

ДОНЕЦКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

КОВАЛЕВ Александр Петрович

ОСНОВЫ ТЕОРИИ И МЕТОДЫ ОЦЕНКИ
БЕЗОПАСНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ
В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ

Специальность 05.26.01 — «Охрана труда
и пожарная безопасность»

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

ЛНБ України ім.В.Стефаника



00825565 (V)

ДОНЕЦКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

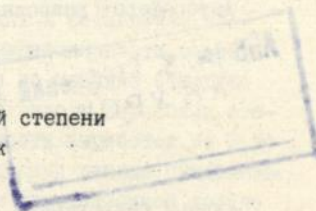
КОВАЛЕВ Александр Петрович

ОСНОВЫ ТЕОРИИ И МЕТОДЫ ОЦЕНКИ БЕЗОПАСНОСТИ
ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ

Специальность 05.26.01 - "Охрана труда и пожарная безопасность"

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук



Донецк - 1992

Работа выполнена в Донецком ордена Трудового Красного Знамени политехническом институте.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,
профессор

СЕРОВ В.И.

доктор технических наук,
старший научный сотрудник

ШАТИЛО А.Н.

доктор технических наук,
профессор

МАКАРОВ М.И.

Ведущая организация:

Научно-исследовательский институт горноспасательного дела
(НИИГД)

Защита состоится "11" декабря 1992 г.
в 12 час. _____ мин. на заседании специализированного совета
по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора техни-
ческих наук (Д 068.20.02) при Донецком политехническом институте
(340000, г.Донецк, ул.Артема, 58).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан "10" ноября 1992 г.



Ученый секретарь
специализированного совета
доктор технических наук,
профессор

В.И. ЧЕРНЯЕВ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Развитие техники и технологии связано с увеличением числа потенциально опасных производств в различных сферах народного хозяйства. При этом непрерывно растет и абсолютное число аварий и катастроф, что наиболее характерно для добывающей отрасли промышленности, в частности для предприятий по добыче угля. Так, по числу аварий, связанных с пожарами, источниками которых является электрический ток, во всем мире угольные шахты занимают одно из первых мест (например, в США такие аварии составляют 63 %, а в КАР - 33 %).

Как свидетельствует зарубежная статистика, за период с 1972 по 1984 гг. на угольных шахтах Великобритании произошло 910 несчастных случаев и опасных ситуаций, в 45 из которых погибли люди, кроме того, осталось много травмированных (328 человек). Причины несчастных случаев: поражение людей электрическим током, подземные пожары и взрывы. На угольных шахтах СССР за период с 1978 по 1988 гг. произошло 759 экзогенных пожаров и 125 взрывов, из них 222 пожара и 39 взрывов - от воздействия теплового источника электрического происхождения (данные НПО "Респиратор"). По данным МакНИИ, за период с 1980 по 1987 гг. было зафиксировано 135 случаев поражения людей электрическим током. Анализ повреждаемости подземных систем электроснабжения на угольных шахтах показал, что из-за случаев КЗ и однофазных замыканий на землю в высоковольтной сети добычные участки только на одной шахте простаивают до 46 ч в год, а из-за повреждений в низковольтных сетях и электроустановках до 675 ч. Неселективные отключения потребителей, питающихся от ЦПП и РПП, приводят к остановкам вентиляторов местного проветривания (ВМП) и загазованности выработок. По данным ВостНИИ, на шахтах Кузбасса по причине отключения электроэнергии и остановки ВМП загазованность выработок составляет 36,4 %. Из 1000 случаев загазованности выработок от I до IV случаев сопровождаются взрывами. Приведенные данные свидетельствуют о том, что одной из главных проблем при подземной добыче угля является создание и внедрение методов и средств, обеспечивающих безопасность и надежность технологических объектов на уровне, нормируемом отраслевыми документами. Применяемые в настоящее время организационные мероприятия, обеспечивающие безопасность и надежность технологического объекта при его эксплуатации, используются без научного обоснования. Поэтому возникает необхо-

димось в создании научных основ, способов и технических решений, применение которых обеспечит предотвращение в процессе эксплуатации рудничного электрооборудования таких случайных событий, как взрыв, пожар, поражение людей электрическим током и длительные перерывы в электроснабжении потребителей.

Связь темы диссертации с планами основных работ института. Диссертация является итогом многолетних поисковых и теоретических исследований, проведенных в Донецком политехническом институте и завершённых выполнением госбюджетных научных работ по заказу Минвуза УССР (номера госрегистрации ОI8500725I5 и ОI900063876). В исследованиях автор принимал непосредственное участие в качестве руководителя соответствующих теме диссертации разделов.

Цель работы. Разработать теоретические основы оценки и методы прогнозирования безопасности применения электрической энергии в угольных шахтах.

Идея работы заключается в уменьшении вероятности появления аварий при эксплуатации рудничного электрооборудования за счет выбора оптимальных сроков профилактики комплекса средств защиты, обеспечивающих нормируемый на участках угольных шахт уровень безопасности.

Методы исследования. Для достижения поставленной цели в работе использованы: аналитические и экспериментальные методы исследований, базирующиеся на основных положениях теории вероятностей и надежности. Аналитические исследования и математическое моделирование выполнялись с использованием ЭВМ.

- Основные научные положения, выносимые на защиту, и их новизна.
1. Математическая модель и зависимости, которые справедливы при любом соотношении средних значений времени нахождения средств защиты в безопасном и опасном состояниях, и которые позволяют прогнозировать вероятность появления аварий на угольных шахтах при эксплуатации рудничного электрооборудования.
 2. Математическая модель и зависимости вероятности появления взрывов на участках угольных шахт при эксплуатации электрооборудования, учитывающие частоту и длительность появления опасного источника, надежность средств защиты [взрывозащиты (ВВ), максимальной токовой (МТЗ), реле утечки (РУ), газовой (АГЗ) и АКВ], сроки их профилактики, частоту возникновения опасной среды и длительность ее существования.
 3. Математическая модель и зависимости вероятности появления экзотических пожаров при эксплуатации электрооборудования; учитывающие

частоту появления опасного источника, длительность его существования, надежность средств МТЗ, РУ, сроки их профилактики, частоту и длительность нахождения горючего материала вблизи поврежденного оборудования.

4. Математическая модель и зависимости вероятности порезания человека электрическим током при эксплуатации оборудования, учитывающие частоту и длительность появления опасного потенциала на корпусах рассматриваемого оборудования, надежность реле утечки и защитного заземления, сроки их профилактики, частоту и длительность прикосновения человека к корпусу электрооборудования без индивидуальных средств защиты.

5. Математическая модель оценки надежности и безопасности шахтных систем электроснабжения, учитывающая существующую структурную избыточность по отключающим коммутационным аппаратам, надежность систем автоматического повторного включения, ввода резерва и блокировочного реле утечки.

Изложенные научные положения определяют теоретические основы и принципы прогнозирования вероятности появления взрывов, пожаров, поражений людей электрическим током и длительных перерывов в электроснабжении участков угольных шахт.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается корректным применением основополагающих теоретических и экспериментальных методов исследования (теории однородных марковских процессов, теории полумарковских процессов, теории матриц, теории вероятностей, моделирования явлений на ЭВМ); соответствием объема данных наблюдений ГОСТ 22782.6-84; удовлетворительной сходимостью результатов оценки взрывобезопасности участков, пожаробезопасности систем электроснабжения и электробезопасности электрооборудования с данными отраслевой статистики (расхождение 15-20 %); гипотезами о функциях распределения исследуемых случайных величин, подтверждаемых с доверительной вероятностью не ниже 0,8 и предельной относительной ошибкой не выше 0,2; положительными результатами внедрения разработанных методик расчета и рекомендаций.

Научное значение работы состоит в разработке математических моделей для расчетов взрывобезопасности выработок угольных шахт, пожаробезопасности и электробезопасности рудничного электрооборудования, надежности подземных систем электроснабжения угольных шахт, в установлении аналитических зависимостей вероятности наступления аварий в течение года от частоты появления и длитель-

ности существования опасного источника, надежности средств защиты, сроков их профилактики и состояния окружающей технологической среды, что позволило разработать ряд теоретических положений, совокупность которых является новым достижением в развитии теории безопасности применения электрической энергии в угольных шахтах.

Практическое значение работы заключается в разработке методов расчета, позволяющих при эксплуатации технологического объекта прогнозировать вероятность взрывов на участке угольной шахты от источников электрического происхождения, вероятность экзогенных пожаров, вероятность длительных простоев добычных и проходческих участков и вероятность поражения людей электрическим током при эксплуатации рудничного электрооборудования, сравнивать полученные оценки вероятности аварий с существующими в отрасли нормами и, если окажется, что они не соответствуют принятым, то выбирать такой оптимальный срок профилактики средств защиты, чтобы вероятность взрывов, пожаров, длительных простоев участков и поражений людей электрическим током была бы на уровне действующих нормативных документов, что существенно повлияет на повышение безопасности работ в угольных шахтах.

Реализация выводов и рекомендаций работы. На четырех шахтах Донбасса внедрены "Рекомендации по оценке безопасного состояния электрооборудования и систем защитного отключения при эксплуатации в шахтах", позволившие сократить число опасных состояний электрооборудования на каждом участке в 3...4 раза. Результаты исследований использованы в документе "Методика. Обнаружение, учет и оценка опасностей на электрифицированном участке угольной шахты" (разработан МакНИИ, ДПИ и Энергомеханическим управлением Минуглепрома УССР в 1986 г.).

На основании предлагаемых автором теоретических представлений о процессе формирования пожаров, возникающих от источников электрического происхождения при эксплуатации электрооборудования, в 1989 г. НИО "Респиратор" и ДПИ разработали документ "Методика оценки пожаробезопасности шахтных кабельных сетей, электрооборудования и электрифицированных выработок на этапе проектирования, реконструкции и эксплуатации". Совместно с институтами КЖНИИгипрогаз, ДПИ и ПО "Льбургаздобича" в 1990 г. разработаны отраслевые методики: "Методика оценки и повышения пожарной безопасности системы электроснабжения газовых промыслов северных районов Тюменской области" и "Методика обнаружения, учета и оценки

вероятных опасностей в системах электроснабжения газовых промыслов северных районов Тюменской области". Фактический экономический эффект, полученный от внедрения рекомендаций по повышению пожаробезопасности сети ПО "Ямбурггаздобыча", составил 201 тыс. руб., что подтверждается соответствующим актом. Предложенные в работе научные результаты приняты институтами МакНИИ и НИИВЭ для использования в дальнейших научных разработках.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и получили одобрение на республиканском семинаре "Повышение эффективности систем электроснабжения на горных предприятиях" (г. Киев, 1973 г.), областной научно-технической конференции "Молодые ученые - научно-техническому прогрессу в угольной промышленности" (г. Донецк, 1976 г.), республиканском семинаре "Применение повышенных напряжений на шахтах Советского Союза и за рубежом" (г. Киев, 1976 г.), семинаре отдела теории вероятностей и математической статистики Донецкого отделения АН УССР (г. Донецк, 1982 г.), III всесоюзной научно-технической конференции "Электробезопасность на горных предприятиях черной металлургии СССР" (г. Днепропетровск, 1982 г.), республиканской научно-технической конференции "Пути повышения надежности и безопасности электрооборудования и электроснабжения угольных шахт" (г. Донецк, 1987 г.), республиканском семинаре АН УССР "Применение методов математического моделирования в научных исследованиях" (г. Донецк, 1988 г.), республиканской научно-технической конференции "Разработка и внедрение новых средств и способов, обеспечивающих улучшение охраны труда и техники безопасности на предприятиях области" (г. Свердловск, 1989 г.) и на расширенном заседании секции машиностроения технического обслуживания и ремонта электротехнического оборудования и связи совета Минуглепрома СССР (г. Донецк, 1990 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 50 научных работ, в том числе I авторское свидетельство на изобретение.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 6 разделов и заключения. Она содержит 302 страницы машинописного текста, включая 35 рис., 14 таблиц, список использованной литературы из 154 названий и приложения на 61 странице.

Автор выражает глубокую благодарность академику Международной академии, профессору, докт. техн. наук М. П. Зборщику за консультативную помощь, оказанную в период завершения диссертации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Проблеме безопасности применения электрической энергии в угольных шахтах уделяется особое внимание. Значительный вклад в разработку этой проблемы внесли: Ю.Г.Бацезев, В.А.Бунько, С.А.Волотковский, В.Н.Винославский, Л.В.Гладилин, В.И.Груба, В.Н.Дремов, В.С.Дзюбан, А.А.Каймаков, В.В.Калинин, П.Ф.Ковалев, В.П.Колосюк, В.П.Коптиков, А.Т.Ерыгин, В.С.Кравченко, Р.М.Лейбов, А.В.Ляхомский, М.И.Мажаров, Б.Г.Меньшов, Ю.П.Миновский, А.Г.Мнухин, Г.Г.Пивняк, Л.А.Плащанский, А.Е.Погорельский, А.В.Проховник, Г.И.Разгильдеев, Ю.Т.Разумный, А.И.Ревякин, В.И.Серов, В.Г.Соболев, Е.С.Траубе, Е.Ф.Цапенко, Н.А.Черников, А.Н.Шатило, Ф.П.Шкрабец, А.Н.Шиганович, В.И.Щуцкий, Б.М.Ягудаев и другие исследователи.

Впервые задача оценки эффективности мер и средств обеспечения безопасности применения рудничного электрооборудования в угольных шахтах была поставлена и решена на уровне случайных событий П.Ф.Ковалевым. Однако существующие методы и подходы в оценке уровней безопасности технологических объектов не обеспечивают в полной мере и с достаточной точностью решения задач по прогнозированию таких явлений, как взрыв, пожар и случаи поражения людей электрическим током. Это, в свою очередь, не дает возможности разрабатывать эффективные способы предотвращения аварий.

Первый раздел работы посвящен оценке уровней возникновения взрывов, пожаров и случаев поражения людей электрическим током при эксплуатации оборудования в угольных шахтах.

Анализ статистических данных ПО "Респиратор" о случаях взрывов и пожаров в угольных шахтах Минуглепрома СССР от источников электрического происхождения показал, что с 1978 по 1987 гг. произошло 39 взрывов метановоздушной смеси от теплового воздействия источников электрического происхождения: КЗ в гибких кабелях вызвали 22, в бронированных кабелях 6, в электрооборудовании II взрывов. В тупиковой выработке произошло 26, в лаве 2, в вентиляционной выработке 3, в откаточном штреке 3 и в других выработках (квершлаг, бремсберг, камера) 5 взрывов. В тупиковых выработках опасный источник появлялся в гибких кабелях 16, в бронированных 2 и в электрооборудовании 7 раз. По числу взрывов, учтенных за 10 лет наблюдений, и среднему количеству выработок, опасных в отношении взрыва, был определен уровень взрывобезопасности. Сравнение полученных данных с нормой согласно ГОСТ 12.1.010-76 пока-

зало, что уровень взрывобезопасности тупиковой выработки ниже нормируемого уровня в 462 раза, лавы в 77,5 раза, вентиляционной выработки в 116 раз, откаточного штрека в 91 раз и всех других выработок (квершлаг, бремсберг, печь, камера) в 41,7 раза. Средняя величина материального ущерба от одного взрыва на этот период составила 330,6 тыс.руб., максимальная - 5,3 млн руб. За этот же период произошло 222 пожара от источников электрического происхождения: КЗ в гибком кабеле вызвали 63; в бронированном 46; в электрооборудовании 42; в контактной сети электрооборудования электровозов, электровозных батареях, в электронагревательных приборах кустарного производства 71 пожар. По числу пожаров, учтенных за 10 лет наблюдений, и среднему количеству единиц различного электрооборудования и кабелей в отрасли был определен уровень пожарной безопасности. Полученный уровень пожарной безопасности одного километра гибкого кабеля ниже нормируемого ГОСТ 12.1.004-85 в 300 раз, бронированного в 184, одного электродвигателя в исполнении ПВ - в 4,29, коммутационного аппарата напряжением до 1000 В - в 6,47, свыше 1000 В в исполнении ПВ - в 2,29, трансформаторной подстанции - в 40 раз. Средняя величина материального ущерба от одного экзогенного пожара составила 93,9 тыс.руб., максимальная достигла 1,52 млн руб.

Используя статистические данные МакНИИ об электротравматизме в подземных выработках угольных шахт за период с 1980 по 1987 гг., а также данные о среднем количестве людей, работавших в шахтах в этот период, была определена интенсивность поражения людей электрическим током в течение года (степень риска) от каждой из девяти групп электрооборудования (см.таблицу). Предлагаемые нормы на группы электрооборудования приняты к использованию институтом МакНИИ. Таким образом, по данным отраслевой статистики, за 10 лет наблюдений определен уровень взрывобезопасности выработок угольных шахт и пожаробезопасности отдельных видов электрооборудования, применяемого в шахтах. Анализ статистических данных о поражении людей электрическим током в течение 8 лет на угольных шахтах отрасли позволил определить уровень электробезопасности и задать нормы на каждый вид оборудования, достижение которых в эксплуатации позволит значительно снизить число случаев поражений людей электрическим током.

Полученные в работе уровни взрывобезопасности выработок, пожаробезопасности элементов систем электроснабжения и электробезопасности оборудования подтверждают актуальность выбранной цели.

Распределение случаев поражения человека электрическим током в отрасли по группам (видам) электрооборудования и предлагаемые нормы электробезопасности

Номер группы оборудования	Вид электрооборудования	Всего поражений за восемь лет наблюдений N	Частота поражения электрическим током от единицы электрооборудования H, 1/год	Предлагаемый для нормирования уровень электробезопасности (степень риска на единицу оборудования)
				$\bar{N}, 1/\text{год}$
1.	Контактный провод	51	$3,66 \cdot 10^{-5}$	$1,57 \cdot 10^{-7}$
2.	Коммутационные аппараты напряжением до 1000 В	14	$1,67 \cdot 10^{-5}$	$7,2 \cdot 10^{-8}$
3.	Коммутационные аппараты напряжением выше 1000 В	13	$2,17 \cdot 10^{-5}$	$9,3 \cdot 10^{-8}$
4.	Бурильные машины, комбайны, конвейеры	8	$8,12 \cdot 10^{-6}$	$3,5 \cdot 10^{-8}$
5.	Сварочные аппараты	5	$4,46 \cdot 10^{-5}$	$1,92 \cdot 10^{-7}$
6.	Участковые сети до 1000 В	27	$3,92 \cdot 10^{-5}$	$1,69 \cdot 10^{-7}$
7.	Участковые сети выше 1000 В	8	$4,00 \cdot 10^{-5}$	$1,72 \cdot 10^{-7}$
8.	Прочие установки напряжением до 1000 В	8	$1,59 \cdot 10^{-5}$	$6,8 \cdot 10^{-8}$
9.	Прочие установки напряжением выше 1000 В	1	$9,62 \cdot 10^{-6}$	$4,1 \cdot 10^{-8}$
10.	Все виды	135	$2,49 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$

Во втором разделе разрабатывается математическая модель процесса формирования аварий при эксплуатации электрооборудования в угольных шахтах.

Система электроснабжения угольной шахты состоит из источников энергии, комплектных распределительных устройств, кабельных сетей и потребителей, оснащена всеми необходимыми видами защиты и защитного отключения. В неповрежденном состоянии такая система безопасна. При повреждении или ошибках обслуживающего персонала система может не только прекратить подавать питание потребителям, но и сама оказаться весьма опасной. Особенно опасной она становится при повреждении изоляции электрических цепей, в результате чего возникает ток утечки и КЗ. При этом появляются источники,

опасные в отношении взрыва (нарушение условий взрывобезопасности) или пожара (нарушение условий пожаробезопасности), или возникают электрические потенциалы на корпусах и оболочках электрооборудования, опасные в отношении поражения людей электротоком (нарушение условий электробезопасности). В определенной части меры и средства обеспечения безопасности при эксплуатации электрооборудования являются общими. Случайное явление, взятое как одно конкретное событие, предвидеть невозможно. Однако при массовых случайных событиях возникают четкие закономерности, которые можно использовать как для оценки существующего положения, так и для прогнозирования поведения изучаемого явления в новых условиях, что, в свою очередь, позволяет организовать деятельность людей в нужном и наиболее эффективном направлении. Количественная оценка эффективности действия всех средств обеспечения безопасности применения электрической энергии в шахте может быть дана по вероятности или интенсивности возникновения опасных явлений (взрыв, пожар, поражение людей электрическим током). Такие опасные явления будем называть авариями, а причины, способные вызвать эти аварии (искра, пламя или высокие потенциалы), опасными источниками. Поврежденное состояние электрооборудования, выносящее в окружающую его среду опасные источники, будем называть опасным состоянием электрооборудования, а загазованные выработки, соприкосновение горючего материала с электрооборудованием, находящимся под напряжением, и прикосновение к нему человека без индивидуальных средств защиты — опасным состоянием среды. Под опасным состоянием средств защиты будем понимать такое их состояние, когда при случайном повреждении на защищаемом элементе происходит их отказ в срабатывании. Под технологическим объектом будем понимать производство, на котором возможен случайный взрыв, пожар, поражение людей электрическим током.

В отраслевых нормативных документах регламентируется вероятность взрыва и пожара на технологических объектах. Производственные процессы должны разрабатываться так, чтобы в течение года вероятность возникновения взрыва на любом взрывоопасном участке и пожара в электротехническом и другом единичном изделии не превышала уровня 10^{-6} . Допустимый количественный уровень обеспечения электробезопасности в отраслевых нормативных документах не установлен. За нормируемый уровень электробезопасности примем 10^{-6} , т.е. вероятность поражения электрическим током одного человека из числа работающих в подземных выработках в течение года. Специа-

листы США и Японии принимают 10^{-6} как тот уровень, к которому следует стремиться на промышленных предприятиях. Используя существующие нормы на вероятность появления аварий, задачу по обеспечению безопасности технологического объекта можно сформулировать следующим образом: какую статистическую информацию с исследуемого технологического объекта нужно собрать в течение времени T , чтобы определить его уровень безопасности (взрывобезопасности, пожаробезопасности и электробезопасности), и, если он окажется больше нормируемого 10^{-6} , то какие организационные и технические мероприятия нужно использовать в эксплуатации объекта, чтобы вывести его на нормируемый уровень, т.е. полностью исключить аварии на данном предприятии. В теоретическом плане эту проблему можно сформулировать следующим образом: разработать научные основы процесса формирования аварий, таких как взрыв, пожар и поражение людей электрическим током при эксплуатации электрооборудования на участке угольной шахты, и получить новые зависимости вероятности взрывов, пожаров и случаев поражения людей электрическим током от состояния электрооборудования, окружающей его среды, надежности средств защит и сроков их профилактики. Имея такие зависимости и соотношения, можно определить, с помощью каких организационных и технических мероприятий возможно вывести "опасные" объекты на уровень действующих нормативных документов. Решение поставленной задачи и повсеместное внедрение разработанных методик и рекомендаций позволит сократить до минимума или устранить вовсе эти катастрофические явления. Взрыв, пожар и поражение людей электрическим током — разные явления, но в терминах теории вероятностей они возникают по одной логической схеме и имеют общие математические модели. Взрыв является результатом случайного появления открытого искрения в электрооборудовании и случайной загазованности выработки. Пожар возникает в результате размещения горячего материала вблизи случайного появления открытого пламени в результате КЗ. Поражение электрическим током происходит от прикосновения человека к корпусу электрооборудования без индивидуальных средств защиты, когда корпус находится под напряжением, или оголенному проводнику вскрытого аппарата. Не каждый источник представляется опасным и не каждое интенсивное выделение метана будет приводить к образованию взрывчатой концентрации газа в выработке. Например, при КЗ во вводной коробке коммутационного аппарата опасный источник будет воздействовать на среду в том случае, если взрывозащита вводной коробки этого аппарата будет нарушена. Опас-

ная среда, образующаяся, например, при выделении метана из отбитого угля при работе проходческого комбайна, не окажется под действием источника электрического происхождения, если аппаратура газовой защиты (АГЗ) будет подключена и находится в исправном состоянии (исправная газовая защита дает команду на отключение электрооборудования раньше чем накопление метана достигнет взрывчатой концентрации). Кроме этого, чтобы произошла опасная загазованность выработки, должен произойти отказ в системе проветривания (остановка вентилятора местного проветривания, повреждение воздухоподводящих трубопроводов и т.д.) и отказ аппаратуры защиты АКВ, реагирующей на уменьшение скорости подачи свежего воздуха в выработку. Таким образом, взрыв в тупиковой выработке участка может произойти только при случайном нахождении ряда элементов системы в опасном состоянии: КЗ во вводной коробке пускателя (длительность существования опасного источника определяется средним временем срабатывания защиты), взрывозащита вводной коробки этого пускателя нарушена (зазор выше нормы), среда находится в опасном состоянии, защиты, реагирующие на повышенную концентрацию метана и на уменьшение скорости подачи свежего воздуха в выработку, находятся в отказавшем состоянии. Отсутствие хотя бы одного из перечисленных опасных состояний элементов делает взрыв невозможным. Пожар в системе электроснабжения тупиковой выработки участка также может произойти в результате совмещений нескольких опасных состояний элементов: произошло КЗ в элементе защищаемой сети, МТЗ и реле утечки (РУ) находятся в отказавшем состоянии, вблизи места КЗ находится горючий материал. Поражение человека электрическим током происходит при совмещении следующих событий: произошло в электрооборудовании замыкание на землю (ОЗ), защитное заземление этого электрооборудования оборвано, РУ находится в отказавшем состоянии, а человек без средств индивидуальной защиты прикоснулся к корпусу этого электрооборудования. Примеры возникновения взрыва, пожара и случаев поражения людей электрическим током при эксплуатации электрооборудования на участке можно продолжить, показывая, что авария может происходить и при совпадении большего числа независимых событий. Поэтому возникает необходимость для любого аварийного совмещения, состоящего из любого количества независимых событий, вывести количественные характеристики на вероятностной основе, определить среднее время до первой аварии T_1 , стандарт σ_1 и функцию распределения этого времени $F_1(t)$.

Рассмотрим систему, состоящую из n элементов $X_1, X_2, \dots,$

X_k, \dots, X_n . Пусть состояния каждого элемента системы описываются случайными функциями $X_k(t)$, ($k=\overline{1, n}$). Случайный характер изменения функции $X_k(t)$ во времени состоит в следующем. Существуют чередующиеся случайные по длительности отрезки времени $\gamma_0^{(o)}; \gamma_0^{(1)}; \gamma_1^{(o)}; \gamma_1^{(1)}; \dots; \gamma_{i-1}^{(o)}; \gamma_{i-1}^{(1)}; \dots; \gamma_i^{(o)}; \gamma_i^{(1)}; \dots; \gamma_{n-1}^{(o)}; \gamma_{n-1}^{(1)}$, из которых последовательно $X_k(t)=0$ и $X_k(t)=1$. Промежутки $\gamma_i^{(o)}$ для элемента X_k безопасные, а $\gamma_i^{(1)}$ - опасные ($i=\overline{1, n}$). Аналогичной функцией $X_2(t)$ описывается поведение во времени и элемента X_2 , где через $\alpha_0^{(o)}, \alpha_1^{(o)}, \dots, \alpha_j^{(o)}, \dots, \alpha_m^{(o)}$ обозначаются случайные по длительности его безопасные состояния ($X_2(t)=0$), а через $\alpha_0^{(1)}, \alpha_1^{(1)}, \dots, \alpha_j^{(1)}, \dots, \alpha_m^{(1)}$ - опасные состояния ($X_2(t)=1$).

Функция $X_k(t)$ описывает поведение элемента X_k , где через $\delta_0^{(o)}, \delta_1^{(o)}, \dots, \delta_p^{(o)}, \dots, \delta_p^{(1)}, \dots, \delta_p^{(1)}$ обозначаются случайные по длительности отрезки времени, на которых $X_k(t)=0$, а через $\delta_0^{(1)}, \delta_1^{(1)}, \dots, \delta_p^{(1)}, \dots, \delta_p^{(1)}$ - случайные отрезки времени, на которых $X_k(t)=1$. Промежутки для элемента $\delta_\nu^{(o)}$ - безопасные, а $\delta_\nu^{(1)}$ - опасные ($\nu=\overline{1, p}$). Для элемента X_n вводим аналогичную функцию $X_n(t)$, где безопасные состояния характеризуются чередующимися отрезками $\beta_0^{(o)}, \beta_1^{(o)}, \dots, \beta_r^{(o)}, \dots, \beta_r^{(o)}$, а опасные - соответственно $\beta_0^{(1)}, \beta_1^{(1)}, \dots, \beta_r^{(1)}, \dots, \beta_r^{(1)}$. Промежутки $\beta_\nu^{(o)}$ для элемента X_n - безопасные, а $\beta_\nu^{(1)}$ - опасные.

Этому описанию аварии соответствует момент случайного совпадения во времени промежутков $\gamma_i^{(1)}, \alpha_j^{(1)}, \dots, \delta_\nu^{(1)}, \dots, \beta_r^{(1)}$. Время до первой аварии обозначим через $\tau_i^{(o)}$ (рис. I). Задача состоит в том, чтобы через статистические характеристики случайных функций $X_k(t)$ вычислить среднее время до первой аварии $\tau_i^{(o)}$, его стандарт σ_i и функцию распределения $F_i(t)$.

О статистической природе этих функций предположим: вероятность переходов из безопасного состояния в опасное за промежуток времени Δt равна $\lambda_k \Delta t + o(\Delta t)$, где $o(\Delta t)$ означает, что появление более одного опасного состояния в интервале $t + \Delta t$ является величиной высшего порядка по сравнению с Δt .

Вероятность перехода из опасного состояния в безопасное за время Δt примем равной $\mu_k \Delta t + o(\Delta t)$. Пусть эти вероятности не зависят от предшествующего течения процесса $X_k(t)$. Величины λ_k и μ_k являются параметрами рассматриваемого процесса. Параметр λ_k характеризует интенсивность или скорость, с которой безопасные промежутки времени сменяются на опасные, а μ_k - частоту или скорость смены опасных промежутков времени на безопасные.

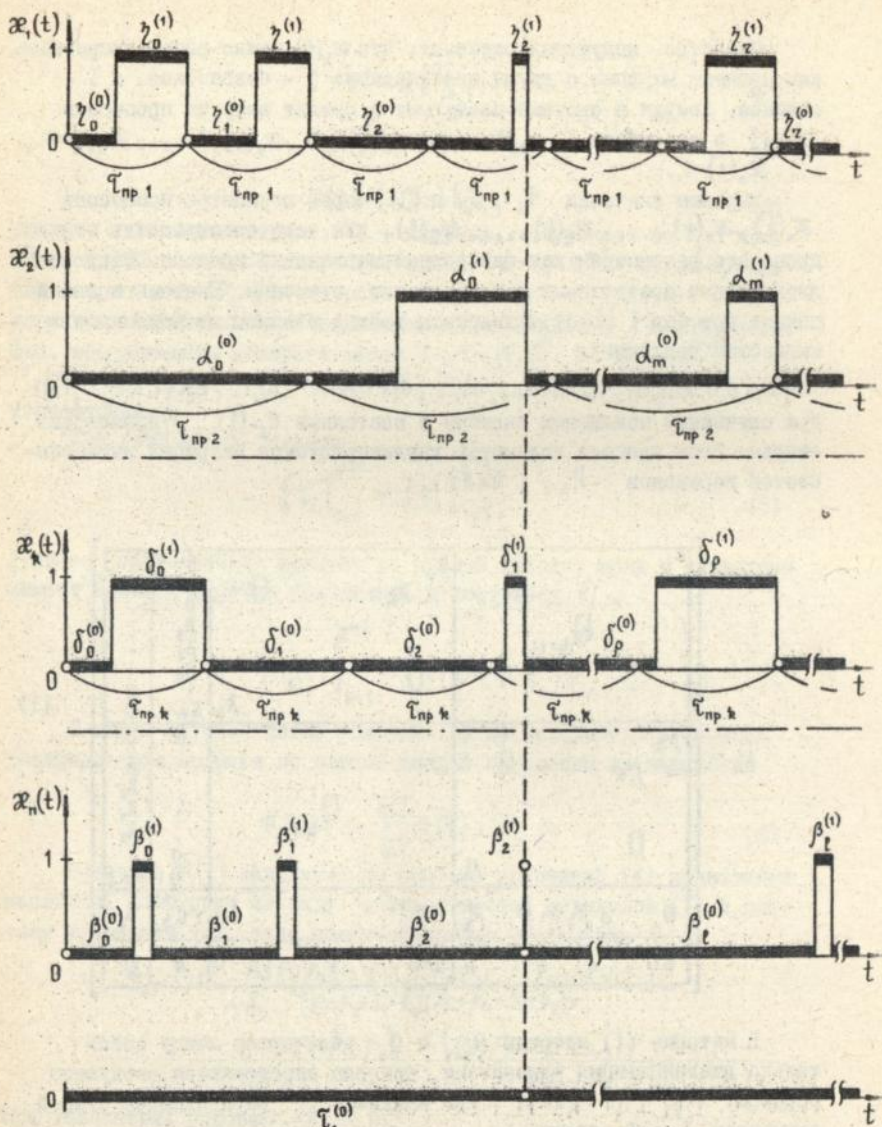


Рис. 1. Процесс формирования аварии при эксплуатации электрооборудования в угольных шахтах

Принятые допущения означают, что $x_k(t)$ можно рассматривать как процесс Маркова с двумя состояниями: 0 - безопасное, а 1 - опасное. Авария в системе наступает в момент встречи процессов $x_k(t)$ в состоянии 1, т.е., когда $x_1(t)=1, x_2(t)=1, \dots, x_k(t)=1, \dots, x_n(t)=1$.

Выразим значения τ_i, σ_i и $F_i(t)$ через параметры процессов $x_1(t), x_2(t), \dots, x_k(t), \dots, x_n(t)$, для чего совокупность этих процессов рассмотрим как однородный марковский процесс $x(t)$ с 2^n дискретными состояниями и непрерывным временем. Система в любой момент времени t может находиться только в одном из конечного множества состояний:

$\xi \{e_1(0,0,0,\dots,0), e_2(1,0,0,\dots,0), \dots, e_i(1,1,1,\dots,0), \dots, e_{2^n}(1,1,1,\dots,1)\}$.
 При случайном попадании системы в состояние $e_{2^n}(1,1,\dots,1)$ происходит авария. Этот процесс полностью характеризуется матрицей интенсивностей переходов $P_k, (k \geq 3)$.

$$P_k = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline & \begin{array}{c} \lambda_k \\ \lambda_k \\ \dots \\ \lambda_k \\ 0 \end{array} & \begin{array}{c} 0 \\ \dots \\ 0 \end{array} & \begin{array}{c} 0 \\ \dots \\ 0 \end{array} \\ \hline \begin{array}{c} Q_{k-1} \\ \dots \\ 0 \end{array} & \begin{array}{c} 0 \\ \dots \\ \lambda_k \end{array} & & \begin{array}{c} 0 \\ \dots \\ 0 \end{array} \\ \hline \begin{array}{c} \mu_k \\ \mu_k \\ \dots \\ 0 \end{array} & & \begin{array}{c} Q'_{k-1} \\ \dots \\ \mu_k \end{array} & \begin{array}{c} 0 \\ \dots \\ 0 \\ \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \dots \\ \lambda_{k-1} \end{array} \\ \hline \begin{array}{c} 0 \dots 0 \\ \mu_2 \mu_1 \mu_3 \dots \mu_k \end{array} & \begin{array}{c} 00 \dots \dots \dots 0 \end{array} & & \begin{array}{c} 1 - c_{2^{k-1}}^{(k)} \\ \lambda_k \end{array} \\ \hline \begin{array}{c} 00 \dots \dots \dots 0 \end{array} & \begin{array}{c} 00 \dots \dots \dots 0 \end{array} & & \begin{array}{c} 0 \\ 1 \end{array} \\ \hline \end{array} \quad (I)$$

В матрице (I) матрицы Q_{k-1} и Q'_{k-1} отличаются между собой только диагональными элементами, которые определяются следующим образом: $1 - c_i^{(k)}, (i = 1, 2^{k-1})$, где величины $c_i^{(k)}$ определяются суммой элементов i -той строки.

Среднее время до первой аварии τ_i , стандарт этого времени σ_i и функцию распределения $F_i(t)$, если в начальный момент времени система находилась в состоянии e_i , найдем из систем уравне-

ний

$$\tau = (\bar{I} - Q)^{-1} \xi; \quad (2)$$

$$\sigma = \sqrt{(2N - \bar{I})\tau - \tau_{sq}}; \quad (3)$$

$$\dot{p}(t) = p(t)B, \quad (4)$$

где \bar{I} - единичная матрица; Q - матрица, полученная из P_k с помощью исключения поглощающего состояния; $N = (\bar{I} - Q)^{-1}$ - фундаментальная матрица; $B = (P_k - \bar{I})$ - матрица, полученная в результате разности матриц интенсивностей переходов и единичной; ξ - вектор-столбец, все элементы которого равны 1; $\tau = [\tau_i]_{i=1}^{2^{n-1}}$, $\sigma = [\sigma_i]_{i=1}^{2^{n-1}}$, $\tau_{sq} = [\tau_i^2]_{i=1}^{2^{n-1}}$ - вектор-столбцы; $\dot{p}(t) = [p_j(t)]_{j=1}^{2^n}$, $p(t) = [p_j(t)]_{j=1}^{2^n}$ - векторы-строки.

При выполнении условия

$$[\tau_i]_{i=1}^{2^{n-1}} = [\sigma_i]_{i=1}^{2^{n-1}} \quad (5)$$

функция распределения времени до первой аварии, если в начальный момент времени система находилась в состоянии e_i ,

$$[F_i(t)]_{i=1}^{2^{n-1}} = \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \right]_{i=1}^{2^{n-1}}.$$

В общем случае, когда условие (5) не выполняется, функцию распределения времени до первой аварии определим из выражения

$$F_i(t) = 1 - \sum_{j=1}^{2^{n-1}} p_j(t). \quad (6)$$

Величины $p_j(t)$ находятся из системы уравнений (4) известными методами. Используя матрицу интенсивностей переходов (I) и систему уравнений (2), была получена нижняя оценка для τ_i ,

$$\hat{\tau}_i = \frac{\mu_1 \mu_2 \dots \mu_n (\mu_1 + \mu_2) (\mu_1 + \mu_3) \dots (\mu_1 + \mu_n) \dots (\mu_{n-1} + \mu_n) \times}{\lambda_1 \lambda_2 \dots (\mu_1 + \mu_2 + \lambda_1 + \lambda_2) (\mu_1 + \mu_3 + \lambda_1 + \lambda_3) \times} \\ \times (\mu_1 + \mu_2 + \mu_3) \dots (\mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_{n-1}) \\ \frac{1}{(\mu_1 + \mu_n + \lambda_1 + \lambda_n) (\mu_1 + \mu_2 + \mu_3 + \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) \dots (\mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_n + \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n)}$$

При выполнении условия $\lambda_k \ll \mu_k$

$$\tau_i = \hat{\tau}_i = \frac{\mu_1 \mu_2 \dots \mu_n}{\lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_n (\mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_n)} \quad (7)$$



Из равенства $\tau_i = \sigma_i$, следует, что функцию распределения времени до первой аварии можно определить следующим образом

$$F_i(t) = 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right). \quad (8)$$

Во всех остальных случаях τ_i , σ_i и $F_i(t)$ определяются с помощью решения системы линейных дифференциальных уравнений (4) и формулы (6). Таким образом, разработанная математическая модель явилась основой для создания методики расчетов взрывобезопасности выработок угольных шахт, пожарной безопасности узлов сети, электробезопасности оборудования и надежности систем электроснабжения.

Третий раздел посвящен применению разработанной математической модели, в оценке взрывобезопасности электрифицированных участков угольных шахт. Взрывобезопасным участком шахты будем называть выработку с практически одинаковыми условиями по газовыделению, проветриванию и проводимым работам, в которой случайно возможно образование взрывоопасной метановоздушной среды и независимо от этого возникновение источника воспламенения. В соответствии с этим определением выработки производственного участка по механической добыче угля (без производства взрывных работ) разделяются на четыре взрывоопасных участка ($j=1,4$): 1 - лава; 2 - тупиковая выработка; 3 - вентиляционная выработка; 4 - откаточная выработка. Размеры лавы и тупиковой выработки не устанавливаются, а вентиляционные и откаточные выработки ограничиваются местами расположения электрооборудования и кабелей, питающихся от участков подстанций или трансформаторов. Критерию взрывобезопасности должна удовлетворять каждая из указанных зон.

Все электрооборудование участка разделим на три группы ($i=1,3$): 1 - электрооборудование, нормально искрящее и неискрящее части которого заключены в отдельные взрывонепроницаемые оболочки или имеют любой другой вид взрывозащиты (автоматические выключатели, магнитные пускатели, переключатели машин и механизмов, сетевые и световые приборы и др.); 2 - электрооборудование, имеющее только нормально неискрящие части, заключенные во взрывонепроницаемые оболочки (электродвигатели с короткозамкнутым ротором, шинные коробки во взрывобезопасном исполнении и др.); 3 - электрооборудование, в котором нет нормально искрящих частей, а неискрящие части не имеют взрывозащиты (кабели, кабельная арматура в нормальном исполнении и др.).

Электроустановки могут применяться в лаге (очистная выработка), а также в тупиковой, вентиляционной (с исходящей струей воздуха) и откаточной (со свежей поступающей струей воздуха) выработках. Из множества опасностей, которые могут привести к взрыву на взрывоопасном участке при эксплуатации электрооборудования, предложено учитывать следующие ($k=1,14$): I - отключаемое КЗ; 2 - неотключаемое КЗ без последующего горения изоляции; 3 - неотключаемое КЗ с последующим горением изоляции; 4 - отключаемое ОЗ; 5 - неотключаемое ОЗ; 6 - ослабленный искрящий и опасно нагретый контакт силовой цепи в оболочке с нормально искрящими частями; 7 - коммутационное искрение, искрение или нагрев ослабленного контакта силовой цепи в оболочке с нормально искрящими частями; 8 - отказ взрывозащиты оболочки с неискрящими частями; 9 - отказ взрывозащиты оболочки с искрящими частями; 10 - отказ защитного заземления; 11 - оголение жил кабеля; 12 - появление взрывоопасной концентрации метана; 13 - отказ аппаратуры контроля воздуха; 14 - отказ приборов автоматического контроля метана.

Под минимальным взрывоопасным совмещением аварийных событий технической системы (в данном случае "электрооборудование - защита - окружающая взрывоопасная среда") будем понимать такой минимальный набор элементов, находящихся в опасном состоянии, восстановление безопасного состояния любого из которых выводит систему из взрывоопасного состояния. В одном таком взрывоопасном совмещении часть минимального набора элементов должна обязательно означать появление открытого источника воспламенения, один элемент должен указывать на возникновение взрывчатой метановоздушной среды, а один или два элемента (если они имеются) - на отказ защиты по воздуху и метану. Только случайное совмещение таких факторов, как возникновение источника воспламенения, образование взрывчатой метановоздушной среды и отказ защиты приводит к взрыву в выработке.

Каждую опасность, действующую в i -той выработке, обозначим через $X_{i,j,k}$, она характеризуется двумя величинами $d_{i,j,k} = d_c$ - среднее время между появлениями k -той опасности, происшедшей в j -той выработке, i -той ее группе и $d_{i,j,k} = d_c$ - среднее время действия k -той опасности, происшедшей в j -той выработке, i -той ее группе. Буквенные индексы i и j (рис.2), незамененные цифрами, указывают на то, что обозначенная опасность должна быть взята столько раз, сколько различных видов или типов электрооборудования установлено в этой выработке.

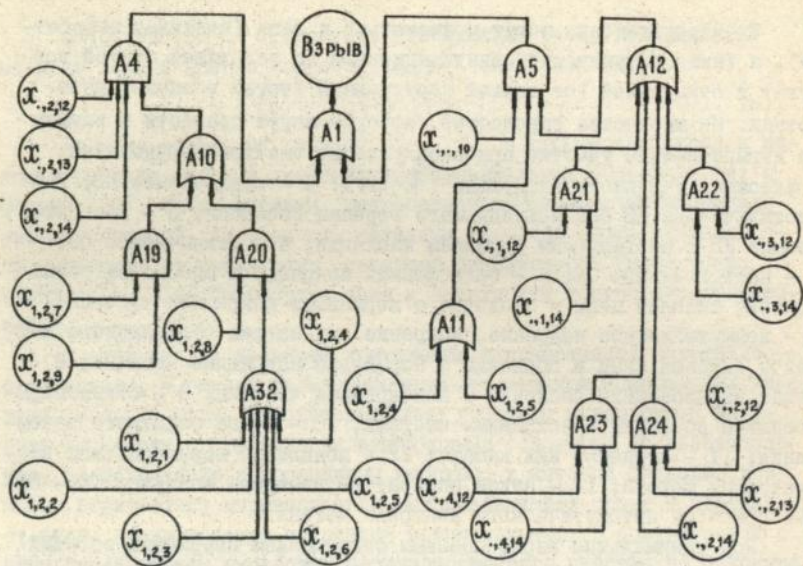


Рис. 2. Дерево формирования взрыва при эксплуатации коммутационных аппаратов в туиковой выработке

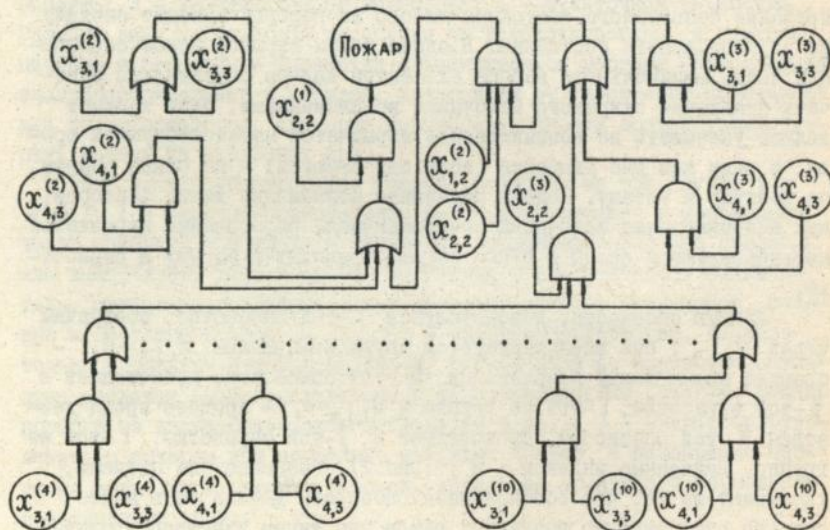


Рис. 3. Дерево формирования пожара при коротких замыканиях во вводных коробках коммутационных аппаратов

Разработанные допущения и положения с учетом разделения электрооборудования на три группы, выбор вида опасности и определение минимального взрывоопасного совмещения позволили построить "дерево" формирования взрывов для каждой из трех групп электрооборудования, используемого в выработках угольных шахт. Для первой группы электрооборудования, используемого в тушиковой выработке, "дерево" формирования взрыва приведено на рис.2.

Поскольку для оценки взрывобезопасности выработок среднее значение времени между появлениями опасного состояния элемента намного больше среднего значения времени нахождения его в опасном состоянии $\bar{d}_\ell \gg d_\ell$, то среднее число взрывов в единицу времени от m -того минимального взрывоопасного совмещения опасностей и для i -того вида электрооборудования, установленного в j -той зоне, определяется по формуле

$$H_o^{(i,j,m)} = \frac{1}{\bar{d}_\ell} = \left(\prod_{\ell=1}^{\gamma} \bar{d}_\ell^{-1} \right) \left(\sum_{\ell=1}^{\gamma} \frac{1}{d_\ell} \prod_{\ell=1}^{\gamma} d_\ell \right), \quad (9)$$

где $\bar{d}_\ell = \lambda_k^{-1}$, $d_\ell = \mu_k^{-1}$ - средние значения времени нахождения элемента в безопасном и опасном состояниях, соответственно ($k=1, n$); γ - число элементов, находящихся в опасном состоянии в m -ной группе.

Число взрывов в единицу времени от всех групп минимальных взрывоопасных совмещений i -того вида электрооборудования, установленного в j -той зоне.

$$H_o^{(i,j)} = n \sum_{m=1}^u H_o^{(i,j,m)}, \quad (10)$$

где n - количество электрооборудования i -того вида, установленного в j -той зоне; u - число групп минимальных взрывоопасных совмещений элементов i -того вида электрооборудования, установленного в j -той зоне.

Взрывобезопасность j -той зоны (всего электрооборудования, установленного в j -той зоне)

$$H_o^{(j)} = \sum_{i=1}^q H_o^{(i,j)}, \quad (11)$$

где q - количество видов электрооборудования, установленного в j -той зоне.

При выполнении условия $H_0^{(j)} \cdot t < 0,01$ вероятность взрыва в течение времени t

$$Q^{(j)}(t) \approx H_0^{(j)} \cdot t. \quad (12)$$

Используя "деревья" формирования взрыва, средние значения времени нахождения элементов в безопасном d_e и опасном d_o состояниях, формулы (9)...(12), представляется возможным получение новых зависимостей вероятности взрывов на участке угольных шахт при эксплуатации электрооборудования от частоты и длительности появления опасного источника надежности средств защиты (РВ, МТЗ, РУ, АТЗ, АКВ), сроков их профилактики, частоты появления опасной среды и длительности ее существования. Разработаны нормы на среднее значение времени между появлениями опасных состояний элементов, входящих в минимальное взрывоопасное совмещение. Достижение полученных норм при эксплуатации электрооборудования позволит обеспечить нормируемый уровень 10^{-6} .

Четвертая глава посвящена применению разработанной математической модели к оценке пожаробезопасности сети участка. Основную роль в обеспечении пожарной безопасности сети играет МТЗ. Отказ в срабатывании защиты происходит при совмещении двух событий: КЗ⁻¹ на защищаемом объекте; отказ в схеме защиты. Обозначим через $d_0 = \lambda_0^{-1}$ и $d_0 = \mu_0^{-1}$ - среднее значение времени между отказами схемы защиты и среднее значение времени нахождения схемы защиты в необнаруженном отказавшем состоянии, а через $d_1 = \lambda_1^{-1}$ и $d_1 = \mu_1^{-1}$ - среднее значение времени между появлениями КЗ на защищаемом элементе и длительность его существования. Вероятность безотказной работы защиты

$$L \{ R(t) \} = \frac{1 - \Psi_1(s)}{s},$$

где $\Psi_1(s)$ - преобразование Лапласа-Стилтьеса

$$\Psi_1(s) = \frac{2S\lambda_0\lambda_1 + \lambda_0\lambda_1(\lambda_0 + \mu_0 + \lambda_1 + \mu_1)}{s^3 + s^2(2\lambda_0 + \mu_0 + 2\lambda_1 + \mu_1) + s[\lambda_0(\lambda_0 + \mu_0) + (\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_0 + \mu_0 + \lambda_1)] + 2\lambda_0\lambda_1(\lambda_0 + \mu_0 + \lambda_1 + \mu_1)}$$

$$R(t) = \frac{G(s_1)}{\alpha'(s_1)} e^{s_1 t} + \frac{G(s_2)}{\alpha'(s_2)} e^{s_2 t} + \frac{G(s_3)}{\alpha'(s_3)} e^{s_3 t},$$

где

$$G(s) = s^2 + s(2\lambda_0 + \mu_0 + 2\lambda_1 + \mu_1) + \lambda_0(\lambda_0 + \mu_0) + (\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_0 + \mu_0 + \lambda_1);$$

$$\alpha(s) = s^3 + s^2(2\lambda_0 + \mu_0 + 2\lambda_1 + \mu_1) + s[\lambda_0(\lambda_0 + \mu_0) + (\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_0 + \mu_0 + \lambda_1) + \mu_0 + \lambda_1] + \lambda_0\lambda_1(\lambda_0 + \mu_0 + \lambda_1 + \mu_1);$$

S_1, S_2, S_3 - корни кубического уравнения $\chi(S)=0$.

Для случая, когда $d_1 \ll \bar{d}_1, d_0 \ll \bar{d}_0, d_1 \ll d_0$, среднее время до первого отказа МТЗ и его стандарт:

$$\bar{t}_1 = \frac{\bar{d}_0 \cdot \bar{d}_1 + d_0(\bar{d}_0 + \bar{d}_1)}{d_0};$$

$$\sigma = \sqrt{\bar{d}_1^2 + \bar{d}_0^2 + \frac{\bar{d}_0^2 \bar{d}_1^2}{d_0^2} + \frac{2\bar{d}_0 \bar{d}_1}{d_0}(\bar{d}_0 + \bar{d}_1)}.$$

Исследования показали, что \bar{t}_1 можно увеличить за счет введения резервных последовательно соединенных коммутационных аппаратов, установка защиты по току которых равна установке защиты основного защитного аппарата. Кроме того, периодичность контроля сокращает среднее время нахождения системы защиты в необнаруженном отказавшем состоянии и тем самым повышает пожарную безопасность защищаемого объекта.

Средний интервал времени между проверками системы защиты при условии обеспечения нормы по пожарной безопасности в защищаемом элементе

$$\bar{t}_{np} \approx 1,5 \cdot 10^{-5} \bar{d}_0 \sqrt{\bar{d}_1}.$$

В шахтных кабельных сетях комплекс защит МТЗ, РУ, БРУ осуществляет непрерывный контроль изоляции в течение всего периода ее эксплуатации и решающим образом влияет на пожарную безопасность узлов сети. Для разработки метода оценки пожарной безопасности элементов сети примем ряд положений и допущений.

Под пожароопасным узлом будем понимать группу электрооборудования либо отдельный элемент в системе электроснабжения, КЗ в которых может привести к пожару в выработке. Пожароопасные узлы будем различать между собой по степени продольного резервирования МТЗ. Если элемент узла при возникновении в нем двухфазного КЗ защищается только МТЗ пускателя, а установка МТЗ автоматического выключателя распределителя будет выше тока двухфазного КЗ поврежденного элемента, то такой элемент будем относить к узлам первого типа, а если при КЗ в элементе узла в действие приходят защиты двух коммутационных аппаратов, через которые прошел сквозной ток КЗ, то такие узлы отнесем к узлам второго типа и т.д. Любое КЗ в кабельной сети сопровождается либо замыканием фазы на заземляющий проводник или броню непосредственно, либо через электрическую дугу, поэтому при КЗ в кабеле действие МТЗ дублируется РУ. Если сквозной

ток будет больше коммутационной способности пускателя, то его МТЗ в обеспечении пожаробезопасности не участвует и в расчет не принимается. При дуговом КЗ с большим переходным сопротивлением в любых точках сети МТЗ на эти токи не реагирует, в этом случае в отключении токов КЗ участвует только РУ. Пожар в кабельной сети наступает всякий раз, когда осуществляются следующие события: КЗ в кабеле, а МТЗ основная и резервная и РУ находится в отказавшем состоянии. За время существования КЗ часть кабеля сгорает независимо от того, из каких материалов он изготовлен, выделяя ядовитые газы, способные отравить людей в выработке. Положение усугубляется, если в кабеле имеются горючие материалы, так как любой кабель горит и после прекращения КЗ. Пожар в выработке от электрооборудования наступает всякий раз, когда случайным образом происходит КЗ во вводных коробках или корпусах электрооборудования, а средства защиты находятся в отказавшем состоянии и на поверхности электрооборудования находится горючий материал.

Каждое опасное событие обозначим символом $x_{i,j}^{(e)}$, где l - порядковый номер электрооборудования (наносится на схему электропитания); i ($i=1,9$) относится к видам электрооборудования (1 - реле утечки; 2 - максимальная токовая защита; 3 - вводная коробка коммутационного аппарата; 4 - корпус коммутационного аппарата; 5 - вводная коробка электродвигателя; 6 - корпус электродвигателя; 7 - жилы кабеля; 8 - вводная коробка светильника; 9 - соединительная или тройниковая кабельная муфта); j ($j=1,7$) относится к видам опасности (1 - короткое замыкание; 2 - отказ защиты в срабатывании; 3 - горючие материалы на коммутационном аппарате; 4 - горючие материалы на электродвигателе; 5 - горючие материалы на корпусе светильника; 6 - горючие материалы на корпусе трансформатора; 7 - горючие материалы на корпусе соединительной или тройниковой кабельной муфты). Используя принятые допущения и положения, пожар в выработке от КЗ во вводной коробке коммутационного аппарата представлен в виде "дерева" (рис.3). За показатель безопасности элемента системы электроснабжения при эксплуатации примем $\bar{d}_{i,j}^{(e)} = \bar{d}_k$; $d_{i,j}^{(e)} = d_k$ - среднее значение времени между появлениями j -того вида опасности, происшедшей в l -том электрооборудовании (кабеле), и среднее значение времени существования j -того вида опасности, происшедшей в l -том электрооборудовании, i -том его элементе.

Под минимальным пожароопасным совмещением аварийных событий данного узла системы электроснабжения ("электрооборудование - за-

щита - окружающая пожароопасная среда") будем понимать такой минимальный набор его элементов, находящихся в опасном состоянии, восстановление безопасного состояния любого из которых выводит систему из пожароопасного состояния. Если $\bar{d}_k \leq 0,01 d_k$ и $d_n \ll d_k$, то интенсивность пожаров от одного минимального пожароопасного совмещения, состоящего из n независимых элементов,

$$H = \prod_{k=1}^{n-1} d_k \left(\prod_{k=1}^n \bar{d}_k \right)^{-1},$$

где \bar{d}_k и d_k - средние значения времени нахождения k -го элемента соответственно в безопасном и опасном состояниях ($k=1, n-1$); d_n - средний интервал времени между появлениями КЗ на защищаемом элементе.

Если задан интервал времени $\tau_{np k}$ между профилактиками для k -го элемента (средства защиты или наличие горючего материала на корпусах электрооборудования), то среднее время нахождения элемента в опасном состоянии

$$d_k = \tau_{np k} - \bar{d}_k [1 - \exp(-\frac{\tau_{np k}}{\bar{d}_k})].$$

В случае, если $\frac{\tau_{np k}}{\bar{d}_k} < 0,1$, то

$$d_k \approx \frac{\tau_{np k}^2}{2 \bar{d}_k}.$$

Для минимального пожароопасного совмещения, состоящего из $n \geq 2$ независимых событий, формула для определения оптимального интервала времени между проверками основной и резервной МТЗ, обеспечивающей вероятность пожаров в пожароопасном узле на уровне действующих нормативных документов, примет вид:

$$\tau_{np} = \sqrt[2n-2]{2^{n-1} H \bar{d}_n \prod_{k=1}^{n-1} \bar{d}_k^2},$$

где H - допустимая нормативными документами интенсивность пожаров для данного узла.

В тех случаях, когда $\tau_{np} \neq \tau_{np1} \neq \tau_{np2} \neq \dots \neq \tau_{npk} \neq \tau_{np i}$,

$$\tau_{np} = \sqrt[2m]{\frac{2^{n-1} H \bar{d}_n \prod_{k=1}^{n-1} \bar{d}_k^{-2}}{n-(m+1) \prod_{i=1}^m \tau_{np i}^2}}, \quad (I4)$$

где m - количество комплектов МТЗ (основная и резервная, обеспечивающая продольное резервирование), для которых определяется τ_{np} ; $\tau_{np i}$ - интервал времени между профилактическими осмотрами i -го элемента.

Эффективность разработанных рекомендаций по повышению пожарной безопасности элементов систем электроснабжения

$$E = \frac{y \left(1 - \frac{H_2}{H_1}\right)}{3};$$

$$3 > 0, H_2 < H_1,$$

где y - ущерб от пожаров на участке угольной шахты из-за КЗ в элементе сети; 3 - дополнительные затраты на профилактические проверки системы защиты; H_1 - интенсивность пожаров при заданном нормативными документами сроке профилактики средств МТЗ; H_2 - ожидаемая интенсивность пожаров при выбранном в соответствии с формулами (I3), (I4) сроке профилактики МТЗ.

Таким образом, с помощью разработанной методики можно оценивать пожарную безопасность узлов системы электроснабжения, выбирать такой интервал времени между проверками средств защиты, чтобы вероятность пожаров от токов КЗ в рассматриваемом узле была на уровне 10^{-6} .

Пятый раздел посвящен применению разработанной математической модели к оценке электробезопасности оборудования. Термин "электробезопасность" будем относить не только к технике, но и к среде, ее окружающей (оболучивающему персоналу и соприкасающимся с техникой другим лицам, обстановке, создающей неудобства в эксплуатации и обслуживании, условиям, способствующим повышенной повреждаемости электрооборудования и др.). Состояние техники (в данном случае электрооборудование и сеть) будет безопасным в те периоды ее работы, когда не возникает источник поражения, и опасным, когда такой источник возникает. То же относится к людям, когда безопасным со-

стоянием для человека является такое его поведение, когда он не касается ни оболочки, ни тем более токоведущих частей электрооборудования без индивидуальных средств защиты, а опасным - прикосновение к электрооборудованию, находящемуся под напряжением. Состояния элементов, так или иначе участвующих в обеспечении электробезопасности, также будем разделять на безопасные и опасные. При определении уровня электробезопасности будем принимать следующие положения и допущения: источник поражения электротоком появляется всякий раз, когда возникает однофазное замыкание на землю (ОЗ) или вскрывается оболочка аппарата под напряжением, или оголяются рабочие жилы в кабеле; поражение человека электрическим током за время действия защиты маловероятно и в учет не принимается; за отказ защитного заземления (опасное состояние) принимается такое его состояние, когда прерывается цепь как местного, так и общего заземления; металлические оболочки электрооборудования и кабелей между двумя точками ОЗ считаются опасными независимо от состояния сети заземления. В основу оценки электробезопасности может быть положено представление о поражении человека электрическим током как о случайном совмещении ряда опасных состояний техники и человека. Под минимальным электроопасным совмещением аварийных событий технической системы (в данном случае "электрооборудование - защита - человек") будем понимать такой минимальный набор находящихся в опасном состоянии элементов, восстановление безопасного состояния любого из которых выводит систему из электроопасного состояния.

Для выявления факторов, влияющих на вероятность поражения человека электрическим током, все электрооборудование, средства защиты и окружающую электрооборудование среду представим в виде трех групп: $X_{i,y}^{(e)}$ - вид электрооборудования; $Y_{j,y}^{(e)}$ - вид средств защиты; $Z_{m,y}^{(e)}$ - вид среды. Индекс $l (l = \overline{1,3})$ - номер элемента, в котором произошло замыкание на землю, относится ко всем группам элементов. Индекс $i (i = \overline{1,9})$ при группе элементов X означает номер группы электрооборудования (см. таблицу). Индекс $j (j = \overline{1,3})$ при группе элементов Y - это номер средств защиты: 1 - реле утечки; 2 - защитное заземление; 3 - индивидуальные средства защиты. Индекс $m (m = \overline{1,2})$ при группе элементов Z - номер вида среды: 1 - человек без индивидуальных средств защиты; 2 - человек с индивидуальными средствами защиты. Индекс y во всех трех группах элементов при X, Y, Z означает номер опасного фактора (опасности), действие которого переводит элемент из безопасного состояния в опасное

$\delta = 1,8$: 1 - замыкание на землю; 2 - оболочка вскрыта, токоведущие части под напряжением; 3 - оголение жилы кабеля; 4 - отказ заземления; 5 - отказ в срабатывании реле утечки; 6 - отказ индивидуальных средств защиты; 7 - прикосновение человека к металлической оболочке; 8 - прикосновение человека к токоведущим частям. Используя принятые обозначения, составим "дерево" формирования случаев поражения человека электрическим током для трех различных видов прикосновения: к металлическим оболочкам электрооборудования и кабелей, к токоведущим частям находящихся под напряжением коммутационных аппаратов и к оголенным жилам кабеля (рис.4). Схема минимальных электроопасных совмещений приведена на рис.5.

В первом случае источником поражения человека электрическим током являются опасные потенциалы на металлических оболочках электрооборудования и кабелей, ОЗ в одном месте или в двух различных местах; во втором случае - напряжение на токоведущих частях вскрытого аппарата и в третьем - напряжение на оголенных жилах кабеля.

Среднее время \bar{t} , до поражения человека электрическим током, стандарт σ , и функцию распределения интервалов времени между поражениями $F_1(t)$ для каждого минимального электроопасного совмещения определим, пользуясь системами уравнений (2), (3), (4). Например, для первого электроопасного совмещения (рис.5) матрица интенсивностей переходов примет вид

$t-c_1^{(4)}$	λ_1	λ_2	λ_3	0	0	0	λ_4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
μ_1	$t-c_2^{(4)}$	0	0	λ_3	0	λ_2	0	λ_4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
μ_2	0	$t-c_3^{(4)}$	0	0	λ_3	λ_1	0	0	λ_4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
μ_3	0	0	$t-c_4^{(4)}$	λ_1	λ_2	0	0	0	0	λ_4	0	0	0	0	0	0	0	0
0	μ_3	0	μ_4	$t-c_5^{(4)}$	0	0	0	0	0	0	λ_4	0	0	λ_2	0	0	0	0
0	0	μ_3	μ_2	0	$t-c_6^{(4)}$	0	0	0	0	0	0	λ_4	0	λ_1	0	0	0	0
0	μ_2	μ_1	0	0	0	$t-c_7^{(4)}$	0	0	0	0	0	0	0	λ_4	λ_3	0	0	0
μ_4	0	0	0	0	0	0	$t-c_8^{(4)}$	λ_1	λ_2	λ_3	0	0	0	0	0	0	0	0
0	μ_4	0	0	0	0	0	μ_1	$t-c_9^{(4)}$	0	0	λ_3	0	λ_2	0	0	0	0	0
0	0	μ_4	0	0	0	0	μ_2	0	$t-c_{10}^{(4)}$	0	0	λ_3	λ_1	0	0	0	0	0
0	0	0	μ_4	0	0	0	μ_3	0	0	$t-c_{11}^{(4)}$	λ_1	λ_2	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	μ_4	0	0	0	μ_3	0	μ_1	$t-c_{12}^{(4)}$	0	0	0	0	0	λ_2	0
0	0	0	0	0	μ_4	0	0	0	μ_3	μ_2	0	$t-c_{13}^{(4)}$	0	0	0	0	λ_1	0
0	0	0	0	0	0	μ_4	0	μ_2	μ_1	0	0	0	$t-c_{14}^{(4)}$	0	0	0	λ_3	0
0	0	0	0	0	μ_2	μ_1	μ_3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$t-c_{15}^{(4)}$	λ_4
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

(15)

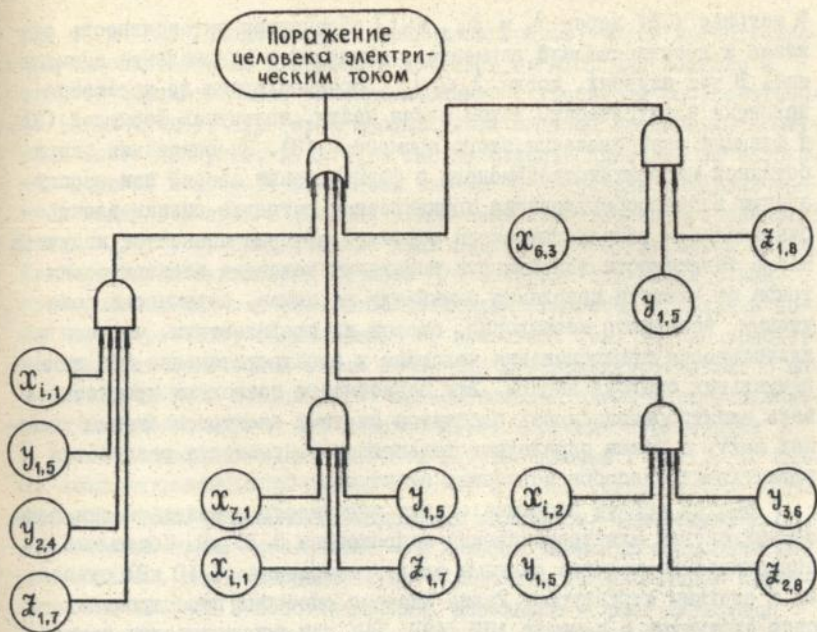


Рис. 4. Дерево формирования поражения человека электрическим током при эксплуатации электрооборудования ($z=1,9$)

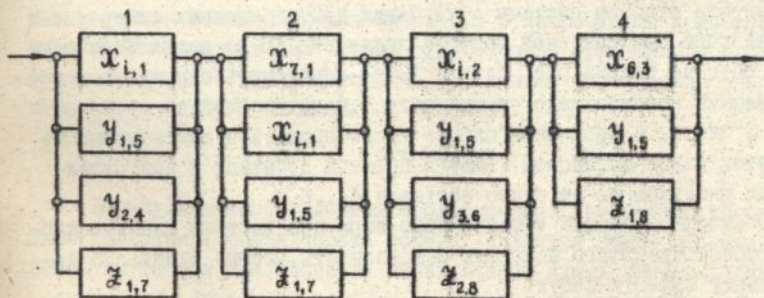


Рис. 5. Логическая схема минимальных электроопасных совмещений

В матрице (15) через λ_k и μ_k , $k=1,4$ обозначены интенсивность отказов и восстановлений элементов, входящих в минимальное совмещение. В тех случаях, когда $\lambda_k \ll \mu_k$, среднее время до поражения человека электрическим током можно найти, пользуясь формулой (7), а функцию распределения этого времени - (8). На основании разработанной математической модели о формировании аварий при эксплуатации электрооборудования предлагается методика оценки электробезопасности технологического объекта, которая позволяет получить новые зависимости вероятности поражения человека электрическим током от частоты появления замыкания на землю, надежности реле утечки, защитного заземления, сроков их профилактики, частоты и длительности прикосновения человека к электроустановке без индивидуальных средств защиты. Эти зависимости позволяют прогнозировать электробезопасность элементов системы электроснабжения угольных шахт, а также определять дальнейшее направление разработки эффективных способов повышения электробезопасности.

Шестой раздел посвящен оценке надежности и безопасности подземных систем электроснабжения напряжением 6-10 кВ. Подземные и поверхностные шахтные системы электроснабжения (6-10 кВ) относятся к сложным структурам. Такие системы способны перестраивать свою структуру с помощью АПВ, АВР, БРУ при возникновении повреждения отдельных ее элементов. В работе дана методика оценки надежности системы электроснабжения, которая позволила решить следующие задачи: определить, какой надежностью должны обладать вводные и фидерные КРУ, чтобы во всех случаях при КЗ на отходящих присоединениях поврежденный участок сети был надежно отключен, т.е. вероятность отказов системы отключения коммутационных аппаратов в течение года при заданной частоте появления КЗ на защищаемом элементе сети не должна быть больше 10^{-6} ; определить вероятность восстановления неселективно отключающихся потребителей за время не более 3 минут, в противном случае может произойти загазованность выработок из-за остановок (ВМП) и простои добычных и подготовительных участков из-за этого составят 4...6 ч.

О выборе наиболее эффективного варианта системы электроснабжения, обеспечивающего пожарную безопасность, можно судить по коэффициенту эффективности

$$K_3 = \frac{2(K_2 - K_1) \sqrt{2(K_2 - K_1)}}{\alpha_{np}^2 (K_2 - K_1)} \cdot \frac{\beta_1}{\beta_2},$$

где K_1 и K_2 — число коммутационных аппаратов, через которые прошел сквозной ток КЗ и привел в действие их МТЗ, для первого и второго варианта схемы электроснабжения потребителя соответственно ($K_2 - K_1 > 0$); $T_{пр}$ — срок профилактики системы отключения коммутационного аппарата; Z_1 и Z_2 — соответственно приведенные затраты для первого и второго вариантов схем, \bar{d} — средний интервал времени между отказами в системе отключения коммутационного аппарата. Если $K_3 < 1$, то предпочтение надо отдать первому варианту схемы. Для сравнения надежности сложной "мостиковой" структуры схемы электроснабжения с учетом восстановления элементов предложен новый метод расчета, отличающийся от известных тем, что не требует составления логической схемы замещения минимальных сечений. В качестве расчетной используется принципиальная схема электроснабжения. Каждый элемент в ней характеризуется своими параметрами λ_i и μ_i — интенсивностями отказов и восстановлений ($i = \overline{1, n}$). Схемы электроснабжения не всегда состоят из последовательного, параллельного, либо смешанного соединения элементов. Существуют и более сложные схемы "мостиковые" в которых элементы соединены таким образом, что непосредственно определить эквивалентные интенсивности отказов и восстановлений, используя только известные формулы для последовательного и параллельного соединения элементов, невозможно. Под системой электроснабжения со сложной схемой будем понимать такую систему, в состав которой входит хотя бы одна группа элементов, имеющая "мостиковую" схему. Для таких схем предлагается использовать новый способ преобразования "треугольник-звезда". Расчет надежности сложных схем систем электроснабжения с учетом восстановления элементов с применением преобразования "треугольник-звезда" менее трудоемок по сравнению с применяемыми в настоящее время методами, требующими составления специальных схем замещения минимальных сечений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых является новым достижением в развитии теории безопасности эксплуатации электрифицированных технологических объектов, а также в создании теоретических основ для оценки уровня взрывобезопасности электрифицированного участка угольной шахты, пожаробезопасности и надежности систем электроснабжения и электробезопасности рудничного электрооборудования и методов их обеспечения, что имеет важное социальное и народно-

хозяйственное значение.

Основные теоретические и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. Разработаны основы теории формирования аварий при эксплуатации рудничного электрооборудования в угольных шахтах и получены новые зависимости вероятности взрывов, пожаров и случаев поражения людей электрическим током от частоты и длительности появления опасного источника, состояния окружающей его среды, надежности средств защиты и сроков их профилактики. Полученные зависимости позволяют прогнозировать уровень безопасности на участке угольной шахты.

2. Установлено, что фактический уровень взрывобезопасности одной тупиковой выработки ниже нормируемого уровня в 462 раза, лавы в 77,5 раза, вентиляционной выработки в 116 раз, откаточного штрека в 91 раз и всех других выработок (квершлаг, бремсберг, печь, камера) в 41,7 раза.

3. На базе разработанных теоретических основ совместно с институтами МакНИИ, ДПИ и Энергомеханическим управлением Минуглепрома СССР разработана "Методика учета и оценки опасностей на электрифицированном участке угольной шахты". Этот документ позволил научно обосновать нормы средних интервалов времени между появлениями 14 видов опасностей, встречающихся на участках угольных шахт при эксплуатации электрооборудования. Обеспечение предлагаемых норм в эксплуатации рудничного электрооборудования позволит достичь нормируемый отраслевыми документами уровень.

4. Установлено, что фактический уровень пожарной безопасности системы электроснабжения участка угольной шахты ниже предусмотренного нормативными документами, например, для одного километра гибкого кабеля ниже в 300 раз, для бронированного в 184 раза, для одного электродвигателя в исполнении РВ в 4,29 раза, для одного коммутационного аппарата напряжением до 1000 В в 5,83 раза, свыше 1000 В в исполнении РВ в 20 раз, для одного трансформатора или подстанции в исполнении РВ в 40 раз.

5. Используя разработанные теоретические основы, совместно с НПО "Респиратор" и ДПИ создана "Методика оценки пожаробезопасности шахтных кабельных сетей, электрооборудования и электрифицированных выработок на этапе проектирования, реконструкции и эксплуатации". Институтами КжНИИгипрогаз, ДПИ и ПО "Ямбурггаздобыча" разработана "Методика оценки и повышения пожарной безопасности систем электроснабжения газовых промыслов северных районов Тименской об-

ласти". Методики позволяют оценивать уровень пожаробезопасности элементов системы электроснабжения и выбирать такой интервал времени между проверками средств защиты, чтобы вероятность пожаров в течение года от случайных КЗ была бы на уровне 10^{-6} . Экономический эффект от разработанных рекомендаций по повышению пожарной безопасности элементов системы электроснабжения ПО "Ямбурггаздобыча" составил 201 тыс. руб.

6. Установлено, что частота поражения человека электрическим током в угольных шахтах попадает в доверительный интервал $[2,16 \cdot 10^{-5}; 2,85 \cdot 10^{-5}]$ с доверительной вероятностью $P = 0,95$. Разработаны нормы (см. таблицу) электробезопасности на каждую из девяти групп оборудования, используемого в шахтах, обеспечение которых в эксплуатации позволит значительно повысить его электробезопасность.

7. Предложена математическая модель для оценки уровня электробезопасности, которая позволяет выбирать сроки профилактических проверок РУ и защитного заземления с целью обеспечения нормируемого (см. таблицу) уровня электробезопасности. Получены новые зависимости вероятности поражения человека электрическим током в течение времени t , которые позволяют прогнозировать уровень электробезопасности, а также определять дальнейшее направление разработки новых способов повышения электробезопасности.

8. Предложена математическая модель для оценки надежности МТЗ, отличающаяся от известных тем, что учитывает среднее значение времени нахождения схемы защиты в необнаруженном отказавшем состоянии и частоту профилактических проверок.

9. Предложена методика оценки надежности шахтных подземных систем электроснабжения с учетом надежности средств защиты и устройств АПВ, АВР, БРУ. Она позволяет точнее выявлять наиболее весомые факторы, влияющие на обеспечение надежности потребителя, и разрабатывать организационные и технические мероприятия, позволяющие поддерживать надежность электроснабжения на заданном уровне.

10. Предложен новый вариант преобразования соединения элементов в виде "треугольника" в эквивалентную по надежности "звезду" с учетом восстановления элементов. Новый вариант отличается от ранее предложенного автором тем, что позволяет учитывать надежность соединений между элементами. Это дает возможность приводить сложные мостиковые схемы замещения сети к простым, последовательно-параллельным. На основании предложенного преобразования разработана методика расчета надежности сложных по структуре схем.

Основные научные результаты работы изложены в следующих публикациях:

1. Дударев Л.Е., Ковалев А.П. Оценка убытков из-за неселективного действия защит шахтных подземных высоковольтных кабельных сетей и селективная быстродействующая защита// Уголь Украины.- 1972.- № 10.- С.33-35.

2. Ковалев П.Ф., Коптиков В.П., Ковалев А.П. О критериях оценки эффективности мер и средств обеспечения безопасности применения электрооборудования в шахтах// Безопасность труда в промышленности.- 1972.- № 8.- С.34-36.

3. Ковалев П.Ф., Коптиков В.П., Ковалев А.П. Надежность и безопасность применения электрооборудования в угольных шахтах// Безопасность труда в промышленности.- 1973.- № 7.- С.40-41.

4. Ковалев П.Ф., Коптиков В.П., Ковалев А.П. Нормирование надежности свойств рудничного электрооборудования// Безопасность труда в промышленности.- 1979.- № 12.- С.40.

5. Ковалев П.Ф., Коптиков В.П., Ковалев А.П. Критерий оценки безопасных свойств рудничного электрооборудования, кабелей и средств защиты в условиях эксплуатации// Безопасная эксплуатация электромеханического оборудования в шахтах: Сб. науч. тр. МакНИИ.- Макеевка, 1974.- С.45-48.

6. Ковалев П.Ф., Ковалев А.П. Некоторые вопросы применения электрической энергии в шахтах// Безопасность труда в промышленности.- 1980.- № 2.- С.47-48.

7. Методы оценки взрывобезопасности на участках угольных шахт/ П.Ф.Ковалев, В.В.Химич, А.П.Ковалев, Л.И.Сердюк// Уголь Украины.- 1981.- № 1.- С.27-29.

8. Разгильдеев Г.И., Ковалев А.П. Влияние характера формирования материального ущерба на автономность электроснабжения подземных потребителей// Уголь Украины.- 1981.- № 3.- С.15-16.

9. Разгильдеев Г.И., Ковалев А.П. О профилактике шахтных систем электроснабжения// Взрывозащищенное электрооборудование: Сб. науч. тр. ВНИИВЭ.- Донецк, 1980.- С.6-9.

10. Разгильдеев Г.И., Ковалев А.П., Сердюк Л.И. О надежности систем электроснабжения угольных шахт// Уголь Украины.- 1982.- № 1.- С.36-38.

11. Ковалев П.Ф., Ковалев А.П., Сердюк Л.И. Теоретические основы безопасности применения электрической энергии в угольных шахтах// Электробезопасность на открытых и подземных горных рабо-

тах.- Днепропетровск, 1982.- С.338-340.

12. Ковалев П.Ф., Ковалев А.П., Сердюк Л.И. Оценка эффективности средств обеспечения безопасности применения электроэнергии// Уголь.- 1982.- № 4.- С.10-11.

13. Ковалев А.П., Сердюк Л.И. Применение теории полумарковских процессов для оценки безопасности и надежности систем// Горная электромеханика и автоматика.: Респ.межвед. науч.-техн.об.- Киев.- 1984.- Вып.11.- С.11-12.

14. Ковалев П.Ф., Ковалев А.П., Сердюк Л.И. Методика оценки взрывобезопасности производственного процесса на участке угольной шахты// Безопасность труда в промышленности.- 1984.- № 11.- С.41-42.

15. Ковалев А.П., Востров В.Н., Сердюк Л.И. Методика расчета надежности систем электроснабжения угольных шахт// Уголь Украины.- 1984.- № 9.- С.30-31.

16. Ковалев А.П., Сердюк Л.И. Метод расчета надежности сложных схем систем электроснабжения// Электричество.- 1985.- № 10.- С.52-53.

17. О замыканиях на землю в кабельных сетях 6 кВ/ А.П.Ковалев, А.Е.Литвинов, В.И.Ярмоленко, О.Л.Фунтова// Промышленная энергетика.- 1985.- № 3.- С.22.

18. Ковалев А.П., Сердюк Л.И., Эдвин Диас. О расчете надежности сложных по структуре систем электроснабжения шахт// Горная электромеханика и автоматика: Респ.межвед. науч.-техн.об.- 1987.- Вып.51.- С.11-15.

19. Ковалев П.Ф., Ковалев А.П., Сердюк Л.И. Методика расчета взрывобезопасности электрифицированного участка угольной шахты// Промышленная энергетика.- 1989.- № 1.- С.25-32.

20. Оценка пожаробезопасности шахтных кабельных сетей и электроустановок/ А.С.Чумак, В.Т.Хорольский, Н.С.Зиновьев, А.П.Ковалев, А.В.Шевченко// Безопасность труда в промышленности.- 1990.- № 7.- С.32-33.

21. Ковалев А.П. О проблемах оценки безопасности электротехнических объектов// Электричество.- 1991.- № 8.- С.50-55.

22. Ковалев А.П. О проблемах обеспечения безопасности технологических объектов// Уголь Украины.- 1991.- № 7.- С.52-55.

23. Ковалев А.П., Шевченко А.В., Белоусенко И.В. Оценка пожарной безопасности передвижных трансформаторных подстанций 110/35/6 кВ// Промышленная энергетика.- 1991.- № 6.- С.28-31.

24. Ковалев А.П. О пожарной безопасности шахтных систем электроснабжения// Промышленная энергетика.- 1991.- № 9.- С.12-14.

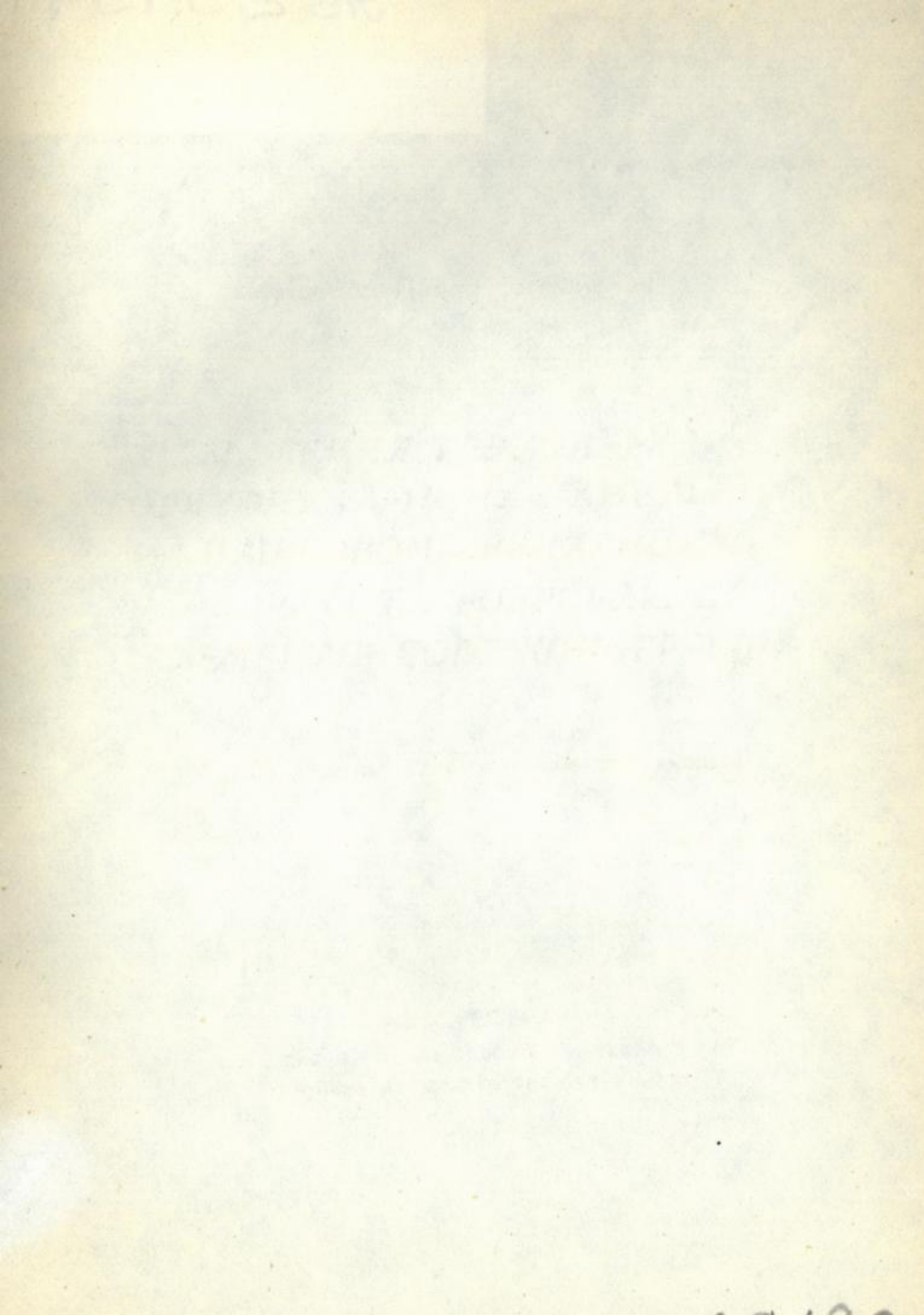
25. Ковалев А.П. Оценка степени риска поражения человека электрическим током при эксплуатации оборудования в подземных выработках угольных шахт// Промышленная энергетика.- 1992.- № 2.- С.42-45.

26. Ковалев А.П. Оценка пожаробезопасности шахтных кабельных сетей// Изв.вузов. Горный журнал.- 1992.- № 2.- С.116-121.

Подп. в печать 27.10.92. Формат 60×84^{1/16}. Бумага *линобумаж.* Офсетная печать.
Усл. печ. л. 2,09 . Усл. кр.-отт. 2,20 . Уч.-изд. л. 2,25 . Тираж 150 экз.
Заказ № 9-604. Бесплатно.

Донецкий политехнический институт, 340000, Донецк, ул. Артема, 58.

ДМПП, 340050, Донецк, ул. Артема, 96



AB 26.194

AB 26.194