УДК 622.693.2:621.796

Ю.В. Лаптев, Р.С. Титов

КОНСТРУИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «ЗАБОЙ-ПЕРЕГРУЗОЧНЫЕ СКЛАДЫ-ФАБРИКА»

Представлена теоретическая модель формирования карьерного транспортного потока с применением схемы отрицательного биномиального распределения. Показано, что в динамической системе «забой — перегрузочные склады — фабрика» плотность транспортного потока зависит от соотношений: время доставки рудного материала: время обслуживания автомобильного (входной поток) и железнодорожного (выходной поток) транспорта. Полученные результаты моделирования служат основой для оптимизации совокупного объема перегрузочных складов в карьере.

Ключевые слова: перегрузочный склад, транспортный поток, добыча.

Современные горные предприятия представляют собой сложные производственные системы. Обеспечить требуемую производительность таких систем возможно только путем создания резервов на каждом производственном процессе. При этом степень готовности и независимости смежных процессов напрямую зависят от резервов производственных мощностей и запасов, подготовленных к добыче. Таким образом обоснование производственной мощности предприятия связано с обоснованием резервов в каждом структурном элементе системы.

Перегрузочные склады как средства предприятия, используемые в целях обеспечения основной и любой сопутствующей его деятельности, относятся к материально-производственным запасам.

Оптимизация материально-производственных запасов в условиях рыночной экономики приобретает особый, важный смысл в связи с происходящими в мире финансово-экономическими потрясениями.

В этом случае совокупность перегрузочных складов представляется как динамическое звено.

Перегрузочные склады являются частью динамической системы. Под динамической системой понимается совокупность средств преобразования исходной информации по определенному алгоритму. Динамическая система включает в себя три основные составляющие: входной поток $x(t)$, оператор преобразования A и выходной поток $y(t)$ (рис. 1). Поток $x(t)$ называется воздействием, $y(t)$ — реакцией.

На рис. 2 представлена структурная схема динамической системы «забой — перегрузочный склад — обогатительная фабрика» на ОАО «Ураласбест».

Перегрузочные склады как аккумулирующее и передаточное звено выполняют связующую функцию между автомобильным и железнодорожным транспортом, обеспечивающую работу перегрузки. Формирование карьерных транспортных потоков является важной научной и практической задачей, решение которой позволяет определить основные характеристики динамической системы «забой — перегрузочные склады — фабрика».

В теории транспортных потоков для оценки вероятности появления того или иного события, происходящего

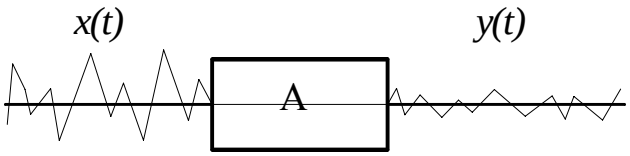

Рис. 1. Простейшая структура динамической системы

Рис. 2. Структурная схема динамической системы «забой — перегрузочный склад — ОФ» на ОАО «Ураласбест»

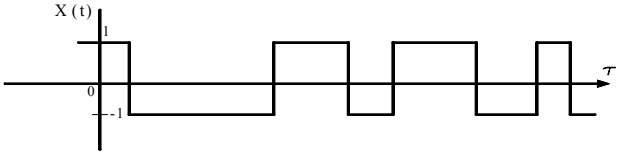

Рис. 3. Принципиальная схема динамического графика транспортного потока

при движении автомобилей или составов, используются два метода.

Первый метод дает статистическую вероятность, которая имеет большое значение в математике; *второй метод* приводит к теоретической вероятности.

Теорию вероятности и математическую статистику можно сравнить с двумя пешеходами, приближающимися к одному и тому же дому с противоположных сторон улицы. В теории вероятности основные факторы известны, но результат нельзя предсказать с абсолютной достоверностью. В математической статистике имеется конечный результат, но причины, обусловившие его появление, неизвестны [2].

В настоящей работе карьерный транспортный поток рассматривается с точки зрения теоретической вероятности появления каждого транспортного объекта на разгрузке.

В практике научных исследований динамический график транспортного потока представляется в виде «телеграфного сигнала» (рис. 3).

Теоретическое конструирование карьерного транспортного потока предполагает следующее [1]:

- определение динамических характеристик потока на основе следующих положений;
- для потоков типа «телеграфная волна» справедливо равенство

$$R(\tau) = e^{-\lambda\tau} = \left(1 - \frac{2}{\bar{\tau}}\right)^{\tau}, \qquad (1)$$

откуда

$$\lambda = -\ln\left(1 - \frac{2}{\bar{\tau}}\right), \qquad (2)$$

где λ — коэффициент погашения автокорреляционной функции транспортного потока; $\bar{\tau}$ — средний полупериод колебания плотности транспортного потока за интервал времени.

- из условия (1) вытекает, что $\bar{\tau} > 2$;
- условиям простейшего или пуассоновского потока отвечает экспоненциальное распределение τ, как период отклонений;
- на вид распределения полупериода оказывает влияние обеспечение

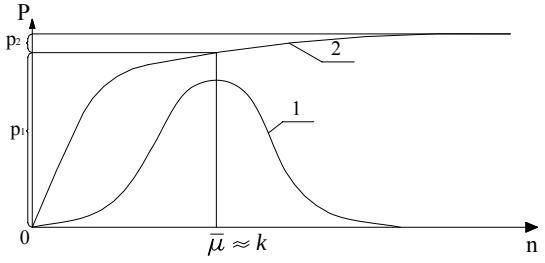

Рис. 4. Дифференциальная (1) и интегральная (2) кривые отрицательного биномиального распределения карьерного транспортного потока

определенного режима подачи руды. При наличии трех и более рудных забоев, питающих склады, или обогатительную фабрику, транспортный поток приближается по своим характеристикам к схеме простейшего потока.

Таким образом, параметры $\bar{\tau}$ и λ являются основными для оценки плотности карьерного транспортного потока.

В теоретическом плане параметры $\bar{\tau}$ и λ определяются следующим образом:

• в качестве теоретической модели формирования карьерного транспортного потока принимается схема с применением отрицательного биномиального распределения [2]. Отрицательное биномиальное распределение предполагает, что необходимо провести Z испытаний сверх требуемых k. Если ввести обозначение $n=Z+k$, то получается выражение

$$P(z;k;q) = C_{k+z}^{k} q^{k} (1-q)^{Z} \qquad (3)$$

или $P(n;k;q) = C_{n}^{k} q^{k} (1-q)^{n-k}$. (4)

Последняя формула отражает биномиальное распределение с математическим ожиданием

$$\bar{\mu} = \frac{k \cdot (1-q)}{q}, \qquad (5)$$

где q — вероятность единичного события «поступление транспорт на разгрузку».

Величина q определяется из результатов исследований [2]. В работе Д. Дрю [2] утверждается, что «если средняя интенсивность прибытия в рассматриваемом периоде составляет 10 автомобилей в минуту, то вероятность прибытия 10 и более автомобилей равна 0,54. Для любой пары последовательных интервалов длительностью 1 мин. вероятность прибытия не менее 10 автомобилей в каждом интервале равна 0,54:0,54. Вероятность прибытия в каждом интервале менее десяти автомобилей составляет 0,46: 0,46.

Остаются еще две возможности: в первом интервале прибывает не менее 10 автомобилей, а во втором интервале прибывает менее 10 автомобилей и наоборот. В итоге, вероятность каждой из этих комбинаций равна $p : q$ = 0,54:0,46.

Исходя из данных [2], вероятность единичного события поступления транспортной емкости на разгрузку принимается $q \approx 0{,}5$;

— величина $\bar{\tau}$ определяется по следующему алгоритму представленному далее.

Производится построение интегральной кривой отрицательного биномиального распределения (рис. 4).

Величина $k_{а/с}$ требуемых событий определяется из выражения

$$k_{а/с} = \overline{N}_{см} = \overline{N}_{заб} \cdot \overline{N}_{а/с}, \qquad (6)$$

где $\overline{N}_{см}$ — среднее количество автосамосвалов, формирующих транспортный поток «забой-склад» в смену; $\overline{N}_{заб}$ — среднее количество добычных забоев, выделяемых в смену на

загрузку перегрузочных складов; $\overline{N}_{э/с}$ — среднее количество автосамосвалов, закрепленных за забойными экскаваторами, в смену.

Соответственно, величина $k_{ж/д}$ требуемых событий поступления железнодорожных составов на фабрику определяется из выражения

$$k_{ж/д} = \overline{N}_{п/с} \cdot \overline{N}_{сост}, \quad (7)$$

где $\overline{N}_{п/с}$ — среднее количество перегрузочных складов, разгружающих добытую массу на фабрики; $\overline{N}_{сост}$ — среднее количество ж/д составов, закрепленных за перегрузочным складом.

В практике горного производства количество $K_{ж/д}$ является величиной, которую комбинат планирует и выделяет ежесменно. Количество испытаний z, сверх требуемого K в отрицательном биномиальном распределении определяется из соотношений

$$Z = A \cdot k, \quad (8)$$

$$A = \frac{t_{обсл}}{t_{ц}} = \frac{t_{обсл}}{t_{дв} + t_{обсл}}, \quad (9)$$

где A — доля времени обслуживания единицы транспорта $t_{обсл}$ в общем времени его рабочего цикла $t_{ц}$; $t_{дв}$ — время движения транспортной единицы, доставляющей рудный материал.

$$t_{дв} = \frac{S}{\overline{\nu}}, \quad (10)$$

где S — средневзвешенное расстояние транспортирования рудного материала, $\overline{\nu}$ — средняя скорость доставки рудного материала груженым транспортом

Время обслуживания карьерной транспортной единицы составляет

$$t_{обсл} = t_{погр} + t_{ож} + t_{ман} + t_{разгр} + t_{пор}, \quad (11)$$

где $t_{погр}$ — время погрузки транспортного сосуда (автосамосвал, ж/д состав); $t_{от}$ — время ожидания погрузки — разгрузки; $t_{ман}$ — время маневрирования на разгрузочно-погрузочных площадках; $t_{разгр}$ — время разгрузки; $t_{пор}$ — время движения порожнего транспортного сосуда

Представление динамического графика транспортного потока в виде «телеграфной волны» (рис. 3) предполагает наличие тренда по количеству «скачков». Этот способ используется в теории математической статистики, когда упорядоченная последовательность состоит из двух типов элементов, которые условно можно обозначить знаком (+) и (-). «Скачком» в данном случае называется интервал последовательности, включающий один или более одинаковых элементов. Статистическое распределение количества «скачков» в случайных последовательностях асимптотически близко к нормальному с математическим ожиданием

$$\overline{m} = \frac{2m_1 m_2}{m_1 + m_2} + 1, \quad (12)$$

где m_1 — количество «скачков», включающих элементы со знаком (+); m_2 — количество «скачков», включающих элементы со знаком (-).

Значения m_1 и m_2 определяются из следующих выражений

$$m_1 = \overline{N}_{ход} \cdot p_1, \quad (13)$$

$$m_2 = \overline{N}_{ход} \cdot p_2,$$

где $\overline{N}_{ход}$ — количество рейсов транспортных единиц в смену; p_1 и p_2 — соответственно, доля «скачков» со знаками (+) и (-), определяемая из интегральной кривой распределения (рис. 4).

Исходя из выражения (13), величина $\overline{m}$, определяется следующим образом

$$\overline{m} = 2\overline{N}_{ход} \cdot p_1 \cdot p_2 + 1. \quad (14)$$

Таким образом, средний полупериод динамического графика карьерного транспортного потока $\bar{\tau}$ имеет вид

$$\bar{\tau} = \frac{\overline{N}_{\text{ход}}}{\overline{\text{m}}} = \frac{\overline{N}_{\text{ход}}}{2\overline{\text{N}}_{\text{ход}} \cdot p_1 \cdot p_2 + 1}. \qquad (15)$$

Величина $\bar{\tau}$ является важной характеристикой, отражающей плотность транспортных потоков.

Перегрузочные склады по характеру своего функционирования с точки зрения теории автоматического регулирования можно отнести к инерционным звеньям первого порядка. Как следует из работ Лукаса В.А., Солодовникова В.В. и др. [3—5] инерционными звеньями первого порядка являются конструктивные элементы, которые могут накапливать и передавать вещество или энергию.

В случае накопления массы это полностью соответствует сути решаемой задачи.

Дифференциальное уравнение звена первого порядка имеет вид

$$T\frac{dy(t)}{dt} + y(t) = Kx(t), \qquad (16)$$

где K — передаточный коэффициент, характеризующий свойства звена в статическом режиме; T — постоянная времени, характеризующая инерционность звена.

Переходную функцию звена можно найти из решения уравнения (16). Выражение для переходной функции имеет вид

$$h(t) = K(1 - e^{-\frac{t}{T}}), \qquad (17)$$

где K — передаточный коэффициент, характеризующий свойства звена в статическом режиме; t — переменная времени.

В рамках решаемой задачи смысл коэффициента K приобретает значение количества транспортных емкостей, загружающих склад или бункер фабрики в смену. Постоянная времени Т дифференциального уравнения (16) определяется из следующих положений и преобразований:

- по совокупности требований [1] к формированию простейших потоков уравнения нормированной автокорреляционной функции для входного и выходного потоков имеют вид

$$R_{BX}(\tau) = e^{-\lambda_1|\tau|} \quad (18) \quad R_{BЫX}(\tau) = e^{-\lambda_2|\tau|},$$

где λ_1, λ_2 — соответственно, коэффициенты погашения автокорреляционной функции входного и выходного потоков.

Величины λ_1 и λ_2 определяются из выражений

$$\lambda_1 = -\ln(1 - \frac{2}{\bar{\tau}_{BX}}), \qquad (19)$$

$$\lambda_2 = -\ln(1 - \frac{2}{\bar{\tau}_{BЫX}}).$$

где $\bar{\tau}_{BX}, \bar{\tau}_{BЫX}$ — соответственно, параметры среднего полупериода отклонений входного и выходного транспортного потока, определяемые по алгоритму, представленному ранее (1, 2);

- определяются значения спектральной плотности входного и выходного потоков. В теории автоматического регулирования величина спектральной плотности случайного сигнала $S(\omega)$ связана с автокорреляционной функцией сигнала $R(\tau)$ преобразованием Винера-Хинчина

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) \cdot e^{-j\omega\tau} d\tau. \qquad (20)$$

Для функции $R(\tau)$ вида

$$R(\tau) = e^{-\lambda\tau},$$

выражения спектральных плотностей потоков имеют вид

$$S_{BX}(\omega) = \frac{2\lambda_1}{\lambda_1^2 + \omega^2}, \qquad (21)$$

$$S_{ВЫХ}(\omega) = \frac{2\lambda_2}{\lambda_2^2 + \omega^2}$$

• определяется квадрат модуля амплитудно-частотной характеристики динамического звена «перегрузочные склады»

$$|\Phi(i\omega)|^2 = \frac{K^2}{T^2\omega^2 + 1}, \quad (22)$$

$$|\Phi(i\omega)|^2 = \frac{S_{вых}(\omega)}{S_{вх}(\omega)}. \quad (23)$$

Из соотношений (22) и (23) имеем

$$\frac{K^2}{T^2\omega^2 + 1} = \frac{S_{вых}(\omega)}{S_{вх}(\omega)} =$$

$$= \frac{2\lambda_2}{\lambda_2^2 + \omega^2} \cdot \frac{\lambda_1^2 + \omega^2}{2\lambda_1} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \cdot \frac{\lambda_1^2 + \omega^2}{\lambda_2^2 + \omega^2} \quad (24)$$

Преобразование соотношения (24) приводит к определению величины T, выражаемой следующим образом

$$T = \sqrt{\frac{K^2}{B\omega^2} \cdot \frac{\lambda_2^2 + \omega^2}{\lambda_1^2 + \omega^2} - \frac{1}{\omega^2}}, \quad (25)$$

где $B = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$.

Учитывая соотношение $\omega = \frac{1}{\tau}$, выражение (25) имеет вид

$$T = \sqrt{\frac{K^2\tau^2}{B} \cdot \frac{\lambda_2^2\tau^2 + 1}{\lambda_1^2\tau^2 + 1} - \tau^2}, \quad (26)$$

$$T = \tau\sqrt{\frac{K^2}{B} \cdot \frac{\lambda_2^2\tau^2 + 1}{\lambda_1^2\tau^2 + 1} - 1}. \quad (27)$$

Таким образом, величина T зависит от параметров входного и выходного потоков, связанных, соответственно, с параметрами автокорреляционных функций λ_1 и λ_2.

Учитывая, что параметр τ является интервальным показателем и запаздывающим в переходной функции *h(t)*, то при $\tau = 1$ получаем величину T для *h(t)*

$$T = \sqrt{\frac{K^2}{B} \cdot \frac{\lambda_2^2 + 1}{\lambda_1^2 + 1} - 1}. \quad (28)$$

Таким образом, проведенные теоретические исследования показали следующее:

• параметры транспортного потока, поступающего на перегрузочные склады, зависят от соотношения: «время доставки груза/ время обслуживания автотранспорта»;

• параметры транспортного потока «склады — ОФ», зависят от соотношения «время поставки рудного материала на ОФ/ время обслуживания ж/д транспорта».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гальянов А.В., Шерстянкин О.А.* К вопросу конструирования рудных потоков по заданным вероятностным характеристикам // Сб. научн. трудов/ИГД МЧМ СССР — Свердловск, 1981. — № 67. — С. 66—72.

2. *Дрю Д.* Теория транспортных потоков и управление ими. — М.: Транспорт, 1972. — 424 с.

3. Техническая кибернетика// Под ред. Солодовникова В.В. Кн.1. — М.: Машиностроение, 1967. — 767 с.

4. *Техническая* кибернетика// Под ред. Солодовникова В.В. Кн.2. — М.: Машиностроение, 1967. — 679 с.

5. *Лукас В.А.* Теория автоматического управления. — М.: Недра, 1990. — 416 с. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Лаптев Юрий Викторович — доктор технических наук, заведующий лабораторией управления качеством минерального сырья,

Титов Роман Сергеевич — младший научный сотрудник лаборатории управления качеством минерального сырья.

Институт горного дела УрО РАН, e-mail: direct@igd.uran.ru.