

УДК 621.3:622:519.24

Построение эргатической системы человек–машина–среда применительно к шахте, опасной по выбросам газа или пыли

Рассмотрены производственные комплексы, в том числе шахта, с позиции человек–машина–среда. По единой методике проведена оценка безопасности с последующим нормированием требуемых вероятностей нормальной или безаварийной работы предприятия с учетом действий обслуживающего персонала и влияния окружающей среды. Разработана методология оценки возможной аварийности, на этой основе выполнены расчеты, обеспечивающие оптимальный выбор последовательности действий по ее предупреждению. Предложенная методология позволяет повысить безопасность работы горного производства путем оптимального расположения имеющихся на конкретном предприятии материально-технических ресурсов.

Ключевые слова: методы регрессионного анализа, анализ безопасности, сложные эргатические системы.

Контактная информация: b.kobiliansky@yandex.ua, anatology.mnukhin@gmail.com

Постановка проблемы. Участвовавшие в последнее годы на шахтах Украины крупные аварии со значительными социальными и материальными потерями влекут за собой необходимость анализа произошедшего с разных позиций, с использованием разных методов. Термины «анализ риска» и «оценка риска» достаточно известны специалистам, так как именно на них базируются критерии надежности и требования безопасности к эргатическим системам.

Численный анализ безопасности многофункциональных систем был введен в практику в начале 1970-х годов после катастрофических аварий на подземных комплексах запуска межконтинентальных ракет. Ныне пришло время практической реализации подобных подходов для оценки и нормирования потенциального риска работы в промышленности, в частности на таком сложном эргатическом объекте, каким является угольная шахта, определяя риск как вероятность человеческих жертв и материальных потерь или повреждений.

Известно [1, 2], что как в Украине, так и за рубежом общественность не чрезмерно озабочена наличием риска от 10^{-6} в год и менее, поэтому редко применяются меры для его последующего снижения. Уровень индивидуального риска с фатальным исходом (за год) обусловлен разными видами опасностей и составляет [2]:



Б. Б. КОБИЛЯНСКИЙ,
канд. техн. наук
(УНППИ Украинской инженерно-педагогической академии)



А. Г. МНУХИН,
доктор техн. наук
(Запорожская государственная инженерная академия)

Транспорт наземный	$3 \cdot 10^{-4}$
Падение с высоты	$9 \cdot 10^{-5}$
Пожар или ожог	$4 \cdot 10^{-5}$
Утопление	$3 \cdot 10^{-5}$
Отравление	$2 \cdot 10^{-5}$
Механическое оборудование	$1 \cdot 10^{-5}$
Падающие предметы	$6 \cdot 10^{-6}$
Электрический ток	$6 \cdot 10^{-6}$
Железнодорожный транспорт	$4 \cdot 10^{-6}$
Молния	$5 \cdot 10^{-7}$
Ураган	$4 \cdot 10^{-7}$
Прочие факторы	$4 \cdot 10^{-5}$

Полагая на основе предварительного анализа и отечественных стандартов допустимый уровень риска со смертельным исходом 10^{-6} за год, следует учесть, что риски, принимаемые на себя индивидумом добровольно (например, при занятиях спортом), которые могут достигать 10^{-2} – 10^{-3}

БЕЗОПАСНОСТЬ ТРУДА

за год, не связаны с обеспечением безопасности на рабочем месте. Указанные подходы применимы для описания аналогичных ситуаций и в других отраслях промышленности (например, металлургии, коксохимии), но структура, способствующая возникновению аварийной ситуации, здесь совсем иная.

Рассмотрим, что связывает между собой все крупные аварии на угольных предприятиях, представив шахту как сложный объект типа человек–машина–среда. Исходные данные приведены в табл. 1, из которой следует, что большинство аварий сопряжены иногда с отравлением газом, но чаще с его взрывом или взрывом пылевоздушной смеси (шахта им. А. Ф. Засядько).

Данные исследований авторов свидетельствуют, что процесс аварии достаточно крупного масштаба состоит, как правило, из двух частей: человек–машина или машина–среда. Причем человеческий фактор в прямом или косвенном виде присутствует практически во всех случаях. Поскольку второй по значимости фактор – оборудование, то из изложенного вытекает, что в настоящее время имеются пути снижения аварийности на шахтах, в том числе опасных по выбросам газа

или пыли, путем целенаправленной подготовки персонала и обеспечения работоспособного состояния горношахтного оборудования.

Попытки оценить безопасность работы в шахте предпринимались, в частности, применительно к системам подземного электроснабжения [3, 4], методом планирования режима обслуживания горношахтного оборудования [5], а также состояния горного массива, т. е. непосредственно окружающей среды [6]. Именно эти работы послужили основой нового научного направления, которое позволило установить численное взаимоотношение между составляющими частями угольной шахты, опасной по выбросам газа или пыли, как эргатического объекта типа человек–машина–среда.

Первоначально при исследовании сложных систем, таких как угольные шахты, безопасную работу в определенный момент традиционно отождествляли с надежностью. Однако впоследствии была выявлена неправомерность такого отождествления: если в теории надежности внимание в основном уделяется технике, то главным объектом безопасности системы является человек.

Повышение надежности несомненно способствует повышению безопасности, хотя это отно-

Таблица 1

Показатель	Шахта, дата аварии				
	Им. Н. П. Баракова, 11.03.00 г.	«Красноармейская-Западная» № 1, 14.02.02 г.	«Украина», 07.07.02 г.	«Юбилейная», 21.07.02 г.	Им. А. Ф. Засядько, 31.07.02 г.
Источник воспламенения	Горящее масло и алюминиевый корпус редуктора давления	Поврежденный сигнальный кабель напряжением 36 В	Горящая транспортная лента при еетрениии о барабан в процессе разрушения	Короткое замыкание в коробке ввода электродвигателя напряжением 660 В при нарушении взрывозащиты	Взрывные работы, выполняемые с нарушениями
Характер аварии	Взрыв пыли, поднятой кислородом высокого давления	Взрыв газа	Отравление газом	Взрыв газа	Взрыв газа
Отличительные особенности аварии	Нарушение правил ведения огневых работ. Аварийное состояние сварочной техники (неисправность редуктора баллона с кислородом)	Неудовлетворительное состояние электрооборудования. Наличие внезапных выбросов и, как следствие, мест скопления взрывоопасной газовой смеси	Ошибочное решение о порядке реверсирования воздушной струи и выводе людей по наклонному квершлагу. Отсутствие контроля за состоянием транспортеров. Значительный дефицит противопожарной техники	Нарушения правил монтажа и обслуживания электрооборудования (нет фиксации кабелей и уплотнений), недостаточный газовый контроль. Наличие слоевых скоплений метана и его зон-ловушек	Нарушение Правил ведения взрывных работ (взрывчатые вещества IV класса вместо V и VI, уменьшенное количество детонаторов, применение накладных зарядов). Наличие местных скоплений метана

сится только к тому оборудованию, которое может быть источником аварийной ситуации. Так, отказ лампы светильника в камере подстанции при наличии индивидуальных светильников у персонала как правило не создает опасности для людей, а значит, не может быть источником аварийной ситуации. Однако отклонение среды от оптимальной при изменении горно-геологических условий в шахте, например в случае внезапного выброса, может привести к возникновению аварийной ситуации, хотя отказы и поломки промышленного оборудования в этом случае не наблюдались. Таким образом, предпосылка отказа – дефект, а предпосылка аварии – отклонение от нормальной работы людей и рудничного оборудования или от нормального состояния окружающей среды.

Рассмотрим, что связывает надежность и безопасность. Наиболее вероятная причина аварий в угольной шахте – отказ оборудования. Это обуславливает основную роль отказов в общем потоке причин возникновения аварий. В действительности общий поток причин появления аварий представляет собой суперпозицию достаточно большого количества таких элементарных потоков, как биологический и психологический отказ персонала с последующими его ошибками, нарушение исправности оборудования, ухудшение условий окружающей среды (внезапные выбросы породы угля или газа).

Отсутствие точной формулировки о составе суммарного потока и основных характеристик элементарных потоков часто формировало пред-

ставление о том, что поток причин появления аварий – это поток отказов исключительно оборудования, т. е. следовал вывод: безопасность системы и надежность – одно и то же. Если надежность шахты можно определить как свойство, заключающееся в способности выполнять задачи в регламентируемых условиях эксплуатации, то понятие безопасности нуждается в уточнении [7].

Согласно исследованиям [8, 9] угольную шахту с учетом взаимодействия обслуживающего персонала, оборудования и среды будем рассматривать как эргатическую систему человек–машина–среда. Нормальное функционирование данной системы определяется взаимодействием персонала, оборудования и среды, которые характеризуются соответственно работоспособностью, исправностью и оптимальностью. В зависимости от условий поддержания на должном уровне указанных параметров в системе будет осуществляться работа нормальная, безаварийная или аварийная. Рассмотрим пути, которые приводят к каждому конкретному условию эксплуатации, предварительно установив различные состояния персонала, электрооборудования и среды (табл. 2).

Нормальную работу предприятия определим как работу на исправном, правильно выбранном оборудовании, расположенном в нормальной среде, при отсутствии ошибок обслуживающего персонала. Локальные и функциональные ошибки в этих условиях не нарушают налаженной работы шахты в целом.

Безаварийная работа наблюдается как при ошибках или физиологическом отказе

Таблица 2

Элемент схемы состояний	Определение состояния	Пример состояния
P_1	Болезнь, алкогольное опьянение, акцентуированная личность	Невроз, сердечно-сосудистые заболевания
P_2	Эмоциональный стресс, клаустрофобия, неправильная профориентация, психологическая несовместимость	Психологическая неуравновешенность
P_3	Ошибка, которая не приводит к каким-либо отрицательным последствиям	Попытка включения заблокированного механизма, нарушение блокировки
P_4	Ошибка, приводящая к изменению технологического процесса, восстанавливаемому после ее устранения	Ошибочное отключение, ошибочное изменение состояния механизма
P_5	Ошибка как причина возникновения особых условий эксплуатации или отказа оборудования	Подача напряжения на закороченную или поврежденную линию, на человека
P_6	Доведение состояния персонала до нормального	Оказание медицинской помощи персоналу или его замена

БЕЗОПАСНОСТЬ ТРУДА

Окончание табл. 2

P_7	Работа персонала в строгом соответствии с действующими нормами, правилами и инструкциями	Отсутствие замечаний инспекции
P_8	Параметры оборудования соответствуют оговоренным в технических условиях и в другой нормативной документации	Отклонение не критично
P_9	Параметры оборудования имеют некоторое отклонение (качественное) от оговоренных в технических условиях и в другой нормативной документации	Ослабление крепления элементов оборудования, ухудшение электрической изоляции
P_{10}	Нарушение параметров оборудования, усложняющее условия его эксплуатации	Взаимное смещение элементов выключателя (коромысла и контактов), отсутствие на корпусе крепежных болтов
P_{11}	Недопустимое изменение параметров оборудования, вызывающее особые условия эксплуатации	Отказ выключателя с неполнофазной коммутацией, нарушение вакуума в камерах
P_{12}	Нарушение режима работы	Неполнофазный режим, повышенная загазованность
P_{13}	Комплекс работ для приведения оборудования в исправное работоспособное состояние	Фиксация или замена элементов оборудования, дополнительная вентиляция
P_{14}	Нарушение параметров оборудования, что влечет за собой чрезвычайные условия эксплуатации	Неравномерная нагрузка, перегрев механизма
P_{15}	Уменьшение количества оборудования, находящегося в чрезвычайных условиях эксплуатации	Выведение из работы поврежденного механизма или заболевшего работника
P_{16}	Состояние, не допускающее восстановления параметров или сужения круга поврежденных элементов	Взрыв, пожар, обрушение
P_{17}	Полное исключение из работы оборудования, находящегося в чрезвычайных условиях эксплуатации	Переход на питание от другого ввода, замена поврежденного оборудования
P_{18}	Среда, обеспечивающая оптимальную работоспособность персонала, параметры которой не выходят за пределы требований нормативов	Параметры среды соответствуют регламентируемым нормативно-технической документацией
P_{19}	Среда, основные параметры которой нестабильны	Параметры среды с переменным характером
P_{20}	Среда, способствующая уменьшению работоспособности персонала и вызывающая его функциональные изменения, выходящие за пределы нормы, но не ведущие к патологическим нарушениям, а также снижающая технические характеристики эксплуатируемого оборудования	Поддув почвы, загазирование с концентрацией метана до 2 %, умеренное увеличение водопритока в выработки
P_{21}	Среда, вызывающая возникновение в организме человека патологические изменения и (или) невозможность выполнения работ. Среда, нарушающая целостность оборудования и (или) препятствующая выполнению им своих функций	Горный удар, загазирование выработки метаном концентрацией более 2 %, недостаток кислорода, выделение опасных газов (H_2S , CO), высокая температура среды, сильное увеличение водопритока в выработку

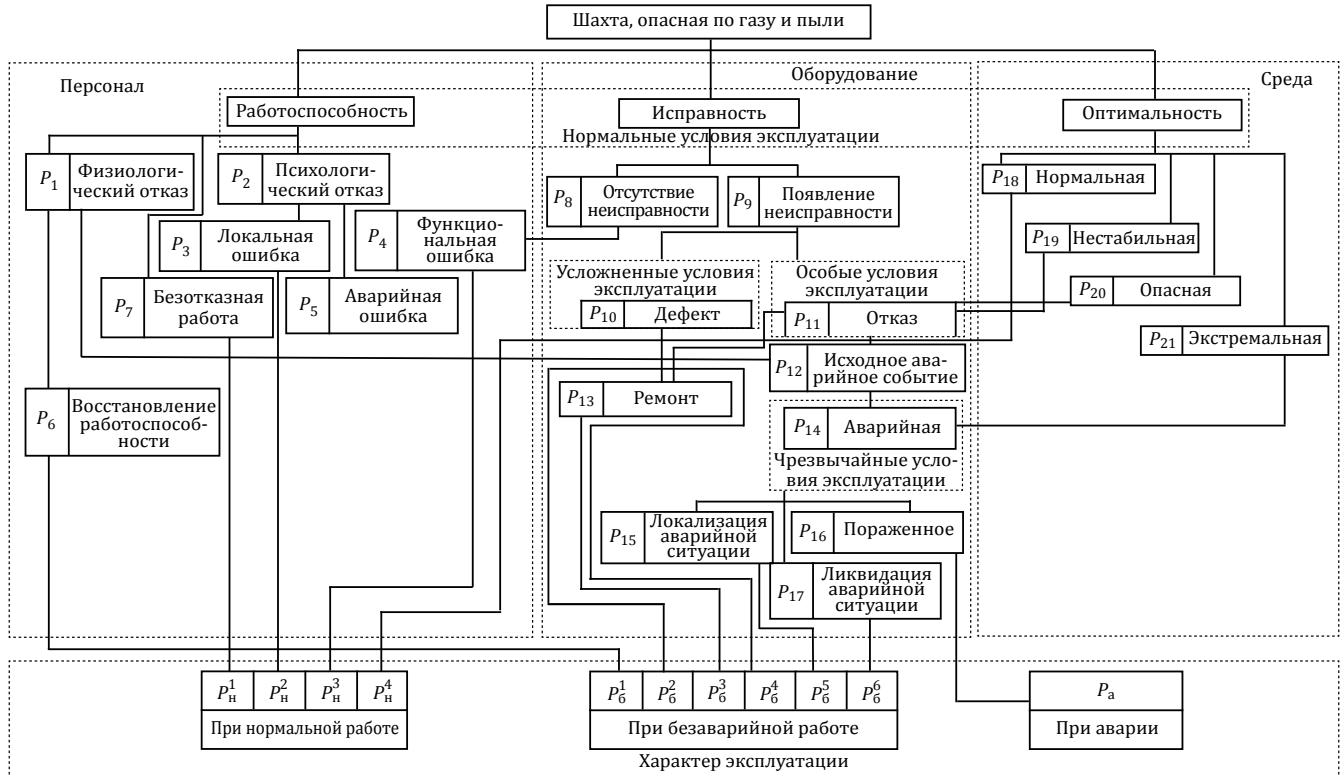


Рис. 1. Схема последовательности событий и состояний шахты, опасной по газу и пыли.

персонала, так и в случае возникновения опасной или даже экстремальной среды. Эти воздействия приводят к отказу оборудования или исходному аварийному событию и далее – к аварийной ситуации. Если дефекты незначительны или сопровождаются регулярным ремонтом оборудования, своевременной локализацией или ликвидацией аварийной ситуации, шахта приводится в достаточно стабильное безопасное состояние.

Анализируя поведение шахты в реальных условиях, исходя из технических соображений и действующих норм, приходим к выводу о независимости рассматриваемых событий, которые образуют множество, определяющее конкретную ситуацию. Обозначив через P_i вероятности i -го события, запишем [1]:

$$\begin{aligned}
 P_1 + P_2 + P_7 &= 1; \\
 P_3 + P_4 + P_5 &= 1; \\
 P_8 + P_9 &= 1; \\
 P_{10} + P_{11} &= 1; \\
 P_{12} + P_{13} &= 1; \\
 P_{15} + P_{16} + P_{17} &= 1; \\
 P_{18} + P_{19} + P_{20} + P_{21} &= 1.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Отсюда следует, что $P_n + P_6 + P_a = 1$, или

$$\begin{aligned}
 P_n^1 + P_n^2 + P_n^3 + P_n^4 + P_6^1 + P_6^2 + \\
 + P_6^3 + P_6^4 + P_6^5 + P_6^6 + P_a = 1.
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

На основании рис. 1, используя логико-вероятностный подход [9] и аппарат условных вероятностей [10], обозначим через $P(S_A / S_B)$ вероятность наступления событий A при условии, что событие B наступило, а логическое умножение (конъюнкцию) как Λ , запишем:

$$P_n^1 = P_7; \tag{3}$$

$$P_n^2 = P_2 \cdot P(S_3 / S_2); \tag{4}$$

$$P_n^3 = P_2 \cdot P(S_4 / S_2) + P_8 - P(S_4 \Lambda S_8); \tag{5}$$

$$P_n^4 = P_{18}; \tag{6}$$

$$P_6^1 = P_1 \cdot P(S_6 / S_1); \tag{7}$$

$$P_6^2 = P_9 (S_{10} / S_9); \tag{8}$$

$$\begin{aligned}
 P_6^3 = \{ [P_2 \cdot P(S_5 / S_2) + P_9 + P_{19} + P_{20} - \\
 - P(S_5 \Lambda S_9 \Lambda S_{19})] [P(S_{10} / S_9) + P(S_{11} / S_9) - \\
 - P(S_{10} \Lambda S_{11})] \} \cdot P(S_{13} / S_{10} \Lambda S_{11});
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

$$\begin{aligned}
 P_6^4 = [P_2 \cdot P(S_5 / S_2) + P_9 + P_{19} + P_{20} - \\
 - P(S_5 \Lambda S_9 \Lambda S_{19} \Lambda S_{20})] \cdot \\
 \cdot P(S_{11} / S_5 \Lambda S_9 \Lambda S_{19});
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

БЕЗОПАСНОСТЬ ТРУДА

$$P_6^5 = \{ \{ [P_2 \cdot P(S_5 / S_2) + P_9 + P_{19} + P_{20} - P(S_5 \wedge S_9 \wedge S_{19} \wedge S_{20})] \cdot P(S_{11} / S_5 \wedge S_9 \wedge S_{19} \wedge S_{20}) + P_1 - P(S_1 \wedge S_{11} / S_5 \wedge S_9 \wedge S_{19}) \} \cdot P(S_{12} / S_{11} / S_5 \wedge S_9 \wedge S_{19}) + P_{20} + P_{21} - P(S_1 \wedge S_{20} \wedge S_{12} / S_{11} / S_5 \wedge S_9 \wedge S_{19} \wedge S_{20}) \} \times P(S_{14} / S_{12} \wedge S_{21}) \cdot P(S_{15} / S_{14}). \quad (11)$$

Сопоставляя формулы (10) и (11), делаем заключение о возможности последующего упрощения и записи P_6^5 , P_6^6 и P_a через P_6^4 . Тогда

$$P_6^5 = \{ [P_6^4 + P_1 - P(S_1 \wedge S_{11} / S_5 \wedge S_9 \wedge S_{19} \wedge S_{20})] \times P(S_{12} / S_{11} / S_5 \wedge S_9 \wedge S_{19} \wedge S_{20}) + P_{21} - P(S_1 \wedge S_{20} \wedge S_{12} / S_{11} / S_5 \wedge S_9 \wedge S_{19} \wedge S_{20}) \} \times P(S_{14} / S_{12} \wedge S_{21}) \cdot P(S_{17} / S_{14}); \quad (12)$$

$$P_6^6 = \{ [P_6^4 + P_1 - P(S_1 \wedge S_{11} / S_5 \wedge S_9 \wedge S_{19} \wedge S_{20})] \times P(S_{12} / S_{11} / S_5 \wedge S_9 \wedge S_{19} \wedge S_{20}) + P_{21} - P(S_1 \wedge S_{20} \wedge S_{12} / S_{11} / S_5 \wedge S_9 \wedge S_{19}) \} \times P(S_{14} / S_{12} \wedge S_{20}) \cdot P(S_{17} / S_{14}); \quad (13)$$

$$P_a = \{ [P_6^4 + P_1 - P(S_1 \wedge S_{11} / S_5 \wedge S_9 \wedge S_{19} \wedge S_{20})] \times P(S_{12} / S_{11} / S_5 \wedge S_9 \wedge S_{19} \wedge S_{20}) + P_{21} - P(S_1 \wedge S_{20} / S_{11} / S_5 \wedge S_9 \wedge S_{19} \wedge S_{20}) \} \times P(S_{14} / S_{12} \wedge S_{21}) \cdot P(S_{16} / S_{14}). \quad (14)$$

Исходя из результатов обследования состояния оборудования и обслуживающего персонала, а также анализа среды (горно-геологических условий) на конкретном предприятии определяют указанные вероятности соответствующих реальному состоянию оборудования при эксплуатации и прогнозируют поведение шахты как эргатической системы.

Именно рассмотрение любых производственных комплексов с позиции человек-машина-среда дает возможность на базе единой методологии оценить безопасные условия труда в шахте с последующим нормированием требуемых вероятностей нормальной или безаварийной работы с учетом действий обслуживающего персонала и влияния окружающей среды.

Анализ показал, что в отрасли не охвачена статистикой большая часть факторов, подлежащих анализу, например виды ошибок персонала, а данные по другим факторам (состояние персонала, оборудование), имеют явно недостоверный характер. Поэтому наиболее целесообразно определять основные параметры, характеризующие работу шахты, опасной по газу или пыли, используя методы экспертных оценок [11], позволяющие при достаточно широком (до 90 % угольных предприятий Украины) и компетентном круге опрашиваемых специалистов (технические директора и специалисты по безопасности работ) корректно решить указанные проблемы.

Разработанная методология оценки возможной аварийности и выполненные на ее основе расчеты, обеспечивающие оптимальный выбор последовательности действий по ее предупреждению, обладают существенным недостатком, характерным для расчетов такого типа, т. е. используется аппарат условных вероятностей. Расчетами не определена их статическая надежность, без которой практическая реализация анализа в определенной мере становится некорректной.

В этом случае для оценки собранного путем опроса специалистов статистического материала и полученных на эргатической основе расчетов было бы возможно применить методы пара-

Таблица 3

Элемент схемы состояний	X_{\min}	X_{\max}	\bar{X}	σ
P_1	0,100	0,400	0,208	0,103
P_2	0,200	0,750	0,408	0,167
P_3	0,250	0,800	0,492	0,188
P_4	0,150	0,400	0,258	0,084
P_5	0,050	0,500	0,167	0,171
P_6	0,150	0,650	0,450	0,266
P_7	0,200	0,900	0,383	0,189
P_8	0,200	0,600	0,433	0,141
P_9	0,400	0,800	0,567	0,141
P_{10}	0,400	0,900	0,677	0,172
P_{11}	0,100	0,600	0,323	0,172
P_{12}	0,015	0,750	0,378	0,207
P_{13}	0,250	0,985	0,623	0,207
P_{14}	0,015	0,500	0,186	0,117
P_{15}	0,200	0,815	0,469	0,126
P_{16}	0,125	0,400	0,288	0,081
P_{17}	0,060	0,600	0,243	0,175
P_{18}	0,250	0,900	0,597	0,200
P_{19}	0,100	0,500	0,262	0,143
P_{20}	0,100	0,640	0,252	0,155
P_{21}	0,000	0,310	0,142	0,132

метрической статистики, алгоритм реализации которых подробно изложен в работе [12].

Уравнение регрессии, выходным фактором которого является P_a , построенное методами, изложенными в работах [12, 13], имеет вид

$$P_a = 0,102 - 0,25P_1 - 0,0003P_3 + 0,237P_4 + 0,0003P_8 - 0,198P_{10} + 0,052P_{13} + 0,146P_{14} - 0,121P_{21}. \quad (15)$$

Критерий Фишера полученного уравнения составляет 13406,7, что значительно больше предельного значения, равного 5,32. Используя для анализа значения T -критериев Стьюдента, для каждого члена уравнения определяем устойчивость регрессионных коэффициентов, корректируя уравнение (15). Низкие значения T -критериев Стьюдента для коэффициентов a_2 и a_4 (факторы P_3 и P_8 соответственно) совпадают с практически незначимыми по абсолютным значениям этих же коэффициентов ($\mp 0,0003$). В связи с этим факторы P_3 и P_8 можно вывести из регрессионного уравнения, которое после корректировки имеет вид

$$P_a = 0,102 - 0,25P_1 + 0,24P_4 - 0,20P_{10} + 0,05P_{13} + 0,15P_{14} - 0,12P_{21}. \quad (16)$$

Значения вероятностей состояний угольной шахты, полученные указанными методами, использовались для оценки безопасности и работоспособности угольной шахты (табл. 3).

Определяем фактический уровень безопасности эксплуатируемых в настоящее время угольных шахт, опасных по газу или пыли, с учетом действий персонала, состояния оборудования и среды. Вероятности режимов работы угольной шахты:

нормальная работа: $P_H^1 = 3,83 \cdot 10^{-1}$; $P_H^2 = 1,60 \cdot 10^{-2}$; $P_H^3 = 4,27 \cdot 10^{-1}$; $P_H^4 = 6,00 \cdot 10^{-2}$;
 безаварийная работа: $P_6^1 = 8,00 \cdot 10^{-3}$; $P_6^2 = 4,10 \cdot 10^{-2}$; $P_6^3 = 6,10 \cdot 10^{-2}$; $P_6^4 = 2,00 \cdot 10^{-3}$;
 $P_6^5 = 0,00$; $P_6^6 = 1,00 \cdot 10^{-3}$. Тогда $P_H = 8,86 \cdot 10^{-1}$;
 $P_6 = 1,13 \cdot 10^{-1}$; $P_a = 10,81 \cdot 10^{-4}$.

Разработанную методологию можно применить для решения аналогичных задач в металлургической, коксохимической, строительной и других смежных отраслях промышленности, функционирование которых связано с действиями персонала значительной численности и разной квалификации, высокой насыщенностью потенциально опасных машин и механизмов, часть которых расположена в потенциально опасной среде.

Пример 1. Определить вероятность нормальной работы угольной шахты в случае технологического отказа персонала, приведшего к его функциональной ошибке.

Решение. Значения условных вероятностей $P_2 = 0,50$; $P_4 = 0,25$; $P_8 = 0,50$ определяют путем опроса ведущих технических специалистов данного предприятия:

$$P_H^3 = P_2 \cdot P(S_4 \times S_2) + P_8 - P(S_4 \Delta S_8);$$

$$P_H^3 = 0,50 \cdot 0,25 \times 0,50 + 0,50 - 0,25 = 0,312.$$

Пример 2. Определить вероятность безопасной работы шахты при появлении неисправности оборудования, которая приводит к дефекту и возникновению усложненных условий эксплуатации.

Решение. Значения условных вероятностей $P_9 = 0,50$; $P_{10} = 0,70$ определяют путем опроса (методом экспертных оценок):

$$P_6^2 = 0,50 \cdot 0,70 = 0,350.$$

Таким образом, методом, изложенным в настоящей работе, совместно с формализованным опросом специалистов соответствующего профиля и уровня, установлены численные значения фактических уровней вероятностей безопасной работы конкретной шахты в зависимости от рассмотренных условий состояния её эргатических компонентов. В случае каких-либо существенных изменений подземного производства, например при его расширении или

Таблица 4

Вероятность	-3σ	-2σ	-σ	\bar{X}	σ	+σ	+2σ	+3σ
P_3	-0,072	0,116	0,304	0,492	0,188	0,680	0,868	1,056
P_6	-0,347	-0,081	0,184	0,450	0,266	0,716	0,981	1,247
P_9	0,143	0,284	0,426	0,567	0,141	0,708	0,850	0,991
P_{12}	-0,244	-0,037	0,171	0,378	0,207	0,585	0,793	1,000
P_{15}	0,089	0,216	0,343	0,469	0,126	0,595	0,722	0,848
P_{18}	-0,003	0,197	0,337	0,597	0,200	0,797	0,997	1,197

Таблица 5

Фактор F	F_{\max}	F_{\min}	\bar{X}	σ
1. Аварийная, ед./Суточная производительность, т	$3,24 \cdot 10^{-7}$	0	$6,66 \cdot 10^{-8}$	$1,04 \cdot 10^{-7}$
2. Аварийная ситуация, ед./Суточная производительность, т	$5,14 \cdot 10^{-5}$	$1,35 \cdot 10^{-6}$	$1,91 \cdot 10^{-5}$	$1,48 \cdot 10^{-5}$
3. Количество оборудования, шт./Численность персонала, чел.	126,18	0,18	15,90	34,92
4. Количество нарушений, ед./Установленная мощность, кВ·А	$2,71 \cdot 10^{-1}$	0	$2,76 \cdot 10^{-2}$	$7,75 \cdot 10^{-2}$

модернизации, можно провести корректировку параметров безопасности.

Прежде чем приступить к сопоставлению полученного значения P_a с расчетными, определенными исходя из иного методического подхода, например приведенного в работе [13] или принятыми на основе нормативных документов [16, 17] для угольной шахты, отметим принципиальное различие предлагаемых методов. Следует также учитывать, что традиционные методы оценки безопасности шахт, как правило, не позволяют четко установить и оценить причинно-следственные зависимости: ошибки персонала – плохая подготовка или болезнь, отказ оборудования – низкое качество его проектирования, изготовления или обслуживания и т. д. В связи с изложенным для оценки конечных результатов полученные расчетные значения целесообразно сопоставить с нормативными. Например, при 100–200 единицах оборудования или 10–20 участках вероятность аварии P_a , принимаемая в данном случае равной сумме предельных значений вероятностей взрыва P_v , пожара $P_{п}$ и поражения $P_{эп}$, может быть приближенно определена по формуле

$$P_a = P_v + P_{п} + P_{эп}, \quad (17)$$

соответственно

$$P_a = 10^{-6} (10-20) + 10^{-6} (100-200) + 10^{-6} = 1,11 \cdot 10^{-4} \dots 2,21 \cdot 10^{-4}.$$

Отклонение от среднего этих шести вероятностей, выраженных через σ (см. табл. 3), приведены в табл. 4. Полученные методом сглаживания трендов [9] и реализованные в последую-

ющих расчетах значения вероятностей $P_3, P_6, P_9, P_{12}, P_{15}$ и P_{18} при настоящем уровне состояния шахт можно рассматривать как перспективные и вполне достижимые, хотя и порознь, на некоторых шахтах в настоящее время.

При современном техническом оснащении шахт значения P_a уже сегодня не должны превышать $10,81 \cdot 10^{-4}$ за год. Следовательно, количество аварий, например на 144 шахтах, должно быть не более

$$N_a = 144 \cdot 10,81 \cdot 10^{-4} = 0,156 \text{ 1/год,}$$

что существенно (примерно на 1,5 порядка) ниже средней аварийности, которая характерна для шахт Украины в настоящее время, а уровень риска будет достигать примерно соответствующего значения для транспорта в странах дальнего зарубежья. Такой уровень безопасности недостаточен для угольной отрасли, в связи с чем необходимо принимать меры для его эффективного повышения.

Расчеты выполнялись на основе статистических данных по аварийности и состоянию энергохозяйства (количество обслуживаемого оборудования, численность персонала, количество зарегистрированных нарушений действующей нормативной документации, установленная мощность). Причем при расчетах, исходя из трудоемкости обслуживания, 5 км кабельной сети приравнивались к единице высоковольтного оборудования. Статистический подход основан на методах регрессионного анализа, разработан для определения расположения бифуркационных линий множества катастрофы сборки на пространстве управления.

Таблица 6

Бифуркационная линия	A	B	σ_A	σ_B
КА	$1,38 \cdot 10^{-5}$	$6,76 \cdot 10^{-5}$	$0,33 \cdot 10^{-5}$	$1,12 \cdot 10^{-5}$
KB	$2,55 \cdot 10^{-2}$	0,12	$0,21 \cdot 10^{-2}$	0,27

Статистические характеристики данных ежегодной аварийности систем подземного электрооборудования приведены в табл. 5.

Полученные на основе этих данных значения параметров уравнений бифуркационных линий, расположенных на двумерном пространстве управления (рис. 2), приведены в табл. 6 [18].

Анализируя исходные данные для расчетов (см. табл. 2) и полученные зависимости (рис. 3), отметим, что совпадение с точностью до доверительного интервала (точность расчетов) соответствующих бифуркационных линий для выходных факторов авария и аварийная ситуация указывает на недостаточную эффективность действия служб, отражающих аварийные ситуации, которые возникают в условиях эксплуатации.

Рассмотрим пример из практики эксплуатации горношахтного электрооборудования, которым комплектуются шахты Украины. Отметим, что сопоставление работы и обслуживания электрооборудования на отечественных предприятиях с аналогичными зарубежными практически некорректно как вследствие использования технических устройств других типов, так и ограниченных сведений о технологии обслуживания. Поэтому значительный интерес представляет процесс эксплуатации систем электрооборудования мощностью 6 кВ на шахтах прибалтийских государств в сопоставлении с аналогичным процессом на шахтах Украины.

Система электрооборудования, например на шахте «Эстония», построена исключительно на использовании морально устаревших ячеек РВД-6 с масляным выключателем ВМБ-10 выпуска более чем 40-летней давности. Однако наличие минимальной ремонтной базы непосредственно на месте установки ячеек РВД-6 в сочетании с их регулярным поочередным обслуживанием позволило добиться отличного состояния и практически безаварийной работы. В этом случае увеличение количества сотрудников службы эксплуатации оборудования напрямую связано с повышением надежности его работы.

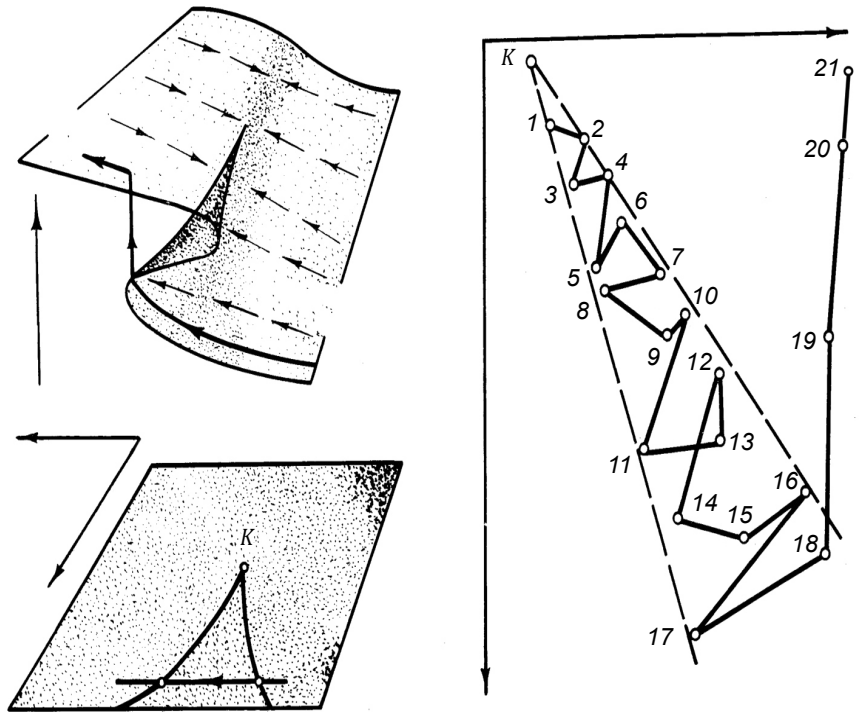


Рис. 2. Типичная катастрофа сборки данных по безопасности систем подземного электрооборудования.

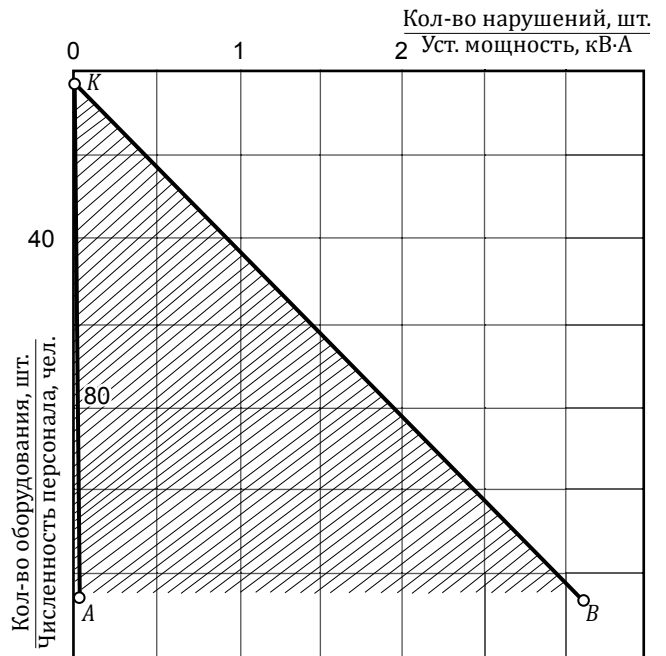


Рис. 3. Бифуркационные линии катастроф сборки данных по безопасности систем подземного электрооборудования.

Наладка режима эксплуатации аналогичного отечественного оборудования осуществляется фактически только в процессе восстановления изделия после аварийной ситуации. При таком подходе к планированию режима эксплуатации количество персонала ремонтных служб перестает быть сколько-нибудь определяющим.

Из сопоставления рис. 2 и 3 также вытекает, что заштрихованная зона АКВ представляет собой проекцию неустойчивого участка сборки, т. е. пространства переменных состояний, проектируемого на пространство управления (площадь АКВ) трижды. Таким образом, для ликвидации условий, в которых возникают аварийные ситуации или непосредственно аварии, режим эксплуатации системы подземного электроснабжения необходимо выбрать таким, чтобы характеризующие его параметры (координаты: приведенное количество нарушений – приведенный объем обслуживания) находились в пространстве переменных состояний, ограниченном бифуркационными линиями КА и КВ.

Выполнив непосредственно численный анализ рис. 3, можно также сделать вывод о том, что вследствие высокой крутизны бифуркационной линии КА снижение приведенного объема обслуживания как метод борьбы с аварийностью не имеет высокую эффективность. Более эффективны в данном случае методы, направленные на снижение количества нарушений обслуживающим и ремонтным персоналом требований нормативно-технической документации и выполнения регламента обслуживания электрооборудования. Причем предлагаемые рекомендации вполне осуществимы в реальных производственных условиях, так как требуют снижения количества нарушений при эксплуатации фактического количества оборудования не более чем в 4–6 раз.

Выводы. Учитывая значительные расхождения вероятностей ошибок различного рода, возникающих при обслуживании систем подземного электроснабжения на разных предприятиях (2,8–13,3 раза), полученные теоретическим путем рекомендации вполне согласуются с данными по безопасности существующего электрооборудования, полученными на действующих шахтах разных регионов Украины статистическими методами. Следовательно, существенное увеличение численности обслуживающего персонала без осуществления кардинальных мероприятий по перестройке службы эксплуатации

не снизит аварийность в системах подземного электроснабжения. Для этого необходима коренная перестройка всего режима эксплуатации горношахтного электрооборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мнухин А. Г. Оценка безопасности и работоспособности систем электроснабжения угольных шахт / А. Г. Мнухин // Безопасность труда в пром-сти. – 1987. – № 2. – С. 26–29.
2. Хенли Э. Д. Надежность технических систем и оценка риска / Э. Д. Хенли, Х. Кумamoto. – М.: Машиностроение, 1984. – 528 с.
3. Mnykhin A. Optimization of coal mine parameters to provide safe operation / A. Mnykhin, O. Bryukhanov // Technology at the service of environment. – Komeko, 2003. – Vol. II. – P. 91–106.
4. Технологии XXI века. Электрогидравлика / [А. Г. Мнухин, А. М. Брюханов, И. В. Иорданов и др.] . – Макеевка-Донецк: ВИК, 2012. – Т. 1. – 432 с.
5. Мнухин А. Г. Оптимизация обслуживания шахт, исходя из их аварийности / А. Г. Мнухин, А. М. Брюханов, А. Р. Вовченко // Наук. вісн. НГАУ. – 2002. – № 1. – С. 83–86.
6. Зорин А. Н. Механика разрушения горного массива и использование его энергии при добыче полезных ископаемых / А. Н. Зорин, Ю. М. Халимендик, В. Г. Колесников. – М.: Недра, 2001. – 412 с.
7. Система стандартов безопасности труда. Термины и определения: ГОСТ 12.0.002–80 ССБТ (СТ СЭВ 1084–78). – Введ. 1982.
8. Юрнев А. П. Аварии под водой / А. П. Юрнев, Б. Д. Сахаров, А. В. Сытин. – Л.: Судостроение, 1981. – 144 с.
9. Береговой Г. Т. Безопасность космических полетов / Г. Т. Береговой, А. А. Тищенко, Г. П. Шибанов, В. И. Ярополов. – М.: Машиностроение, 1977. – 264 с.
10. Ширяев А. Н. Вероятность / А. Н. Ширяев. – М.: Наука, 1980. – 576 с.
11. Бешелев С. Д. Математико-статистические методы экспертных оценок / С. Д. Бешелев, Ф. Г. Гурвич. – М.: Статистика, 1980. – 263 с.
12. Мнухин А. Г. Защита электрических сетей шахт от коммутационных перенапряжений / А. Г. Мнухин, Б. И. Коневский. – М.: Недра, 1987. – 143 с.
13. Гринь К. А. Воспламенение горючих материалов при повреждении шахтных кабелей высокого напряжения / К. А. Гринь // Техника безопасности в угольной пром-сти. – М.: Госгортехиздат, 1963. – С. 200–201.
14. Мнухин А. Г. Оптимизация параметров угольных шахт для обеспечения безопасной работы / А. Г. Мнухин, А. М. Брюханов, В. В. Радченко // Уголь Украины. – 2004. – № 5. – С. 31–37.
15. Мнухин А. Г. Планирование эксперимента при исследованиях коммутационных перенапряжений в электрических сетях / А. Г. Мнухин, Б. И. Коневский // Электричество. – 1984. – № 11. – С. 17–18.
16. Методы анализа данных: пер. с франц. С. А. Айвазяна, В. Д. Конакова, С. Ю. Адамова; под ред. С. А. Айвазяна, В. М. Бухштабера. – М.: Финансы и статистика, 1985. – 357 с.
17. Стюарт И. Тайны катастроф / И. Стюарт. – М.: Мир, 1987. – 76 с.
18. Горский В. Г. Об оценке рисков в сфере технического регулирования / В. Г. Горский. – М., 2003. – 12 с.