

УДК 621.31.027.5

**Ф.П. Шкрабец<sup>1</sup>**, д-р техн. наук, проф.,  
**Е.А. Вареник<sup>2</sup>**, канд. техн. наук,  
**В.Н. Савицкий<sup>2</sup>**, канд. техн. наук,  
**В.С. Дзюбан<sup>3</sup>**, д-р техн. наук, проф.

1 – Государственное высшее учебное заведение „Национальный горный университет“, г. Днепропетровск, Украина, e-mail: ShkrabetsF@nmu.org.ua

2 – Украинский научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт взрывозащищенного и рудничного электрооборудования с исследовательско-экспериментальным производством, г. Донецк, Украина, e-mail: ukmiive@ukmiive.com.ua

3 – ПрАО „Донецксталь“, г. Донецк, Украина

## НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ КОМПЛЕКСА ВЗРЫВОЗАЩИЩЕННОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ГОРНЫХ ПРОИЗВОДСТВ

**F.P. Shkrabets<sup>1</sup>**, Dr. Sci. (Tech.), Professor,  
**Ye.A. Varenik<sup>2</sup>**, Cand. Sci. (Tech.),  
**V.N. Savitsky<sup>2</sup>**, Cand. Sci. (Tech.),  
**V.S. Dziuban<sup>3</sup>**, Dr. Sci. (Tech.), Professor

1 – State Higher Educational Institution „National Mining University“, Dnepropetrovsk, Ukraine, e-mail: ShkrabetsF@nmu.org.ua

2 – Ukrainian Scientific Research Project-Designing and Technological Institute of Explosion-Proof and Mining Electrical Equipment with Experimental Production, Donetsk, Ukraine, e-mail: ukmiive@ukmiive.com.ua

3 – PrAT “Donetskstal”, Donetsk, Ukraine

## NEW GENERATION OF EXPLOSION-PROOF ELECTRICAL EQUIPMENT COMPLEX FOR MINING INDUSTRY POWER SUPPLY SYSTEMS

**Цель.** Представить результаты решения проблемы создания и освоения производства на предприятиях Украины нового поколения взрывозащищенного электрооборудования, обеспечивающего безопасное и бесперебойное электроснабжение потребителей горных производств.

**Методика.** Методика выполнения исследований включает: аналитические методы исследований; математическое моделирование на основе формализации изучаемых процессов и построения частных математических моделей; применение общей теории электрических цепей, а также натурные эксперименты с целью практической проверки результатов теоретических исследований и принятых технических решений.

**Результаты.** Впервые в мировой практике установлены физические явления, определены их качественные и количественные параметры, которые приводили к катастрофически быстрому разрушению аппаратов управления и защиты. Эти исследования определили пути дальнейшего усовершенствования взрывозащищенных и рудничных электрических аппаратов на напряжение выше 500В. Были созданы коммутационные аппараты с герметизированными и с вакуумными дугогасительными камерами, срок службы которых составил 5-6 и больше лет. Разработаны новые способы, методы и технические решения, позволившие впервые в мировой практике создать системы защиты от токов утечки для сетей напряжением 1140В. Это обеспечивает: эффективное снижение значений тока утечки за счет автоматической настройки компенсирующих дросселей; автоматическое отключение источника и закорачивание на землю фазы сети с поврежденной изоляцией при превышении током утечки допустимого значения. Разработаны новые принципы самоконтроля работоспособности средств защиты, дистанционного управления и каналов связи, которые практически исключают возможность эксплуатации поврежденных электрических сетей и оборудования, ошибочные срабатывания средств защиты.

**Научная новизна.** Теоретически обоснован и практически решен широкий круг задач безопасности персонала и обеспечения высокой надежности работы горного электрооборудования и систем подземного электроснабжения при высоких уровнях напряжения питания (660, 1140, 6000 В). Предлагаемые решения касаются как работы силового электрооборудования, так и функционирования систем управления и защиты.

**Практическая значимость.** Разработаны, освоены серийно и повсеместно применяются на шахтах различных горнодобывающих отраслей промышленности рудничные взрывозащищенные аппараты, имеющие следующие преимущества: широкая номенклатура исполнения, высокий уровень взрывозащиты; блочность конструкций; эффективные средства управления, защиты и искробезопасности. Новые технические решения по конструкциям и электрических схемах, высокие значения механической, электрической износостойкости и коммутационной способности, применение специальных дугоглагостойких материалов обеспечивают высокие показатели и ресурсы разработанной аппаратуры.

**Ключевые слова:** взрывозащищенное электрооборудование, аппараты управления и защиты, бесперебойное и безопасное электроснабжение

**Вступление.** Развитие угольной и горнорудной промышленности должно обеспечивать рост добычи угля, руд черных и цветных металлов, других полез-

ных ископаемых, что, в свою очередь, требует наращивания энерговооруженности работ, повышения уровня механизации и автоматизации технологических процессов в шахтах и рудниках. Все это приводит к быстрому росту мощностей добычных, проход-

ческих и транспортных машин, увеличению протяженности электрических сетей. В то же время, системы электроснабжения горных машин имеют специфические особенности: центры энергоснабжения и энергопотребления технологически не могут быть совмещены; основные горные машины – передвижные, поэтому подведение электроэнергии к ним может быть обеспечено гибкими кабелями, имеющими ограниченное поперечное сечение жил.

Таким образом, наращивать мощности горных машин, а значит и их производительность, при заданном уровне питающего напряжения, возможно только до определенной границы. Попытки дальнейшего увеличения мощности ведут к значительной потере напряжения в кабельных сетях и снижению его на зажимах электродвигателей, особенно в пусковых режимах, что, в свою очередь, приводит к недопустимому снижению момента на валу и, как следствие, к неустойчивой работе горных машин.

Остается лишь один путь – повышение номинального напряжения систем электроснабжения. Технико-экономический анализ и оценка возможностей решения проблем безопасности применения электроэнергии привели к выбору следующей ступени напряжения для угольных шахт, равной 1140 В. Впервые в мировой практике электрооборудование на 1140 В, оснащенное эффективными средствами защиты, было разработано во ВНИИВЭ (в настоящее время УкрНИИВЭ). Напряжение 1140 В начало широко внедряться в украинских шахтах. В результате мощность электроприводов очистных комбайнов увеличилась более чем в 4 раза и достигла 860 кВт.

Однако повышение номинального напряжения систем электроснабжения ведет к росту степени опасности эксплуатации оборудования. В подземных же условиях шахт и рудников проблемы безопасности применения электроэнергии вообще являются первоочередными.

Ограниченность и слабая освещенность рабочего пространства при эксплуатации, осмотрах и ремонтах оборудования, высокие значения влажности (до 98%) и температуры, наличие токопроводящей пыли, присутствие в рудничной атмосфере взрывоопасных газо- и пылевоздушных смесей, мобильный характер работ, частая механическая повреждаемость электрооборудования создают повышенную опасность электротравматизма, взрывов газа, пыли и пожаров. Это потребовало решения ряда серьезных научно-технических проблем, связанных с защитой людей от поражения электрическим током, подземных электроустановок и систем электроснабжения от аварийных режимов работы, а электрооборудования от передачи взрывов в окружающую атмосферу.

**Цель работы** – представить результаты решения проблемы создания и освоения производства на предприятиях Украины нового поколения взрывозащищенного электрооборудования, обеспечивающего безопасное и бесперебойное электроснабжение высокопроизводительной горнодобывающей техники для

повышения производительности труда и объемов добычи полезных ископаемых.

Для решения указанной проблемы необходимо было, прежде всего, решить целый ряд исследовательских, конструкторских, технологических, производственных и организационных *задач*, основные из которых следующие:

- исследование причин ускоренного разрушения изоляционных материалов и покрытий металлических деталей взрывозащищенных аппаратов управления при напряжении 660 В и выше, разработка методов и средств устранения указанных отрицательных явлений;

- разработка научных основ по созданию аппаратов и систем контроля и защиты от токов утечек, токов коротких замыканий и других аварийных режимов в целях обеспечения условий электро- и пожаробезопасности при эксплуатации рудничных электроустановок и распределительных сетей напряжением до 1200 В;

- исследование переходных и установившихся процессов при сложных видах несимметричных повреждений в распределительных электрических сетях напряжением 6 кВ и создание селективной защиты от однофазных замыканий на землю подземных сетей;

- создание комплекса взрывозащищенного электрооборудования нового поколения, обеспечивающего надежное, бесперебойное и безопасное электроснабжение горных машин и механизмов.

**Материал и результаты исследований.** В результате решения *первой задачи* было установлено, что попытки быстрого перевода подземных электроустановок на повышенное напряжение, кроме несовершенства систем защиты, были задержаны на несколько лет еще одним, ранее неизвестным фактором: катастрофически быстрым снижением сопротивления изоляции и выходом из строя взрывозащищенных и рудничных комплексных аппаратов управления и защиты, которые работают в интенсивных режимах коммутации силовых электрических сетей при напряжении 660 В и выше. Например, срок службы пускателей на 660 В составлял от нескольких недель до 3-х месяцев.

В результате исследований разработана модель расчета электронных молекулярных термов с учетом экранирования ядерных потенциалов электронными остовами связанных электронов. Особое внимание отводилось разработке методики расчетов уровней колебательно-возбужденных состояний молекул газа. Открыта новая закономерность развития высокоскоростных физико-химических реакций в рудничной атмосфере, обусловленная объемными и поверхностными процессами в неравновесной низкотемпературной плазме газового разряда, которые сопровождаются разрушением молекул и образованием новых соединений под влиянием электрического поля точечных зарядов как катализаторов химических процессов.

Указанные процессы, выявленные при выполнении данной работы, явились фактически открытием для специалистов, разрабатывающих взрывозащищенное электрооборудование, и определили главное направление в создании такого электрооборудования: разработку и применение коммутационных аппара-

тов, которые осуществляют гашение электрической дуги в герметизированных, а со временем и в вакуумных, камерах. По инициативе УкрНИИВЭ впервые в Украине было организовано производство контакторов с вакуумными дугогасительными камерами на токи 160, 250, 400 А и напряжение до 1200 В, на базе которых выпускаются все современные пускатели и станции управления, разработанные УкрНИИВЭ.

В результате решения *второй задачи* были разработаны научные основы, созданы новые принципы, методы и средства, на базе которых была решена проблема электробезопасности рудничных электроустановок напряжением до 1140 В.

Как известно для электрификации шахт и рудников в Украине и других странах СНГ применяются трехфазные электрические сети переменного тока промышленной частоты 50 Гц с изолированной нейтралью трансформатора. Опасность эксплуатации таких сетей определяется не только вероятностью прикосновения человека к элементам электрооборудования, которые находятся под напряжением, но и состоянием изоляции его относительно земли.

Раньше считалось, что достаточно предусмотреть защитное отключение электрической сети с поврежденной изоляцией, при снижении активного сопротивления утечки ниже заданного значения, и проблема электробезопасности будет решена. Эта концепция была положена в основу расчета необходимых защитных характеристик и проектирования аппаратов и систем защиты от токов утечки в подземных электрических сетях. При этом влиянием переходных процессов в этих сетях и их емкостей относительно земли пренебрегали.

На основе проведенных исследований процессов в подземных электрических сетях было доказано, что, при наличии устройств контроля изоляции, именно переходные процессы являются определяющими при выборе необходимых защитных характеристик и выполняемых функций аппаратами защиты с точки зрения обеспечения электробезопасности. Было показано, что в результате протекания переходных процессов в подземных электрических сетях, в связи с наличием значительной емкости их фаз относительно земли и высоким уровнем номинального напряжения, токи через тело человека могут в несколько раз превышать допустимое значение.

В связи с этим были изменены сама концепция и принципы построения аппаратов и систем защиты, а именно:

1. Одним лишь контролем изоляции и защитным отключением невозможно решить проблему электробезопасности людей, нужно обеспечить также снижения тока через тело человека или уменьшение продолжительности его протекания.

2. Уставки аппаратов защиты нужно выбирать исходя не из необходимости не превышения током утечки длительно допустимого его значения (так как это невозможно), а из необходимости быстрого отключения сети от источника питания при возникновении токов утечки, которые превышают длительно

допустимое значение, приняв при этом дополнительные меры по ограничению этого тока.

Эти принципы и необходимые параметры, определенные из результатов проведенных исследований, были положены в основу при разработке государственного стандарта и стандарта СЭВ, действующего в Украине и странах СНГ до сих пор.

Не менее сложной оказалась проблема обеспечения устойчивой работы указанных аппаратов. Ложные срабатывания и отключения подземных электрических сетей не только снижали технико-экономические показатели участков, но и заставляли делать повторные включения сетей без выяснения причин срабатывания средств защиты, или вообще блокировать эти средства, что стало причиной многих серьезных аварий.

Все это потребовало решения данных вопросов на базе тщательных, всесторонних исследований процессов в подземных электрических сетях и измерительных цепях аппаратов защиты при нестационарных процессах. Благодаря установленным закономерностям, созданы технические системы, которые обеспечивают надежную и эффективную защиту людей и подземных электроустановок, что сыграло основную роль в решении проблем электробезопасности шахтеров.

При этом впервые в мире разработаны и организовано серийное производство средств снижения токов утечки: устройств автоматической компенсации емкостных токов в аппаратах защиты от токов утечки; выявления и защитного заземления фаз сети с поврежденной изоляцией. Создание и повсеместное внедрение таких аппаратов с устройствами автоматической компенсации емкостных составляющих токов утечки, типа АЗАК, АЗПБ, АЗУР, обеспечило стабильную работу подземных электроустановок, что способствовало быстрому переводу их на напряжение 660В, а затем и на 1140 В.

В последние годы появилась новая серьезная проблема защиты распределительных сетей, содержащих силовые полупроводниковые элементы – преобразователи частоты, устройства плавного пуска и др. Очевидные преимущества регулируемых электроприводов на базе силовых полупроводниковых приборов (тиристоров и транзисторных модулей), которые нашли широчайшее применение в общепромышленных сетях, неоднократно пытались использовать для управления шахтными машинами и механизмами. В настоящее время на шахтах Украины и России проводится внедрение новых высокопроизводительных механизированных комплексов на базе комбайнов УКД-300, КДК-500 и КДК-700, питающихся напряжением 1140В, в состав которых входят взрывозащищенные полупроводниковые преобразователи частоты для привода подачи комбайнов.

Внедрение регулируемых приводов в угольном машиностроении сопровождается как технически сложными вопросами обеспечения взрывобезопасности и надежности силовых полупроводниковых приборов в сложных условиях угольных шахт, так и непростыми вопросами обеспечения электробезопасно-

сти их эксплуатации. Связано это с тем, что при введении силовых полупроводниковых приборов обычная распределительная сеть становится комбинированной, т.е. содержит дополнительно участок сети постоянного тока и участок сети с регулируемой частотой от 0 до 100 и более Гц. Каждый из этих участков вносит особенности эксплуатации и различные требования по обеспечению электробезопасности, причем, учитывая, что участки находятся в одной сети, необходимо комплексное решение проблемы защиты от аварийных режимов и защиты человека.

К основным причинам, препятствующим безопасной эксплуатации комбинированных электрических сетей, относятся следующие причины:

- существующие реле утечки, принцип действия которых основан на наложении постоянного измерительного тока на контролируемую сеть, могут быть заблокированы при возникновении утечек или плавном снижении сопротивления изоляции в звене постоянного тока силовых полупроводниковых установок;

- применение новых кабелей с шестью силовыми жилами стало причиной существенного увеличения емкости сети в целом и отдельных ответвлений в частности (ориентировочно в полтора раза), что привело к росту токов утечек, а, соответственно, и к повышению тяжести последствий возможных аварий;

- наличие в преобразователе частоты звена постоянного тока не позволяет выявить поврежденную фазу после преобразователя и произвести ее защитное шунтирование;

- управляемые полупроводниковые приборы в силовой сети являются источником помех; переходные процессы, сопровождающие ток утечки на землю, имеют сложный характер, их описание затруднено;

- после отключения электродвигателей возникает длительно действующая э.д.с. выбега, причем в двигателе подачи после преобразователя частоты э.д.с. выбега имеет форму и частоту, отличающуюся от основной частоты.

С участием авторов успешно была решена и эта сложная задача, в результате отечественной промышленностью освоено производство аппарата защиты типа АЗУР-4ПП.

*Третья задача.* Проблемы защиты от однофазных замыканий на землю распределительных сетей напряжением 6 кВ угольных шахт и рудников стояли не менее остро, чем защита от поражения людей электрическим током.

Однофазные замыкания на землю (ОЗЗ), которые, по данным исследований, составляют 70–90% общего количества аварий в шахтах и вызывают простои электрооборудования до 60–80% суммарного времени простоев, представляют собой большую опасность для сетей и окружающей среды, которая заключается в возможности пожаров и взрывов. Кроме того, как показывает опыт эксплуатации, наибольшая опасность однофазных замыканий заключается в том, что они являются причиной развития больших цепочечных (каскадных) аварий, которые охватывают всю распределительную сеть в целом и довольно часто происхо-

дят в сетях угольных шахт и рудников. Так, например, в распределительной сети шахты „Им. А. Стаханова“ ГП „Красноармейскуголь“ дуговое перемежающееся замыкание фазы на землю вызвало лавинообразную цепочечную аварию с пробоем изоляции в 10 местах, причем в нескольких местах имели место двойные замыкания на землю, что привело к срабатыванию максимальных токовых защит. В распределительной сети шахты „Петровская“ развитие аварии обусловило 17 пробоев изоляции сети в разных местах и т.д.

Из вышеизложенного нетрудно убедиться, что в такой ситуации самым действенным мероприятием по предупреждению развития цепочечных аварий является прерывание развития аварии на начальной стадии, т.е. устранение первого пробоя изоляции в сети. Это потребовало оснащения распределительных сетей защитой от замыканий на землю, способной селективно обнаруживать и отключать все виды однофазных замыканий и, в первую очередь, дуговые перемежающиеся замыкания.

Авторами проведены комплексные крупномасштабные теоретические и экспериментальные исследования переходных процессов в распределительных сетях напряжением 6 кВ при однофазных замыканиях на землю, а также при других возможных аварийных режимах работы сети. Проведены многочисленные экспериментальные исследования дуговых процессов, в том числе в условиях реальных сетей угольных шахт. Развита теория переходных процессов при несимметричных повреждениях в длинных распределительных сетях. Выполнен системный анализ совокупности протекающих процессов в сетях при наличии возможных помех, разработан метод структурного синтеза, который максимизирует отношение сигнал/помеха. Все это послужило базой для разработки надежного устройства селективной защиты от однофазных замыканий на землю типа БНЗ.

Сейчас это устройство встраивается в комплектные распределительные устройства типа КРУВ-6, КРУРН-6, УК-6 и повсеместно применяется в распределительных сетях угольных шахт, рудников Украины и стран СНГ, а многолетний опыт эксплуатации подтвердил правильность принятых теоретических положений.

Создание и организация производства комплекса взрывозащищенных аппаратов с искробезопасными системами управления и защиты – *четвертая задача* решения указанной в начале комплексной проблемы.

Постоянное повышение требований к взрывозащищенным аппаратам в части их свойств привело к созданию довольно сложных конструкций, которые обеспечивали необходимый уровень безопасности их эксплуатации, однако не могли быть освоены в серийном производстве в необходимых количествах. Нужна была разработка новых принципов конструирования таких аппаратов с целью кардинального снижения трудоемкости их изготовления, затрат материалов и массогабаритных показателей.

Все взрывозащищенные аппараты как в Украине, так и за рубежом строились по одной конструктивной схеме. Оболочка аппарата имела четыре автономных взрывобезопасных отделения: отделение ввода кабе-

лей питания электроприводов; отделение блокировочного разъединителя; аппаратное отделение, где монтировался необходимый для выполнения заданных функций набор аппаратуры; отделение вывода кабеля, который связывает аппарат с электроприемником. Элементы в разных отделениях соединялись между собой с помощью проходных токопроводящих зажимов, смонтированных на перегородках.

В результате взрывозащищенная оболочка оказывалась очень громоздкой, а доступ к монтажу узлов аппарата был затруднен, что мешало сокращению технологического цикла его изготовления. Встала задача разработки новой элементной базы и создания на ее основе комплекса рудничного взрывозащищенного электрооборудования, которое не только отвечало бы современным требованиям безопасности применения электроэнергии в шахтах и рудниках, но и, по своим техническим характеристикам, превышало бы уровень лучших зарубежных аналогов.

Эти проблемы были решены созданием конструкций с делением по функциональному принципу и составу модулей и блоков, объединенных в единую конструкцию с помощью быстроразъемных электрических и механических соединений. Были разработаны принципиально новые взрывозащищенные блокировочные разъединители, которые соединили в себе проходные токопроводящие зажимы из отделения ввода и исключили взрывозащищенное отделение последнего, что существенно упростило конструкцию аппаратов. Появилась возможность изготовления блоков и модулей на ряде технологических линий, которые значительно (в 3–4 раза) сократили цикл изготовления, а также позволили совершенствовать весь комплектный аппарат путем изменения отдельных его блоков, т.е. без серьезных затрат на технологическую подготовку модификаций аппаратов. Создание комплексных аппаратов управления и защиты на 1140 / 660В дало возможность приступить к широкому внедрению высокопроизводительной горной техники.

На основе научной базы, выполненных исследований и испытаний, создан ряд новых серий взрывозащищенного и рудничного электрооборудования:

- комплектные распределительные устройства с аппаратами защиты, управления и системной автоматики на напряжение 6 кВ (КРУВ-6А, КРУВ-6Б, КРУВ-6В, УК-6, КРУРН-6) с тремя видами исполнения: вводные, секционные и фидерные;

- взрывозащищенные трансформаторные подстанции серий ТСВП и КТПВ со вторичным напряжением 660 и 1140 В на мощности до 1600 кВА с соответствующими средствами защиты;

- пускатели серии ПВ1 и ПВР-Р (на токи 25, 63, 125, 250, 320 и 400 А), автоматические выключатели серии АВ (на токи 250 и 400 А), электромагнитные и вакуумные контакторы, реверсоры, разъединители (на токи до 400 А) на напряжение до 1140В;

- комплектные аппараты управления и защиты технологическими комплексами (СУВ-350АВ,

КУУВК-500), станции управления двухскоростными электродвигателями конвейеров (КСД-27);

- средства защиты от токов утечек и максимального тока в подземных сетях напряжением 660 и 1140В (АЗАК, АЗПБ, АЗУР-1, АЗУР-2, АЗУР-3, АЗУР-4; УМС, ПМЗ, БКЗ; БУ, БДУ, БДУ-4).



*Рис. Комплекты взрывозащищенного электрооборудования на международной выставке*

### **Основные научные результаты работы.**

1. Впервые в мировой практике проведены теоретические и экспериментальные исследования переходных процессов в подземных электрических сетях и аппаратах защиты, связанные с нарушениями изоляции и коммутационными операциями. Результаты составили научную основу для анализа, синтеза средств и систем защиты подземных электрических сетей и электрооборудования. Эти исследования привели к кардинальному пересмотру требований к техническим характеристикам, выполняемым функциям, методам обеспечения эффективной и надежной работы средств защиты людей при их прямом контакте с токоведущими частями при наличии высоких уровней напряжения (660 и 1140 В).

2. Разработаны новые способы, методы и технические решения, позволившие впервые в мировой практике создать системы защиты от токов утечки для сетей напряжением 1140В. Это обеспечивает: эффективное снижение значений тока утечки за счет автоматической настройки компенсирующих дросселей; автоматическое отключение источника и закорачивание на землю фазы сети с поврежденной изоляцией при превышении током утечки допустимого значения. Следует отметить, что созданный уровень безопасности превышает мировой уровень.

3. Разработаны новые принципы самоконтроля работоспособности средств защиты, дистанционного управления и каналов связи, которые практически исключают возможность эксплуатации поврежденных электрических сетей и оборудования, ошибочные срабатывания средств защиты.

4. Впервые в мировой практике установлены физические явления, определены их качественные и количественные параметры, которые приводили к катастрофически быстрому разрушению аппаратов управления и защиты. Эти исследования определили пути дальнейшего усовершенствования взрывозащищенных и рудничных электрических аппаратов на напряжение выше 500В. Были созданы коммутационные аппараты с герметизированными и с вакуумными дугогасительными камерами, срок службы которых составил 5–6 и больше лет.

5. Развита теория переходных и установившихся процессов при сложных видах несимметричных повреждений в электрических сетях с разными режимами работы нейтрали. Разработаны математические модели, которые позволяют оценить влияние параметров изоляции, режима заземления нейтрали и переходного сопротивления в точке замыкания на значение аварийного тока, тока и напряжения нулевой последовательности при однофазных и двойных замыканиях на землю. Установлены закономерности электромагнитных процессов в подземных распределительных электрических сетях напряжением 6 кВ, их качественные и количественные характеристики, что стало научной основой для создания новых эффективных средств селективного контроля изоляции и защиты от замыканий на землю, от токов коротких замыканий.

**Выводы.** Практическая ценность работы состоит в следующем:

1. Народное хозяйство Украины получило серии аппаратов отечественного производства на напряжение до 1140 В и 6–10 кВ в исполнении РВ-3В, РВ-4В, РН. Создание и внедрение в производство новых серий взрывозащищенных аппаратов и систем защиты полностью удовлетворило потребность Украины в таком оборудовании, обеспечило безопасную эксплуатацию горных электроустановок, подземных систем электроснабжения.

2. Решены проблемы ликвидации отрицательного влияния дугогасительных процессов в оболочках взрывозащищенных и рудничных аппаратов на их надежность методами гашения электрической дуги в герметизированных и вакуумных камерах. Это позволило на порядок повысить надежность работы шахтных и рудничных аппаратов управления и защиты при высоких уровнях напряжения (660 и 1140 В). Такие аппараты впервые созданы в Украине, а их принципы построения используются в мировой практике.

3. Впервые в мировой практике созданы универсальные высоконадежные аппараты защиты персонала от поражения электрическим током при напряжении до 1140В. Укомплектованные аппаратами защиты передвижные трансформаторные подстанции мощностью от 100 до 1600 кВА позволили гарантировать безопасность людей при их прямом контакте с фазой сети. Об эффективности предложенных методов и технических средств защиты свидетельствует тот факт, что в Украине и других странах СНГ на протяжении 10 лет не было зарегистрировано ни одного случая поражения человека электрическим током, несмотря на высокий уровень напряжения 1140 В.

4. Экономический эффект от внедрения в производство разработок данной работы за последние 5 лет составляет свыше 250 млн грн. На отечественных заводах-изготовителях взрывозащищенного и рудничного электрооборудования созданы новые рабочие места. Высокий технический уровень, патентная чистота, соответствие разработок требованиям действующих государственных и межгосударственных стандартов обеспечили конкурентоспособность этой продукции на мировом рынке.

Следует также отметить, что созданная научная база и технические решения приемлемы для других отраслей, прежде всего химической промышленности, предприятий добычи и транспортировки нефти, газа и т.п.

Работа, основные научные и практические результаты которой изложены в данной статье, в 2010 году была удостоена Государственной премии Украины в области науки и техники.

Как перспективу дальнейшего развития направления следует считать научное обоснование и разработку концепции перевода питания подземных потребителей глубоких энергоемких шахт на напряжение до 35 кВ.

#### Список литературы / References

1. Вареник Е.А. Новые решения при разработке аппаратов защиты подземных электрических сетей / Е.А. Вареник, В.С. Дзюбан, Ф.П. Шкрабец // Взрывозащищенное электрооборудование: сб. науч. тр. УкрНИИВЭ. – Донецк: ООО „Юго-Восток, Лтд“, 2006. – С. 15–21.

Varenik, Ye.A., Dziuban, V.S. and Shkrabets, F.P. (2006), “New solutions of the development of protection apparatuses for underground electrical networks”, *Vzryvozashchishchennoe elektro-oborudovanie: collected articles UkrNIIVE*, pp. 15–21.

2. Забезпечення безпеки та ефективності шахтних електроустановок / [С.О. Вареник, С.І. Випанасенко, В.С. Дзюбан та ін.]; за ред. акад. Г.Г. Півняка. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2004. – 334 с.

Varenik, Ye.O., Vypanasenko, S.I., Dziuban, V.S., Shydlovska, N.A. and Shkrabets, F.P. (2004), *Zabezpechennya bezpeky ta efektyvnosti shakhtnykh elektroustanovok* [Safety and Efficiency of Mining Electrical Installations], National Mining University, Dnepropetrovsk, Ukraine.

3. Дзюбан В.С. Взрывозащищенные аппараты низкого напряжения / В.С. Дзюбан. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 240 с.

Dziuban, V.S. (1993), *Vzryvozashchishchennye apparaty nizkogo napriazheniia* [Explosion-Proof Low Voltage Apparatuses], Energoatomizdat, Moscow, Russia.

4. Півняк Г.Г. Несимметричные повреждения в электрических сетях карьеров: справ. пособие / Г.Г. Півняк, Ф.П. Шкрабец. – М.: Недра, 1993. – 192 с.

Pivniak, G.G. and Shkrabets, F.P. (1993) *Nesimmetrichnye povrezhdeniya v elektricheskikh setyakh karyerov* [Nonsymmetric Damages of the Electrical Network of Open-Mines], Nedra, Moscow, Russia.

5. Системы эффективного энергозабезпечення вугільних шахт / [Г.Г. Півняк, Ф.П. Шкрабець, В.Т. Заїка та ін.]; за ред. акад. Г.Г. Півняка. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2004.–206 с.

Pivniak, G.G., Shkrabets, F.P., Zaika, V.T. and Razumnyi Yu.T. (2004), *Systemy efektyvnogo energozabezpechennia vyglynykh shakht* [Systems of Efficient Energy Supply of Coal Mines], National Mining University, Dnepropetrovsk, Ukraine.

**Мета.** Представити результати вирішення проблеми створення та освоєння виробництва на підприємствах України нового покоління вибухозахищеного електрообладнання, що забезпечує безпечне й безперебійне електропостачання споживачів гірничих виробництв.

**Методика.** Методика виконання досліджень включає: аналітичні методи досліджень; математичне моделювання на основі формалізації досліджуваних процесів і побудови часткових математичних моделей; загальну теорію електричних кіл, а також натурні експерименти з метою практичної перевірки результатів теоретичних досліджень і прийнятих технічних рішень.

**Результати.** Уперше у світовій практиці встановлено фізичні явища, визначено їх якісні й кількісні параметри, що приводили до катастрофічно швидкого руйнування апаратів керування та захисту. Ці дослідження визначили шляхи подальшого удосконалення вибухозахищених та рудничних електричних апаратів на напругу вище 500В. Було створено комутаційні апарати з герметизованими та з вакуумними дугогасильними камерами, термін служби яких складав 5–6 і більше років. Розроблено нові способи, методи та технічні рішення, що дозволили вперше у світовій практиці створити системи захисту від струмів витоку для мереж напругою 1140В. Це забезпечує: ефективне зниження значень струму витоку за рахунок автоматичної настройки компенсуючих дроселів; автоматичне відключення джерела й закорочування на землю фази мережі з ушкодженою ізоляцією при перевищенні струмом витоку допустимого значення. Розроблено нові принципи самоконтролю працездатності засобів захисту, дистанційного керування та каналів зв'язку, що практично виключають можливість експлуатації пошкоджених електричних мереж та обладнання й помилкові спрацьовування засобів захисту.

**Наукова новизна.** Теоретично обґрунтовано й практично вирішено широке коло завдань безпеки персоналу та забезпечення високої надійності роботи гірничого електрообладнання й систем підземного електропостачання при застосуванні високих рівнів напруги живлення (660, 1140, 6000 В). Запропоновані рішення стосуються як роботи силового електроустаткування, так і функціонування систем управління та захисту.

**Практична значимість.** Розроблені, освоєні серійно й повсюдно застосовуються на шахтах різних гірничодобувних галузей промисловості рудникові вибухозахищені апарати, що мають такі переваги: широка номенклатура виконань; високий рівень вибухозахисту; блочність конструкцій; ефективні засоби керування й захисту та іскробезпеки. Нові технічні рішення по конструкціях і електричних схемах, високі значення механічної, електричної зносостійкості та комутаційної здатності, застосування спеціальних дуговологостійких матеріалів забезпечують високі показники та ресурси розробленої апаратури.

**Ключові слова:** вибухозахищене електрообладнання, апарати керування та захисту, безперебійне й безпечне електропостачання

**Purpose.** To present the results of solving the problem of creating and manufacturing explosion-proof equipment of new generation at enterprises of Ukraine, which ensures safe and continuous power supply to mining industry consumers.

**Methodology** of research include: analytical research methods; mathematical modeling based on the formalization of studying processes and the construction of quotient mathematical models; the general theory of electrical circuits, and full-scale experiments with the purpose of the practical verification of theoretical study and adopted engineering solutions.

**Findings.** For the first time in world practice physical phenomena causing dramatically rapid destruction of control and protection apparatuses were determined, their qualitative and quantitative parameters were defined. This research outlined the ways of further improving explosion-proof and mine electric equipment with 500 V and higher voltage. Switching devices with sealed and vacuum arc chutes with the service life of 5–6 and more years were designed. New ways, methods and technical solutions, which allowed for the first time in the world to create a system of protection against leakage currents for the networks with a voltage 1140 V were developed. It provides an effective reduction of leakage currents values through the automatic tuning of compensating chokes, automatic shutdown of the source and grounding the phase with damaged insulation in conditions of exceeding the acceptable values of leakage current. New principles governing self-control of operability of protective equipment, remote control and communication channels were developed, which practically eliminates the possibility of operating damaged electric networks and equipment, as well as of erroneous activating of protection devices.

**Originality.** A wide range of tasks related to personnel safety and high reliability of mining electric equipment and of mining electric equipment and of underground power supply systems at high voltage levels (660 V, 1140 V, 6000 V) have been theoretically grounded and practically solved.

**Practical value.** mine explosion-proof apparatus, having the following advantages: a wide range of performance, a high level of protection, blocking designs, effective control, protection and spark-proof design are developed, exploited commercially and widely used in the mines of various mineral resource industries. New engineering solution in construction and electrical circuits, high values of mechanical, electrical wear-resistance and switching capacity, the use of special materials arc-moisture-proof materials provides with high factors and resources of developed equipment.

**Keywords:** explosion-proof electrical equipment, control apparatus and protection, uninterrupted and safe power supply

*Рекомендовано до публікації докт. техн. наук Ю.Т. Разумним. Дата знаходження рукопису 16.07.12.*