

УДК 622.014.2

**А.В. Мерзликін** (канд. техн. наук, доц.)**Ю.М. Селезнева** (магістр), **С.В. Кузяра** (канд. техн. наук),**В.В. Назимко** (д-р техн. наук, проф.)

Донецкий национальный технический университет

[merzlikin@ukr.net](mailto:merzlikin@ukr.net)

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ

Выполнен анализ простоев шахтного оборудования и построены гистограммы их распределения. Анализ показал, что наибольшее время простоев имеет наименьшую вероятность, а гистограммы распределений не противоречат экспоненциальному закону. Это свидетельствует о том, что природа процессов смены одних простоев другими может быть описана Марковскими цепями. Составлены временные ряды, разработана методика моделирования случайных остановок шахтного оборудования.

**Ключевые слова:** простои оборудования, матрицы переходов, вероятность.

**Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.** Угольная промышленность является гарантом энергетической независимости Украины, однако надежность работы очистных забоев остается весьма неудовлетворительной. Большое количество остановок очистных забоев связаны с работой выемочного оборудования, транспортных установок, механизированной крепи, переходом геологических нарушений, сбоями в электропитании. Все указанные факторы существенно снижают надежность и обуславливают недопустимо низкий уровень готовности работы очистных забоев.

Поэтому важной научно-технической задачей является проведение системных исследований с целью выявления причин и типов простоев оборудования, установления очередности их появления и определения вероятности переходов из одного состояния в другое.

**Анализ исследований и публикаций.** Анализ устойчивости и ритмичности работы очистных забоев представлен в работах [1, 2]. В своих работах автор рассматривает угольное пред-

приятие как динамическую систему, управлять которой можно при помощи мероприятий, направленных на проектирование и эксплуатацию технологических процессов, включающих планирование, оперативное управление, мониторинг и диагностику неустойчивых режимов работы очистных забоев. В работе [1] предложено характеризовать работу очистного забоя по ритмичности и управляемости. При этом недостаточно полно исследованы причины и вероятностные характеристики остановок в работе очистных забоев. Также противоречие состоит в том, что показатель ритмичности определяется по данным суточной нагрузки, а степень управляемости по данным месячной нагрузки. Автором не обоснованы интервалы вариации добычи, при которых ритмичные и управляемые режимы меняются на неритмичные и неуправляемые.

В существующих нормативных документах [3] предусматривается вычисление среднего значения коэффициента готовности в зависимости от исходных горно-геологических условий, которые определяются с помощью детерминированных подмоделей. Другими словами, вероятностный, случайный характер действия факторов и причин, задерживающих темпы продвижения очистных забоев, существующие модели учитывают недостаточно полно.

В работе [4] рассматриваются особенности планирования нагрузки на очистной забой с учетом надежности горношахтного оборудования. Авторы разделяют интенсивность работы очистного забоя по характеру последствий, вызываемых изменениями условий эксплуатации на две группы. К первой группе относятся изменения, при которых нормальная работа очистного забоя становится невозможной, а ко второй группе – изменения при которой очистной забой при проведении некоторых мероприятий может продолжать нормальную работу. Соответственно для этих групп, на основе методов математической статистики, рассчитывается нагрузка на очистной забой с учетом надежности работы оборудования, определяется коэффициент готовности и средняя продолжительность простоев. Недостатком данной методики яв-

ляется использование статистических показателей надежности, которые учитывают лишь факт появления и отсутствия отказов в работе горношахтного оборудования.

Анализ надежности погрузочной машины как сложной системы рассматривается в работе [5]. Авторами разработана методика оценки работоспособности шахтной погрузочной машины непрерывного действия с учетом частичного отказа. Используя методику определения вероятностных состояний построены графы возможных состояний систем машины и на их основе составлены матрицы вероятностей. В результате получены вероятности нахождения систем в тех или иных состояниях в любой момент времени, при этом вероятность нахождения системы в нулевом состоянии есть коэффициент готовности этой части машины. Таким образом, в работе предложена методика определения работоспособности лишь одного механизма, который входит в единую динамическую систему по добыче полезного ископаемого надежность и ритмичность работы которой не рассматривались.

**Постановка задач исследований.** Целью данной статьи является совершенствование математической модели надежности работы очистного забоя с учетом вероятностного механизма возникновения причин и факторов влияющих на снижение темпов подвигания очистного забоя.

### **Изложение материала и результаты.**

Большинство факторов влияющих на надежность работы очистных забоев прямо или косвенно определяются негативным проявлением горного давления. Так, увеличение концентрации горного давления влечет за собой вывалы горной породы, в результате чего возникают серьезные проблемы с управлением состоянием кровли в действующем очистном забое: появляются заколы над краевой частью угольного пласта, обрушение непосредственной кровли в рабочее пространство, посадка крепи на жестко, излом консолей перекрытий механизированных крепей и т.д. Кроме того, вследствие растрескивания горного массива, повышается интенсивность газовыделения. Вследствие пучения пород почвы происходит выход из строя транспортного оборудования

из-за перекосов конвейерного става, рельсовых путей и уменьшения габаритов сечения выработок.

На рис. 1 показан характерный пример обрушений неустойчивой непосредственной кровли в очистном забое на участке перехода зоны повышенного горного давления. Заколы кровли возникают над краевой частью угольного пласта, причем по мере продвижения механической крепи происходит прогрессирующее снижение устойчивости кровли и ее обрушение, и заполнение рабочего пространства разрушенными породами [6]. На таких участках наблюдается интенсивный рост горного давления и резко возрастает скорость сдвижения пород кровли. На рис. 2 видно, что на участке устойчивого оседания кровли скорость ее сдвижений составляла 30-40 мм в сутки, тогда как на участке перехода зоны ПГД, отмеченной фигурной скобкой на рисунке 2, скорость оседания увеличилась до 80-120 мм в сутки. При этом характерно, что на участках устойчивой кровли нагрузка на механизированную крепь на момент обрушения непосредственной кровли не превышала 5-100 т/сут. В то же время интенсивность нарастания нагрузки на посадочный ряд крепи на участке неустойчивой кровли увеличилась до 100-200 т/сут., а общая нагрузка на крепь перед обрушением превышала 150 т.

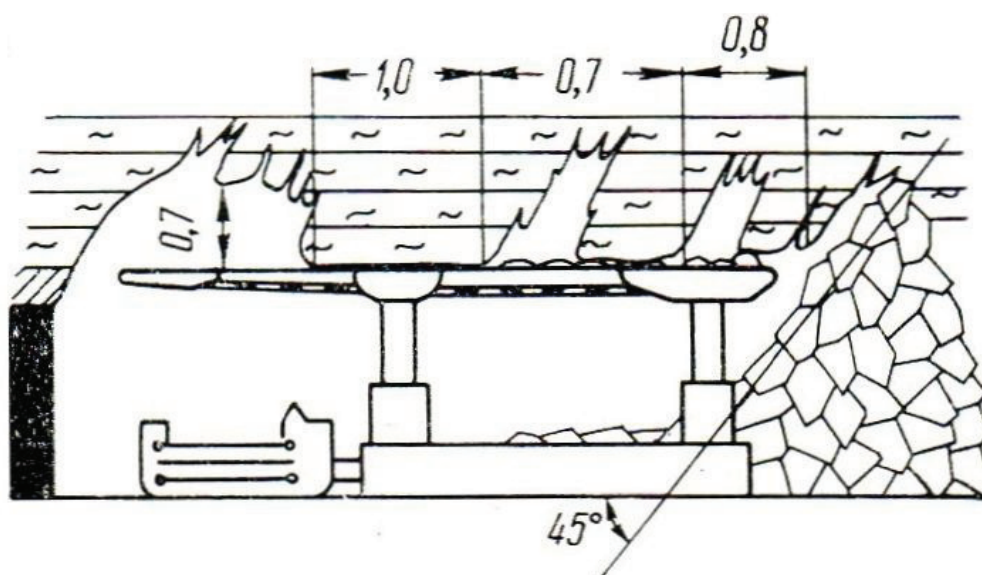


Рис. 1. Обрушение неустойчивой непосредственной кровли в очистном забое

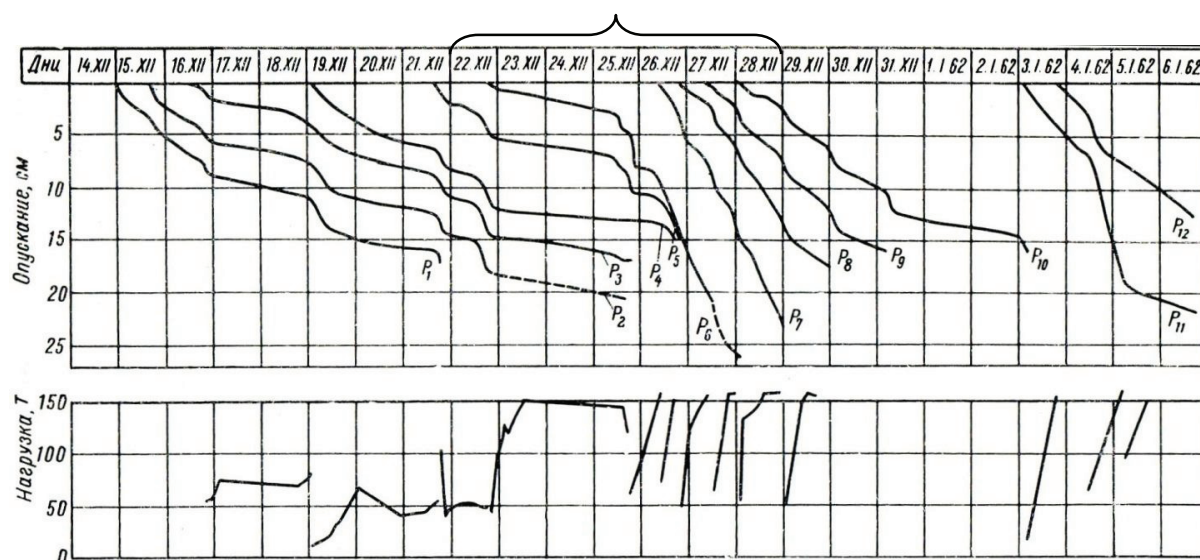


Рис. 2. Обрушение неустойчивой непосредственной кровли в очистном забое

На участках интенсивного проявления горного давления темпы подвигания очистного забоя замедляются в 3-5 раз и более. Это приводит к большим экономическим убыткам вследствие нереализованной добычи. Так при переходе неблагоприятных зон современные высокопроизводительные очистные забои могут терять 50 тыс. тонн добычи в месяц и более, что влечет за собой убытки, составляющие 20-30 млн. грн.

Существующие математические модели учитывают задержки работы очистных забоев в достаточно обобщенном виде. Поэтому для достижения поставленной цели необходимо было решить задачу детального анализа простоев в работе действующих современных забоев и установить закономерности, которые управляют переходами от рабочего к нерабочему состоянию.

Были выбраны 19 очистных забоев 7-ми современных угольных шахт, которые отрабатывают запасы в широком диапазоне горно-геологических и горнотехнических условий. При этом фиксировалась проектная и фактическая добыча (почасовая, посменная, посуточная), величина подвигания очистных забоев, причины и продолжительность простоев оборудования, а также особые обстоятельства, сопровождающие простои. В таблице 1 приведен пример исходной выборки данных, собранных за октябрь 2010 года.

Таблица 1

## Простои в 4-й южной лаве за октябрь 2010 года

Дата	Прстои, час								Сумма
	Технологические					Транспорт	Геология	Электроснабжен.	
	Основной процесс				задержки				
	добыча	комплекс	транспорт	прочее		7	2	6	
1	3	2	5	7	2	6	4		
01.10.2010	2:50:00	1:10:00		3:00:00					7:00:00
02.10.2010	1:25:00	1:00:00							2:25:00
03.10.2010	1:10:00					0:45:00			1:55:00
04.10.2010	0:50:00					8:10:00			9:00:00
05.10.2010	0:45:00	0:40:00				3:30:00			4:55:00
06.10.2010	1:40:00								1:40:00
07.10.2010	1:40:00	1:00:00				1:30:00			4:10:00
08.10.2010									0:00:00
09.10.2010	0:55:00					10:30:00			11:25:00
10.10.2010	3:00:00		1:10:00			1:00:00			5:10:00
11.10.2010	0:30:00					0:45:00			1:15:00
12.10.2010	7:05:00					0:50:00			7:55:00
13.10.2010			3:45:00						3:45:00
14.10.2010			3:20:00						3:20:00
15.10.2010						0:55:00			0:55:00
16.10.2010	1:10:00					0:35:00			1:45:00
17.10.2010			3:45:00						3:45:00
18.10.2010				2:00:00					2:00:00
19.10.2010				0:30:00	0:35:00				1:05:00
20.10.2010					1:30:00				1:30:00
21.10.2010	5:50:00								5:50:00
22.10.2010		4:45:00		1:40:00		0:45:00			7:10:00
23.10.2010		0:40:00				6:45:00			7:25:00
24.10.2010	1:50:00					2:35:00			4:25:00
25.10.2010	1:00:00							1:05:00	2:05:00
26.10.2010	0:40:00	1:15:00							1:55:00
27.10.2010	0:40:00		0:45:00						1:25:00
28.10.2010	0:45:00								0:45:00
29.10.2010									0:00:00
30.10.2010	1:10:00	0:50:00	1:10:00						3:10:00
31.10.2010	1:20:00					1:20:00			2:40:00

Все простои или задержки работы очистного забоя были разделены на: технологические, к которым были отнесены сбои в работе очистного оборудования, механизированного комплекса, транспорта и прочее. В отдельную группу были выделены задержки, обусловленные предписаниями службы безопасности и вентиляции. Так же дифференцировано учитывались остановки

очистного забоя, вызванные сбоями работы транспортной цепочки, непредвиденными геологическими факторами (и, в частности, негативными проявлениями горного давления), а также сбоями в электроснабжении.

На рис. (3а) показана гистограмма времени простоев по всем выделенным факторам. Видно, что основные простои связаны с фактором добычи (1) и транспорта (2). Так 46% простоев обусловленных сбоями в работе выемочных механизмов, а 48% – транспортной цепочки.

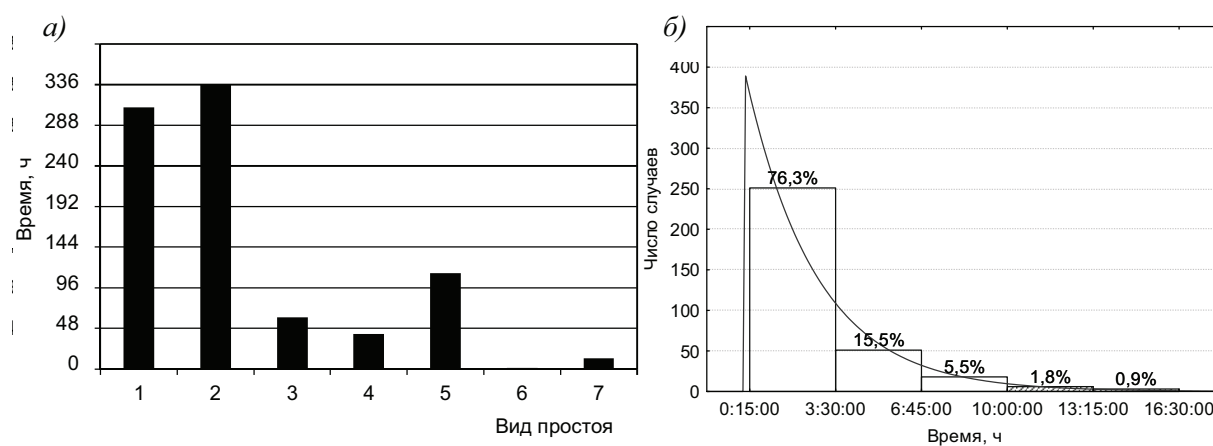


Рис. 3. Общая гистограмма распределения простоев:

а) распределение по видам простоев;

б) распределение по продолжительности простоев

Анализ гистограммы распределений времени простоев показал, что 76% простоев не превышает 3-х с половиной часов (рис. 3б). При этом гистограмма распределения удовлетворительно согласуется с экспоненциальным законом.

Распределения простоев по каждому из отдельных факторов (рис. 4) показали, что все гистограммы задержек лавы так же согласуются с экспоненциальным законом распределения. Так, например, простои, связанные с добычей полезного ископаемого, делятся от 30 минут до 3х часов с вероятностью более 70%, а простои, связанные с транспортированием основного груза, не превышают полутора часов также с вероятностью 70%.

Проанализировав гистограммы распределения можно сделать вывод о том, что наибольшее время простоев имеет наименьшую вероятность и соответственно наоборот – наименьшему

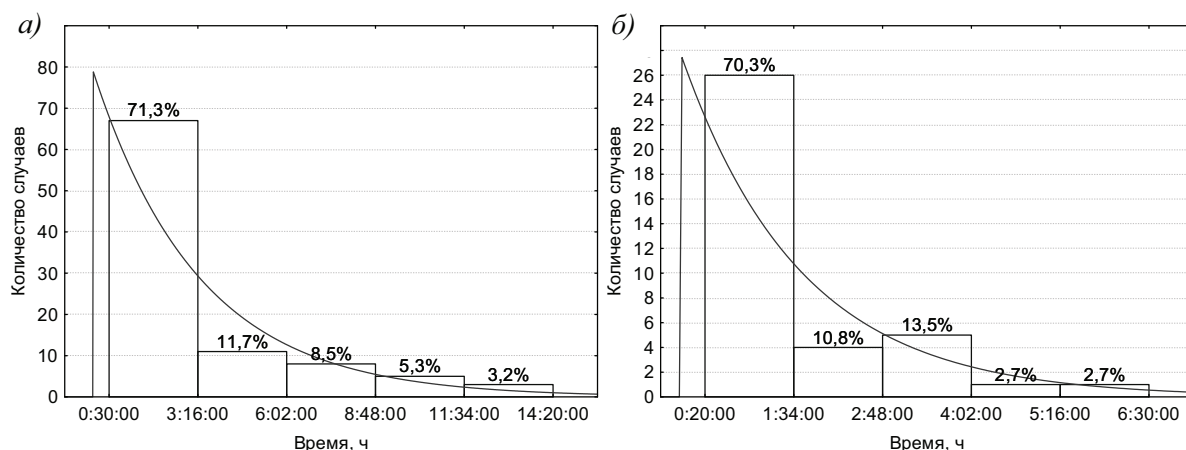


Рис. 4. Гистограммы распределения простоев:

- а) связанных с добычей;  
б) связанных с транспортом

времени простоев соответствует наибольшая вероятность. Это хорошо согласуется с теорией надежности и тот факт, что все гистограммы не противоречат экспоненциальному закону распределения, свидетельствует о том, что природа процессов смены одних простоев другими может быть описана марковскими цепями [7].

Реализация марковского процесса (процесс его моделирования) представляет собой вычисление последовательности (цепи) переходов из состояния в состояние (рис. 5). При этом важной особенностью является то, что переход в новое состояние определяется только тем, в каком состоянии находится система в данный момент и не зависит от всех предыдущих состояний. Полученная цепь представляется в виде случайной последовательности и может иметь также и другие варианты реализации.



Рис. 5. Пример марковской цепи

Чтобы определить, в какое новое состояние перейдет процесс из текущего  $i$ -го состояния, достаточно разбить интервал  $[0; 1]$  на подынтервалы величиной  $P_{i1}, P_{i2}, P_{i3}, \dots$  ( $P_{i1} + P_{i2} + P_{i3} + \dots = 1$ ), (см. рис. 6). Далее с помощью генератора случайных чисел (ГСЧ) получают очередное равномерно распределенное в



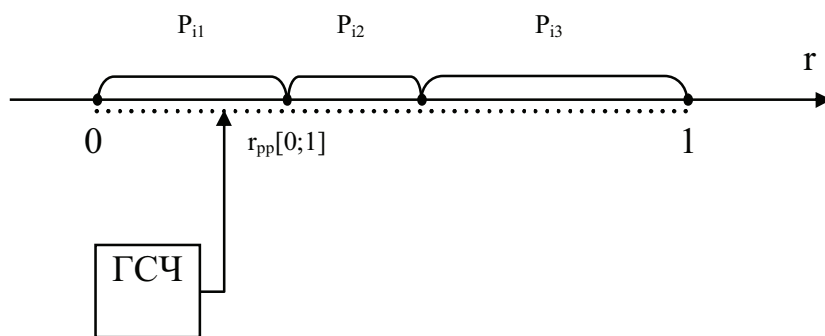


Рис. 6. Процесс моделирования перехода из  $i$ -го состояния марковской цепи в  $j$ -е с использованием генератора случайных чисел

интервале  $[0; 1]$  случайное число и определяют, в какой из интервалов оно попадает.

После этого осуществляется переход в состояние, определенное ГСЧ, и повтор описанной процедуры для нового состояния. Результатом работы модели является марковская цепь.

Для того чтобы отобразить математическую модель надежности работы лавы в виде марковской цепи необходимо построить матрицу переходов вероятностей. На рис. 7. показана матрица переходов (слева в абсолютных значениях, а справа в вероятностных показателях).

а)		1	2	3	4	5	6	7	б)						
1	73	39	14	4	7	0	1	1	0,53	0,28	0,10	0,03	0,05	0,00	0,01
2	39	82	13	8	21	1	4	4	0,23	0,49	0,08	0,05	0,13	0,01	0,02
3	12	17	2	3	6	0	1	1	0,29	0,41	0,05	0,07	0,15	0,00	0,02
4	5	6	3	2	2	0	2	2	0,25	0,30	0,15	0,10	0,10	0,00	0,10
5	9	20	8	3	25	0	1	1	0,14	0,30	0,12	0,05	0,38	0,00	0,02
6	0	1	0	0	0	0	0	0	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	2	5	0	0	0	0	2	2	0,22	0,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,22

Рис. 7. Матрицы переходов:

- а) в абсолютных значениях;  
б) в вероятностных показателях

Всего матрица содержит 7 основных факторов, где: 1 – связанные с добычей; 2 – с работой механизированного комплекса; 3

– с транспортом; 4 – электроснабжение; 5-прочее; 6 - геология; 7 – предварительные задержки в лаве.

Анализ таблицы показывает, что наиболее вероятны (53%) переходы из состояния 1 в состояние 1, т.е. поломка, связанная с оборудованием по выемке полезного ископаемого сменяется такой же поломкой. Так же большую вероятность имеет переход из состояния 2 в 2 (49%) и 7 в 2 (56%). Можно предположить, что простои выемочного оборудования сменяются такими же простоями из-за некачественного ремонта, а простои, связанные с остановами лицами горнотехнического надзора, сменяются простоями транспортного оборудования из-за нарушений правил эксплуатации и безопасной работы, что приводит к аварии, связанной с транспортом. Эта внутренняя связь отражается тем, что получается большое значение вероятности перехода. Если построить марковскую цепь, то эта закономерность будет присутствовать в ней в скрытом, устойчивом виде, и тогда марковская цепь будет отражать реальную чередуемость и периодичность этих остановок.

Матрицы переходов дают возможность построить временные ряды, чередуемости переходов во времени. Для этого по каждому фактору производится сортировка вероятностей по возрастанию. Задается произвольное начальное состояние системы. Например, пусть очистной забой находится в состоянии простоя из-за причины 3 (посадка на жестко секции механизированной крепи из-за обрушения пород непосредственной кровли). Затем генератором случайных чисел генерируем случайное число и подставляем в матрицу переходов соответствующего состояния. Тип простоя, ближайшая большая вероятность которого близка к случайному числу, будет являться следующим переходом с вероятностью соответствующей ему.

На рис. 8. показаны временные ряды переходов, которые вызванные причинами остановок. По оси абсцисс откладываются причины (номер) простоев, а по оси ординат вероятность переходов. Каждая цифра характеризуется гистограммой распределения, а так же его параметрами. Эти параметры мы можем исполь-

зовать в качестве исходных данных для работы более общей модели, которая отражает и моделирует всю работу очистного за-  
боя.

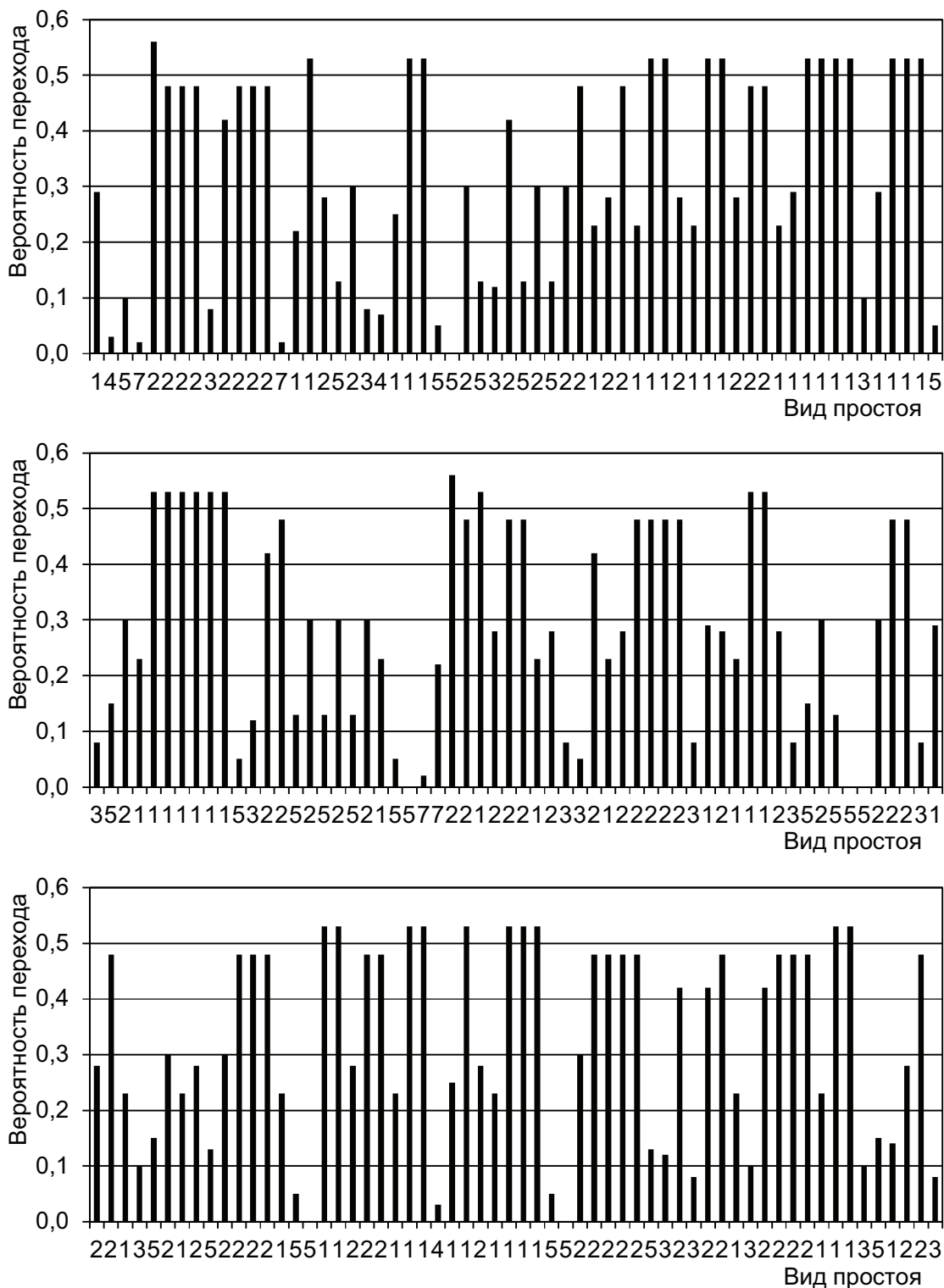


Рис. 8. Графики переходов

**Выводы и направления дальнейших исследований.** На основе проделанного анализа установлено, что большинство остановок очистных забоев вызвано непосредственно или косвенно негативным проявлением горного давления. Построены и проанализированы гистограммы распределения простоев. Построена матрица переходов между причинами простоев очистного забоя. Составлены временные ряды, разработана методика моделирования случайных остановок, которые могут быть использованы в качестве исходных данных для работы общей модели для имитации работы очистного забоя.

Дальнейшими исследованиями является совершенствование глобальной модели, которая описывает всю работу очистного забоя как стохастической системы.

#### Список литературы

1. Федоров В.Н. Обеспечение ритмичной работы очистных забоев – главное условие роста эффективности / В.Н. Федоров // Уголь. – 2009. – №1. – С. 70-73.
2. Федоров В.Н. К вопросу о техническом регулировании производственных процессов современной шахты / В.Н. Федоров // Уголь. – 2010. – №2. – С. 49-51.
3. Прогрессивные технологические схемы разработки пластов на угольных шахтах. А.С. Кузьмич и др. – Институт горного дела им. А.А. Скочинского, 1979 г. – 246 с.
4. Левкович П.Е., Чаленко Н.Е. Планирование нагрузки на очистной забой с учетом надежности машин и изменения условий эксплуатации / Уголь Украины. – 1967. – №4. – С. 24-26.
5. Носенко С.И., Носенко А.С. Априорный анализ надежности работы погрузочной машины как сложной системы / Материалы Международной научной конференции «Неделя горняка», 31 января - 4 февраля 2000, Москва, 2000. – С.113-116.
6. Проявления горного давления в очистных выработках при применении механизированных крепей / Кузнецов С.Т., Орлов А.А., Глушихин Ф.П. и др. – М.: Недра, 1966. - 318 с.
7. Чжунь Кай-Лай. Однородные марковские цепи / Чжунь Кай-Лай. – М.: Мир, 1964. – 428с.

Стаття надійшла до редакції 09.11.2012.

Рекомендовано до друку д-ром техн.наук С.М. Александровим

**А.В. Мерзлікін, Ю.М. Селезньова, С.В. Кузяра, В.В. Назимко**

Донецький національний технічний університет

### УДОСКОНАЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ НАДІЙНОСТІ РОБОТИ ОЧИСНОГО ВИБОЮ З УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ ГІРСЬКОГО ТИСКУ

Виконано аналіз простоїв шахтного устаткування і побудовані гістограми їх розподілу. Аналіз показав, що найбільший час простоїв має найменшу ймовірність, а гістограми розподілів не суперечать експоненціальним законом. Це свідчить про те, що природа процесів зміни одних простоїв іншими може бути описана марковськими ланцюгами. Складені часові ряди, розроблена методика зупинок моделювання шахтного устаткування.

**Ключові слова:** простої устаткування, матриці переходів, ймовірність.

**A. Merzlikin, Yu. Selezneva, S. Kuzyara, V. Nazimko**

Donetsk National Technical University

### IMPROVING A MATHEMATICAL MODEL OF THE RELIABILITY OF A WORKING FACE TAKING INTO ACCOUNT ROCK PRESSURE INFLUENCE

The paper provides an analysis of mining equipment downtimes and a histogram of their distribution. The analysis has shown that the longest downtime has the least probability, and distributions histograms do not conflict with the exponential law. It testifies to the fact that the nature of the processes of exchanging delays can be described by Markov chains. We provide time-series and a technique of simulating mining equipment shutdowns.

**Keywords:** downtime, transition matrix, probability.