

УДК 621.31; 621.316.9; 622.33.012.2

В.П. Коптиков, д-р техн. наук, О.И. Кашиба, д-р техн. наук, Л.А. Муфель, канд. техн. наук, О.А. Демченко, канд. техн. наук

БЕЗОПАСНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ШАХТАХ. ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ

На основании анализа опыта эксплуатации и техногенных аварий обоснованы основные аспекты, обеспечивающие безопасную эксплуатацию электрооборудования и электрических систем в шахтах.

Ключевые слова: электрическая энергия, короткое замыкание, шахта, техногенные аварии, безопасность.

V. Kopytkov, Doct. of Sc. (Eng.), O. Kashuba, Doct. of Sc. (Eng.), L. Mufel, Cand. of Sc. (Eng.), O. Demchenko, Cand. of Sc. (Eng.)

SAFETY OF APPLICATION OF ELECTRIC ENERGY IN THE MINES. SOME PROBLEMS AND SOLUTIONS

Some aspects to ensure safe exploitation of the electric equipment and electric system within the mines have been grounded based on the analyzing of exploitation experience as well as man-caused accidents.

Keywords: electric energy, short circuit, mine, man-caused accidents, safety.

Применение электрической энергии является одной из причин возникновения крупных техногенных происшествий в шахтах.

Жесткие шахтные условия и горно-технические факторы, а также психофизиологические свойства человека требуют, чтобы электрооборудование и кабели, электрические системы, применяемые в шахтах, имели такую конструкцию и электрическую часть, которые бы практически не требовали каких-либо предосторожностей во время эксплуатации. Они должны противостоять тяжелым природным условиям и любым неосторожным действиям человека, сохраняя при этом взрывопожаробезопасные свойства. Такой подход является определяющим и актуальным для решения проблемы безопасности применения электрической энергии в шахтах.

Накопленный опыт эксплуатации и анализ произошедших техногенных аварий позволяют обосновать основные аспекты, обеспечивающие безопасную эксплуатацию электрооборудования и электрических систем и позволяющие в полной мере перейти от техники безопасности к безопасной технике. Для этого необходимо чтобы:

силовая электрическая часть была безыскровой и, следовательно, не содержала искрящих блоков и узлов;

слаботочные электрические цепи выполнялись с искробезопасными параметрами уровня Ia;

распознавание режима короткого замыкания (к.з.) в кабельных сетях не требовало увеличения тока к.з., в том числе в самой удаленной точке сети;

прогноз сопротивления изоляции силовых цепей выполнялся непрерывно;

электрооборудование и электрические системы обеспечили устойчивую и продолжительную их работу;

трудовые нагрузки на обслуживающий персонал были снижены в процессе эксплуатации и профилактических работ;

меры технической безопасности содержали не менее двух независимых линий защиты;

информационно-диагностическая система содержала расширенный объем информации и достаточно глубокую диагностику;

человек не был функциональным звеном в процессе эксплуатации, обслуживания, наладки, контроля и проверки электрооборудования, ввода параметров защиты и других работ, что позволит исключить влияние человеческого фактора на безопасность применения электрической энергии в шахтах;

конструкция и монтаж электрической части электрооборудования и предусмотренные электрические защиты в системах электроснабжения не допускали условий для электропоражения обслуживающего персонала электрическим током, а также для возникновения техногенных угроз.

Приведенные аспекты соответствуют современному уровню развития техники и требуют расширенного рассмотрения.

Взрывонепроницаемая оболочка, как вид взрывозащиты от воспламенения метановоздушной смеси в выработках, не обеспечена средствами автоматического контроля и защитного отключения в случае отклонения параметров взрывозащиты от нормированных требований. Такие функции сейчас возлагаются на обслуживающий персонал, который периодически осматривает электрооборудование и одновременно выполняет ремонтные и профилактические работы, т.е. поддержание электрооборудования с заданными параметрами взрывозащиты полностью выполняет человек, который является и контролирующим и исполнительным звеном. В силу природных и психофизиологических характеристик он способен допускать ошибки, а иногда выполнять несанкционированные действия, что в отдельных случаях является причиной техногенных аварий.

Введение безыскровой электрической части является технической мерой по поддержанию взрывобезопасности электрооборудования, и она формирует вторую линию защиты от воспламенения и взрыва метана, образовавшегося в выработках шахт.

Безыскровая электрическая часть электрооборудования не допускает воспламенения метановоздушной смеси и базируется на следующих положениях:

- устранение условий для возникновения к.з. внутри отделений электро-оборудования путем выполнения специальных технических решений: жесткое крепление монтажных проводов, надежное крепление проводов в присоединительных зажимах; усиленная изоляция проводников; увеличение путей утечки и воздушных зазоров; предусмотрение защитной изоляции на нетоковедущих частях;

- снижение нагрева токоведущих частей до температуры не более 85°C за счет уменьшения токовой нагрузки в электрических цепях до 2/3 от номинального значения;

- выполнение узлов и блоков, токоведущих шин и проводов с защитами от пыли, влаги и других факторов окружающей среды;

- выполнение силовых электрических цепей с использованием неискрящих блоков и узлов как в нормальном, так и в аварийном режимах;

- выполнение электрических цепей с пониженной токовой нагрузкой искробезопасными уровнями Иа.

Для поддержания параметров взрывозащиты и работоспособности необходимо, чтобы электрооборудование предусматривало информационно-диагностическую систему с дисплеем, позволяющую автоматически определять возникающие отказы в электрической части электрооборудования и в кабельных линиях без вскрытия крышек взрывонепроницаемых отделений, перемонтажа электрической цепи и сложных переключений.

В электрических системах предусматривают встроенные средства для определения схемных и параметрических отказов. Поиск схемных отказов осуществляют в процессе рабочего функционирования электрооборудования и в режиме «Проверка». Параметрические отказы устанавливают по результатам следующих измеряемых величин: сопротивление

изоляции силовой цепи внутри изделия и в отходящем присоединении; напряжения на вводе и выводе изделия, а также на выходе источника питания собственных нужд (присущие коммутационным аппаратам); токопроводность (непрерывность цепи) межблочных линий связи; влажности внутри отделений и температуры нагрева контактных соединений наиболее нагруженных цепей.

Важно, что в системе диагностики предусмотрен блок с функцией «черного ящика», с помощью которого обеспечивается регистрация и хранение величин и параметров, характеризующих состояние электрической части и конструкции в реальном масштабе времени. Основные параметры регистрации: текущее значение рабочего тока; время срабатывания электрических защит; уставка тока и чувствительность защиты от к.з. (в коммутационных аппаратах); содержание метана внутри взрывонепроницаемых отделений; возникающие отказы; сопротивление изоляции силовой цепи; влажность внутри отделений и температура нагрева контактных соединений; открытая крышка взрывонепроницаемых отделений.

С учетом тенденции к централизации сведений в специальных пунктах, в электрической части формируют сигналы, характеризующие техническое состояние изделия, для передачи по специальному каналу (например, интерфейс Я8 485) данных в другие удаленные места (диспетчеру на поверхности и т.д.). Этот канал также может быть использован для контроля параметров безопасности электрооборудования уполномоченными лицами с поверхности шахты.

Чтобы противостоять жестким шахтным условиям, неправильным и ошибочным действиям человека конструкцию и схемно-технические решения выполняют с учетом того, что:

- электрические защиты в электросетях работают автоматически, без участия человека;
- электромеханические блокировки простые в конструкции и действуют автоматически без участия человека;

- электрооборудование имеет достаточную функциональную надежность и развитую диагностическую систему для автоматического определения возникающих отказов;

- конструкция взрывозащитных соединений электрооборудования устойчива к механическим воздействиям и факторам окружающей среды;

- в электрооборудовании применен специальный вид взрывозащиты на основе контроля содержания метановоздушной смеси внутри взрывонепроницаемых отделений с автоматическим отключением его при превышении нормируемого значения метана;

- контроль электрических параметров электрооборудования осуществляют также с поверхности шахты уполномоченными лицами.

Применение искробезопасных схем является гарантией обеспечения безопасности применения электрической энергии в шахтах. Сейчас, в связи с разработкой мощных (до 150 Вт) искробезопасных источников, можно обеспечить искробезопасные параметры электрических цепей уровня Ia с кабельной линией до 500 м, которые ранее традиционно были искроопасными.

Для безаварийного электроснабжения электроприемников предусматривают электрическую защиту, задачей которой является недопущение возникновения к.з. или его последствия свести к минимуму. Так сложилось, что сейчас во всех странах в электрических сетях как низковольтных, так и высоковольтных повсеместно применяют максимальную токовую защиту (МТЗ), работа которой основана на измерении тока к.з. Устойчивость работы такой защиты зависит от значения тока к.з., т.е. чем больше ток к.з. тем чувствительнее и надежнее защита реагирует на появление повреждения в электрической сети.

Для повышения чувствительности и зоны действия МТЗ в процессе эксплуатации необходимо увеличить ток к.з., что достигается применением передвижных трансформаторных подстанций повышенной мощности и силовых кабелей с большим сечением жил. В некоторых случаях, если это возможно, для этого сокращают длину защищаемой линии электроснабжения. Приведенные меры свидетельствуют о том, что

повышение надежности работы МТЗ обуславливает увеличение стоимости обустройства системы электроснабжения в шахтах.

Применение МТЗ противоречит обеспечению безопасности в шахтах, поскольку ток к.з. и его максимальное значение вызывает: дополнительный нагрев токопроводящих частей и термическое старение изоляции; разрушение конструктивных элементов и проводников электрических устройств в результате возникновения электродинамических процессов; открытое искрение, способное воспламенить метановоздушную смесь, что является причиной взрывов, пожаров и крупных аварий, вызывающих разрушение выработок и гибель людей в шахтах, а также потери добычи угля.

Для работы МТЗ с заданными параметрами необходимо привлечение человека для расчета тока к.з., расчета и ввода уставок, что отрицательно сказывается на объективности функционирования защиты. МТЗ не реагирует на замыкание с переходным сопротивлением и на дуговое замыкание ввиду резкого снижения тока к.з. в этих режимах. Данная защита чувствительна к току к.з. только во втором полупериоде его развития, когда достигается значение ударного тока, наиболее опасного с точки зрения возникновения техногенных аварий. Уставка и чувствительность защиты зависят от значения тока к.з., токовой нагрузки потребителей, длины и сечения жил кабельной сети, что ограничивает безопасные свойства МТЗ [1].

Потребовалась разработка требований к защите от к.з. нового поколения, которые выполняли бы:

- защитное отключение с момента развития к.з. и, по возможности, с упреждением аварийной ситуации;

- распознавание к.з. двумя и более величинами одновременно; распознавание режима к.з. с помощью величин, которые не увязаны со значением максимального тока к.з. в сети;

- защиту от к.з. на двух уровнях: отдельно при пуске электропривода и отдельно в установившемся режиме работы;

- анализ параметров сети с учетом недопущения ложных срабатываний защиты;

- защиту от к.з. в электрической сети с переходным сопротивлением в месте замыкания и при дуговом к.з.;

- формирование уставки защиты без учета токовой нагрузки подключенных потребителей, мощности трансформаторных подстанций, общего сопротивления кабельной линии, в том числе короткозамкнутого контура.

Новая защита от к.з. в соответствии с изложенными требованиями сейчас разработана и ее применение позволило обеспечить защиту от к.з. в электрических сетях любой протяженности и независимо от фактического значения тока к.з.

Сегодня в мировой практике традиционно технические разработки устройств защиты от к.з. в кабельных сетях ведутся с учетом измерения величин, характеризующих режим к.з. со стороны коммутационных аппаратов (источников питания электроприемников). При этом вариант контроля к.з. со стороны потребителя с измерением величин, характерных в конце кабельной линии, не рассматривался. Предусматривая устройства защиты с двух сторон относительно места к.з. в кабельной линии, можно существенно повысить надежность защиты за счет введения двух, дублирующих друг друга, линий защиты. Этот аспект безопасности сейчас в Украине проработан для систем электроснабжения напряжением 1140 и 6000 В.

С разработкой устройства защиты нового поколения стало возможным впервые изменить структуру системы электроснабжения и улучшить безопасные характеристики отдельных видов электрооборудования. Так, ввиду того, что ток к.з. не является определяющим для распознавания режима к.з., в шахтные электрические сети можно ввести устройство для ограничения тока к.з., а разработку шахтных передвижных трансформаторных подстанций (ПТП) осуществлять с использованием новой концепции.

Сейчас, согласно сложившейся традиции, в мировой практике разработка ПТП ведется с увеличением единичной выходной мощности до 3000 кВА. Последнее вызывает огромные

токи к.з. с опасными последствиями, о которых было сказано выше. По-нашему мнению, следует ограничить выходную единичную мощность ПТП до 1000 кВА. Увеличения суммарной мощности ПТП можно добиться, если предусматривать расщепления выходной мощности с помощью двух и более вторичных обмоток с требуемыми сочетаниями по мощности. Это направление сейчас в Украине начинает развиваться. При таком подходе можно существенно снизить токи к.з. особенно с применением устройства токоограничения.

Введение специальных решений, которые искусственно ограничивают ток к.з., позволяет повысить устойчивость и безаварийность работы трансформаторных подстанций, коммутационных аппаратов и системы электроснабжения в целом. Требуемого ограничения токов можно достичь правильным выбором схемы электрических соединений, отказом от параллельной работы силовых трансформаторов, применением передвижных трансформаторных подстанций с расщепленной вторичной обмоткой, эффективно также применение реакторов нового типа.

Особенность данного реактора заключается в том* что он постоянно включен в систему электроснабжения и поэтому не требует специальных коммутаций, управляющих сигналов и устройств для ввода его в работу. В течение первого полупериода, за время не более 5 мс, происходит ограничение тока до значения пускового. В этом полупериоде ток к.з. небольшой и начинает только увеличиваться, поэтому упреждается развитие ударного тока, свойственного режиму к.з. и, тем самым, отрицательное действие электродинамических нагрузок на электрические конструкции не происходит. Устройство автоматически восстанавливается в нормальное состояние после выполнения защитного ограничения тока. В реакторе потери напряжения в нормальном режиме не превышают 2 % от номинального значения, что достаточно для устойчивой работы системы электроснабжения [2].

Стесненные условия рабочего пространства обуславливают контактирование горнорабочих с электрооборудованием и кабелями электроснабжения. При обслуживании, ремонте и профилактическом осмотре, когда предусматривается доступ к электрическим цепям и отдельным блокам необходимо, чтобы они не были под напряжением. Однако не исключены условия включенного состояния электрического устройства. Поэтому электрооборудование выполняют с учетом требований недоступности к токоведущим частям.

Оболочка электрооборудования, выполняя взрывонепроницаемость и защиту электрооборудования от внешних механических воздействий, также обеспечивает защиту по всем направлениям от прямых контактов с токоведущими частями. Однако, как следует из анализа причин поражения людей электрическим током, оболочка совместно с предусмотренной блокировкой в отдельных случаях не может быть препятствием для доступа людей к токоведущим частям. Поэтому для обеспечения защиты от поражения электрическим током при случайном прикосновении человека к токоведущим частям, расположенным внутри оболочки, предусматривают защитное отключение, защитное изолирование, либо ограждение их специальными перегородками из изоляционного материала, защитную изоляцию нетоковедущих частей.

Защитное отключение в случае прикосновения человека к токоведущим частям также реализуется с помощью устройства защиты от утечки тока на землю. В этом случае происходит автоматическое отключение напряжения за время, достаточное для защиты человека от поражения электрическим током.

Защитное изолирование достигается путем наложения изоляции на все токоведущие части, включая присоединительные зажимы.

Повреждения электрической части, обусловленные замыканием фазы на корпус, указывают, что нетоковедущая в нормальном режиме оболочка электрооборудования может оказаться под напряжением и быть опасной с точки зрения поражения электрическим током. Устройства защиты от утечки тока на землю (корпус) и местное заземление являются теми техническими решениями, которые осуществляют защиту в указанном выше аварийном режиме.

Улучшения безопасных свойств электрооборудования можно достичь, если выполнять защитную изоляцию нетоковедущих частей. Защитная изоляция является средством защиты от поражения электрическим током при прикосновении к металлическим нетоковедущим частям, которые могут оказаться под напряжением. Принцип действия такой защиты основан на покрытии внутренней поверхности нетоковедущих корпусов изоляционными материалами. Данная техническая мера устраняет аварийные режимы, вызванные замыканием фазы на корпус. Предусматривая защитную изоляцию нетоковедущих частей с сопротивлением, равным основной изоляции токоведущих частей, можно местное заземление рассматривать как резервную линию защиты от поражения электрическим током.

Эффективность средств блокировки, как технической меры обеспечения взрывобезопасности электрооборудования и защиты от поражения электрическим током, может быть достигнута за счет упрощения конструкции электромеханической блокировки и выполнения ею функций назначения автоматически. Такая техническая задача сейчас решена с использованием специальных электронных «чипов» для контроля состояния сопряжения взрывозащитного соединения электрооборудования.

Особенность данного решения состоит в том, что при появлении зазора вызванного открыванием крышки, «чип» выдает сигнал на автоматическое отключение выключателя и, тем самым, происходит отключение напряжения с открываемого отделения. В таком решении человеку не надо осуществлять какие-либо действия для ввода блокировки в работу и, тем самым, исключается влияние человеческого фактора. Предложенная система блокирования является простой по конструкции, не требует применения сложного взаимосвязанного комплекса сборочных единиц и деталей, значительно снижает металлоемкость блокировки и обеспечивает эффективность ее применения.

Кабельная линия является потенциально уязвимым участком системы электроснабжения ввиду ее низкой механической прочности. В настоящее время в Украине разработан силовой гибкий экранированный кабель с параметрами взрывобезопасности и пожаробезопасности. Кабель является стойким к механическим повреждениям и межфазным коротким замыканием, что позволяет кардинально улучшить безопасные свойства системы электроснабжения.

Кабель содержит: расщепленные основные жилы, которые концентрически проложены по периметру кабеля; скрутку контрольных жил, заключенную в оболочку и размещенную по оси кабеля; упрочняющие стержни, которые размещены в углублениях между жилами с внутренней их стороны, которые совместно с оболочкой контрольных жил образуют составной профилированный сердечник; двухслойную защитную оболочку, упрочненную медно-стальной оплеткой. Данной конструкции кабеля присущи следующие достоинства в сравнении с известными решениями: практически 100%-ная механическая прочность при внутреннем и внешнем воздействии на кабель; геометрическая стабильность жил в структуре кабеля; повышенная гибкость; устойчивость к раздавливающим и ударным нагрузкам; снижение динамических нагрузок между основными жилами; равнопрочная конструкция защитной оболочки. Кабель устойчив к к.з. под оболочкой, выдерживает давление взрыва и, что существенно, изоляционный материал основных жил способствует гашению дуги, образовавшейся при к.з., за время, не превышающее 30 мс (для сравнения время отключения коммутационного аппарата составляет 80... 140 мс). Оболочка кабеля не распространяет горение и при длительном воздействии внешнего пламени образует спекшийся коксовый участок, противодействующий проникновению горения внутрь кабеля.

В кабеле предусмотрена опережающая защита при повреждении защитной оболочки. Контроль состояния оболочки выполнен путем построения искробезопасной схемы дистанционного отключения, в которой в качестве одного провода используется медно-стальная оплетка, второго – жила заземления. В случае повреждения оболочки происходит замыкание внешней цепи дистанционного отключения, что приводит к отключению коммутационного аппарата и отключению напряжения с кабеля до начала повреждения основных жил и, следовательно, опасное искрение не найдет развития.

Применение быстродействующего отключения в аварийных режимах приобретает важное значение с целью предупреждения развития техногенных угроз. Данное решение прорабатывается и ожидается, что можно добиться отключения в аварийных режимах за время, не превышающее десятки мкс с учетом времени распознавания возникшего к.з. Прорыв в этом направлении открывает реальные возможности в обеспечении безопасности применения электрической энергии в шахтах.

Содержащиеся в статье аспекты безопасности применения электрической энергии в шахтах позволили обосновать наиболее актуальные решения и проблемы, которые необходимо реализовать в XXI веке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брахалов А.М., Демченко О.А., Муфель Л.А., Кац А.Б., Дубинский А.А. Новая стратегия безопасности применения электроэнергий в шахтах – Уголь Украины № 9, 2012, с. 12-14.
2. Жуйков П.К. Определение токов короткого замыкания в целях электроснабжения – Материалы научной конференции, Днепропетровск, 2007, с. 203-206

