

УДК 622.232.7

В.П. КОНДРАХИН (д-р техн. наук, проф.)

А.И. ХИЦЕНКО (канд. техн. наук, доц.)

Донецкий национальный технический университет

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСИЛИЙ РЕЗАНИЯ И ПОДАЧИ ПРИ РЕЗАНИИ ГОРНЫХ ПОРОД

Предложена имитационная математическая модель формирования усилий резания и подачи при резании горных пород рабочим инструментом горных машин, основанная на представлении процесса в виде потока случайных событий – единичных актов разрушения, и произведена идентификация параметров.

усилие резания, усилие подачи, математическая модель, случайные составляющие, резец, идентификация параметров

Проблема и ее связь с научными или практическими задачами. Повышение технического уровня проходческих комбайнов на основе оптимизации их параметров является актуальной для современного горного машиностроения. Для проведения оптимизации необходимо разработать модель, описывающую процесс функционирования комбайна. Важной составляющей такой модели является математическая модель процесса формирования нагрузок на резцах проходческого комбайна при резании горных пород.

Анализ исследований и публикаций. Изучение закономерностей формирования усилий при резании угля и горных пород необходимо для исследования и оптимизации рабочих процессов породоразрушающих машин [1]. В настоящее время достаточно полно разработаны вопросы имитационного моделирования нагрузок на рабочих инструментах при выемке угля очистными комбайнами [2]. Следует подчеркнуть, что для горных пород вполне решенной можно считать только задачу моделирования средних нагрузок [3].

Постановка задачи. Для широкого распространения методов имитационного моделирования в практику исследования и проектирования породоразрушающих машин необходимо разработать достаточно общую и простую математическую модель формирования динамических составляющих нагрузок на их рабочих инструментах при резании широкого класса горных пород и полезных ископаемых. Модель должна содержать минимальное количество параметров, требующих экспериментального определения или идентификации.

Изложение материала и результаты. Предлагаемая математическая модель процесса резания позволяет определить мгновенные значения усилий резания и подачи. При резании пород боковым усилием можно пренебречь, так как в большинстве случаев оно мало по сравнению с усилиями резания и подачи. При резании угля создание модели для определения мгновенных значений бокового усилия затруднительно ввиду отсутствия его корреляции с усилием резания.

Разработанная модель процесса резания основана на представлении процесса в виде потока случайных событий – единичных актов разрушения (сколов). Данная модель имеет малое число параметров, что позволяет ее использовать для широкого класса пород, для которых определение параметров математической модели весьма затруднительно. Учет сопротивляемости пласта резанию, изменения геометрических параметров резца в процессе резания, а также других факторов, влияющих на формирование нагрузки на резце комбайна, производится косвенным путем через определение средних усилий резания и подачи в соответствии с [3].

При моделировании процесса резания по предлагаемой модели усилие резания на резце в каждый момент времени определяется как сумма усилий, формируемых в каждом i -том единичном акте разрушения (см. рис.):

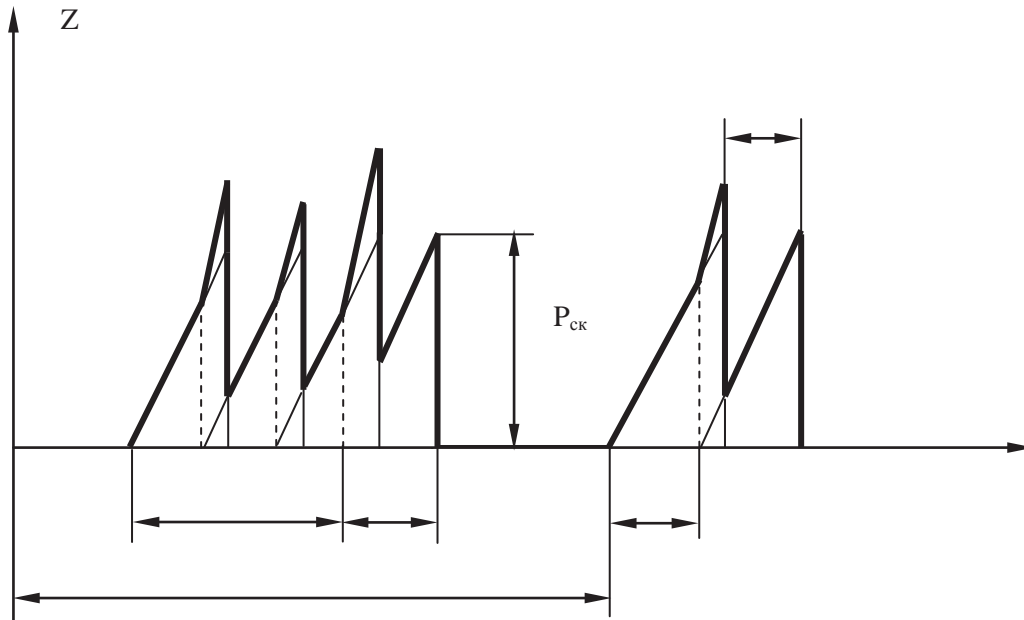


Рисунок 1. Определение усилия резания

$$Z(t) = \sum_{i=N_1}^{N_2} Z_i$$

где N_1, N_2 – порядковые номера первого и последнего из начавшихся, но еще не закончившихся единичных актов разрушения;

Z_i – усилие резания, формирующееся в каждом единичном акте разрушения:

$$Z_i = \begin{cases} C_{\Pi} \Delta X_i(t), & \Delta X_i(t) \leq P_{\text{ск}}/C_{\Pi}; \\ 0, & \Delta X_i(t) > P_{\text{ск}}/C_{\Pi}, \end{cases}$$

где $\Delta X_i(t)$ – упругопластические деформации рассматриваемого объема породы в данном единичном акте нагружения:

$$\Delta X_i(t) = l(t) - l_i,$$

где $l(t)$ – путь, пройденный резцом за время t ;

$P_{\text{ск}}$ – усилие, при котором происходит хрупкое разрушение и отделение рассматриваемого объема породы:

$$P_{\text{ск}} = \sqrt{\frac{2Z_{\text{ср}}C_{\Pi}}{\lambda}},$$

где $Z_{\text{ср}}$ – математическое ожидание усилия резания;

C_{Π} – линейризованный коэффициент псевдожесткости породы;

λ – интенсивность потока единичных актов разрушения, m^{-1} .

Положение резца в момент начала i -того скола определяется как

$$l_i = l_{i-1} + \Delta l_i,$$

где Δl_i – случайная величина интервала между началами сколов.

Полученная описанным выше способом реализация мгновенных значений усилия резания может быть использована для моделирования усилия подачи, так как эти процессы взаимно коррелированы. Так, полученный при обработке экспериментальных данных коэффициент взаимной корреляции между усилиями резания и подачи при резании песчанистого сланца находится в пределах 0,79–0,88.

Мгновенные значения усилия подачи определяются следующим образом:

$$Y_i = Y_{cp} + k_i (Z_i - Z_{cp}),$$

где Y_{cp} – математическое ожидание усилия подачи;

k_i – мгновенное значение случайной функции, определяемой как отношение мгновенных значений усилия подачи и усилия резания, обусловленных цикличностью процесса хрупко–пластического разрушения породы.

Параметр k_i имеет достаточно ясный физический смысл. Он представляет собой тангенс угла наклона вектора случайной составляющей нагрузки на резец по отношению к плоскости резания. Функция k рассматривается как стационарная эргодическая случайная функция пути, пройденного резцом, которая характеризуется законом распределения и автокорреляционной функцией.

Моделирование коэффициента k производится по рекуррентным зависимостям [4]:

$$k_i = \sigma_{0Y} \sqrt{\psi_{1i}^2 + \psi_{2i}^2},$$

$$\psi_{1i} = e^{-\frac{\alpha \Delta l_M}{2}} \psi_{1(i-1)} + \sqrt{1 - e^{-\frac{\alpha \Delta l_M}{2}}} \xi_{1i},$$

$$\psi_{2i} = e^{-\frac{\alpha \Delta l_M}{2}} \psi_{2(i-1)} + \sqrt{1 - e^{-\frac{\alpha \Delta l_M}{2}}} \xi_{2i}.$$

где Δl_M – шаг моделирования, м;

α – показатель затухания автокорреляционной функции, м-1 ;

ψ_{1i} и ψ_{2i} – независимые нормальные случайные процессы с математическим ожиданием, равным 0, дисперсией, равной 1, и нормированной корреляционной функцией $r_0 = e^{-\frac{\alpha \mu}{2}}$.

Параметрами разработанной математической модели процесса резания являются: для определения мгновенных составляющих усилия резания – интенсивность потока сколов λ , коэффициент псевдожесткости породы S_p и параметр закона распределения интервалов между сколами; для определения мгновенных составляющих усилия подачи – параметры случайной функции k : σ_{0Y} и α .

В ходе экспериментальных исследований по резанию породы получено эмпирическое выражение для определения интенсивности потока сколов по известному среднему значению усилия резания:

$$\lambda = 5050 Z_{cp}^{-0,352}.$$

Параметр S_p для условий резания пород определялся методом параметрической идентификации путем сравнения спектральных плотностей усилий резания с использованием метода наименьших квадратов, а также по гистограммам распределения усилия резания с применением критерия согласия Пирсона χ^2 . Полученная в результате иден-

тификации зависимость коэффициента псевдожесткости от среднего значения усилия резания имеет вид:

$$C_{\Pi} = 0,495Z_{\text{ср}}^{0,810}.$$

Для сокращения количества параметров модели, требующих идентификации, рассмотрены потоки событий, для которых интервалы времени (или пути Δl) распределены по однопараметрическим законам. Как показали проведенные исследования, заключающиеся в подборе закона распределения величины Δl , при резании породы целесообразно использовать рэлеевское распределение, как однопараметрическое и более близкое к экспериментальным данным. Параметр распределения σ_{0Z} равен:

$$\sigma_{0Z} = \frac{0,798}{\lambda}.$$

Интервал между сколами определяется из выражения:

$$\Delta l_i = \sigma_{0Z} \sqrt{\xi_1^2 + \xi_2^2},$$

где ξ_1, ξ_2 – независимые нормально распределенные случайные величины с математическим ожиданием, равным 0, и дисперсией, равной 1.

Идентификация параметра σ_{0Y} производилась путем сравнения спектральных плотностей усилий подачи, полученных экспериментально и при моделировании. Критерием сравнения была выбрана величина, равная сумме квадратов отклонений. По результатам проведенной идентификации получена эмпирическая зависимость параметра σ_{0Y} от отношения средних значений усилий подачи и резания:

$$\sigma_{0Y} = 0,455 \frac{Y_{\text{ср}}}{Z_{\text{ср}}} + 0,118.$$

Как показал анализ результатов статистической обработки, нормированная автокорреляционная функция исследуемой случайной функции k может быть аппроксимирована экспонентой

$$r(\mu) = e^{-\alpha|\mu|}.$$

В результате идентификации параметра α установлено, что при его изменении в пределах 50...2000 м⁻¹ результаты моделирования изменяются незначительно. Для имитационного моделирования усилия подачи рекомендуется принимать коэффициент затухания автокорреляционной функции $\alpha = 200$ м⁻¹. При этом достигается наибольшее сходство результатов натуральных и вычислительных экспериментов.

Выводы и направления дальнейших исследований. В результате анализа адекватности разработанной интегральной математической модели реальным процессам [5, 6] установлено, что разработанная модель в основном адекватно описывает процесс резания горных пород. Таким образом, разработанная модель может использоваться для исследования и оптимизации породоразрушающих машин и их рабочих процессов.

Библиографический список

1. Кондрахин В.П. Математическое моделирование рабочих процессов и оптимизация структуры и параметров породоразрушающих горных машин: дис. ... докт. техн. наук: 05.05.06. / В.П. Кондрахин. - Донецк, 1999. - 412с.
2. Бойко Н.Г. Динамика очистных комбайнов / Н.Г. Бойко. - Донецк: РВА ДонНТУ, 2004. - 206 с.
3. Комбайны проходческие со стреловидным исполнительным органом. Расчет эксплуатационной нагруженности трансмиссии исполнительного органа : ОСТ 12.44.197-81. - Введ. с 01.07.82. - М.: Минуглепром СССР, 1981. - 59 с.

4. Быков В.В. Цифровое моделирование в статистической радиотехнике / В.В. Быков. – М.: Советское радио, 1971. – 326 с.

5. Кондрахин В.П. Имитационное моделирование процесса формирования нагрузок на резцах при резании горных пород / В.П. Кондрахин, А.И. Осипенко // Наукові праці Донецького державного технічного університету. - 2000. - Вип. 16. - С. 161 - 168.

6. Кондрахин В.П. Имитационное моделирование усилия подачи при резании горных пород / В.П. Кондрахин, А.И. Хищенко // Наукові праці Донецького державного технічного університету. - 2002. - Вип. 42. - С. 124 - 129.

Надійшла до редколегії 12.10.2010

В.П. Кондрахин, Г.І. Хищенко

Запропоновано імітаційну математичну модель формування зусиль різання та подачі при різанні гірських порід робочим інструментом гірничих машин, яка заснована на уявленні процесу в вигляді потоку випадкових подій - одиничних актів руйнування, та проведено ідентифікацію параметрів.

зусилля різання, зусилля подачі, математична модель, випадкові складові, різець, ідентифікація параметрів

V. Kondrakhin, A. Khitsenko

A mathematical model for simulation of the process of rock cutting by the working instrument of mining machines is proposed. The model is based on its representation by a stream of random events - simple acts of destruction. The parameters of the model are identified.

cutting forces, mathematical model, stochastic loads, cutter, identification of parameters

© Кондрахин В.П., Хищенко А.И., 2010