предполагать, что следующее состояние X_2 имеет нормальное распределение со средним $\alpha_1 x_1 + \beta_1 + u_1$ и дисперсией σ_1^2. После наблюдения $X_2=x_2$ выбираем некоторое значение u_2 управления. Очередное состояние X_3 тогда нормально распределено со средним $\alpha_2 x_2 + \beta_2 + u_2$ и дисперсией σ_2^2. Этот процесс продолжается до заключительного состояния X_{n+1}.

На каждом шаге j ($j=1, \ldots n$) выбор значения управления осуществляется так, чтобы очередное состояние системы X_{j+1} было близко к некоторому требуемому значению величины максимальной амплитуды A_{0j}. Для оптимизации значения управления u_j на j-м шаге будем оценивать некоторую функцию ущерба $\lambda_j(x_j)$. Из предыдущих замечаний ясно, что общий ущерб λ_j на *j*-м шаге (*j =1,..., n*) можно представить в виде:

$$\lambda_j(x_j) = q_j(X_{j+1} - A_0)^2 + r_j u_j^2 . \tag{2}$$

В выражении (2) первый член суммы квадратов в правой части $q_j(X_{j+1} - A_0)^2$ определяет ущерб вследствие отклонения текущего значения величины максимальной амплитуды, соответствующего очередному состоянию системы X_{j+1} (*j* = 1, … *n*), где $q_j \geq 0$ – неотрицательная весовая функция. Второй член суммы выражения функции ущерба (2) $r_j u_j^2$ определяет стоимость выбора значения управления u_j на *j*-м шаге, где r_j – неотрицательная постоянная весовая функция, задающая значимость стоимости выбора управления.

Общий ущерб всего процесса равен сумме

$$L = \sum_{j=1}^{n} \lambda_j \ . \tag{3}$$

Обозначим через $L_j(x_j)$ среднее значение суммы (3), если u_j и дальнейшие значения управления выбираются оптимальным образом. В частности, $L_1(x_1)$ – средний минимальный ущерб для всего процесса, если начальное состояние X_1 есть x_1.

Пусть E_1 при *j* = 1,..., *n* обозначает математическое ожидание, вычисленное относительно распределения случайной величины X_{j+1}, при $X_j = x_j$ и заданном значении управления u_j. Если определить функцию $L_{n+1}(x_{n+1})$ как тождественный нуль, то функции L_1, ... , L_n должны удовлетворять для всех *j=1, …, n* следующему выражению:

$$L_j(x_j) = \inf_{u_j} E_j[\lambda_j + L_{j+1}(X_{j+1})] . \tag{4}$$

Учитывая (3) и используя метод индукции, выражение (4) можно представить в виде квадратичной функции

$$L_j(x_j) = a_{j-1}(x_j - b_{j-1})^2 + c_{j-1} . \tag{5}$$

Если выбрать постоянную ε так, что из уравнения (1) второй начальный момент ($X_{j-1} - \varepsilon$) записать через дисперсию, тогда из (2) квадратичная функция потерь преобразуется к виду:

$$\begin{aligned} &L_j(x_j) = q_j(a_j x_j + \beta_j + u_j - z_j)^2 + r_j u_j^2 + q_j \sigma_j^2 + \\ &a_j(a_j x_j + \beta_j + u_j - b_j)^2 + a_j \sigma_j^2 + c_j \end{aligned} . \tag{6}$$

Тогда из (4) оптимальное управление u_j, обеспечивающее минимум функции квадратичных потерь (6), запишется:

$$u_j = \frac{q_j z_j + a_j b_j - (q_j + a_j)(a_j x_j + \beta_j)}{q_j + a_j + r_j} . \tag{7}$$

После подстановки оптимального управления (7) в выражение (5) и проведения алгебраических преобразований получаем выражения для определения постоянных a_{j-1}, b_{j-1}, c_{j-1}, которые обеспечивают оптимальное управление:

$$a_{j-1} = a_j^2 r_j (q_j + a_j)/(q_j + a_j + r_j); b_{j-1} = \frac{1}{a_j}((q_j z_j + a_j b_j)/(q_j + a_j) - \beta_j);$$
$$c_{j-1} = q_j a_j (z_j - b_j)^2/(q_j + a_j) + (q_j + a_j)\sigma_j^2 + c_j . \quad (8)$$

Двигаясь назад от $a_n = b_n = c_n = 0$ по (8), находим всю последовательность значений коэффициентов для вычисления по (7) оптимальных значений последовательности управлений $u_1,...,u_n$.

Начальное состояние управляемой газоструйной установки X_0 представляет собой случайное значение амплитуд сигналов рабочей зоны помола после загрузки, имеющее нормальное распределение со средним x_0 и дисперсией σ_0^2, которое заранее известно для заданного материала и технологического режима измельчения (на основе экспериментов). В процессе измельчения происходит преобразование этой нормальной величины в нормальное распределение случайной величины, соответствующей амплитудам измельченного продукта необходимой крупности. При этом в ходе измельчения распределение величины амплитуд все более концентрируется возле ее среднего значения. На рис. 1 показано изменение распределения величины амплитуды при измельчении шамота (а), угля (б): кривые 1 – начало измельчения, кривые 2 – конец измельчения.

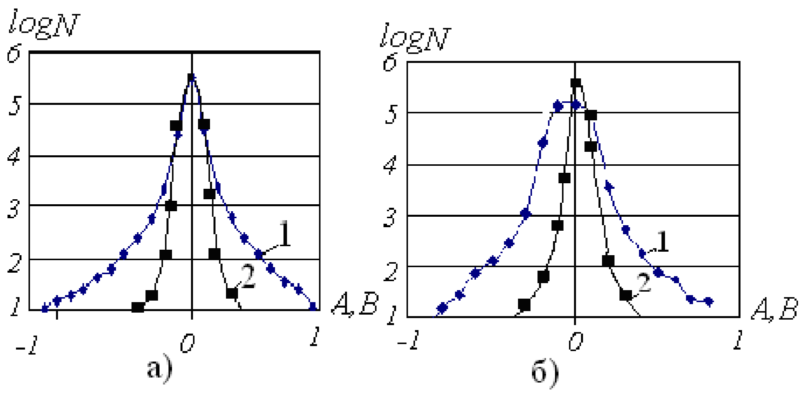

Рис. 1

Для построения адекватной этому процессу измельчения математической модели примем допущение, что в каждый момент измельчения величина амплитуды сигналов представляет собой повторную статистическую выборку из сопряженных нормальных распределений. Основным свойством таких распределений является то, что для любого начального распределения амплитуд ($x_0', \sigma_0'^2$) существует выборочное распределение амплитуд (x', σ'^2), вычисляемое по формуле Байеса [7]

$$x' = (x_0 \sigma''^2 + n x'' \sigma_0^2)/(\sigma''^2 + n\sigma_0^2), \sigma'^2 = \sigma''^2 \sigma_0^2/(\sigma''^2 + n\sigma_0^2), \quad (9)$$

где x'', σ''^2 – значения среднего и дисперсии на предыдущем шаге.

Оптимальный закон управления загрузочным бункером на каждом шаге управления определяется зависимостью: $b_j^z = x_j / k_u$, где x_j, $x'_j = u_j + x_j$ – средние значения амплитуды до и после управления соответственно; u_j – значение оптимального управления, вычисляемое по (7), (8); k_u – коэффициент измельчения, учитывающий свойства измельчаемого материала.

Среднее значение амплитуды при статистическом моделировании процесса управления определяется по формуле $x_j = x_{j-1} + R\sigma_{j-1}$, где R – случайная величина, распределяемая по нормальному закону со средним 0 и дисперсией 1. Значения $x_j, \sigma_j, (j = 1,...n)$ согласно (9) определяются:

$$x_j = (x_0\sigma_{j-1}{}^2 + jx_{j-1}\sigma_0^2)/(\sigma_{j-1}{}^2 + j\sigma_0^2), \sigma_j = \sigma_{j-1}\sigma_0/(\sigma_{j-1}{}^2 + j\sigma_0^2)^{1/2}.$$

На основе описанного подхода проведена оптимизация процесса измельчения для конкретных материалов на экспериментальной измельчительной установке УСИ-29 [8]. Рассматривался непрерывный процесс струйного измельчения (с возвратом недоизмельченного материала после классификатора в помольную камеру). В этом случае весовая функция ущерба q_j алгоритма оптимального управления имеет отличное от нуля значение только на последнем (n) шаге управления в момент, когда текущее значение амплитуды сигнала x_n равно с допустимой точностью требуемому значению z_0. Для промежуточных шагов управления при $j = 1...n-1$ весовая функция будет иметь нулевое значение $q_j = 0$. Метод оптимального управления процессом струйного измельчения на основе акустического мониторинга включает две процедуры: процедуру вычисления коэффициентов a_j, b_j и процедуру вычисления оптимального управления u_j методом индукции назад.

Выводы. На основе стохастической теории управления предложен метод одномерного оптимального управления процессом струйного измельчения при его акустическом мониторинге. Выбраны контролируемые органы и управляемые параметры процесса измельчения. Используя результаты экспериментального исследования процесса газоструйного измельчения различных сыпучих материалов, установлены необходимые априорные распределения величины амплитуды сигналов зоны помола и разработана процедура определения оптимального закона управления процессом измельчения.

1. Акустические и технологические характеристики процесса измельчения в струйной мельнице / *П. И. Пилов, Л. Ж. Горобец, В. Н. Бовенко, Н. С. Прядко* // Известия вузов. Горный журнал. – 2009. – № 4. – С. 117 – 121.
2. Мониторинг изменений технологических и режимных параметров в процессе струйного измельчения строительных материалов / *П. И. Пилов, Л. Ж. Горобец, Н. С. Прядко, И. В. Верхоробина, Б. Ф. Бевзенко, В. П. Кравченко* // Сб. материалов научно-технической конференции «Применение дисперсных и ультрадисперсных порошковых систем в промышленных технологиях, 8 – 10 июля 2008, г. Санкт-Петербург. – С. 112 – 127.
3. Интенсификация процесса струйного измельчения на основе анализа акустических параметров / *Л. Ж. Горобец, Н. С. Прядко, И. А. Шуляк, Ю. Г. Соболевская* // Вібрації в техніці та технологіях. – 2009. – № 2(54). – С. 15 – 19.

4. О повышении эффективности процесса струйного измельчения с использованием акустического мониторинга / *П. И. Пилов, Л. Ж. Горобец, В. Н. Бовенко, Н. С. Прядко, И. В. Верхоробина* // Вестник НТУ «ХПИ». – Харьков. – 2009. – № 25. – С. 74 – 82.
5. Исследование технологических и акустических характеристик струйного измельчения шамота / *П. И. Пилов, Л. Ж. Горобец, Н. С. Прядко, Г.А. Стрельников* // Сб. «Наукові праці ДонНТУ».– Донецк.– 2008.– № 15 (131).– С. 158 – 164.
6. Акустическое исследование измельчаемости гетерогенных материалов струйным способом / *П. И. Пилов, Л. Ж. Горобец, В. Н. Бовенко, Н. С. Прядко //* ЗКК. – 2008. – № 34 (75). – С. 67 – 74.
7. *Де Гроот М*. Оптимальные статистические решения / *М. Де Гроот*. – М. : Мир, 1974. – 491с.
8. *Прядко Н. С*. Об износе разгонных трубок при газоструйном измельчении / *Н. С. Прядко, Н. Д. Коваленко, Г. А. Стрельников, В. А. Грушко, Н. П. Сироткина* // Техническая механика. – 2009. – № 4. – С. 94 – 110.

Институт технической механики
НАН Украины и НКА Украины,
Днепропетровск

Получено 20.05.10,
в окончательном варианте 10.06.10