

## ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА РИСКОВ ПРОСТОЕВ АВТОСАМОСВАЛОВ ПРИ ОТКРЫТОЙ РАЗРАБОТКЕ НА ОСНОВЕ ПОТОКОВЫХ ГРАФОВ

*А.Ю. Дриженко, В.И. Корсун, К.В. Литвиненко Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», Украина*

Представлена новая методика численной оценки рисков простоев в единичном транспортном цикле автосамосвала при открытой разработке полезных ископаемых. Метод основан на процедурах потоковых графов и ГЕРТ – анализа. Проведен анализ работоспособности предложенной методики на примере горнотранспортной системы карьера Полтавского ГОКа.

**Вступление.** Наблюдаемые колебания интенсивности движения горной массы на выходах карьера обусловлены сложной природой процесса добычи полезного ископаемого. Причины таких колебаний, имеющие стохастическую природу, различны как по частоте и характеру появления, так и по величине влияния на режимы работы и приводят к значительным временным ограничениям потенциальной производительности системы [1,2]. Одно из главных влияний на указанные колебания вносит горнотранспортная система карьера.

Масштабы и сложность горного производства позволяют разделить горнотранспортную сеть карьера на несколько участков с независимыми транспортными потоками, разделенными приемными, бункерными устройствами или накопительными складами. Эффективность работы транспортного звена на каждом из указанных участков горнотранспортной системы влияет на общую эффективность всей транспортно-технологической цепи.

В идеальном случае каждая транспортная единица при выполнении всех рейсов не должна простаивать. Однако при невозможности предусмотреть регламент всех работ, возможные поломки и человеческий фактор, имеет место стохастичность процессов погрузки – разгрузки и движения транспортных средств.

В такой ситуации оперативному управлению и планированию должен предшествовать процесс ситуационного анализа для принятия обоснованного оптимального решения. Этот анализ, с целью последующих качественных управляющих воздействий, может обеспечить расчет показателей категории «риск». Рисковый анализ является одним из методов нахождения «узких» мест в цепи «забой – ДОФ», внутри которых следует искать оптимальный вариант управляющих воздействий.

**Постановка задачи.** Под риском в литературе понимается угроза частичной или полной потери эффективности производственной деятельности в результате действия некоторых неблагоприятных факторов [3,4,5]. В абсолютном выражении риск определяется величиной возможных потерь в стоимостном выражении; в относительном – риск есть величина возможных потерь, отнесенных к одному из показателей: себестоимость, стоимость, прибыль. Для предотвращения потерь следует на основании некоторого критерия оценить степень риска и стремиться снизить его до более низкого уровня, уменьшая степень отрицательного воздействия на конечный результат. В качестве критерия при рисковом анализе участков горнотранспортной системы выступает потеря производительности горнотранспортного оборудования по времени. В данной работе предлагается метод определения количественной характеристики рисков транспортных единиц, как локального критерия прогнозируемой величины простоев и убытков.

**Цель работы.** В работе предложена методика расчета количественных значений риска простоев автомобильного звена в одном транспортном цикле на основе процедур потоковых графов.

**Основной материал и результаты.** В классическом определении риск  $R$  понимается как скалярное произведение двух векторов: вектора величин стоимостных оценок потерь  $A_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , и вектора вероятностей их реализации  $p_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$  при реализации принятого решения

$$R = \sum_{i=1}^n A_i p_i = A_i p^i, \quad (1)$$

где  $A_i p^i$  - есть тензорная свертка [3].

Для рискованого анализа производственных систем и комплексов, представленных сетевыми структурами, подход (1) не применим. Адекватной альтернативой, по нашему мнению, является трактовка риска как произведения математического ожидания случайной величины неблагоприятного события на величину стоимостной оценки события

$$R = A_i E[x_i], \quad (2)$$

где  $E[x_i]$  - математическое ожидание величины  $x_i$ .

Такое определение риска подходит для применения в сетевых математических моделях со стохастической структурой и позволит оценивать численно величину риска.

*Анализ технологического процесса.* Элементом горнотранспортной системы глубоких карьеров являются автомобильные звенья, транспортирующие горную массу от забойных экскаваторов до перегрузочных пунктов (перегрузочных эстакад, приемных устройств дробилок, бункерных устройств). В направлении забоя автотранспорт движется порожняком, а в направлении разгрузочного пункта – загруженным. Выбор места загрузки в забое определяется диспетчерской службой или жестким закреплением автосамосвала за экскаватором.

Время продолжительности единичного транспортного цикла автосамосвала  $T$  представляет собой сумму

$$T = t_{погр} + t_{движ} + t_{разгр} \quad (3)$$

где  $t_{погр}$  - время погрузки автосамосвала;

$t_{движ}$  - время движения автосамосвала из забоя к разгрузочному пункту;

$t_{разгр}$  - время погрузки автосамосвала на разгрузочном пункте.

Известно, что слагаемые равенства (3) определяются аналитическими выражениями

$$t_{погр} = \frac{V_{сам}}{n_э \cdot V_{к.э}}$$

где  $V_{сам}$  - объем кузова автосамосвала,

$V_{к.э}$  - объем ковша экскаватора,

$n_э$  - количество ковшей экскаватора для загрузки автосамосвала;

$$t_{движ} = \frac{L_{мп}}{V_{авт}}$$

где  $L_{мп}$  - расстояние транспортирования автосамосвалами,

$V_{авт}$  - скорость автосамосвала;

$$t_{разгр} = t_{ман} + t_{отвала}$$

где  $t_{ман}$  - время маневра автосамосвала,

$t_{отвала}$  - время разгрузки горной массы из кузова автосамосвала.

Таким образом, аналитическое выражение времени продолжительности единичного транспортного цикла автосамосвала имеет вид

$$T = \frac{V_{сам}}{n_э \cdot V_{к.э}} + \frac{L_{мп}}{V_{авт}} + t_{ман} + t_{отвала}. \quad (4)$$

Однако равенство (4), являясь детерминированным выражением, не учитывает непроизводственных простоев автосамосвалов при технологических процессах. Простои автотранспорта возникают в местах погрузки, разгрузки и по ходу движения (в случае слияния дорог, поломок и пр.). Таким образом в выражение (4), вместо введения некоторых коэффициентов неравномерности, можно добавить слагаемое  $t_{простоев}$ , значение которого для каждого этапа разработки карьера может быть вычислено достаточно точно.

Технологическая операция перемещения горной массы автосамосвалом от погрузочного оборудования в забое до перегрузочного пункта может быть представлена графически в виде направленного графа. При этом множество дуг графа представляют собой процессы, а множество узлов – состояния элемента. Исходя из того, что технологический процесс имеет четкую последовательность операций, то и последовательность простоев в цикле транспортирования следует в соответствии логикой процесса. Так как риск по дугам графа обладает свойством аддитивности, следовательно, к построенному графу можно применить процедуры ГЕРТ – моделирования для выявления рисков, связанных с выполнением всей сети.

*Формализация сети.* Определим существующие процессы и операции транспортировки горной массы отдельным автосамосвалом. Обозначим  $S_i$ ;  $i \in N$  - состояния автосамосвала, а через функцию  $W_{ij}$ ;  $i, j \in N$  - процессы простоя автомобиля на этапах транспортирования. При этом,  $S_i$  - будут соответствовать узлам сетевой модели и не иметь временной протяженности,  $W_{ij}$  - соответствуют дугам сетевой модели и иметь временную протяженность.

$W$ - функция случайной величины определяется как [6]

$$W_{ij} = p_{ij} \cdot M_{ij}, \quad (5)$$

где  $p_{ij}$  - вероятность возникновения операции простоя автосамосвала,

$M_{ij}$  - производящая функция моментов длительности операции простоя автосамосвала.

Декартово произведение элементов состояний представляет собой множество пар, мощностью 4 (табл. 1).

Таблица 1

Описание обозначений состояний (узлов) сетевой модели

Состояние	Загрузка автосамосвала	Положение автомобиля
$S_1$	Нет	Около погрузочного устройства
$S_2$	Да	Около погрузочного устройства
$S_3$	Да	Около разгрузочного пункта
$S_4$	Нет	Около разгрузочного пункта

*Топология сети.* Логический анализ технологического процесса перемещения горной массы с помощью автотранспорта позволяет определить возможные простои транспортной единицы в процессе функционирования. Сетевая стохастическая модель единичного транспортного цикла при любом способе закрепления автосамосвала за погрузочным устройством представлена на рис. 1.

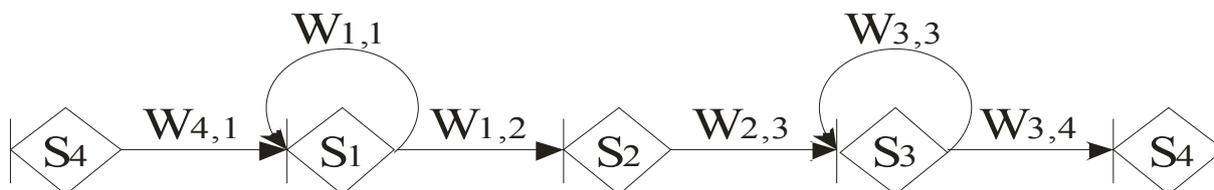


Рис.1 Сетевая стохастическая модель единичного транспортного цикла автосамосвала.

Вероятностное описание простоев на одном цикле. Простои автосамосвала по элементам единичного транспортного цикла, как случайные величины, подчинены определенному закону распределения. Хронометрический анализ простоев на цикле транспортирования автосамосвала БелАЗ-75121 за смену на карьере Полтавского ГОКа позволил установить следующие распределения простоев и вероятности  $p_i$  их возникновения на основе критерия согласия Колмогорова (табл. 2).

Таблица 2

Описание обозначений дуг (операции простоя) сетевой стохастической модели

Обозначение операции простоя	Описание операции простоя	Вероятность возникновения операции простоя, $p_{ij}$	Параметры распределения операции	Вид распределения операции простоя
$W_{1,1}$	Ожидание погрузки у погрузчика	0,35	$\sigma_{1,1} = 1,5$ $\mu_{1,1} = 7$	Нормальный $p_{1,1} \exp\left(s\sigma_{1,1} - \frac{1}{2}s^2\mu_{1,1}^2\right)$
$W_{1,2}$	Простои в процессе загрузки автомобиля	0,1	$a_{1,2} = 2$	Экспоненциальный $p_{1,2}a_{1,2}(a_{1,2} - s)^{-1}$
$W_{2,3}$	Простои при движении с грузом от погрузчика к разгрузочному пункту	0,1	$a_{2,3} = 2,75$ $b_{2,3} = 0,06$	Гамма $p_{2,3} \left(1 - \frac{s}{a_{2,3}}\right)^{-b_{2,3}}$
$W_{3,3}$	Ожидание начала процесса разгрузки на разгрузочном пункте	0,45	$\sigma_{1,1} = 3$ $\mu_{1,1} = 6$	Нормальный $p_{3,3} \exp\left(s\sigma_{3,3} - \frac{1}{2}s^2\mu_{3,3}^2\right)$
$W_{3,4}$	Простои в процессе разгрузки на разгрузочном пункте	0,03	$a_{3,4} = 1,5$	Экспоненциальный $p_{3,4}a_{3,4}(a_{3,4} - s)^{-1}$
$W_{4,1}$	Движение от разгрузочного пункта в забой к погрузчику	0,09	$a_{4,1} = 2,75$ $b_{4,1} = 0,06$	Гамма $p_{4,1} \left(1 - \frac{s}{a_{4,1}}\right)^{-b_{4,1}}$

Топологическое уравнение Мейсона для сети. Для определения численного значения рисков на транспортном цикле (2) необходимо вычисление математического ожидания времени простоя. Для определения  $W_A$  – функции, эквивалентной стохастической сети (рис.1), введем дополнительную дугу  $W_A$ , соединяющую начальный и конечный узел сети (рис. 2) для получения замкнутого графа.

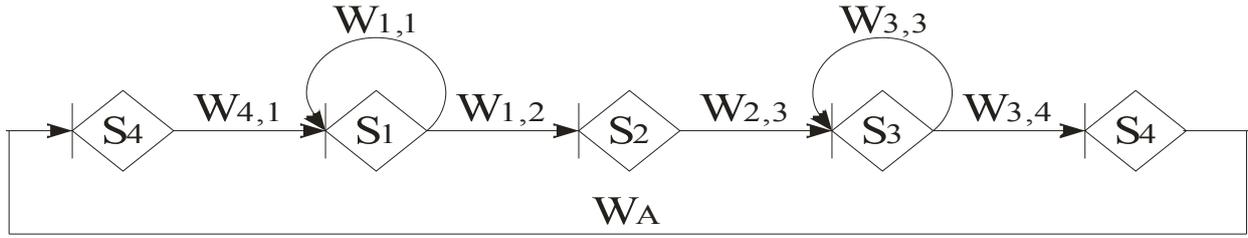


Рис.2 Сетевая модель единичного транспортного цикла автосамосвала

Под петлей понимают связанную последовательность ориентированных ветвей, каждый узел которых является общим ровно для двух ветвей. Порядок петли  $L_m$  определяется как множество  $m$  не связанных между собой петель первого порядка. Определим множества петель для стохастической сетевой модели.

Множество петель первого порядка есть трехэлементное множество  $L_1 = \{W_{1,1}; W_{3,3}; W_{4,1} W_{1,2} W_{2,3} W_{3,4} W_A W_{4,1}\}$ .

Множество петель второго порядка есть одноэлементное множество  $L_2 = \{W_{1,1} W_{3,3}\}$ .

Топологическое уравнение Мейсона для замкнутых графов имеет вид [6]

$$H = 1 - \sum T(L_1) + \sum T(L_2) + \dots + (-1)^m \sum T(L_m) + \dots = 0. \quad (6)$$

Подставляя в уравнение (6) множества элементов  $L_m$ , получаем выражение

$$H = 1 - W_{1,1} - W_{3,3} - W_{4,1} \cdot W_{1,2} \cdot W_{2,3} \cdot W_{3,4} W_A + W_{1,1} \cdot W_{3,3} = 0 \quad (7)$$

Из равенства (7) после преобразований получаем равенство для функции вспомогательной дуги  $W_A$

$$W_A = \frac{1 - W_{1,1} - W_{3,3} + W_{1,1} \cdot W_{3,3}}{W_{4,1} \cdot W_{1,2} \cdot W_{2,3} \cdot W_{3,4}}. \quad (8)$$

Учитывая, что  $1 - W_A \cdot W_A = 0$ , получаем функцию  $W_A = \frac{1}{W_A}$ , эквивалентную сети на

рис. 2

$$W_E = \frac{W_{4,1} \cdot W_{1,2} \cdot W_{2,3} \cdot W_{3,4}}{1 - W_{1,1} - W_{3,3} + W_{1,1} \cdot W_{3,3}}. \quad (9)$$

Подстановка в равенство (8) соответствующих выражений из табл. 2 дает аналитическое выражение для нахождения функции, эквивалентной по параметру всей стохастической сетевой модели.

*Численное определение математического ожидания.* Для нахождения численного значения математического ожидания простоев на одном транспортном цикле автосамосвала учтем, что

$$W_E(S) = p_E \cdot M_E(S). \quad (10)$$

Так как  $p_E = W_E(0)$ , то производящая функция моментов  $M_E(S)$  может быть найдена как отношение

$$M_E(S) = \frac{W_E(S)}{W_E(0)}. \quad (11)$$

Математическое ожидание может быть вычислено как 1-я частная производная по  $s$  функции  $M_A$

$$E[t] = \mu_{1E} = \left. \frac{\partial M_E(s)}{\partial s} \right|_{s=0}. \quad (12)$$

Вычисление значения математического ожидания (12) времени простоя автосамосвала на одном транспортном цикле для функции (9) дает

$$E[t] = 4,47(\text{мин}).$$

Так как количество рейсов автосамосвала БелАЗ-75121 за смену на карьере Полтавского ГОКа равно 19, то ожидание времени простоев для одной машиносмены составляет

$$t_{\text{простоев}} = 19 \cdot E[t] = 84,93(\text{мин}).$$

**Выводы.** Таким образом, предложенная методика оценки рисков простоев на транспортном цикле автосамосвала позволяет достаточно точно численно определить вероятные простои транспортной единицы. Полученные данные могут быть использованы при планировании сменного состава автосамосвалов, работающих на одном уступе, с целью оптимизации использования оборудования и снижения стоимости транспортировки горной массы.

Предложенный подход является универсальным и подходит для карьеров любых видов и любого списочного состава автопарка предприятия.

Все численные расчеты в работе выполнены с использованием пакета программ для математических расчетов Mathcad.

#### Список литературы

1. Дриженко, А.Ю. Открытая разработка железных руд Украины [Текст]/А.Ю. Дриженко, Г.В. Козенко, А.А. Рыкус.- Полтава: Полтавський літератор, 2009.- 452 с.
2. Литвиненко, К.В. Оптимизация взаимодействия звеньев комбинированного транспорта при открытой разработке полезных ископаемых/ Литвиненко К.В. // Науковий вісник Національного гірничого університету. Науково-технічний журнал / Національний гірничий університет – Вип.3. – Дніпропетровськ: ДВНЗ НГУ. - 2012. – С.41- 44.
3. Рогальский, Ф.Б. Математические методы анализа экономических систем [Текст]. Книга 1. Теоретические основы. / Ф.Б. Рогальский, Я.Е. Курилович, А.А. Цокуренок.- К.: Наук. думка, 2001.- 435 с.
4. Костерев, В.В. Надежность технических систем и управление риском [Текст] учеб. пособие / В.В. Костерев. – М.: МИФИ, 2008. – 280 с.
5. Мушик, Э., Мюллер, П. Методы принятия технических решений [Текст]: пер. с нем.- М.: Мир, 1987. – 198 с.
6. Филипс, Д., Гарсиа-Диас А. Методы анализа сетей [Текст]: пер. с англ.- М.: Мир, 1984. – 496 с.