

УДК 519.9: 622.2

**РИСК - АНАЛИЗ ТРАНСПОРТНЫХ ПРОЦЕССОВ В КАРЬЕРЕ С ПОМОЩЬЮ  
СТОХАСТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ**

**Корсун Валерий Иванович**  
доктор технических наук, профессор  
Национальный технический университет «Днепровская политехника»  
г. Днепр

**Литвиненко Константин Викторович**  
кандидат технических наук  
Днепровский национальный университет железнодорожного транспорта  
имени академика В. Лазаряна  
г. Днепр

**Еремеев Владимир Сергеевич**  
доктор технических наук, профессор  
Мелитопольский государственный педагогический университет  
имени Б. Хмельницкого  
г. Мелитополь

**RISK - ANALYSIS OF TRANSPORT PROCESSES IN OPEN – CAST MINE BY MEANS  
OF STOCHASTIC NETWORKS**

**Korsun Valery Ivanovich**  
Doctor of technical Sciences, Professor  
Dnipro University of Technology  
Dnipro

**Lytvynenko Kostiantyn Viktorovych**  
Candidate of technical Sciences  
Dnipro National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan  
Dnipro

**Eremeev Vladimir Sergeevich**  
Doctor of technical Sciences, Professor  
Bogdan Khmelnytsky Melitopol State Pedagogical University  
Melitopol

**АННОТАЦИЯ**

Статья посвящена изучению моделирования потери производительности транспортного оборудования в карьерах. Исследуется возможность использования средств GERT – моделирования для оперативного рискованного анализа процессов транспортирования на горных предприятиях.

**Ключевые слова:** Компьютерное моделирование, транспортная система карьера, GERT, риск.

**ABSTRACT**

Article is devoted to studying of modelling of loss of productivity of transport equipment of open - cast mines. It is investigated the possibility of GERT – modelling usage for the operative risk – analysis of transport processes at mining enterprises.

**Key words:** Computer modelling, GERT, risk, transport system of open - cast mine.

**Вступление.**

Одной из количественных мер качества эксплуатации, надежности, безопасности и т.д. технологической системы может служить понятие риска. Под риском в данном случае следует понимать угрозу частичной или полной потери эффективности производственной деятельности в результате действия некоторых неблагоприятных факторов [7], [12], [15]. В абсолютном выражении

риск определяется величиной возможных потерь в стоимостном выражении; а в относительном выражении риск – есть величина возможных потерь, отнесенных к одному из показателей: себестоимость, стоимость, прибыль. При анализе и прогнозировании производственно – технологических систем риск – ориентированная методология занимает важное место, что отражено в

международных и национальных стандартах, например:

1) ISO 12100:2010 «Safety of machinery – General principles for design – Risk assessment and risk reduction»;

2) ISO/TR 14121-2:2007 «Safety of machinery – Risk assessment – Part 2: Practical guidance and examples of methods»;

3) ISO 31000:2009 «Risk management – Principles and guidelines»;

4) ISO/IEC 31010:2009 «Risk management – Risk assessment techniques» и др.

5) ГОСТ Р 51901.1-2002 «Менеджмент риска. Анализ риска технологических систем»;

6) ГОСТ Р 51901.12-2007 «Менеджмент риска. Метод анализа видов и последствий отказов»;

7) ГОСТ Р 51901.13-2005 «Менеджмент риска. Анализ дерева неисправностей»;

8) ГОСТ Р 51901.14-2007 «Менеджмент риска. Структурная схема надежности и булевы методы» и др.

Качество управления функционированием сложной производственной системы напрямую зависит от принятия соответствующих управленческих решений. Для эффективного оперативного производственного анализа и последующих обоснованных рациональных решений риск-анализ может дать своевременную и достоверную информации о функционировании системы.

#### Постановка задачи.

Главным способом добычи полезных ископаемых является открытая разработка в карьерах. При этом отдельные технологические элементы карьера должны рассматриваться в виде целостного образования средств подвижного состава и выемочно-погрузочного оборудования с учетом внутренних и внешних связями – горнотранспортной системы (ГТС) [2], [4], [5], [6]. ГТС карьера рассматривается как производственно-технологическая система, обеспечивающая эффективное функционирование в течение

длительного промежутка времени. В соответствии с основной задачей рациональная ГТС, будучи сложной системой, должна обеспечивать формирование рабочей зоны карьера с выполнением плановых объемов добычи полезного ископаемого и перемещения горной массы при минимальных затратах на добычу руды, а ее некорректная работа (недостижение заложенных расчетных характеристик, работа на ограничительных пределах параметров и т.д.) крайне нежелательны.

ГТС на глубоких карьерах при комбинированных видах транспорта формируются сочетанием машин с различными принципами действия. При конвейерном транспорте технологический процесс протекает непрерывно, а при автомобильном и железнодорожном – дискретно. Процесс погрузки и перегрузки также имеет дискретный характер. В идеальном случае каждая транспортная и погрузочная единица при выполнении технологической операции не должна простаивать. Однако невыполнение предусмотренного регламента всех работ, возможные поломки оборудования, влияние человеческого фактора определяют сильную стохастичность процессов погрузки – разгрузки и движения транспортных средств карьера. Неравномерность и случайность процессов проявляются во всех звеньях технологической цепи и обуславливают простои и неплановую потерю производительности погрузочно-транспортного оборудования. Такие процессы относятся к классу сложных индетерминированных, для которых характерны изменчивость условий функционирования системы, высокая неупорядоченность протекания процесса, действия возмущений, трудно выражаемых количественно. Например, на рис.1 показаны неравномерности грузопотоков автомобильного и железнодорожного транспорта НКГОКа на временном периоде 90 суток. Похожая картина наблюдается и на других глубоких карьерах.

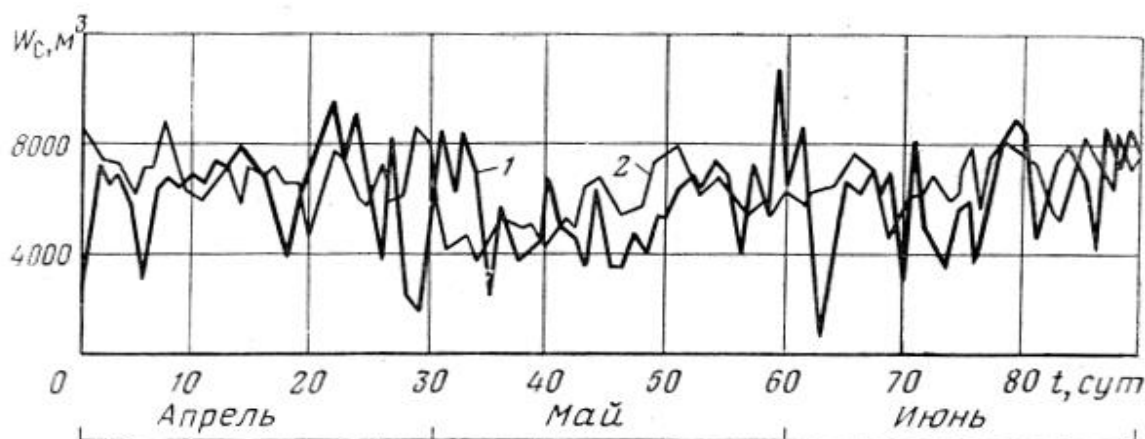


Рисунок 1 График изменения суточной интенсивности ( $t$ ) грузопотоков  $W_c$ , поступающих на перегрузочный пункт:  
1,2–соответственно для автомобильного и железнодорожного транспорта

Задача ситуативного управления состоит в сглаживании последствий негативных и нежелательных событий и повышения эффективности функционирования ГТС.

**Цель работы.** Предложить методику анализа рисков простоев транспортного оборудования карьера на основе диаграммы «причин – результатов» и процедур потоковых графов, расчета количественных значений времени простоев оборудования для оценки величины технологических потерь и возможных временных резервов.

**Основной материал.** Понятие «риск» – весьма сложное и противоречивое, а сам риск очень часто сильно влияет на окончательный результат производственной деятельности предприятия.

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

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

где  $A_i p^i$  – есть тензорная свертка.

Вместо вероятности реализации  $p_i$ , могут использоваться другие вероятностные показатели, например, математическое ожидание функции потери времени производительности технологического оборудования. Под риском будем понимать определенную вероятностную характеристику, описывающую технологические потери в процессе функционирования сложной системы, подверженной случайным неблагоприятным воздействиям. Тогда для траектории в пространстве выбранных параметров имеем случайный процесс, которому в рамках математической модели может быть поставлен в соответствие некоторый функционал, соответствующий параметрам реальной технологической системы, а риск может описываться в терминах данного функционала. При анализе риска  $R$  таким функционалом часто выступает величина убытка в результате наступления единичного неблагоприятного события или возможных комбинаций таких событий. Так как абсолютно исключить риск невозможно, то существует режим функционирования системы со значением функционала  $R_0$ , приемлемый с точки зрения целей и задач объекта. Тогда мерой снижения функциональной эффективности объекта в результате риска можно характеризовать модулем разности  $|R - R_{i0}|$ .

Можно предложить два подхода к анализу рисков сложных технологических систем:

1. *Метод точного расчета.* Под элементом системы или объекта будем понимать такую ее часть, которая выполняет некоторую функцию. В зависимости от вида системы ее можно разделить

различным способом на элементарный состав. Для определенного элементарного состава отыскивается совокупность показателей рисков  $R_1, R_2, \dots, R_m$ , связанных с отдельными элементами объекта или системы и влияющих в совокупности на значение функционала риска  $R$ , т.е.  $R = (R_1, R_2, \dots, R_m)$ . Тогда задача расчета состоит в том, чтобы через значения  $R_1, R_2, \dots, R_m$  рассчитать  $R$ .

2. *Метод мажорантного расчета.* При точном методе расчета риска, риск объекта или системы есть функция рисков ее элементов. Для сложных систем такой подход может оказаться достаточно сложной задачей, поэтому возможно применение более укрупненного подхода. Для этого можно выделить множества  $A_1, A_2, \dots, A_m$ , которые являются классами исходных элементов системы. Если  $R_1, R_2, \dots, R_m$  показатели рисков соответствующих классов разбиения  $A_1, A_2, \dots, A_m$ , то риск системы можно определить мажорантной формулой  $R \geq F[R_1, R_2, \dots, R_m]$ . Таким образом, можно определить нижнюю границу риска системы. Для применения мажорантной схемы необходимо найти компромисс, суть которого заключается в том, что слишком подробное описание системы ведет к возрастанию вычислительных трудностей, а слишком крупномасштабное описание приводит к увеличению погрешности значения риска  $\Delta = R - F[R_1, R_2, \dots, R_m]$ .

Для получения выводов о величине риска для системы, а также последующий выбор стратегии его уменьшения, требуют получения информации о законах  $f_i$  действия неблагоприятных факторов. Факторы, вызывающие риски потери производительности в технических системах считаются случайными, подчиненными некоторым статистическим законам распределения. При этом можно различать следующие виды информированности о законе распределения:

- 1) закон  $f$  известен достаточно точно – наиболее желательный вариант, но не всегда достижимый;
- 2) известен тип закона  $f$  распределения, но недостаточно точно известны параметры распределения;
- 3) известны некоторые характеристики распределения (моменты закона распределения или значения в некоторых тестовых точках), но не известен сам закон распределения  $f$ .

При анализе риска второй и третий случаи менее желательны, чем первый, так как степень точности является существенным моментом для проведения качественного рискового анализа системы.

Если законы распределения случайных факторов известны достаточно точно и других неконтролируемых факторов нет, то оценка риска системы может быть проведена достаточно полно. В других случаях возможность избежать необоснованного занижения или завышения

величины риска системы дает подход, основанный на гарантированных оценках, базирующийся на той или иной информации о законе распределения  $F(r)$  [3]. При любых видах параллельно-последовательного соединения элементов технологической системы, наибольшие значения риска достигаются одновременно с наибольшими значениями вероятностей наступления неблагоприятных событий  $p_i(t)$  и минимуме эффективности системы.

Горное производство относится к категории производств повышенного риска. Практика добычи полезных ископаемых позволила создать технологии разработки месторождений, снижающие риски вторжения в природный массив. И все же риск, вследствие высокого уровня изменчивости и неопределенности условий, остается. Это касается как горно-геологических, так и технологических рисков потери производительности погрузочного и транспортного оборудования. Учитывая, что карьеры по добыче крутопадающих пластовых месторождений достигают значительных глубин, негативное влияние многих технических, технологических, организационных и др. факторов при разработке месторождения требуют всестороннего анализа, в том числе и в направлении ситуативного оценивания неплановых потерь производительности оборудования.

**Графический метод оценки и пересмотра планов (GERT).** Методика GERT создана А. Притскером по заказу НАСА [1], [13], [14] и позволяет производить оценки параметров стохастических сетей при выполнении только некоторого подмножества из множества дуг сетевой модели. При этом узлы могут пониматься как состояния системы, а дуги – как переходы из одного состояния в другое. Каждому узлу соответствует две функции: входящая (условие при котором узел может выполняться) и выходящая (совокупность условий, связанных с выполнением узла).

Правила выполнения стохастической сети имеют вид:

- 1) любой переход из одного состояния в другое может начинаться, если выполнено условий одной из входящих дуг;
- 2) операции перехода соответствует случайный параметр с известной плотностью распределения;
- 3) из одного состояния система может перейти только в одно из следующих состояний.

Каждой дуге сетевой модели ставится в соответствие характерный параметр, имеющий свойство аддитивности по дугам сетевой модели. Если  $f_{ij}$  – плотность распределения параметра дуги  $(ij)$ , то условная производящая функция моментов непрерывного случайного параметра имеет вид

$$M_{ij} = \int e^{sy_{ij}} f(y_{ij}) dy_{ij}.$$

Таким образом, каждому переходу между состояниями (дуге) системы  $(ij)$  ставится в соответствие функция  $W_{ij}$  по правилу

$$W_{ij} = M_{ij} \cdot p_{ij},$$

где  $p_{ij}$  – вероятность перехода по дуге  $(ij)$ .

В статье [11] предлагается оценивать пропускную способность GERT-сетей не с помощью производящих, а с помощью характеристических функций. В некоторых случаях это дает возможность получать аналитическое выражение для плотности распределения случайного параметра сети.

Для определения эквивалентной функции может применяться правило Мейсона для потоковых графов

$$H = 1 + \sum T(L_1) + \sum T(L_2) - \sum T(L_3) + \dots + (-1)^n \sum T(L_m) = 0$$

где  $\sum T(L_i)$  – сумма эквивалентных коэффициентов пропускания для всех возможных петель  $i$ -го порядка.

Планированию горных работ в карьерах с применением процедур GERT-моделирования посвящена работа [8].

**Анализ рисков потери производительности транспортного оборудования карьера с применением методики GERT и диаграммного подхода.**

Элементами горнотранспортной системы 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. Технологическая операция перемещения горной массы автосамосвалом от погрузочного оборудования в забое до перегрузочного пункта может быть представлена графически в виде направленного графа. Логический анализ технологического процесса перемещения горной массы с помощью автосамосвалов в карьере позволяет построить сетевую модель транспортного цикла автосамосвала и определить возможные временные простои транспортной единицы в процессе функционирования.

Сетевая стохастическая модель единичного транспортного цикла при жестком закреплении автосамосвала за одним погрузочным устройством была рассмотрена в работе [9], стохастическая модель единичного транспортного цикла, при диспетчерском способе управления работой автосамосвала по обслуживанию трех погрузочных устройств в забоях на одном горизонте, представлена на рис. 2. Узлы соответствуют состоянию и положению транспортного средства в местах погрузки и разгрузки, а дуги – потерям времени при переходах между состояниями. Описание состояний и положений транспортного средства приведено в таблице 1. Для определения

$w_E$  – функции, эквивалентной стохастической сети рис. 2, введена дополнительная дуга  $w_A$ , которая

соединяет начальный и конечный узел сети для получения замкнутого графа.

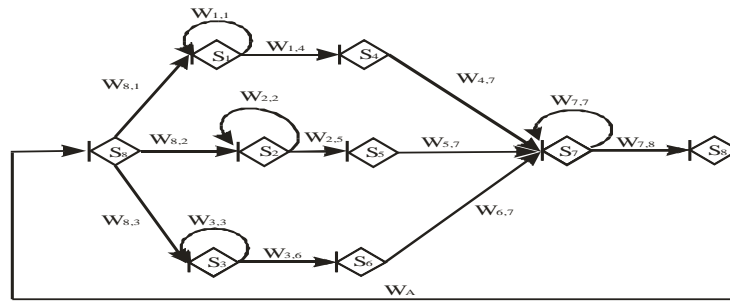


Рисунок 2. Сетевая стохастическая модель единичного транспортного цикла автосамосвала при диспетчерском управлении загрузкой.

Таблица 1

Описание обозначений состояний (узлов) сетевой модели

Состояние	Загрузка автосамосвала	Нахождение автосамосвала в технологическом цикле
$S_1$	Нет	Около погрузочного устройства забоя 1
$S_2$	Нет	Около погрузочного устройства забоя 2
$S_3$	Нет	Около погрузочного устройства забоя 3
$S_4$	Да	Около погрузочного устройства забоя 1
$S_5$	Да	Около погрузочного устройства забоя 2
$S_6$	Да	Около погрузочного устройства забоя 3
$S_7$	Да	Около разгрузочного пункта
$S_8$	Нет	Около разгрузочного пункта

Правила GERT-моделирования позволяют рассчитать выражения для петель  $L_i$  – порядка стохастической сетевой модели рис. 1. Подставляя в топологическое уравнение Мейсона для замкнутых графов уравнения множеств элементов  $L_i$ , и

учитывая, что  $1 - w_A \cdot w_E = 0$ , после эквивалентных преобразований получаем функцию для вычисления потери времени производительности  $w_E$ , эквивалентную сетевой модели

$$w_E = \frac{W_{7,8}}{W_{7,7} - 1} \left[ \frac{W_{1,4} \cdot W_{4,7} \cdot W_{8,1}}{W_{1,1} - 1} + \frac{W_{8,2} \cdot W_{2,5} \cdot W_{5,7}}{W_{2,2} - 1} + \frac{W_{8,3} \cdot W_{3,6} \cdot W_{6,7}}{W_{3,3} - 1} \right]$$

Соответствующие выражения  $W_{ij}$  могут быть вычислены по методологии GERT-моделирования после обработки статистических данных для конкретного карьера и горизонта разработки. Процесс обработки может быть автоматизирован при условии оборудования транспортных средств системами позиционирования, которые позволят контролировать местоположение автотранспорта и получать статистические данные о простоях в системе координат карьера.

$$R = A \cdot T = A \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^M t_{ijk} \rightarrow \min,$$

где  $A$  – нормативная производительность автотранспортной единицы при существующих условиях эксплуатации,  $t_{ijk}$  – потеря времени  $k$ -ой автотранспортной единицей (ожидании погрузки, разгрузки, остановки по ходу движения) в  $j$ -ом транспортном цикле;  $K$  – нормативное количество рейсов в смену транспортной единицы;  $M$  – количество транспортных единиц в работе;  $n$  – количество забоев.

При регулировании горнотранспортных работ необходимо применение локальных критериев в соответствии с этапами транспортирования горной массы. При использовании сборочного автомобильного транспорта, локальным критерием оптимального управления является минимальная величина технологического риска

Другой удобной и доступной формой для проведения оперативного рискованного анализа является диаграмма «причин - результатов» [10]. Перед построением диаграммы необходимо идентифицировать все неблагоприятные факторы, оказывающие негативное влияние на производственно-технологический процесс. Из

множества идентифицированных неблагоприятных факторов необходимо логически выделить наиболее важные факторы по своему влиянию и установить определенную иерархическую структуру. При этом второстепенные факторы могут представлять структурные элементы главнейших факторов. Качество проведения данного этапа является очень важным, так как выпадение из рассмотрения некоторых неучтенных факторов может серьезно повлиять на полученное оценочное значение величины. Если система или процесс достаточно сложны, то необходимо разделить его на составные части или подпроцессы, в которых происходит достаточно независимое функционирование элементов. В противном случае диаграмма может оказаться большой и сложной, что затруднит процесс анализа риска и последующего принятия решения.

Рассмотрим в качестве примера применение диаграммного подхода для оценки технологических

рисков при транспортировании горной массы в карьерах установками с ленточными конвейерными линиями. Характеризуя надежность применения ленточных конвейеров на глубоких карьерах, следует отметить, что наряду с высокой производительностью технологические системы с их участием недостаточно эффективны в работе вследствие наличия большого числа погрузочно-перегрузочных узлов и конвейерных установок. Долговечность конвейерных лент существенно зависит от динамических нагрузок, крупности, плотности и абразивности транспортируемых пород. Большое число роликкоопор снижает надежность работы конвейера, вызывает большую вероятность повреждения ленты. Изучение и обработка данных о причинах простоев при транспортировании горной массы ленточными конвейерами на Криворожских ГОКах позволило установить основные причины простоев и их иерархию рис.3.



Рисунок 3. Диаграмма «причин - результатов» причин простоев ленточных конвейерных систем на карьерах.

Учитывая многофакторность и взаимную независимость факторов диаграммы рис.3, видно,

что диаграмма эквивалентна стохастической сети со множеством параллельных дуг рис 4.

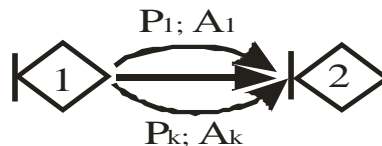


Рисунок 4. Стохастическая сеть с параллельными дугами

Используя процедуры стохастических сетей, учитывая  $P = P_1 + \dots + P_k$  получаем выражение для вычисления функции  $w_E$ , эквивалентной по

параметру для диаграммы с произвольным  $n$ -м количеством главных факторов

$$W_E = P_1 M_{A_1}(s) + P_2 M_{A_2}(S) + \dots + P_n M_{A_n}(S) = W_1(S) + W_2(S) + \dots + W_n(S)$$

При этом  $P_1 + \dots + P_k = 1$ , а каждый из факторов  $A_k$  подчиняется некоторому вероятностному распределению с условной производящей функцией моментов. Равенство устанавливает соответствие между диаграммой «причин-результатов» как по отдельным группам неблагоприятных факторов, так в целом по всей диаграмме. Так как для реальных конвейерных линий факторы диаграммы подчинены различным видам распределений, то нахождение вида производящих функций моментов определяется в соответствии с теорией GERT - моделирования [8].

Риски технологических процессов погрузки и транспортирования горной массы следует рассматривать по этапам технологического процесса:

- 1) риски по добычному звену (аварийные состояния забоя, неисправности механической части погрузочного устройства, неисправности электрической части погрузочного устройства и перебои с электроснабжением забоя, простои в ожидании транспортных средств);
- 2) риски по транспортному звену (простои автосамосвалов в ожидании погрузки – разгрузки, опоздание на трассу, аварийные сходы автосамосвалов с трассы, организационные причины);
- 3) риски по приемным пунктам (аварийные остановки, остановки по организационным причинам).

Работа технологической цепи с минимальным риском может быть достигнута за счет резервирования оборудования элементов системы. Однако подход с резервированием в большинстве случаев приносит такие экономические издержки от создания и поддержания резервов, что применение его оказывается не рационально. Для уменьшения величины технологического риска функционирования горнотранспортной системы карьера также можно идти по пути уменьшения числа взаимосвязанных элементов в технологических цепях.

**Выводы.** Таким образом, к настоящему времени разработаны методы учета и оценки горно-геологического риска и надежности карьера на стадии проектирования открытых работ, однако нет обоснованных методов оценки риска на уровне оперативного управления и планирования для принятия технических решений. В статье предложен общий подход для численной оценки технологических рисков потери производительности на транспортном цикле автосамосвала при диспетчерском способе управления и диаграммный подход для конвейерной линии с использованием процедур

стохастических графов. Результаты расчетов по предложенной методике могут быть использованы при планировании сменного состава автосамосвалов, работающих на одном уступе, а также с целью оптимизации использования оборудования и снижения стоимости транспортировки горной массы к перегрузочным пунктам. Сформулированные принципы могут быть заложены в основу стратегии всесторонней оценки экономических и производственно – технологических систем с учетом рисков неплановых потерь. Величина риска в сложных технико-технологических системах может быть критерием оптимизационных решений с целью повышения эффективности функционирования самой системы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Ахьюджа Х. Сетевые методы управления в проектировании и производстве. М.: Мир. 1979. 638 с.
2. Васильев М.В. Комбинированный транспорт на карьерах. М.: Недра. 1975. 360 с.
3. Гермейер Ю.Б. Введение в теорию исследования операций. Наука. 1971. 383 с.
4. Дриженко А.Ю., Мартыненко В.П., Симоненко В.И. и др. Вскрытие глубоких горизонтов карьеров. М.: Недра. 1994. 288 с.
5. Дриженко А.Ю., Козенко Г.В., Рыкус А.А. Открытая разработка железных руд Украины: состояние и пути совершенствования. Полтава: Полтавский литератор. 2009. 452 с.
6. Дриженко А.Ю. Карьерные технологические горнотранспортные системы. Государственное ВУЗ «НГУ». 2011. 542 с.
7. Костерев В.В. Надежность технических систем и управление риском. М.: МИФИ. 2008. 280 с.
8. Корсун В.И., Воловик В.П. Планирование открытых горных разработок на основе стохастических сетей // Науковий вісник Національного гірничого університету. 2009. №9. С.11–17.
9. Литвиненко К.В. ГЕРТ-моделирование рисков простоев на транспортном цикле автосамосвала // Збірник наукових праць НГУ. 2012. № 39. С. 61-68.
10. Литвиненко К.В. Выявление и оценка рисков горнотранспортной системы глубоких карьеров с использованием диаграммы «причин и следствий» / Системний аналіз, інформатика, управління: III міжнар. наук.-практ. конф., 14 - 16 березня 2012р. - Запоріжжя, 2012. – С. 175 – 177.
11. Михалев А.И., Корсун В.И., Демченко Д.А. Оценка пропускной способности GERT-сетей с использованием характеристических функций // «АСАУ». 2007. № 11(31). С 25 – 35.
12. Петросов А.А., Мангуш К.С. Экономические риски горного производства. М.: Издательство Московского государственного горного университета. 2002. 142 с.
13. Pritsker A.A.B. GERT: graphical evaluation and review technique: Memorandum RM-4973-NASA., april, 1966. – Режим доступа: [www/rand.org / content / rand / pubs / reseach memoranda /2006 /RM 4973.pdf](http://www.rand.org/content/and/pubs/research_memoranda/2006/RM4973.pdf).
14. Филипс Д., Гарсиа-Диас А. Методы анализа сетей: пер. с англ.- М.: Мир. 1984. 496 с.
15. Хенли Э. Дж., Кумамото Х. Надежность технических систем и оценка риска: пер. с англ. М.: Машиностроение. 1984. 528 с.
16. Курбатов В.Л., Комарова Н.Д., Лесовик Р.В., Алфимова Н.И., Ковтун М.Н. Стеновые блоки из мелкозернистого бетона на основе техногенного песка Северного Кавказа // Строительные материалы. 2006. № 11. С. 87-89.
17. Курбатов В.Л., Дайронас М.В., Поляков М.Н. К вопросу о георадиолокации // Университетская наука. 2018. № 2 (6). С. 21-24.