

Originality. Strategic fundamentals of engineering education development regarding establishment of a common international platform in the field of the world natural resources consumption for ensuring sustainable development are determined and substantiated in the paper.

Practical value. Practical implementation of the provisions and proposals of the World Forum of Resource Universities for sustainable development is the key to

well-being of modern technogenic society in the conditions of resource depletion and environmental crisis.

Keywords: *mineral resources, sustainable environmental development of territories, World Forum of resource universities on sustainable development*

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук В.І. Прокопенком. Дата надходження рукопису 27.11.12.

УДК 621.316.9

**Ф.П. Шкрабец, д-р техн. наук, проф.,
А.В. Остапчук, канд. техн. наук, доц.**

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

ПРИМЕНЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ 35 кВ ДЛЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ ГЛУБОКИХ ЭНЕРГОЕМКИХ ШАХТ

**F.P. Shkrabets, Dr. Sci. (Tech.), Professor,
A.V. Ostapchuk, Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Prof.**

State Higher Educational Institution “National Mining University”,
Dnipropetrovsk, Ukraine, e-mail: ShkrabetsF@nmu.org.ua

APPLICATION OF 35 KILOVOLT VOLTAGE FOR UNDERGROUND POWER CONSUMERS SUPPLY SYSTEMS OF DEEP POWER-INTENSIVE MINES

Цель. Обоснование возможности применения напряжения 35 кВ в системах электроснабжения глубоких рудных и угольных шахт для питания подземных электроприемников и формулирование принципов обеспечения безопасности их эксплуатации.

Методика. Используются теоретические и экспериментальные методы, в частности, теория вероятности и аналитические методы исследований для оценки надежности элементов и электробезопасности систем электроснабжения, общая теория электрических цепей для оценки аварийных процессов.

Результаты. Выбором соответствующего уровня напряжения можно в полном объеме и на длительный срок решить задачу качественного электроснабжения глубоких шахт с учетом перспективы роста электрических нагрузок подземных электроприемников. Этот путь совершенствования и повышения эффективности электроснабжения глубоких энергоемких шахт в настоящее время представляется наиболее реальным и технически осуществимым. Наиболее перспективным при реконструкции системы электроснабжения, в связи с разработкой глубоких горизонтов, представляется вариант использования глубокого ввода напряжения 35 кВ на горизонты 1000 м и более с установкой подземной подстанции 35/6 кВ и распределением электроэнергии по нижним горизонтам на напряжении 6 кВ. Предпочтение при выборе схемы питания подземной подстанции 35/6 кВ следует отдать варианту „блок линия – трансформатор“, что позволит отказаться от распределительного устройства 35 кВ в шахте при соблюдении действующих общих и отраслевых требований эксплуатации и безопасности. Представлено теоретическое обоснование селективного способа автоматического и непрерывного контроля параметров изоляции электрических сетей напряжением 35 кВ, основанного на наложении на сеть би-частотных оперативных синусоидальных сигналов не промышленной частоты, и принципа защитного заземления поврежденной фазы при замыканиях на землю в электрических сетях напряжением 6–35 кВ для целей улучшения условий электробезопасности.

Научная новизна. Представлены варианты повышения эффективности электроснабжения глубоких горизонтов шахты. Показано, что перспективным является перевод на более высокий класс напряжения, как минимум, питающих шахтных сетей. Для обеспечения безопасности применения в подземных условиях напряжения 35 кВ предложен способ автоматического, непрерывного и селективного контроля параметров изоляции относительно земли без снятия рабочего напряжения.

Практическая значимость. Повышение эффективности электроснабжения глубоких шахт за счет улучшения показателей качества и уменьшения потерь электроэнергии в питающих сетях.

Ключевые слова: *электроснабжение глубоких шахт, контроль параметров изоляции, защитное заземление поврежденной фазы*

Вступление. Не последнюю роль в обеспечении устойчивой работы шахт играют системы электро-

снабжения, их надежность, безопасность, экономическая эффективность. Зависят эти показатели от многих факторов, но, в основном, от напряжения питающих и распределительных сетей, параметров эле-

ментов этих сетей, выбор которых зависит от ожидаемых нагрузок. В настоящее время для внутришахтных высоковольтных распределительных сетей разрешено применение напряжения 6 кВ. С ростом мощности строящихся шахт и, особенно, с увеличением суммарной мощности электродвигателей на проходческих и добычных участках усложняется стволочная и подземная кабельная сеть (увеличивается сечение жил кабелей, прокладываются параллельные линии и т.д.), что вызывает увеличение капитальных вложений в систему электроснабжения, повышение потерь электроэнергии.

Цель и задачи исследований. Разработка концепции перевода на следующий уровень рабочего напряжения систем подземного электроснабжения глубоких рудных и угольных шахт, обоснование вариантов технической реализации.

Для достижения поставленной цели должны быть решены следующие научные задачи:

- обоснование возможных номинальных значений питающих и подземных распределительных сетей глубоких шахт с учетом технических ограничений по условиям эксплуатации и безопасности;
- разработка структуры систем электроснабжения глубоких шахт и обоснования глубины применения повышенного напряжения;
- обоснование специального оборудования для обеспечения безопасности и надежности применения в подземных условиях напряжения 35 кВ.

Материал и результаты исследований. Развитие в Украине добычи полезных ископаемых подземным способом сопровождается углублением шахт, а интенсификация производства – ростом электрических нагрузок подземных потребителей. Уже в настоящее время установленная мощность подземных потребителей на ряде шахт превышает 10 МВт, а глубина залегающих разрабатываемых пластов превысила 1000 метров. Если учесть и распределение электроэнергии в подземных выработках, то становятся очевидными нарастающие проблемы обеспечения качества электроэнергии и роста потерь электроэнергии в системах электроснабжения глубоких шахт при напряжении 6 кВ. С учетом перспектив развития отраслей, повышение эффективности электроснабжения глубоких шахт может быть достигнуто за счет перевода на более высокий класс напряжения, как минимум, питающих (стволовых) шахтных сетей. Указанное мероприятие предусматривает установление непосредственно в шахте подстанции с первичным напряжением 35 кВ, что, в свою очередь, требует решения комплекса вопросов, связанных с технической реализацией и обеспечением безопасности эксплуатации высоковольтных электроустановок в условиях шахт.

По соображениям надежности необходимо стремиться к уменьшению количества элементов систем электроснабжения, в том числе и линий, которые питают центральную подземную подстанцию. Осуществление таких схем возможно также путем повышения напряжения, которое подается на центральную под-

земную подстанцию. Определение целесообразного значения напряжения шахтных высоковольтных распределительных сетей, с учетом развития предприятия, становится актуальной задачей. Выбором соответствующего уровня напряжения можно в полном объеме и на продолжительный срок решить задачу качественного электроснабжения глубоких шахт с учетом перспективы роста электрических нагрузок подземных электроприемников. Этот путь совершенствования и повышения эффективности электроснабжения глубоких энергоемких шахт представляется наиболее реальным и технически осуществимым [2].

Прежде чем принимать решения по усовершенствованию (реконструкции) системы электроснабжения действующих шахт и обоснованию необходимых технических решений, следует оценить возможности существующей системы электроснабжения с точки зрения возможных увеличений электрических нагрузок при обеспечении требуемого качества электроэнергии. Следует оценить пропускную способность стволочных кабелей до конкретных горизонтов с учетом параметров существующих кабелей без их усиления или замены. Для такой оценки можно воспользоваться зависимостью передаваемой мощности S в функции от потери напряжения ΔU при заданном номинальном напряжении питающих сетей и физических параметрах кабелей, MBA

$$S = \frac{10\Delta U U_n^2}{(R \cdot \cos \phi + X \cdot \sin \phi)} 10^{-3},$$

где S – передаваемая мощность; ΔU – потери напряжения; U_n – номинальное напряжение кабельной линии; R – активное сопротивление кабеля; X – индуктивное сопротивление кабеля; ϕ – угол между вектором тока и напряжения.

Для реконструкции системы подземного электроснабжения глубоких энергоемких шахт с целью дальнейшего развития отработки горизонтов более 1000 м следует рассмотреть следующие возможные базовые варианты:

1. Электроснабжение глубоких горизонтов шахты по классической схеме при напряжении 10 кВ питающих и распределительных сетей.

2. Электроснабжение глубоких горизонтов шахты по схеме глубокого ввода напряжением 35 кВ с установкой подземной подстанции 35/6 кВ с дальнейшим распределением электроэнергии при напряжении 6 кВ.

Сравнительная технико-экономическая оценка вариантов электроснабжения при разных напряжениях производится путем сопоставления как экономических параметров, так и технических (качественных) показателей, не имеющих стоимостного выражения. Качественные показатели варианта являются лучшими, если:

- при работе в электросети возникают меньшие колебания напряжения;
- уменьшаются потери мощности и энергии;

- создаются более благоприятные условия для монтажа и эксплуатации сетей;
- сокращается расход цветных металлов;
- имеется возможность без значительных затрат осуществить реконструкцию сети (увеличить передаваемую мощность, длину кабелей и т.п.).

Для определения экономически целесообразного напряжения системы электроснабжения при определенной передаваемой мощности и протяженности кабелей следует произвести расчет стоимостных показателей элементов системы (кабелей, электродвигателей, трансформаторов и пр.) и всей системы в целом при нескольких выбранных уровнях напряжения (существующего и планируемого).

Эффективность перевода питающих линий на повышенное номинальное напряжение определяется тем, что при одинаковой нагрузке, коэффициенте мощности, материале и сечении токоведущих жил, при повышении напряжения линии с $U_{н1}$ до $U_{н2}$, отношение потерь напряжения будет следующим

$$\frac{\Delta U_2}{\Delta U_1} = \frac{U_{н1}}{U_{н2}},$$

а отношение потерь мощности таким

$$\frac{\Delta P_2}{\Delta P_1} = \left(\frac{U_{н1}}{U_{н2}} \right)^2,$$

где ΔU_1 , ΔP_1 – потери напряжения и мощности при напряжении $U_{н1}$, ΔU_2 ; ΔP_2 – потери напряжения и мощности при напряжении $U_{н2}$.

Расчетные значения соотношений потерь напряжения и потерь мощности в шахтных кабельных сетях, при неизменных параметрах системы, приведены ниже в таблице.

Таблица

Расчетные значения соотношений потерь напряжения и мощности в шахтных кабельных сетях

Напряже- ние линии $U_{н1}$, кВ	Напряже- ние линии $U_{н2}$, кВ	Потери на- пряжения $\frac{\Delta U_2}{\Delta U_1}$, %	Потери мощности $\frac{\Delta P_2}{\Delta P_1}$, %
6	10	60	36
	35	17	3

Из таблицы видно, что при переводе линий напряжением 6 кВ на напряжение 10 или 35 кВ потери напряжения уменьшаются, соответственно, на 40 и 83%, а потери мощности – на 64 и 97 %.

При переводе шахтных высоковольтных сетей на напряжение 10 кВ требуется замена трансформаторов 6/0,4 кВ трансформаторами 10/0,4 кВ. Следует также отметить, что перевод сетей с 6 на 10 кВ облегчается тем, что трансформаторы мощностью 630 кВА и выше, с номинальным напряжением 6 и 10 кВ, выполняются так, что для перехода на напряжение 10 кВ, как правило, не требуется замена обмоток высшего

напряжения. Трансформаторы меньших мощностей при напряжении 6 и 10 кВ имеют разные типы обмоток. Следовательно, перевод подземных распределительных сетей на напряжение 10 кВ, с точки зрения обеспечения питанием участков потребителей напряжением до 1000 В, практически не связан с дополнительными затратами, равно как и не связан с повышением эффективности именно этих участков системы электроснабжения.

Перевод шахтных распределительных сетей на повышенное напряжение улучшит условия эксплуатации пусковой и распределительной аппаратуры, но, как правило, не вызовет изменения количества подстанций или конфигурации сети. Следовательно, количество высоковольтной распределительной аппаратуры будет одинаковым при различных вариантах напряжения сети.

Повышение напряжения в высоковольтных распределительных сетях с 6 до 10 кВ, очевидно, не будет связано с существенным повышением опасности при эксплуатации стационарных высоковольтных двигателей, подстанций и высоковольтных кабельных линий. Соответствующим образом сконструированная аппаратура позволит сохранить тот же уровень безопасности, который достигнут при использовании напряжения 6 кВ. Связано это с тем, что для таких уровней напряжения следует говорить только об обеспечении косвенной безопасности (непосредственное прикосновение к токоведущим частям опасно в любом случае), а сети напряжением 6 и 10 кВ предполагают одинаковую систему релейной защиты.

Задача применения напряжения 35 кВ для подземного электроснабжения в настоящее время, с точки зрения подаваемых в шахту и распределяемых по шахте электрических нагрузок, а также с точки зрения безопасности эксплуатации системы электроснабжения в условиях шахты, может ставиться только как применение системы глубокого ввода напряжения 35 кВ на энергоемкий горизонт с установкой трансформаторной подстанции (ТП) 35/6 кВ на соответствующем горизонте. При этом предполагается, что электроснабжение электроприемников на основном и ближайших горизонтах будет осуществляться при напряжении распределительных сетей 6 кВ по классическим и апробированным схемам [2].

Принципиальную схему питания подземных трансформаторов 35/6 кВ предлагается реализовать по схеме „блок линия – трансформатор“ (рис.1), что позволит исключить необходимость установки на подземной подстанции как минимум трех (вводных и секционной) распределительных ячеек напряжением 35 кВ в рудничном исполнении. Последнее будет способствовать как снижению капитальных затрат, так и повышению надежности системы хотя бы за счет уменьшения элементов системы. Применение сухих трансформаторов в исполнении IP54 (серия RESIBLOC, фирма АВВ), имеющих в комплекте заземляющие ножи, позволяет выполнить одно из основных требований отраслевых Правил безопасности также без установки распределительной ячейки.

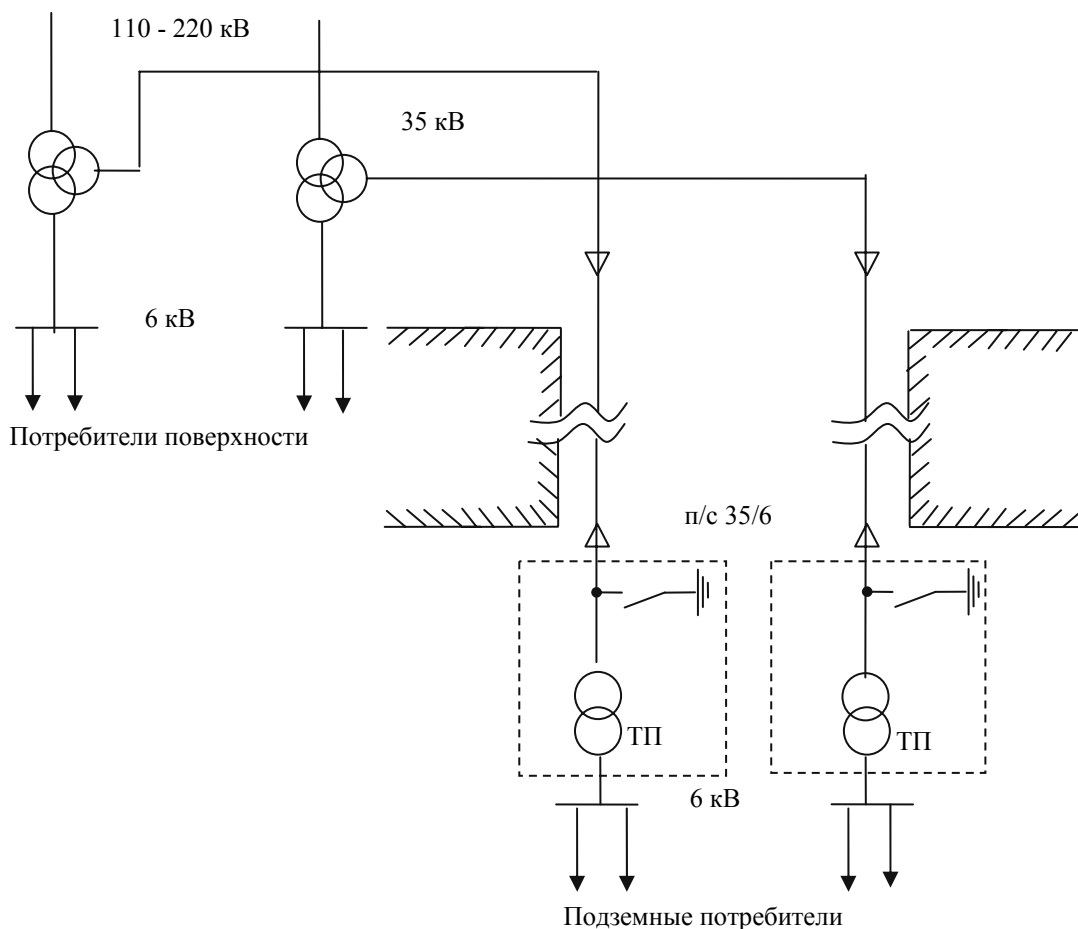


Рис. 1. Принципиальная схема питания подземных трансформаторов 35/6 кВ по схеме „блок линия – трансформатор“

Однако применение напряжения 35 кВ определяется успешностью решения дополнительных технических задач, связанных с обеспечением условий электро- и пожаробезопасности в подземных выработках, а именно: минимизация влияния параметров и режимов работы электрических сетей напряжением 35 кВ поверхности на эксплуатационные характеристики внутришахтных сетей и оборудования; непрерывный контроль состояния изоляции относительно земли электрической сети напряжением 35 кВ или, как минимум, ЛЭП, питающих подземные потребители; уменьшение значений аварийных токов при замыканиях на землю в шахтных кабелях напряжением 35 кВ, что, учитывая значения параметров изоляции разветвленных сетей напряжением 35 кВ (подземных и поверхности), может быть достигнуто путем защитного заземления (закорачивания) поврежденной фазы.

Одним из важных вопросов обеспечения безопасности и эксплуатационной надежности системы электроснабжения является ограничение (подавление) внутренних перенапряжений. Проблема усугубляется тем, что шахтная сеть напряжением 35 кВ гальванически связана с разветвленной сетью 35 кВ поверхности, выполненной, в основном, в виде воздушных

ЛЭП и работающей с полностью изолированным от земли режимом нейтрали.

К недостаткам сетей с полностью изолированной нейтралью можно отнести нестабильность напряжения нейтрали, благоприятные условия для возникновения дуговых замыканий, феррорезонансные явления, повышенные напряжения прикосновения и шага при дуговых замыканиях на землю, повышенные кратности внутренних перенапряжений и др. Отмеченные явления приводят к появлению многоместных замыканий на землю и к снижению уровня надежности и электробезопасности. Кроме того, основной причиной ложных срабатываний защит (сигнализаций) от замыканий на землю в сетях с полностью изолированной нейтралью следует считать возникновение в сети, после отключения поврежденного присоединения (или после самоликвидации повреждения), колебательного процесса с частотой, близкой к частоте 50 Гц [1]. Естественно, что для устранения ложных срабатываний устройств защиты от замыканий на землю, вызванных указанными колебаниями, необходимо исключить или резко сократить длительность переходных процессов. Одним из эффективных методов устранения колебания является уменьшение добротности колебательного контура, что дости-

гається уменьшением значения активного сопротивления изоляции сети относительно земли, которое включено параллельно с реактивным сопротивлением изоляции (сети с резистором в нейтрали). Эффективность метода подавления переходного процесса существенно проявляется при значении создаваемого активного тока замыкания на землю на уровне не менее 40 % от емкостного.

Электрические сети с резистором в нейтрали обладают, по сравнению с сетями с полностью изолированной или компенсированной нейтралью, более высокой надежностью за счет улучшения качества работы устройств защиты от однофазных замыканий на землю, исключения феррорезонансных процессов и уменьшения повреждаемости элементов системы электроснабжения. Последнее обусловлено значительным снижением (до значения 2,4 фазного напряжения при равенстве активного и емкостного тока замыкания) внутренних перенапряжений, сопровождающих однофазные замыкания на землю [1].

В соответствии с действующими отраслевыми нормативными материалами, в угольных шахтах все кабельные линии напряжением выше 1000 В, проложенные в подземных выработках, в стволах и в скважинах, должны оборудоваться защитой от утечек и замыканий на землю мгновенного действия (без выдержки времени). Указанная защита, в свою очередь, должна обеспечивать отключение линии при появлении однофазной утечки, соответствующей снижению активного сопротивления изоляции относительно земли одной фазы или сети в целом до значений ниже нормативных. Кроме того, правила предполагают предварительный контроль состояния изоляции с запретом на включение поврежденного участка при снижении сопротивления изоляции ниже заданного уровня [2]. Следует отметить, что указанные весьма жесткие требования отраслевых Правил до настоящего времени не реализованы для шахтных сетей напряжением 6 кВ по ряду причин, основной из которых следует считать отсутствие высокочувствительных методов защиты от утечек (контроля изоляции) при одновременном обеспечении селективности (избирательности) действия.

Для целей автоматического и селективного контроля параметров изоляции (активного, реактивного и, при необходимости, полного сопротивлений изоляции относительно земли) в распределительных сетях напряжением 35 кВ, питающих подземные потребители, предлагается использовать метод непрерывного измерения значений, составляющих сопротивления изоляции сети относительно земли под рабочим напряжением, основанный на использовании наложенных на сеть оперативных токов промышленной частоты (рис. 2).

Суть предложенного метода непрерывного и оперативного контроля параметров изоляции относительно земли электрической сети и ее элементов состоит в том, что на электрическую сеть одновременно накладываются два оперативных синусоидальных сигнала (источники ИОС-1 и ИОС-2), частоты кото-

рых не равны между собой и отличается от промышленной частоты. На контролируемых участках (линии или присоединении), а также в месте подключения оперативного источника устанавливаются устройства, назначением которых является снятие параметров оперативных сигналов и их соответствующая обработка с целью определения в указанных точках значений оперативных токов и напряжений. Зафиксированные (с заданной скважностью сканирования) параметры оперативных сигналов в цифровом виде подаются на входы микроконтроллера (МК), где используются для вычисления и передачи по заданному адресу непрерывно (регулярно) обновляемых значений параметров изоляции.

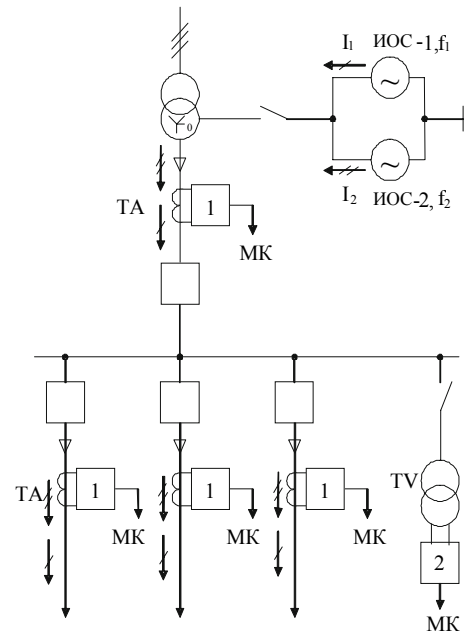


Рис. 2. Схема, поясняющая способ непрерывного контроля параметров изоляции распределительной сети: 1 – устройство выделения и обработки оперативных токов; 2 – устройство выделения и обработки оперативных напряжений

Структура и функциональная схема системы непрерывного измерения параметров изоляции относительно земли всей распределительной сети или ее элементов без снятия рабочего напряжения предполагает один канал напряжения и несколько (по количеству контролируемых присоединений) каналов тока. Канал напряжения, на вход которого сигнал поступает с датчика напряжения TV (измерительного трансформатора напряжения), подключенного к шинам распределительного устройства, предназначен для снятия, обработки и измерения значений оперативных напряжений U_{f1} и U_{f2} и передачи их в вычислительный модуль для дальнейшего использования. Токосые каналы, на входы которых сигналы поступают от соответствующих датчиков тока TA_i (измерительных трансформаторов тока), установленных на отходящих (контролируемых) присоединениях,

также предназначены для снятия, обработки и измерения значений оперативных токов I_{f1} и I_{f2} соответствующих участков распределительной сети и передачи их в вычислительный модуль [3].

Вычислительный блок на основании одновременно измеренных и зафиксированных значений оперативных токов и напряжений, с учетом коэффициентов трансформации измерительных трансформатора напряжения k_V и трансформаторов тока k_{Ai} в заданных точках распределительной сети системы электроснабжения, производит вычисления:

– активного сопротивления изоляции относительно земли трех фаз всей сети или соответствующего контролируемого участка (i -го присоединения)

$$R_i = \frac{U_1 U_2}{k_V k_{Ai}} \sqrt{\frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{U_2^2 I_{1i}^2 \omega_2^2 - U_1^2 I_{2i}^2 \omega_1^2}};$$

– суммарной емкости трех фаз всей сети или соответствующего контролируемого участка (i -го присоединения) относительно земли

$$C_i = \frac{k_V k_{Ai}}{U_1 U_2} \sqrt{\frac{U_2^2 I_{1i}^2 - U_1^2 I_{2i}^2}{(\omega_1^2 - \omega_2^2)}};$$

где I_1, U_1, ω_1 – ток, напряжение и частота первого оперативного источника; I_2, U_2, ω_2 – ток, напряжение и частота от второго оперативного источника; k_V – коэффициент трансформации измерительных трансформаторов напряжения, k_{Ai} – коэффициент трансформации измерительных трансформаторов тока.

Однофазные замыкания на землю оказывают существенное негативное влияние на условия электробезопасности при эксплуатации электрических сетей и оборудования в шахтах. Электробезопасность электрических сетей, если не учитывать физиологические особенности и психологическое состояние человека, оценивается, в основном, значением тока, проходящего через тело человека, значением напряжения прикосновения и временем воздействия указанных величин. Для реальных параметров распределительных и питающих сетей прикосновение человека к одной из фаз сети напряжением 35 кВ, даже без учета переходного процесса, всегда является смертельно опасным.

Степень же опасности распределительных сетей при прикосновении к корпусу электрооборудования, оказавшегося под напряжением, характеризуется значением напряжения прикосновения и временем его воздействия. Значение напряжения прикосновения для установившегося процесса замыкания, в общем случае, определяется значениями тока однофазного замыкания на землю и сопротивления защитного заземления и, без учета шунтирующего действия сопротивления тела человека и активного сопротив-

ления изоляции сети относительно земли, может быть рассчитано по выражению

$$U_{np} = I_3 r_3 = \frac{\sqrt{3} U_H \omega C r_3}{\sqrt{1 + 9 \omega^2 C^2 r_3^2}},$$

где r_3 – сопротивление защитного заземления поврежденного электрооборудования; I_3 – ток однофазного замыкания на землю (корпус).

При дуговых замыканиях имеет место продолжительный переходный процесс, сопровождающийся бросками емкостного тока, что приводит к увеличению действующего значения напряжения прикосновения

$$U_{np} = k_d I_3 r_3,$$

где k_d – коэффициент, учитывающий увеличение тока замыкания в переходном режиме (принимается равным 4–5).

Следует отметить, что однофазные замыкания на землю, в большинстве случаев, сопровождаются переходными процессами и появлением внутренних перенапряжений, которые, в свою очередь, являются причиной пробоя изоляции неповрежденных фаз сети и возникновению значительно более опасных двойных замыканий на землю в разных точках распределительной сети.

Одним из логических направлений улучшения условий электробезопасности при эксплуатации электрических сетей напряжением 35 кВ на горных предприятиях является путь снижения негативных показателей процесса однофазного замыкания на землю, а именно:

- уменьшение значения аварийного тока в зоне замыкания на землю;
- уменьшение времени воздействия поражающих величин (аварийного тока и напряжения прикосновения);
- снижение кратности внутренних перенапряжений и, соответственно, уменьшение вероятности развития аварии в распределительной сети.

Решение указанных задач возможно путем автоматического заземления (шунтирования) фазы, на которой появилось однофазное замыкание на землю. Основная идея заземления (закорачивания) поврежденной фазы заключается в том, что при повреждении (ослаблении) изоляции относительно земли одной из фаз распределительной сети поврежденная фаза автоматически соединяется с землей, то есть шунтируется место повреждения. При этом резко уменьшается значение тока через место повреждения (или человека), и практически за полпериода промышленной частоты затухает переходный процесс. Основным условием эффективности процесса автоматического замыкания (шунтирования) поврежденной фазы является высокое быстродействие системы.

Основными функциональными блоками устройства автоматического заземления поврежденной фа-

зы при однофазных замыканиях на землю (рис. 3) являются: блок выбора (определения) поврежденной фазы (БВПФ), блок заземляющих аппаратов с пофазным управлением (БЗА) и блок управления заземляющими аппаратами (БУЗА).

Жесткие требования по функциональной надежности должны предъявляться к блоку выбора поврежденной фазы БВПФ в части чувствительности (обеспечение работоспособности при замыканиях на землю через переходное сопротивление, в том числе и через тело человека) и в части правильности определения поврежденной фазы. Ошибка при выборе поврежденной фазы приводит к созданию искусственного двухфазного замыкания через заземляющую сеть, т.е. перевод одно-

фазного замыкания на землю в более опасный для поражения людей и стойкости электрооборудования аварийный режим. Для разветвленных электрических сетей система автоматического заземления поврежденной фазы при однофазных замыканиях на землю должна быть дополнена блоком селективного определения поврежденной линии. Для длинных линий распределительной сети с мощными синхронными или асинхронными электродвигателями в качестве нагрузки следует рассматривать возможность применения двух блоков заземляющих аппаратов с пофазным управлением – в начале линии, в конце линии, для обеспечения защиты от действия напряжения выбега от отключенных от сети электродвигателей.

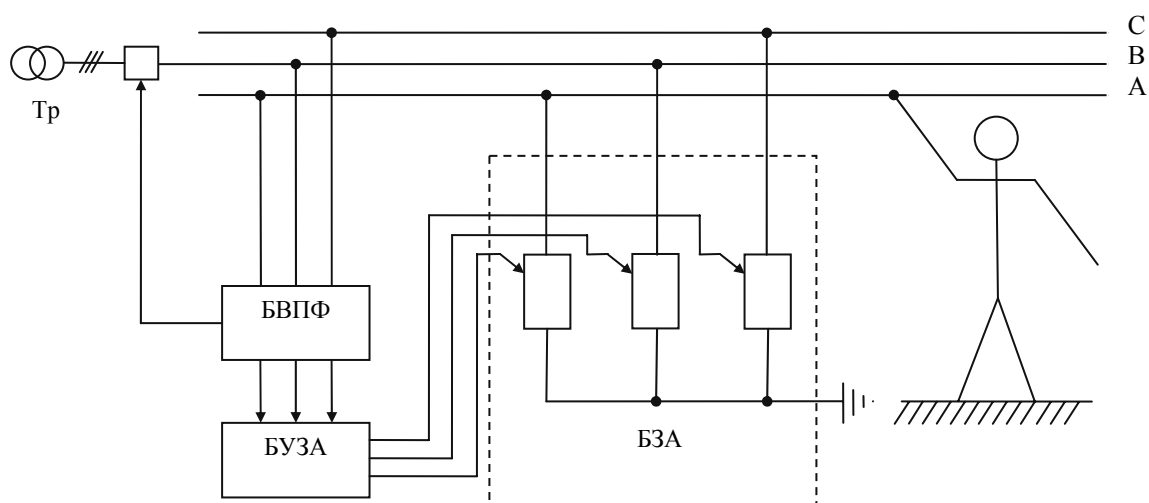


Рис. 3. Структура устройства шунтирования поврежденной фазы при замыкании на землю

Выводы.

1. Применение напряжения 35 кВ для подземного электроснабжения, с точки зрения подаваемых в шахту и распределяемых по шахте электрических нагрузок, а также с точки зрения безопасности эксплуатации системы электроснабжения, в настоящее время может рассматриваться только как применение системы глубокого ввода напряжения 35 кВ на энергоемкий горизонт с установкой трансформаторной подстанции 35/6 кВ на соответствующем горизонте.

2. Предложен способ непрерывного автоматического и селективного контроля параметров изоляции относительно земли электрической сети напряжением 35 кВ под рабочим напряжением, основанный на наложении на распределительную сеть би-частотных оперативных синусоидальных сигналов непромышленной частоты. В зависимости от места включения измерительных датчиков тока система способна обеспечивать селективное измерение параметров изоляции относительно земли всей электрической сети или соответствующего присоединения.

3. Значительное улучшение условий косвенной электробезопасности в электрических сетях напряжением 35 кВ может быть обеспечено применением защитного заземления поврежденной фазы при за-

мыканиях на землю. Степень функциональной надежности системы защитного заземления поврежденной фазы определяется устройством выбора поврежденной фазы.

Список литературы / References

1. Пивняк Г.Г. Несимметричные повреждения в электрических сетях карьеров [Текст]: справ. пособие / Г.Г. Пивняк, Ф.П. Шкрабец. – М.: Недра, 1993. – 192 с.
Pivnyak, G.G. and Shkrabets, F.P. (1993), *Nesimmetrichnye povrezhdeniia v elektricheskikh setiakh karierov* [Nonsymmetric Damages of the Electrical Power Network of Open-Cast Mines], Nedra, Moscow, Russia.
2. Правила безпеки у вугільних шахтах: НПАОП 10.0 – 1. 01–05. – К.: Недра, 2005. – 496 с.
Pravila bezpeky v vugilnykh shakhtakh (2005), [Safety Regulations in Coal Mines], Nedra, Kiev, Ukraine.
3. Шкрабец Ф.П. Автоматический и селективный контроль параметров изоляции в распределительных сетях напряжением выше 1000 В [Текст] / Шкрабец Ф.П. // Взрывозащищенное электрооборудование: сб. науч. тр. УкрНИИВЭ. – Донецк: ООО „Юго-восток, Лтд“, 2009. – С.31–39.

Shkrabets, F.P. (2009), "Automatic and Selective Monitoring of Insulation Parameters in 1 kV Distributive Electrical Grid", *Vzryvovazhchishchennoye elektrooborudovaniye*, Collected Sci. Papers of UkrNIIVE, Donetsk, pp. 31–39.

Мета. Обґрунтування можливості застосування напруги 35 кВ у системах електропостачання глибоких рудних і вугільних шахт для живлення підземних електроприймачів і формулювання принципів забезпечення безпеки їх експлуатації.

Методика. Використано теоретичні та експериментальні методи, зокрема, теорію ймовірності та аналітичні методи досліджень для оцінки надійності елементів і електробезпеки систем електропостачання; загальну теорію електричних кіл для оцінки аварійних процесів.

Результати. Вибором відповідного рівня напруги можна в повному обсязі й на тривалий термін вирішити завдання якісного електропостачання глибоких шахт з урахуванням перспективи зростання електричних навантажень підземних електроприймачів. Цей шлях удосконалення й підвищення ефективності електропостачання глибоких енергоємних шахт у даний час є найбільш реальним і технічно здійсненним. Найбільш перспективним при реконструкції системи електропостачання, у зв'язку з розробкою глибоких горизонтів, представляється варіант використання глибокого введення напруги 35 кВ на горизонти 1000 м і більше з установкою підземної підстанції 35/6 кВ і розподілом електроенергії по нижнім горизонтам на напрузі 6 кВ. Перевагу при виборі схеми живлення підземної підстанції 35/6 кВ слід віддати варіанту „блок лінія – трансформатор“, що дозволить відмовитися від розподільного пристрою 35 кВ у шахті при дотриманні діючих загальних і галузевих вимог експлуатації й безпеки.

Представлено теоретичне обґрунтування селективного способу автоматичного та безперервного контролю параметрів ізоляції електричних мереж напругою 35 кВ, заснованого на накладенні на мережу бічастотних оперативних синусоїдальних сигналів непромислової частоти, і принципу захисного заземлення пошкодженої фази при замиканнях на землю в електричних мережах напругою 6–35 кВ з метою поліпшення умов електробезпеки.

Наукова новизна. Представлено варіанти підвищення ефективності електропостачання глибоких горизонтів шахти. Показано, що перспективним є переведення на більш високий клас напруги, як мінімум, живильних шахтних мереж. Для забезпечення безпеки застосування в підземних умовах напруги 35 кВ запропоновано спосіб автоматичного, безперервного й селективного контролю параметрів ізоляції відносно землі без зняття робочої напруги.

Практична значимість. Підвищення ефективності електропостачання глибоких шахт за рахунок по-

ліпшення показників якості та зменшення втрат електроенергії в живлячих мережах.

Ключові слова: електропостачання глибоких шахт, контроль параметрів ізоляції, захисне заземлення пошкодженої фази

Purpose. To substantiate the possibility of 35 kV voltage application in deep-level ore and coal mine power supply systems to supply underground electric collectors and draw up the principles of ensuring their operational safety.

Methodology. We have used theoretical and experimental methods, in particular, probability theory and analytical research methods to estimate electrical elements reliability and power supply electric safety; general electrical circuit theory to estimate emergency processes.

Findings. By selection of appropriate level of voltage we can solve the deep mines power supply problem comprehensively and for extended period of time taking into account growing electrical loads in underground electric collectors. This way of improving the efficiency of deep-level energy-intensive mines supply appears the most realistic and technically feasible. To reconstruct the power supply system we can supply 35 kV voltage to the depth over 1000 m to the 35/6 kV underground substation and distribute power at deeper horizons with voltage of 6 kV. Between different schemes of power supply for the 35/6 kV underground substation the most preferable is the scheme 'block line – transformer' allowing to refuse the 35/6 kV distribution device and meet existing general and specialized requirements of maintenance and safety.

We have presented theoretical substantiation of the selective method of automatic and continuous monitoring of 35/6 kV electrical grid isolation parameters. This method is based on impinging of operational bi-frequency sinusoid signals of nonindustrial frequency on electrical grid, and on the principle of faulted phase earth protection during ground faults in 6-35 kV electric grids for the purposes of improving the electrical safety.

Originality. Alternative method of improvement of the power supply effectiveness in deep geological position is presented. We have shown that change-over to a higher voltage class of mine supply networks is a promising method. To ensure the safety, we propose the method of automatic, continuous and selective monitoring of isolation parameters relative to ground without removing the operating voltage.

Practical value. Improvement of the effectiveness of power supply in deep geological position can be performed through power quality enhancement and reducing the energy loss.

Keywords: deep-level mine power supply, insulation parameters monitoring, faulted phase earth protection

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