



ШКРАБЕЦ Ф.П. (Национальный горный университет, Днепр, Украина)

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ГЛУБОКИХ И ЭНЕРГОЕМКИХ ШАХТ

Рост мощностей очистных проходческих и транспортных средств высокопроизводительных и энергоемких шахт вызывает необходимость увеличения напряжения питания очистных и проходческих комбайнов, а также транспортных систем: с напряжения 660 В перешли на 1140 В, а в настоящее время до 3300 В. Это позволило улучшить технико-экономические показатели по очистным и проходческим участкам, а также повысить безотказность участковых систем электроснабжения (СЭС).

Однако этой тенденции препятствуют питающие подземные электрические сети напряжением 6 кВ, в связи с чем возникает задача увеличения напряжения питающих сетей. Проведенный технико-экономический сравнительный анализ возможных вариантов позволил на сегодняшний день принять к эксплуатации напряжение 10 кВ, которое для использования электрооборудования электрических сетей, устройств защиты наиболее приемлемо.

Исследованиями данной проблемы занимались ведущие учебные, научно-исследовательские и проектные организации (ДГИ, МГИ, ДПИ, ВНИИВЭ, Днепрогипрошахт, Центрогипрошахт и др.). Анализ результатов исследований показал, что переход на напряжение 10 кВ является обоснованным и своевременным.

Вместе с тем с повестки дня не снимается и напряжение 35 кВ, которое технически целесообразно и экономически обосновано, однако возникают проблемы с безопасностью его эксплуатации в подземных выработках, что требует соответствующей доработки. Такой уровень напряжения позволит улучшить показатели качества электроэнергетики.

Выводы: 1. Применение напряжения 35 кВ в системе подземного электроснабжения угольных и рудных шахт целесообразно при глубине более 1000 м при максимальной нагрузке не менее 1000 кВ·А на уровне стволовых кабелей.

2. Применение напряжения 35 кВ в подземных электрических сетях позволит существенно улучшить показатели качества напряжения, надежности и экономичности системы за счет токовой разгрузки наиболее ответственного элемента СЭС, какими являются стволовые кабели.

3. Анализ основных параметров и характеристик электротехнического рудничного электрооборудования дает основание считать, что оно позволяет реализовать тренд глубокого ввода напряжением 35 кВ на глубокие горизонты шахт (рудников) и размещение подстанций 35/6 кВ на рабочих горизонтах.

Ключевые слова: система электроснабжения, уровень напряжения, кабели стволовые, электрооборудование рудничное, качество напряжения, надежность, экономичность.

Высокая степень механизации и электрификации современных угольных и рудных шахт приводит к росту уровней электрических нагрузок и объемов электропотребления, значительно превышающему темпы роста объема добычи полезных ископаемых подземным способом. Это обусловлено как производственно-организационными факторами (тенденция к интенсификации горных работ, укрупнение и объединение шахт, увеличение суточной нагрузки на лаву), так и существенным усложнением горнотехнологических условий в связи с переходом на отработку более глубоких горизонтов. Добыча полезных ископае-

мых на глубоких горизонтах из-за увеличения общей длины распределительных сетей высокого и низкого напряжения, неравномерности графиков нагрузки и т.п. приводит к уменьшению надежности и экономичности подземных систем электроснабжения. Техническое переоснащение предприятий угольной и горнорудной промышленности связано с увеличением электрооснащенности, электропотребления, установленной электрической мощности электроустановок, а также повышением уровня рабочего напряжения. Согласно отмеченным факторам повышаются требования к уровню оснащенности и безопасности



систем электроснабжения шахт, принципы построения и экономические показатели которых зависят от производственной мощности крупнейших приемников электрической энергии, максимальных расчетных значений электрических нагрузок, от уровней потребления основных групп потребителей (очистные работы, транспорт, подъем, водоотлив и т.п.), распределения нагрузок между потребителями на поверхности и подземными установками, а также от горно-геологических особенностей месторождения. В то же время количественный рост энерговооруженности и показателей энергопотребления формирует новые требования к системам электроснабжения, которые, как правило, не могут быть успешно реализованы при существующем уровне развития электрооборудования и систем питания.

Основными потребителями электрической энергии при этом являются стационарные и передвижные установки значительной электрической мощности. Мощность наибольших приемников электрической энергии на поверхности шахт составляет 5–8 МВт (подъем установки и вентиляторы главного проветривания) и 1–2 МВт в подземных выработках (углесосы и установки главного водоотлива). С увеличением глубины шахты увеличивается доля установленной мощности подъемных и водоотливных установок, их количество.

Динамика развития горнодобывающих предприятий за последние годы указывает на значительное увеличение уровня потребления электрической энергии. Так, за последние 50 лет на шахтах Донбасса установленная мощность электродвигателей и силовых трансформаторов напряжением выше 1 кВ увеличилась в 13,5 раз, расход электроэнергии на 1 т добытого угля – в 2,7 раза, а энергооснащенность труда – более чем в 7 раз. Аналогичная тенденция увеличения установленной мощности характерна для иностранных угольных шахт. Так, например, за расчетный период мощность приводов очистных забоев в Польше увеличилась в

6 раз, во Франции – в 4,6 раза, в Германии – в 10 раз [38, 43].

Увеличение глубины горных предприятий с подземной добычей ископаемых также существенно. Например, средняя глубина разработки на шахтах Украины в 2000 г. составляла 635 м. При этом на глубоких горизонтах (более 600 м) работали 105 шахт (48,2 %), доля которых составляла 47,9 % от всей добычи угля. На 25 шахтах (11,5 %) горные работы велись на глубинах 1000–1300 м. Ежегодно глубина разработки полезных ископаемых на шахтах увеличивается в среднем на 11–15 м. Если в 80-х годах прошлого века средняя глубина разработок составляла 557 м [22], то в 2010 г. это значение достигло 730 м. С увеличением глубины и производственной мощности значительно повышаются горное давление и газообильность угольных пластов, повышаются опасность внезапных выбросов угля, газа и породы, горных ударов, рабочая температура, осложняется обеспечение необходимого режима проветривания, подъема, водоотведения и работы рудничного транспорта, снижается общая безопасность ведения горных работ. Указанные факторы приводят к тому, что энергоемкость горных предприятий вырастает [22, 28].

Переход на более глубокие горизонты требует решения ряда вопросов технологии горного производства, создания и внедрения новых средств и мер механизации и автоматизации производственных процессов, надежного обеспечения потребителей электрической энергией с соответствующими показателями качества, повышения уровня безопасности труда. Указанных показателей можно достичь за счет обоснования оптимального класса напряжения подземной системы питания, что позволит в полном объеме и на длительный срок решить вопросы построения эффективных систем электроснабжения глубоких шахт с учетом перспектив развития горных предприятий, связанных с углублением и ростом мощности электрических нагрузок подземных электроприемников.



Целью настоящей статьи является оценка повышения энергоэффективности и надежности систем электроснабжения глубоких и энергоемких шахт на основе использования напряжения 35 кВ для питания подземных потребителей.

В условиях глубоких энергоемких угольных и рудных шахт наблюдается повышение интенсификации подземных горных работ, вызывающее дальнейший рост производительности выемочных комбайнов и других забойных машин и, следовательно, значительное увеличение общего объема потребления электрической энергии. Кроме того, углубление уровня горных выработок приводит к росту мощности насосных агрегатов [25]. Известно, что большинство современных горных предприятий тратит на подземное производство около 60 % всей потребляемой электроэнергии [28, 30].

Одним из основных направлений технического развития забойного оборудования является значительный рост энерговооруженности. Установленная мощность оборудования в высокопроизводительном очистном забое достигает 1500–2000 кВт, а мощность отдельных двигателей забойных машин превышает 400–600 кВт. Наблюдается значительный рост единичной мощности двигателей подъемных машин, вентиляторов, других машин и механизмов. В связи с этим одной из наиболее актуальных задач, стоящих перед отраслью, является экономное расходование энергоресурсов и электроэнергии и соответствующее регулирование режимов электропотребления.

Как показали исследования [7, 22, 39, 40, 50], наибольшее влияние на эффективность работы подземных потребителей оказывают отклонения и колебания напряжения. Отклонение напряжения на шинах шахтных подстанций в нормальном режиме достигает 10, а в отдельных случаях 15 % и более от номинального. Колебания напряжения на шинах 6 кВ главной понизительной подстанции (ГПП), расположенной на поверхности шахты, вызваны запуском мощных синхронных и асинхронных с короткозамкнутым ротором двигателей и неравно-

мерным режимом работы подъемных машин, мощность которых в течение одного цикла значительно меняется.

В условиях глубоких шахт затраты на построение системы электроснабжения растут в большей степени, чем производительность горизонтов и шахт, так как уровень роста электропотребления связан в первую очередь с ростом энерговооруженности труда. Таким образом, вопросы обеспечения требуемого значения напряжения питания и уровня ее изменения должны тщательно рассматриваться при разработке схем внутреннего и внешнего электроснабжения горных предприятий, при расчете шахтных сетей, выборе способа пуска двигателей, проверке возможности самозапуска и т.п. Исходя из условий обеспечения нормированного уровня напряжения необходимо принимать меры мониторинга и регулирования уровня напряжения питания подземных потребителей электрической энергии. Следовательно, необходим поиск технических решений по построению рациональной или модернизированной системы электроснабжения шахт, которые могли бы обеспечивать необходимые показатели эксплуатации электрооборудования с минимальными затратами.

Основные пути обеспечения необходимого уровня напряжения питания подземных потребителей в условиях глубоких шахт.

Предельные значения уровней и колебаний напряжения в первую очередь обеспечиваются поддержкой стабильности напряжения на шинах источника питания, входящей в обязанность энергоснабжающей организации. Все мероприятия [2, 15, 17], направленные на снижение негативного влияния изменения напряжения, можно условно разделить на три группы:

- 1) меры, направленные на изменение работы устройств генерации;
- 2) меры, позволяющие регулировать параметры напряжения при изменении режима работы потребителей;
- 3) мероприятия, направленные на снижение потерь напряжения за счет повышения пропускной способности сети.



Для условий угольных и рудных шахт следует говорить о получивших распространение второй и третьей группах мероприятий.

Ко второй группе мероприятий относится централизованное регулирование напряжения трансформаторов ГПП шахты. Оно обеспечивается применением устройств регулирования напряжения под нагрузкой (РПН) с рабочим диапазоном до 15–20 %. Эффективность данного мероприятия характеризуется не только ограничением уровня отклонений напряжения в допустимых пределах, но и расходом электроэнергии. Как низкие, так и повышенные уровни напряжения на шинах ГПП, помимо снижения надежности системы электроснабжения, могут вызвать и дополнительные потери мощности, и чрезмерное потребление электрической энергии. При таком способе регулирования необходимо помнить, что отклонение напряжения на шинах ГПП влияет на качество потребляемой электрической энергии большого количества различных приемников, расположенных как на поверхности, так и в подземных выработках шахты. Эти электроприемники могут отличаться по допустимым значениям отклонения напряжения в зависимости от режима работы и их индивидуальных характеристик [12, 13, 46].

В центре электрических нагрузок (ЦЭН) шахты (как правило, ее ГПП) и в узлах нагрузки есть определенная совокупность электроприемников с различными технологическими режимами работы и графиками электропотребления. Общий регулирующий эффект узла нагрузки зависит от статических характеристик отдельных приемников электрической энергии и их взаимовлияния и определяется по соответствующим методикам. В качестве регулирующих устройств используются вольтодобавочные трансформаторы (линейные регуляторы) и другие средства регулирования [21, 24, 33]. Большое внимание должно быть уделено мерам по поддержанию стабильности напряжения и уменьшению уровня его колебаний непосредственно в шахтных сетях, а также повышению эффек-

тивности использования горных машин и комплексов. К этим мерам относятся:

1) применение средств автоматического регулирования напряжения трансформаторов при использовании нерегулируемого привода в качестве нагрузки с учетом особенностей мощных асинхронных двигателей, работа которых особенно зависима от напряжения в сетях;

2) применение регулируемого привода для забойных машин, который оказывает меньшее влияние на эксплуатационные параметры сети, что требует значительных затрат;

3) выбор технологического оборудования и электроприводов в соответствии с мощностью нагрузки и режима работы. Успешность этого мероприятия в значительной степени зависит от опыта и интуиции проектировщика и значительно изменяется в процессе эксплуатации;

4) упорядочение технологического процесса для обеспечения равномерного графика нагрузки в течение смены и суток. Для реализации мероприятия необходима оснащенность системы электроснабжения горного предприятия соответствующими средствами технического мониторинга, работа которых связана с эффективными мерами энергоменеджмента и диспетчеризации системы.

Эффективность реализации методов второй группы в условиях шахты можно реализовать на основе расчета параметров питающей сети отдельного объекта. Так, при применении в качестве основного класса подземной шахтной сети напряжения 6 кВ необходимо выполнять оценку степени изменения напряжения у потребителей соответствующего горизонта [23, 48]. Уровень отклонения напряжения в такой питающей сети может быть определен с помощью построения эпюры отклонения напряжения, и общие потери напряжения определяются выражением:

$$\Sigma \Delta U = \Delta U_{\text{вл}110} + \Delta U_{\text{тр.гпп}} + \Delta U_{\text{рба}} + \Delta U_{\text{кл6}} + \Delta U_{\text{тр.упп}}, \quad (1)$$

где $\Delta U_{\text{вл}110}$ – потери напряжения в воздушной линии (110 кВ) внешнего электроснабжения; $\Delta U_{\text{тр.гпп}}$ – потери напряжения в трансформаторе ГПП; $\Delta U_{\text{рба}}$ –



потери напряжения в токоограничивающем реакторе (при наличии); $\Delta U_{\text{клб}}$ – потери напряжения в кабельной линии, питающей потребителей подземной системы электроснабжения; $\Delta U_{\text{тр.упп}}$ – потери напряжения в трансформаторе участковой подстанции.

Имея в системе трансформаторы, можно автоматически (при наличии РПН) или стационарно (трансформаторы без РПН) частично компенсировать потери напряжения в элементах питающей сети. Увеличение напряжения на выходе соответствующих трансформаторов, не оборудованных специальными средствами регулирования напряжения, возможно на уровне 5 %. Для таких условий выражение для определения уровня напряжения у потребителя с учетом возможной компенсации потерь напряжения будет иметь вид

$$U_{\text{ном}} = U_{\text{ин}} - \Delta U_{\text{вл110}} - \Delta U_{\text{тр.гпп}} + \Delta E_{\text{тр.гпп}} - \Delta U_{\text{рба}} - \Delta U_{\text{клб}} - \Delta U_{\text{тр.упп}} + \Delta E_{\text{тр.упп}}, \quad (2)$$

где $U_{\text{ном}}$ – напряжение источника питания; $\Delta E_{\text{тр.гпп}}$, $\Delta E_{\text{тр.упп}}$ – увеличение напряжения на трансформаторах ГПП и УПП соответственно.

Поскольку возможный уровень регулирования напряжения на трансформаторах ограничен превышением номинального значения на 5%, можно сделать вывод, что для условий глубоких шахт и мощных удаленных подземных потребителей обеспечить необходимое качество напряжения (особенно при отсутствии РПН) названными средствами проблематично.

К третьей группе мероприятий относится комплекс технических решений, направленных на совершенствование линий подземной системы питания и распределения [18, 22, 49]. Уменьшение уровня потерь напряжения в линиях обеспечивается увеличением их пропускной способности в процессе проектирования несколькими технически возможными путями, из которых основными являются:

1) замена питающих линий кабелями большего сечения;

2) увеличение количества питающих кабелей;

3) компенсация реактивной мощности (поперечная компенсация) в нерегулируемых приводах с постоянным режимом работы;

4) продольная компенсация реактивных параметров линии;

5) использование более высокого класса напряжения для распределительной сети.

Увеличение пропускной способности кабельных линий за счет первого и второго способов целесообразно только для шахт, выработки которых проходят реконструкцию или проектируются. Замена питающих кабелей кабелями большего сечения связана с большим расходом цветного металла, а прокладка новых линий электропередачи (стволовых кабелей) требует больших капитальных вложений и поэтому может быть рекомендована только в тех случаях, когда повысить пропускную способность существующих линий другим путем не удастся.

Компенсация реактивной мощности в системах внутреннего электроснабжения является обязательным мероприятием повышения пропускной способности в сетях промышленных предприятий. Не являются исключением и подземные распределительные сети горных предприятий. Отсутствие этого мероприятия приводит к загрузке кабелей распределительной сети реактивной составляющей рабочего тока. Кроме того, компенсация реактивной мощности позволяет снизить потери электрической энергии, повысить общий коэффициент мощности сети и уменьшить отклонения напряжения у потребителя. Включение или выключение секций конденсаторных установок (КУ) приводит к изменению уровня отклонения напряжения в месте ее присоединения на величину, % [18, 50]:

$$\Delta u_{\text{ку}} = \frac{X_c Q_{\text{ку}}}{10UU_{\text{ном}}}, \quad (3)$$

где X_c – индуктивное сопротивление внешней сети по отношению к месту присоединения КУ; U – значение напряжения в месте присоединения КУ (до его



регулирования); $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение сети; $Q_{\text{ку}}$ – мощность конденсаторной установки.

Расчеты и опыт [23, 51] показали целесообразность применения поперечной компенсации в шахтных сетях. Лучшая эффективность их использования достигается в сети низкого напряжения, где участковые сети являются достаточно длинными и с подключенными мощными потребителями. В высоковольтных подземных сетях эффективность такой меры снижается из-за незначительного регулирующего эффекта (по напряжению) и наличия большого количества потребителей с высоким коэффициентом мощности (мощные насосные установки, вентиляторы и др.) [8].

Использование повышенного напряжения в распределительных подземных сетях шахт также может быть довольно эффективной мерой. На сегодня завершён перевод высоковольтных подземных распределительных сетей всех отечественных шахт из класса напряжения 3 кВ до 6 кВ, довольно значительное количество угольных и рудных шахт получает питание по схеме «глубокого ввода» с напряжением 35, 110 и 220 кВ. Научной и технической общественностью не обсуждается проблема применения напряжения более 6 кВ для внутришахтных распределительных сетей [20]. Это связано в первую очередь, с требованиями действующих правил безопасности и недостаточным техническим обоснованием перевода подземной сети на более высокие классы напряжения.

Одним из компромиссных вариантов, имеющих незначительные капитальные расходы, является обеспечение соответствующего качества напряжения за счет применения продольной компенсации в подземной сети [21].

Обеспечение необходимого уровня рабочего напряжения подземной сети за счет продольной компенсации.

В условиях горных предприятий, отдельные потребители которых имеют резкопеременные нагрузки, для относительной стабилизации уровня рабочего напряжения целесообразно использова-

ние продольной емкостной компенсации, что обеспечивается последовательным включением к питающей линии батареи конденсаторов. Это мероприятие было впервые предложено Р. Рюденбергом [46] и за годы эксплуатации доказало свою эффективность. Устройства продольной емкостной компенсации (ПЕК) способны несколько улучшить показатели качества напряжения: уменьшить колебания напряжения питания, снизить коэффициент несимметрии и даже повысить уровень напряжения. Они имеют по сравнению с другими средствами стабилизации напряжения определенные преимущества: установленная мощность ПЕК меньше мощности других устройств компенсации, незначительные удельные потери активной мощности и простота в эксплуатации. К недостаткам ПЕК следует отнести трудности обеспечения защиты конденсаторных батарей установок от токов коротких замыканий, появления в переходных режимах субгармонических колебаний токов и напряжений и т.п.

В условиях использования ПЕК для подземных ствольных сетей отдельного горизонта сопротивление емкости конденсаторов компенсирует (частично или полностью) или даже перекомпенсирует индуктивное сопротивление линии, вследствие чего в ней уменьшается потеря напряжения. Схема электроснабжения глубокого горизонта с использованием установки ПЕК приведена на рис. 1.

Напряжение на шинах ЦПП, значение которого обеспечивается последовательно включенными в цепи питания конденсаторами, пропорционально значению тока нагрузки и меняется практически безынерционно при его изменении. Это обстоятельство определяет особую эффективность последовательного включения конденсаторов при колебаниях нагрузки (при частых пусках двигателей с большими пусковыми токами, при работе сварочных агрегатов и т.д.) для снижения колебаний напряжения [5, 12].

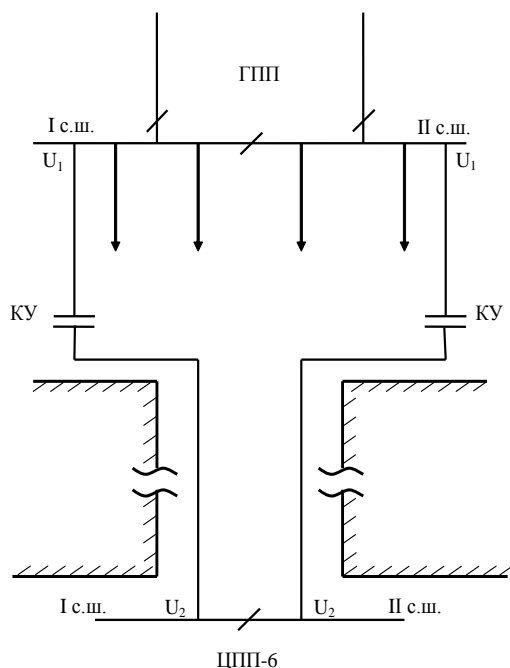


Рис. 1. Электроснабжение глубокого горизонта с установкой ПЕК

Реактивное сопротивление конденсаторов в этом случае компенсирует не только индуктивное сопротивление линии, но и в некоторой степени падение напряжения на активном сопротивлении:

$$\Delta U = \sqrt{3} I_n \cdot R_{\text{ЛЭП}} \cdot \cos \phi + \sqrt{3} I_n \cdot X_{\text{ЛЭП}} \cdot \sin \phi - \sqrt{3} I_n \cdot X_{\text{КУ}} \cdot \sin \phi. \quad (4)$$

При включении компенсирующего устройства, имеем «прибавку» напряжения ΔU (рис. 2) на зажимах электроприемника, причем при соответствующих параметрах можно обеспечить превышение напряжения у потребителя над напряжением источника питания.

Использование класса напряжения 35 кВ для питания потребителей глубоких горизонтов угольных и рудничных шахт.

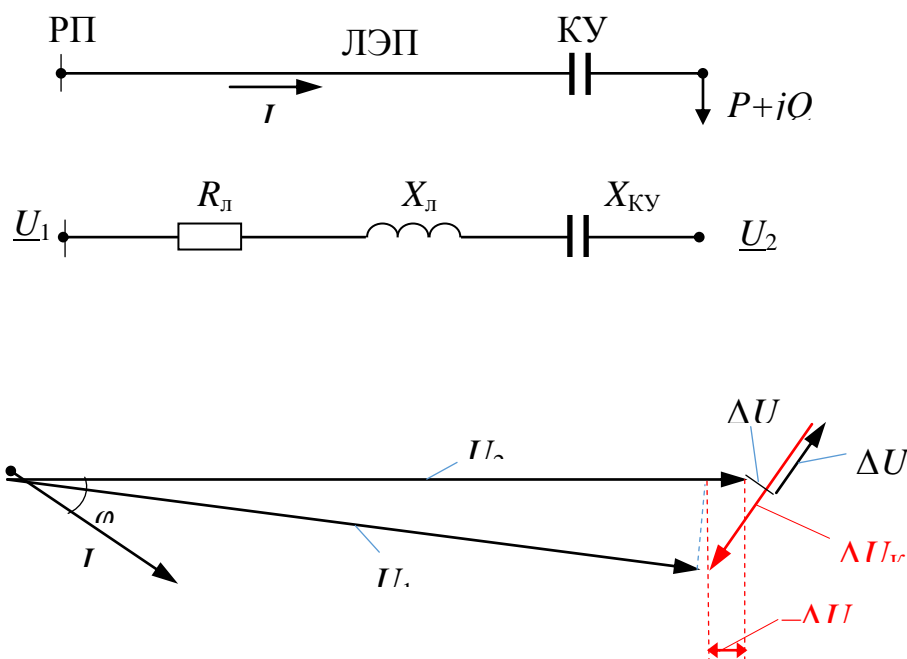


Рис. 2. Принцип повышения напряжения у потребителя методом продольной компенсации

В последнее десятилетие ряд рудных и угольных шахт уже осуществляют добычу полезных ископаемых на горизонтах более 1000 м. Это обстоятельство повлияло на увеличение уровня электрических нагрузок, и в ближайшее время таким предприятиям необходимо оценить возможности существующей системы электроснабжения с точки зрения ее пропускной способности при одновременном

обеспечении необходимого качества электроэнергии. Следует определить пропускную способность ствольных кабелей к конкретным горизонтам с учетом параметров существующих кабелей без их усиления или замены. Анализ результатов исследований показывает, что для горизонта глубже 1000 м, напряжения 6 кВ для подачи электроэнергии на горизонт оказывается недостаточно, поскольку



ку больше половины допустимой потери напряжения приходится на ствольные кабели, а еще предполагается многокилометровая передача электроэнергии распределительными сетями горизонта.

В практике проектирования систем электроснабжения шахт известны варианты сравнения уровней напряжения, превышающих принятые 6 кВ, даже для распределительных сетей [1, 19, 27, 28]. Полученные результаты показывают перспективность такого мероприятия в плане снижения потерь, уменьшения сечения и количества ствольных кабелей и т.п. Поэтому вариант с использованием глубокого ввода напряжения 35 кВ для соответствующих условий подземного электроснабжения предполагает значительный экономический эффект. Однако для принятия окончательного решения по введению под землю напряжения 35 кВ и эксплуатации электротехнического оборудования и кабельных сетей на 35 кВ в шахтах необходим анализ действующих нормативно-правовых документов [24, 25].

Согласно нормативным материалам, действующим в горнорудной отрасли, в подземных выработках рудничных предприятий должны применяться электрические машины, трансформаторы, аппараты и приборы только в рудничном исполнении, которые удовлетворяют требованиям Правил изготовления взрывозащищенного и рудничного электрооборудования. Допускается к освоению выпуск электрооборудования в рудничном исполнении для употребления в шахтах электрооборудования в нормальном (не рудничном) исполнении (закрытом, защищенном). Однако в соответствии с указанными документами для питания стационарных приемников электрической энергии, передвижных подстанций, а также при проходке стволов допускается применение напряжения не выше 6000 В, а для стационарных подземных подстанций допускается с разрешения органов Госгортехнадзора использование напряжения до 10 000 В.

На основании результатов исследований, выполненных в Национальном горном университете Украины, при реконструкции системы подземного электроснабжения глубокой шахты с целью дальнейшего развития предприятия и разработки горизонтов на глубине 1000 м и более рекомендуется рассмотреть вариант применения класса напряжения 35 кВ [34–36]. Электроснабжение глубокого горизонта шахты предлагается осуществлять по схеме глубокого ввода напряжением 35 кВ с установкой подземной подстанции 35/6 кВ с последующим распределением электроэнергии по горизонту напряжением 6 кВ.

Для определения экономически целесообразного напряжения системы электроснабжения шахты при определенной передаваемой мощности и протяженности кабелей следует провести расчет стоимостных показателей элементов системы (кабелей, электродвигателей, трансформаторов и т.д.) 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 одинаковых нагрузках, коэффициенте мощности, материале и сечении токоподводящих жил при повышении напряжения линии с $U_{н1}$ до $U_{н2}$ получим соответствующие соотношения потерь напряжения и потерь мощности:

$$\frac{\Delta U_2}{\Delta U_1} = \frac{U_{н1}}{U_{н2}}, \quad \frac{\Delta P_2}{\Delta P_1} = \left(\frac{U_{н1}}{U_{н2}} \right)^2,$$

где ΔU_1 , ΔP_1 , ΔU_2 , ΔP_2 — потери напряжения и мощности соответственно при номинальных напряжениях $U_{н1}$ и $U_{н2}$.

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 потерь мощности в шахтных кабельных сетях при неизменных параметрах системы

$U_{н1}, \text{кВ}$	$U_{н2}, \text{кВ}$	$\frac{\Delta U_2}{\Delta U_1}, \%$	$\frac{\Delta P_2}{\Delta P_1}, \%$
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 %.

Вариант применения напряжения 35 кВ для подземного электроснабжения [36, 48] обусловлен уровнем ожидаемых электрических нагрузок, которые могут быть обеспечены развитием шахты, глубиной расположения электроприемников (с учетом расстояния от источника к

стволу на поверхности и от ствола в камеру подстанции под землей) и сосредоточением основных по мощности и ответственности электроприемников в районе ствола (рис. 3). Кроме того, такой вариант предусматривает дальнейшую перспективу развития шахты и исключает влияние (и связь в нормальном режиме эксплуатации) существующей системы подземного электроснабжения шахты в случае реконструкции [14, 47].

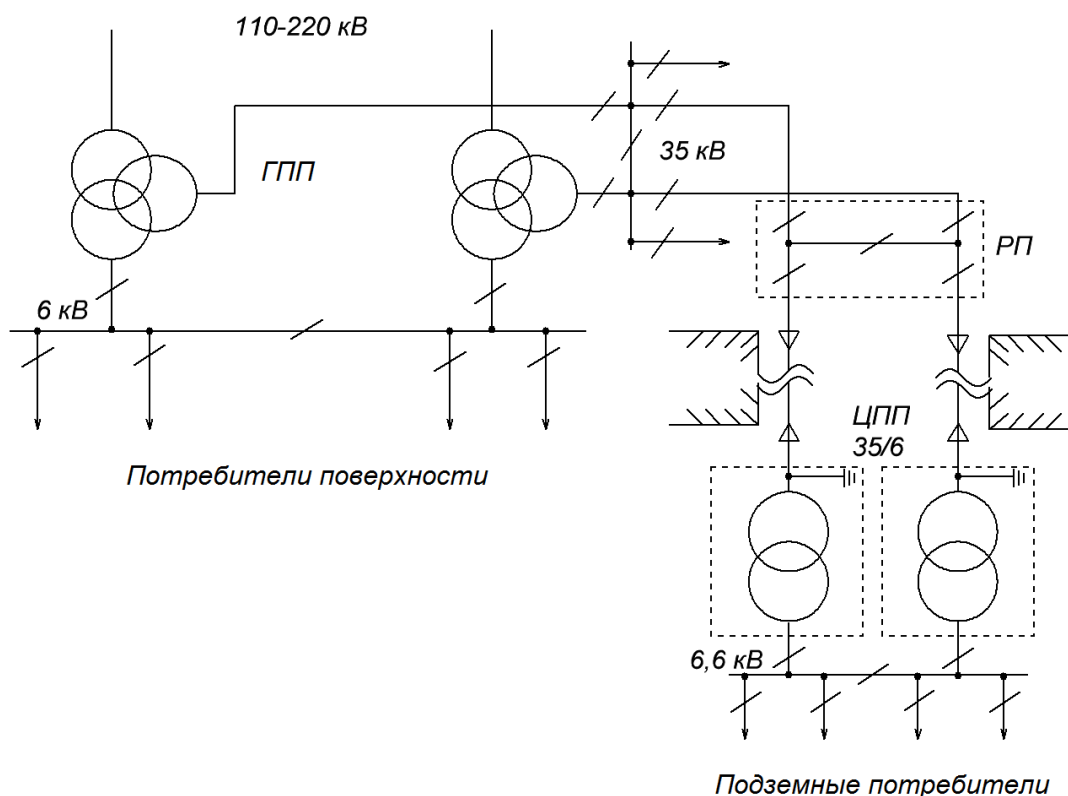


Рис. 3. Принципиальная схема питания подземных трансформаторов 35/6 кВ по схеме блока линия – трансформатор

Принципиальную схему питания подземных трансформаторов 35/6 кВ предлагается реализовать по схеме блока линия – трансформатор (рис. 3), что позволит исключить необходимость уста-

новки на подземной подстанции как минимум трех (вводных и секционной) распределительных ячеек 35 кВ в рудничном исполнении. Последнее будет способствовать как снижению капитальных затрат,

так и повышению надежности системы хотя бы за счет уменьшения элементов системы. Дальнейшее использование класса напряжения 6 кВ (после ЦПП 35/6 кВ) для внутришахтного высоковольтного электроснабжения будет способствовать обеспечению (при необходимости) резервирования питания электроприемников соседних горизонтов [15, 42].

При выполнении реконструкции существующей системы подземного электроснабжения следует помнить, что внедрение напряжения 35 кВ не повлияет на работу высоковольтной распределительной сети напряжением 6 кВ. Такой вариант (рис. 4) предусматривает дальнейшую перспективу развития шахты и исключает взаимное влияние существующей системы подземного электроснабжения шахты (до реконструкции) и высоковольтных распределительных сетей глубоких горизонтов. Кроме того, такой подход к реконструкции системы электроснабжения не требует замены электрооборудования, подключенного к

классу напряжения 6 кВ существующей сети.

Существенным фактором является разработка новых принципов поиска оптимальной глубины размещения подземной подстанции глубокого ввода. Это будет способствовать снижению общих затрат на реализацию варианта использования напряжения 35 кВ для подземных питающих сетей и, как следствие, повышению энергоэффективности предприятий в целом.

Выбор целесообразного места расположения шахтной подземной подстанции 35/6 кВ в условиях глубоких и энергоемких шахт позволяет не только снизить общие расходы на эксплуатацию сети (при соответствующих показателях качества электрической энергии), но также обеспечивает опускание точки раздела классов напряжения (и токовых нагрузок) на соответствующую глубину, таким образом сокращая общую длину распределительной шахтной кабельной сети напряжением 6 кВ.

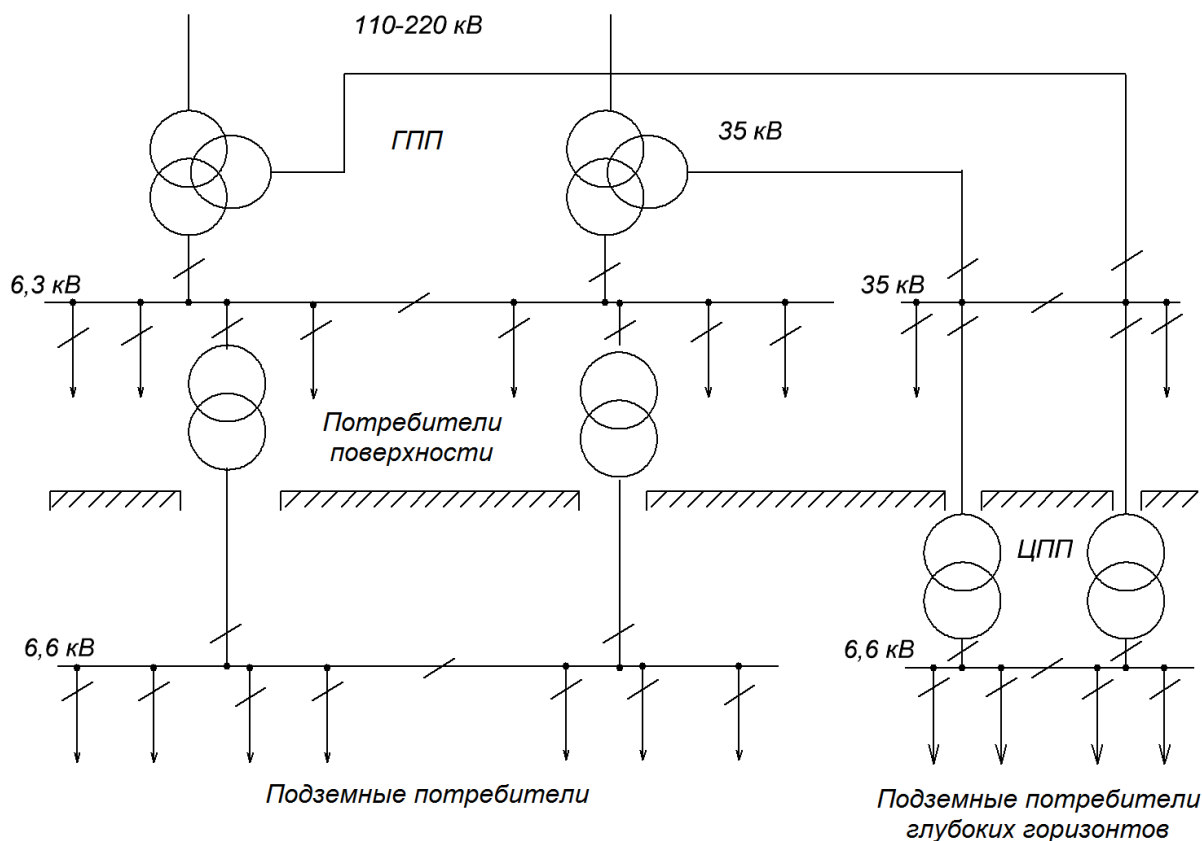


Рис. 4. Принципиальная схема питания подземных потребителей для шахт, которые проходят реконструкцию



Определять центр электрических нагрузок (ЦЭН) возможно по различным критериям. При пространственном определении ЦЭН местоположение ЦПП можно определить по координатам [37]

$$X_{\text{ц}} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i x_i}{\sum_{i=1}^n P_i}; Y_{\text{ц}} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i y_i}{\sum_{i=1}^n P_i};$$

$$Z_{\text{ц}} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i z_i}{\sum_{i=1}^n P_i}. \quad (5)$$

Из-за нехватки открытого пространства для размещения подстанции необходима разработка инструментария определения рационального места расположения ЦПП. Следует сказать, что с учетом указанных факторов решающим для определения местоположения подземной подстанции напряжением 35/6 кВ является определение координаты $Z_{\text{ц}}$ по выражению (5).

Одним из важных вопросов обеспечения безопасности и эксплуатационной надежности системы высоковольтного электроснабжения подземных потребителей является ограничение (подавление) внутренних перенапряжений [6, 25]. Проблема осложняется тем, что шахтная сеть напряжением 35 кВ имеет гальваническую связь с разветвленной сетью 35 кВ поверхности, которая выполнена в основном в виде воздушных ЛЭП и работает с полностью изолированным от земли режимом нейтрали [9, 45].

К недостаткам сетей с 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 [26, 27]. Кроме того, основной причиной ложных срабатываний за-

щит 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 [42].

Сравнение вариантов электроснабжения подземных потребителей шахт напряжением 6, 10 и 35 кВ по техническим показателям.

Система электроснабжения подземных потребителей является одним из основных критериев целесообразности (возможности) применения и эффективного использования нового горного технологического оборудования особенно для условий глубоких и энергоемких шахт. В настоящее время для подземных высоковольтных распределительных сетей применяется напряжение 6 кВ. С ростом мощности строящихся шахт, и особенно с увеличением общей мощности электродвигателей на проходческих и добычных участках, осложняется стволовая и подземная кабельная сеть (приходится увеличивать сечения жил кабелей и прокладывать параллельные линии), что вызывает увеличение капиталовложений в подземную систему электроснабжения и рост потерь электроэнергии. В условиях энергоемких шахт приходится прокладывать в стволе большое количество параллельных кабелей, число которых на некоторых шахтах доходит до 4–5, а на гидрошахтах до 10 и больше [5, 50].

Через существующие ограничения относительно максимального сечения жил проложенных кабелей (до стационарных распределительных пунктов – 240 мм², до передвижных распределительных подстанций – 95 мм²) передача мощности даже при 5 МВА с выполнением требований к качеству электроэнергии и использованием напряжения 6 кВ является достаточно сложной задачей. Указанные обстоятельства приводят к применению ненадежного и опасного в эксплуатации многократного секционирования подземных подстанций. Так, из приведенных в [14, 25] сведений известно, что увеличение количества стволовых



кабелей до 8–14 вызывает трудности не только в построении надежных схем питания ЦПП и прокладке кабелей, но и существенно снижает надежность электроснабжения и усложняет эксплуатацию.

В соответствии с требованиями [8, 37] все проложенные в стволе кабели для питания ЦПП должны постоянно находиться под нагрузкой. Для питания ЦПП необходимо проложить не менее двух рабочих кабелей, прокладка резервных кабелей запрещена. При использовании трех ствольных кабелей напряжением 6 кВ возможны разнообразные варианты схем питания ЦПП, которые существенно отличаются количеством используемых вводных и секционных ячеек. При проектировании питания ЦПП, в том числе для глубоких шахт, необходимо использовать схему с двумя вводами на каждый РП. В условиях глубоких шахт при передаче электрической энергии напряжением 6 кВ на значительное расстояние (длина отдельных линий в выработках достигает 5 км) значительно возрастают потери напряжения и снижается качество электрической энергии.

Пропускную способность шахтных сетей целесообразно повышать двумя путями: использованием сдвоенных кабельных линий и увеличением максимального сечения ствольных кабелей. Использование таких мер позволяет увеличить пропускную способность примерно в два раза, упростить существующую схему ЦПП за счет уменьшения количества вводных и секционных ячеек, уменьшается также количество резервных комплектных распределительных устройств.

Недостатком такой системы является то, что линия рассматривается как одна, и поэтому должна иметь 100 % резервирования. Кроме того, увеличивается вероятность повреждения сдвоенных линий. Увеличение пропускной способности за счет изменения площади сечения кабеля ограничено типами существующих КРП и усложняется монтаж кабелей в стволе из-за роста их массы.

Из-за увеличения общей суммарной длины кабельных линий возникает зна-

чительное количество отказов в высоковольтной распределительной сети – частота отказов в кабельной линии напряжением 6–10 кВ длиной 6 км составляет $0,6 \text{ ч}^{-1}$ [51]. Повысить указанные показатели можно только за счет разработки новых принципов построения и реконструкции систем электроснабжения глубоких и энергоемких производств.

Согласно [26] в подземной сети напряжением 6 кВ при сопротивлении контура заземления 2 Ом и напряжении прикосновения 30 В предельно допустимая емкость не должна превышать 4,6 мкФ на фазу. Поэтому общая длина высоковольтной кабельной сети, выполненной кабелями ВБ, СБГ, ЦСКН, ЦСКл при условии безопасной эксплуатации, не должна превышать 24 км. Широкое использование в последнее время кабеля типа ЭВТ, который имеет вдвое большую емкость [32] по сравнению с названными марками кабелей, дополнительно приводит к сокращению общей длины шахтной кабельной сети.

В работах [22, 28, 39] отмечена необходимость применения уровня напряжения 10–20 кВ для высоковольтной распределительной сети строящихся шахт. ИГД им. Скочинского, Днепрогипрошахт, МакНИИ и МГГУ обосновывали целесообразность использования класса напряжения 10 кВ в условиях подземных высоковольтных распределительных сетей, а также питания мощных приемников электрической энергии [4, 25, 39]. Это предложение позволяет сократить количество ствольных кабелей с 10–12 до 4–6, улучшить условия пуска мощных электродвигателей стационарных установок (прежде всего водоотлива), повысить показатели качества напряжения в подземной системе электроснабжения, улучшить эффективность использования и надежность оборудования.

С участием Днепрогипрошахт был разработан проект системы электроснабжения одной из шахт с использованием класса напряжения 10 кВ [50]. Особым преимуществом такого технического решения стало достижение стабильности напряжения даже в самых отдаленных



участках распределительной сети. Существенно увеличился пусковой момент (примерно на 20 %) мощных стационарных двигателей, что не вызвало критического снижения напряжения при их запуске под нагрузкой и связанного с этим отключения устройствами управления и защиты.

Использование класса напряжения 10 кВ вместо 6 кВ для подземных распределительных сетей требует разработки на это рабочее напряжение комплекса оборудования во взрывозащищенном исполнении (кабели, КРУ, трансформаторы, мощные двигатели и т.д.). Переход на 10 кВ может быть эффективным только за счет увеличения допустимой мощности КЗ с 50–75 МВА до 100–150 МВА, что требует принципиально нового подхода в разработке средств защиты. Решающее значение в таком случае приобретает координация номинальных напряжений системы внутреннего электропитания шахты и ее потребителей. Например, использование трансформаторов 10/6 кВ в забоях для питания мощных потребителей значительно снижает область применения класса напряжения 10 кВ.

Несмотря на отмеченные преимущества использования напряжения 10 кВ в распределительной сети угольных и рудных шахт, этот подход выглядит неперспективным в силу тенденции роста мощностей технологического оборудования, увеличения объема потребления электрической энергии и нарастающего роста глубины залегания обрабатываемых горизонтов как рудных, так и угольных шахт. В связи с этим дополнительного внимания заслуживает вариант использования глубокого ввода напряжения 35 кВ для питания подземных потребителей шахт. При таком подходе не сказываются существенные ограничения по уровню пропускной способности ствольных кабелей. Основными проблемами при использовании этого подхода являются наличие (разработка) подземных трансформаторных подстанций 35/6 кВ во взрывозащищенном исполнении, а также наличие (разработка) соответствующих технических средств защиты для обеспече-

ния соответствующего уровня безопасности при использовании класса напряжения 35 кВ. Дополнительными преимуществами использования указанного подхода является обеспечение независимого питания потребителей подземной системы электроснабжения без установки разделительных трансформаторов, а также перенос границы раздела с ГПП в ЦПП, что позволяет снизить суммарную длину кабелей питания на несколько километров. Кроме того, использование трансформаторов 35/6 кВ на ЦПП позволит ограничить ток КЗ до приемлемого уровня и отказаться от токоограничивающих реакторов, что будет способствовать повышению надежности и безопасности обслуживания подземной сети.

Технико-экономический сравнительный анализ вариантов электроснабжения при классах напряжения 6, 10 и 35 кВ необходимо проводить также с учетом качественных показателей, не имеющих стоимостной оценки. Качественные показатели варианта являются лучшими, если:

- при работе в электросети возникают небольшие колебания напряжения;
- уменьшаются потери напряжения;
- упрощается монтаж и эксплуатация сетей подземной системы электроснабжения;
- упрощается реконструкция сети (при необходимости увеличения производственной мощности).

При выполнении анализа необходимо учитывать, что в качестве напряжения питающей сети целесообразно использовать класс напряжения соответствующего стандартного ряда: 6, 10 и 35 кВ. Использование класса напряжения 20 кВ не является целесообразным из-за отсутствия необходимого оборудования отечественного производства (в первую очередь двигателей и трансформаторов).

Сначала выполняется оценка влияния «технических факторов» к которым относятся: качество напряжения у потребителей электрической энергии, надежность системы электроснабжения, анализ пропускной способности соответствующей



щих распределительных сетей [17, 21]. Для выполнения анализа пропускной способности кабельных линий основным показателем является значение передаваемой полной мощности при заданном уровне потерь напряжения и номинальном напряжении. Следует, однако, учитывать, что конструкция кабеля предопределяет особое значение для него эффекта близости, дополнительных потерь мощности и других явлений, характерных для передачи переменного тока.

Выполненные расчеты и их анализ показывают, что для рабочего горизонта, который расположен на глубине более 1000 м, при существующих уровнях электрических нагрузок использование напряжения 6 кВ не является эффективным, поскольку больше половины допустимой потери напряжения приходится на ствольные кабели, а еще предполагается многокилометровая передача электроэнергии распределительными сетями горизонта. Таким образом, обеспечение соответствующего уровня пропускной способности ствольных кабелей подземной системы электроснабжения побуждает к поиску технических решений по изменению существующих принципов построения систем внутреннего электроснабжения горных предприятий. Исходя из результатов выполненных исследований можно сделать вывод, что повышение пропускной способности ствольных кабельных сетей шахт за счет увеличения рабочего напряжения является единственным технически возможным вариантом.

Такая ситуация сложилась в первую очередь из-за ограничений допустимого сечения токопроводящих жил кабельных линий до 240 мм² и значительного количества параллельных кабельных линий из-за дефицита пространства в стволе шахты. Пропускная способность сети при переводе на повышенное напряжение пропорциональна увеличению напряжения. При этом несколько снижаются допустимые токовые нагрузки кабелей в связи с увеличением толщины изоляции и ухудшением условий охлаждения токопроводящих жил.

Следующим шагом реализации процесса перевода подземных высоковольтных электрических сетей на более высокий класс напряжения и его применение являются оценка и решение вопросов обеспечения безопасности применения напряжения 35 кВ в условиях рудных и угольных шахт. Все многообразие вопросов, связанных с обеспечением соответствующего уровня безопасности использования напряжения 35 кВ в подземном электроснабжении, в общем случае можно разделить на две, возможно, неравнозначные группы:

- разработка пакета нормативных (инструктивных) материалов по безопасности применения напряжения 35 кВ для систем электроснабжения подземных потребителей на стадии проектирования, строительства и эксплуатации указанных систем;

- разработка организационно-технических мероприятий и схемных решений; специального силового электрооборудования, устройств управления, контроля и защиты, предназначенных для выполнения требований нормативных (инструктивных) материалов по безопасности применения напряжения 35 кВ в подземном электроснабжении.

Успешность применения этого класса напряжения в первую очередь определяется возможностью решения дополнительных технических задач, связанных с обеспечением соответствующих условий электро- и пожаробезопасности в подземных выработках [16, 29, 41, 44, 54, 58], а именно: минимизацией влияния параметров и режимов работы электрических сетей напряжением 35 кВ поверхности на эксплуатационные характеристики внутришахтных сетей и оборудования; непрерывным контролем состояния изоляции относительно земли электрической сети напряжением 35 кВ или как минимум ЛЭП, питающих подземные потребители; уменьшением значений аварийных токов при замыканиях на землю и снижением уровня внутренних и феррорезонансных перенапряжений в шахтных сетях напряжением 35 кВ за счет оптимизации режима нейтрали и повышения



уровня их безопасности путем защитного заземления (закорачивания) поврежденной фазы, разработкой эффективных систем защиты от аварий, употреблением электротехнических изделий с соответствующей степенью защиты (IP 44 или IP 54) и др.

Для применения класса напряжения 35 кВ в условиях подземных сетей выполнен анализ существующих промышленных образцов основных элементов подземной системы электроснабжения, а именно силовых кабелей, трансформаторов и распределительных ячеек в соответствующем исполнении, что позволяет сделать вывод о возможности применения рассматриваемого способа изменения архитектуры сети уже сегодня. Установлено, что для указанных целей могут применяться (как пример) трехфазные или однофазные кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена; для подземных трансформаторных подстанций 35/6 кВ – сухие трансформаторы RESIBLOC [34], изготавливаемые фирмой АВВ, сухие трансформаторы с литой изоляцией SEA серии TTR и сухие трансформаторы итальянской компании GBE с изоляцией из литой смолы [35]; для применения высоковольтных ячеек напряжением 35 кВ и степенью защиты не ниже IP 54 – комплектная распределительная установка в элегазовой изоляции (моноблок) серии «FLUSARC» («ФЛУСАРК»), предназначена для приема и распределения электрической энергии трехфазного переменного тока с номинальным напряжением 36 кВ [53, 57].

Выводы

1. Применение напряжения 35 кВ в системе подземного электроснабжения угольных и рудных шахт становится целесообразным при глубине залегания рабочих горизонтов более 1000 м и общей нагрузке подземных потребителей не менее 10 МВ·А на уровне ствольных кабелей с последующим распределением электроэнергии по горизонтам классическими методами напряжением 6 кВ, что обеспечит качество, надежность и экономичность систем электроснабжения глубоких энергоемких шахт.

2. Перенос границы применения напряжения 35 кВ системы электроснабжения шахты с поверхности в подземные выработки позволило существенно улучшить показатели качества напряжения, надежности и экономичности системы за счет токовой разгрузки наиболее критичного звена шахтной сети, каковыми являются ствольные кабели.

3. Анализ основных параметров и характеристик электротехнического высоковольтного рудничного электрооборудования отечественного и зарубежного производства дает основания считать, что параметры и характеристики электрооборудования в рудничном исполнении позволяют реализовать вариант системы электроснабжения шахты по схеме глубокого ввода напряжения 35 кВ на глубокие горизонты шахты и размещение подстанции 35/6 кВ на рабочем горизонте.

Библиографический список

1. Аспекти енергоефективності залізорудних підприємств. Монографія [Текст] / Гузов Е.С. та ін. – Кривий Ріг, 2017. – 240 с.
2. Баркан, Я.Д. Автоматизация регулирования напряжения в распределительных сетях [Текст] / Под ред. Н.А. Мельникова – М.: Энергия, 1971. – 232 с.
3. Белых, Б.П. Электрические нагрузки и электропотребление на горнорудных предприятиях. / Б.П. Белых, И.С. Свердель, В.К. Олейников – М.: Недра, 1971. – 247 с.
4. Беляк В.Л., Плащанский Л.А. Увеличение напряжения участковых сетей как способ повышения эффективности использования горных машин в высокопроизводительных забоях угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. № 9.
5. Грейсух, М.В. Электроснабжение угольных и рудных шахт [Текст] / М.В. Грейсух, Л.Н. Кутовой – М.: Недра, 1965. – 360 с.
6. Зархи, И.М. Внутренние перенапряжения в сетях 6–35 кВ [Текст] / И.М. Зархи, В.Н. Мешков, Ф.Х. Халилов и др. – Изд-во «Наука», Ленинградское отд-ние, 1986. – 128 с.
7. Застосування напруги 35 кВ для систем електропостачання підземних електроприймачів глибоких енергоємних шахт [Текст] / Ф.П. Шкрабець, О.В. Остапчук // Науковий вісник НГУ. – 2013. – № 1. – С. 83-90.



8. Инструкция по проектированию электроустановок угольных шахт, разрезов, обогатительных и брикетных фабрик [Текст]. – М.: Минтопэнерго РФ, 1993. – 115 с.
9. Колосюк В.П. Техника безопасности при эксплуатации рудничных электроустановок [Текст] / В. П. Колосюк – М.: Недра, 1987. – 407 с.
10. Кудрин Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий: учеб. для вузов [Текст]. – М.: Изд-во МГГУ, 2007.
11. Макаров, М.И. Надежность электроснабжения забоев угольных шахт [Текст] / М.И. Макаров, А.А. Бочаров – К.: Техніка, 1985. – 184 с.
12. Маркушевич, Н.С. Регулирование напряжения и экономия электроэнергии [Текст] / Н.С. Маркушевич – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 104 с.
13. Миновский, Ю.П. Эффективность электроснабжения забоев угольных шахт [Текст] / Ю.П. Миновский – М.: Недра, 1990. – 158 с.
14. Муравьев, В.П. Надежность систем электроснабжения и электрооборудования подземных разработок шахт [Текст] / В.П. Муравьев, Г.И. Разгильдеев. – М.: Недра, 1970. – 144 с.
15. Направления совершенствования подземных систем электроснабжения шахт [Электронный ресурс] / Н.М. Басов, В.С. Дзюбан, М.И. Рымар, А.А. Мацегора // Уголь Украины. – 2013. – №5. – С. 28-31.
16. Остапчук, О.В. Технічна реалізація методу захисного шунтування в системі електропостачання глибоких шахт / О.В. Остапчук // Гірнична електромеханіка та автоматика: наук.-техн. Зб. – 2016. – Вип. 93. – С. 25-32
17. Пивняк, Г. Г. Перспективы повышения номинальных напряжений электрической сети в системе электроснабжения угольных шахт [Текст] / Г.Г. Пивняк, Ю.Т. Разумный, А.В. Рухлов // Энергосбережение. – 2008. – № 3. – С. 9-11.
18. Плащанский, Л.А. Основы электроснабжения горных предприятий: учеб. для вузов [Текст] / Л.А. Плащанский – 2-е изд., исправ. – М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2006. – 499 с.
19. Плащанский, Л.А., Беляк, В.Л. Анализ технологических схем с целью рационального электроснабжения участков шахт при напряжении 3 (3,3) кВ // Горное оборудование и механика. – 2008. – № 1.
20. Плащанский Л.А., Беляк В.Л. Технико-экономическое обоснование уровня номинального напряжения электродвигателей высокоэнерговооруженных очистных комплексов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2009. – № 1.
21. Побуль, Г.Х. Повышение пропускной способности распределительных сетей высокого напряжения с применением продольно-емкостной компенсации [Текст] / Г.Х. Побуль – М.: Энергия, 1977. – 60 с.
22. Повышение энергетической эффективности угольных шахт Украины [Электронный ресурс] / Б.А.Грядущий, Г.Н.Лисовой, В.А. Корсун // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) – 2007. – №10. – С. 244-248.
23. Показатели качества электроэнергии в распределительных сетях шахт и влияние отклонений напряжения на технико-экономические показатели электроснабжения [Электронный ресурс] / О.Н. Синчук, И.И. Пересунько // Гірничий вісник. – 2014. – № 97. – С. 152-157
24. Праховник, А.В. Энергосберегающие режимы электроснабжения горнодобывающих предприятий [Текст] / А.В. Праховник, В.П. Розен, В.В. Дегтярев – М.: Недра, 1985 – 232 с.
25. Разумный, Ю.Т. Повышение эффективности электроснабжения угольных шахт [Текст] / Ю.Т. Разумный, Ф.П. Шкрабец – Киев: Техника, 1984. – 136 с.
26. Серов, В.И. Методы и средства борьбы с замыканиями на землю в высоковольтных системах горных предприятий [Текст] / В.И. Серов, В.И. Щуцкий, Б.М. Ягудаев – М.: Наука, 1985. – 136 с.
27. Синчук, О.Н. О проблеме электрогавматизма при эксплуатации электроустановок в подземных горных выработках железорудных шахт [Текст] / О.Н. Синчук, А.А. Харитонов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 2/10 (68). – С. 21-25.
28. Синчук, И.О. Потенциал энергоэффективности и пути его реализации на производствах с подземным способом добычи железорудного сырья. Монография [Текст] / [И.О. Синчук, и др.]. – Кременчуг: изд. ЧП Щербатых А.В. – 2015. – 296 с.
29. Сирота, И.М. Режимы нейтрали электрических сетей [Текст] / И.М. Сирота, С.И. Кисленко, А.М. Михайлов. – Киев: Наукова думка, 1985. – 264 с.
30. Совершенствование методов расчета нагрузок систем электроснабжения рудных шахт [Текст] / В.П. Розен, О.Н. Синчук, С.С.



- Гузов, Р.А. Пархоменко / Горный журнал. – 2013. – №12. – С. 87-90.
31. Совершенствование схем питания подземных электроприемников глубоких шахт: обзор [Текст] / Островский Э.П., Разгильдеев Г.И., Волощенко Н.И. // ЦНИЭИуголь. – Вып. 9. – 1985. – 43 с.
32. Справочник по электроустановкам угольных предприятий. Электроустановки угольных шахт [Текст] / под общей ред. В.В. Дегтярева, В.В. Серова. – М.: Недра, 1988. – 727 с.
33. Справочник энергетика угольной шахты: в 2 т. [Текст] / Дзюбан В.С. и др.; под ред. Б.Н. Ванеева. – 2-е изд., перераб. и доп.. – Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2001. – Т. 1 – 477 с.; Т. 2. – 440 с.
34. Сухие трансформаторы RESIBLOC [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://new.abb.com/products/transformers/ru/sukhie-transformatory/sukhie-transformatory-srednego-napryazhenia/transformatory-resibloc>.
35. Сухие трансформаторы производства «GBE S.p.a.» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.s-kont.com.ua/ru/suhie-transformatori-proizvodstva-laquogbe-sparaquotitaliya>.
36. Технічні вимоги до системи електропостачання підземних споживачів напругою 35 кВ [Текст] / О.В. Остапчук // Гірнична електромеханіка та автоматика: наук.-техн. зб. – 2013. – Вип. 91. – С. 9-12.
37. Угольная промышленность за рубежом [Текст] / В.Е. Зайденварг, Н.И. Гаркавенко, В.С. Афендикова и др. – М.: Горная промышленность, 1993. – 389 с.
38. Федоров, А.А. Основы электроснабжения промышленных предприятий [Текст] / 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1972. – 416 с.
39. Шишкин, Н.Ф. Основные направления электрификации современных шахт [Текст] / Н.Ф. Шишкин, В.Ф. Антонов. – М.: Наука, 1981. – 116 с.
40. Шкрабец, Ф.П. Глубокий ввод напряжения 35 кВ для питания потребителей глубоких горизонтов шахты ЗАО «Запорожский ЖРК» [Текст] / Ф.П. Шкрабец, А.В. Остапчук, Ю.Н. Безручко // Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук. - техн. зб. – 2010. – №84. – С.69-76.
41. Шкрабец, Ф.П. Создание современных систем защиты электрических сетей горных предприятий [Текст] // Горный журнал: Спец. выпуск. – Москва: Издательский дом «Руда и Металлы». – 2010. – С. 34-40.
42. Шкрабец, Ф.П. Пути повышения безаварийности распределительных сетей горных предприятий [Текст] / Ф.П. Шкрабец // Науковий вісник НГУ. – 2009. – Вип. №1. – С. 59-65.
43. Шрайбер, А.А. Современные и перспективные технологии добычи угля [Электронный ресурс] / А.А. Шрайбер, В.Б. Редькин // Проблемы загальної енергетики. – 2008. – Вип № 1(17). – С. 7-13. dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/2999/Shraiber.pdf sequence.
44. Щуцкий, В.И. Защитное шунтирование однофазных повреждений электроустановок [Текст] / В.И. Щуцкий, В.О. Жидков, Ю.Н. Ильин – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 152 с.
45. Щуцкий, В.И. Надежность и безопасность электроснабжения подземных горных работ: Справочное пособие [Текст] / В.И. Щуцкий, М.И. Макаров, Э.Р. Осипов – М.: Недра, 1994. – 255 с.
46. Эксплуатационные режимы электроэнергетических систем и установок [Текст] / Р. Рюденберг; Пер. с нем. И. З. Богуславского, Б. А. Цветкова. – 3-е изд., сокр. – Л.: Энергия : Ленингр. отд-ние, 1981. – 576 с.
47. Электрификация горного производства: Учебник для вузов: В 2-х т. / Под ред. Л.А. Пучкова и Г.Г. Пивняка. – М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2007. – Т. 1. – 511 с.; Т. 2. – 595 с.
48. Электрификация горных работ / Под. ред. С.А. Волотковского. – Киев: Вища школа, 1980. – 448 с.
49. Электробезопасность в горнодобывающей промышленности [Текст] / Л.В. Гладилин, В.И. Щуцкий, Ю.Г. Баженцев и др. – М.: Недра, 1977. – 327 с.
50. Электрооборудование и электроснабжение горнорудных предприятий [Текст] / Под. ред. В.С. Виноградова. – М.: Недра, 1983. – 335 с.
51. Электроснабжение угольных шахт / С.А. Волотковский, Ю.Т. Разумный, Г.Г. Пивняк, Ф.П. Шкрабец и др. – М.: Недра, 1984. – 376 с.
52. Damiano N., Homce G., Jacksha R. A review of underground coal mine emergency communications and tracking system installations. Coal Age, 2014, 119 (11), pp. 34-35.
53. Gas-Insulated Switchgear up to 36 kV [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.schneider-electric.com/en/product-range-presentation/60712-flusarc-36>.
54. Marinovic, N. Electrotechnology in Mining [Текст] / N. Marinovic; Rudarska elektrotehnika.

– Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V., 1990. – 613 p.
55. Mitra D.K. Earth-fault diversion - A novel technique for safer use of electricity in underground coal mines. *Coal International Mining and Quarry World*, 1996, 244 (3), p. 123.
56. Shcrabets F. Modern development principles of protection and diagnostics in mining facilities mains and distribution grids [Текст]/ F. Shcrabets, О. Остapчук // Гірнича електромеханіка та автоматика: наук.-техн. зб. – 2014. – Вип.92. – С.40-48.

57. Società *Elettromeccanica* Arzignanese - Via L. Galvani, 8 - 36070 Tezze di Arzignano (VI) Italia: [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.seatrasformatori.it.
58. Wang Xi-Fan *Modern Power Systems Analysis* / Xi-Fan Wang, Yonghua Song, Malcolm Irving. – New York, NY, USA: Springer Science+Business Media, LLC, 2008. – 559 p.
59. Damiano N., Homce G., Jacksha R. A review of underground coal mine emergency communications and tracking system installations. *Coal Age*, 2014, 119 (11), pp. 34-35.

“Gornye nauki i tehnologii”/ “Mining science and technology”, 2017, No. 3, pp. 25-42

Title:	ELECTRIC SUPPLY OF UNDERGROUND CONSUMERS OF DEEP ENERGY-INTENSIVE MINES
Author:	<i>Name&Surname: F.P. Shkrabets</i> <i>Company: National Mining University of Ukraine</i> <i>Address: 49000, Ukraine, Dnipro, Olesya Gonchara str., 4A</i> <i>Work Position: Head of the Department of Renewable Energy Sources</i> <i>Scientific Degree: Dr. Sci. (Tech.)</i> <i>Contacts: ShcrabetsF@nmu.org.ua</i>
DOI:	10.17073/2500-0632-2017-3-25-42
Abstract:	<p>The increase in the capacity of cleaning and construction vehicles for high-capacity and energy-intensive mines calls for an increase in the supply voltage of cleaning and tunneling combines, as well as transport systems: from a voltage of 660 V switched to 1140 V, and now to 3300 V. This allows improving technical and economic indicators for clearing and access areas, as well as improving the reliability of local Power Supply Systems (PSS).</p> <p>However, this trend prevents the supply of underground electric networks with a voltage of 6 kV, in connection with which the problem arises of increasing the voltage of supply networks. To date, it has become possible to apply the 10 kV voltage to the operation, which is most acceptable for the use of electrical equipment for electrical networks and protection devices.</p> <p>Leading educational, research and design organizations were engaged in research on this issue. An analysis of the results of the research showed that switching to 10 kV voltage is justified and timely.</p> <p>At the same time, 35 kV voltage is not removed from the agenda, which is technically feasible and economically justified, but there are problems with the safety of its operation in underground workings, which requires appropriate refinement. This level of voltage will improve the quality of electricity.</p> <p>Conclusions: 1. Application of 35 kV voltage in the underground power supply system of coal and ore mines is advisable at a depth of more than 1000 m with a maximum load of at least 1000 kVA at the level of the stem cables.</p> <p>2. Application of 35 kV voltage in underground electrical networks will allow to significantly improve the quality indicators of voltage, reliability, and economy of the system due to the current unloading of the most important element of SES, such as stem cables.</p> <p>3. Analysis of the main parameters and characteristics of electrical mine electrical equipment gives reason to believe that it allows implementing a trend of 35 kV deep input to deep horizons of mines (mines) and placement of 35/6 kV substations on working horizons.</p>
Keywords:	<i>power supply system, voltage level, stem cables, mine electrical equipment, voltage quality, reliability, economy</i>
References:	1. Aspekti energoefektivnosti zalizorudnih pidpriemstv [Aspects of energy effi-



- ciency of iron ore enterprises*]. Monograph. Guzov E.S., et. al. Krivoy Rog, 2017, 240 p. [in Ukrainian].
2. Barkan Ja.D. Avtomatizacija regulirovanija naprjazhenija v raspreditel'nyh setjah [*Automation of voltage regulation in distribution networks*]. Ed. by N.A. Melnikov. Moscow, Energia, 1971, 232 p.
 3. Belyh B.P. Jelektricheskie nagruzki i jelektropotreblenie na gornorudnyh predpriyatijah [*Electrical loads and power consumption in mining enterprises*]. B.P. Belyh, I.S. Sverdel', V.K. Olejnikov. Moscow, Nedra, 1971, 247 p.
 4. Beljak V.L., Plashhanskij L.A. Uvelichenie naprjazhenija uchastkovykh setej kak sposob povyshenija jeffektivnosti ispol'zovanija gornyh mashin v vysokoproizvoditel'nyh zabojah ugol'nyh shaht [*Increase in the voltage of district networks as a way to increase the efficiency of using mining machines in high-productivity coal mine faces*]. Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal), 2011, no. 9.
 5. Grejsuh M.V. Jelektrosnabzhenie ugol'nyh i rudnyh shaht [*Power supply of coal and ore mines*]. M.V. Grejsuh, L.N. Kutovoj. Moscow, Nedra, 1965, 360 p.
 6. Zarhi I.M. Vnutrennie perenaprjazhenija v setjah 6–35 kV [*Internal overvoltages in 6-35 kV networks*]. I.M. Zarhi, V.N. Meshkov, F.H. Halilov, et. al. Publ. Nauka, Leningrad branch, 1986, 128 p.
 7. Zastosuvannja naprugi 35 kV dlja sistem elektropostachannja pidzemnih elektroprijmachiv glibokih energoemnih shaht [*Application of 35 kV voltage for power supply systems of underground electric appliances of deep energy-intensive mines*]. F.P. Shkrabets, O.V. Ostapchuk. Scientific bulletin of NMU, 2013, no. 1, pp. 83-90. [in Ukrainian]
 8. Instrukcija po proektirovaniju jelektrostanovok ugol'nyh shaht, razrezov, obogatitel'nyh i briketnyh fabric [*Instruction on the design of electrical installations of coal mines, sections, concentrating and briquette factories*]. Moscow, Ministry of Fuel and Energy of the Russian Federation, 1993, 115 p.
 9. Kolosjuk V.P. Tehnika bezopasnosti pri jekspluatacii rudnichnyh jelektrostanovok [*Safety in the operation of mine electrical installations*]. Moscow, Nedra, 1987, 407 p.
 10. Kudrin B.I. Jelektrosnabzhenie promyshlennyh predpriyatij [*Electricity supply of industrial enterprises*]. Textbook for high schools. Moscow, Publ. MSMU, 2007.
 11. Makarov M.I. Nadezhnost' jelektrosnabzhenija zaboev ugol'nyh shaht [*Reliability of power supply to the faces of coal mines*]. M.I. Makarov, A.A. Bocharov. Kiev, Tehnika, 1985, 184 p.
 12. Markushevich N.S. Regulirovanie naprjazhenija i jekonomija jelektrojenergii [*Voltage regulation and energy saving*]. N.S. Markushevich. Moscow, Energoatomizdat, 1984, 104 p.
 13. Minovskij, Ju.P. Jeffektivnost' jelektrosnabzhenija zaboev ugol'nyh shaht [*Efficiency of power supply to the faces of coal mines*] Ju.P. Minovskij. Moscow, Nedra, 1990, 158 p.
 14. Murav'ev V.P. Nadezhnost' sistem jelektrosnabzhenija i jelektrooborudovanija podzemnyh razrobotok shaht [*Reliability of power supply systems and electrical equipment for underground mine development*] V.P. Murav'ev, G.I. Razgil'deev. Moscow, Nedra, 1970, 144 p.
 15. Napravlenija sovershenstvovanija podzemnyh sistem jelektrosnabzhenija shaht [*Directions for the improvement of underground power supply systems for mines*]. Electronic resource. N.M. Basov, V.S. Dzuban, M.I. Rymar, A.A. Macegora. Ugol' Ukrainy, 2013, no. 5, pp. 28-31.
 16. Ostapchuk O.V. Tehnichna realizacija metodu zahisnogo shuntuvannja v sistemi elektropostachannja glibokih shaht [*Technical realization of the method of protective shunting in the power supply system of deep shafts*]. O.V. Ostapchuk. Girnicha elektromehanika ta avtomatika, Sci.-Tech. Collection, 2016, vol. 93, pp. 25-32. [in Ukrainian].



17. Pivnjak G. G. Perspektivy povyshenija nominal'nyh naprjazhenij jelektricheskoi seti v sisteme jelektronsnabzhenija ugol'nyh shaht [*Prospects for increasing the nominal voltages of the electric grid in the coal mine power supply system*]. G.G. Pivnjak, Ju.T. Razumnyj, A.V. Ruhlov. Jenergoberezhenie, 2008, no. 3, pp. 9-11.
18. Plashhanskij L.A. Osnovy jelektronsnabzhenija gornyh predpriyatij [*Bases of power supply of mining enterprises*]. Textbook for high schools. L.A. Plashhanskij. 2-nd Ed., corrected, Moscow, Publ. MSMU, 2006, 499 p.
19. Plashhanskij L.A., Beljak V.L. Analiz tehnologicheskikh shem s cel'ju racional'nogo jelektronsnabzhenija uchastkov shaht pri naprjazhenii 3 (3,3) kV [*Analysis of technological schemes for the purpose of rational power supply to mine sites at a voltage of 3 (3.3) kV*]. Gornoe oborudovanie i mehanika, 2008, no. 1.
20. Plashhanskij L.A., Beljak V.L. Tehniko-jekonomicheskoe obosnovanie urovnja nominal'nogo naprjazhenija jelektrodvigatelej vysokojenergovoorozhennykh ochistnykh kompleksov [*Feasibility study of the rated voltage level of electric motors of high-energy treatment complexes*]. Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal), 2009, no. 1.
21. Pobul' G.H. Povyszenie propusknoj sposobnosti raspredelitel'nykh setej vysokogo naprjazhenija s primeneniem prodol'no-emkostnoj kompensacii [*Increase of throughput capacity of high voltage distribution networks using longitudinally capacitive compensation*]. G.H. Pobul'. Moscow, Energia, 1977, 60 p.
22. Povyszenie jenergeticheskoi jeffektivnosti ugol'nykh shaht Ukrainy [*Increase of energy efficiency of coal mines in Ukraine*]. Electronic resource. B.A. Grjadushhij, G.N. Lisovoj, V.A. Korsun. Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal), 2007, no. 10, pp. 244-248.
23. Pokazateli kachestva jelektroenergii v raspredelitel'nykh setjah shaht i vlijanie otklonenij naprjazhenija na tehniko-jekonomicheskie pokazateli jelektronsnabzhenija [*Indicators of electricity quality in the distribution grids of mines and the effect of voltage deviations on technical and economic indicators of electricity supply*]. Electronic resource. O.N. Sinchuk, I.I. Peresun'ko. Gornichij visnik, 2014, no. 97, pp. 152-157.
24. Prahovnik, A.V. Jenergoberegajushhie rezhimy jelektronsnabzhenija gornodobyvajushhih predpriyatij [*Energy-saving modes of power supply for mining enterprises*]. A.V. Prahovnik, V.P. Rozen, V.V. Degtjarev. Moscow, Nedra, 1985, 232 p.
25. Razumnyj Ju.T. Povyszenie jeffektivnosti jelektronsnabzhenija ugol'nykh shaht [*Increasing the efficiency of electricity supply of coal mines*]. Ju.T. Razumnyj, F.P. Shkrabets. Kiev, Tehnika, 1984, 136 p.
26. Serov V.I. Metody i sredstva bor'by s zamykanijami na zemlju v vysokovol'tnykh sistemah gornyh predpriyatij [*Methods and means of combating earth faults in high-voltage systems of mining enterprises*]. V.I. Serov, V.I. Shhuckij, B.M. Jagudaev. Moscow, Nauka, 1985, 136 p.
27. Sinchuk O.N. O probleme jelektrotravmatizma pri jekspluatacii jelektroustanovok v podzemnykh gornyh vyrabotkah zhelezorudnykh shaht [*To the problem of electro-injury in the operation of electrical installations in underground mine workings of iron ore mines*]. O.N. Sinchuk, A.A. Haritonov. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2014, no. 2/10(68), pp. 21-25.
28. Sinchuk I.O. Potencial jenergojeffektivnosti i puti ego realizacii na proizvodstvah s podzemnym sposobom dobychi zhelezorudnogo syr'ja. [*Potential of energy efficiency and ways of its implementation in industries with underground mining of iron ore raw materials*]. Monograph. I.O. Sinchuk, et. al. Kremenchug, ed. PE Shcherbatykh A.V., 2015, 296 p.
29. Sirota I.M. Rezhimy nejtrali jelektricheskikh setej [*Neutral modes of electrical networks*]. I.M. Sirota, S.I. Kislenco, A.M. Mihajlov. Kiev, Naukova



dumka, 1985, 264 p.

30. Sovershenstvovanie metodov rascheta nagruzok sistem jelektrosnabzhenija rudnyh shaht [*Improvement of methods for calculating loads of power supply systems for ore mines*]. V.P. Rozen, O.N. Sinchuk, Je.S. Guzov, R.A. Parhomenko. Gornyi Zhurnal = Mining Journal, 2013, no. 12, pp. 87-90.

31. Sovershenstvovanie shem pitanija podzemnyh jelektropriemnikov glubokih shaht: obzor [*Perfection of power circuits for underground electric receivers of deep mines: Overview*]. Ostrovskij Je.P., Razgil'deev G.I., Voloshenko N.I. CNIJeIugol', vol. 9, 1985, 43 p.

32. Spravochnik po jelektroustanovkam ugol'nyh predpriyatij. Jelektroustanovki ugol'nyh shaht [*Handbook of electrical installations of coal enterprises. Electric installations of coal mines*]. Gen. ed. V.V. Degtyareva, V.V. Serov. Moscow, Nedra, 1988, 727 p.

33. Spravochnik jenergetika ugol'noj shahty: v 2 t. [*Handbook of power engineering of a coal mine: in 2 vol.*]. Dzuban V.S., et. al. Ed. B.N. Vaneev, 2-nd Ed., revised and enlarged. Donetsk, LLC "Jugo-Vostok, Ltd", 2001, vol. 1, 477 p., vol. 2, 440 p.

34. Suhie transformatory RESIBLOC [*Dry transformers RESIBLOC*]. Electronic resource. Available at: <http://new.abb.com/products/transformers/ru/sukhie-transformatory/sukhie-transformatory-srednego-napryazhenia/transformatory-resibloc>.

35. Suhie transformatory proizvodstva «GBE S.p.a.» [*Dry transformers produced by GBE S.p.a.*]. Electronic resource. Available at: <http://www.s-kont.com.ua/ru/suhie-transformatori-proizvodstva-laquogbe-sparaquo-italiya>.

36. Tehnichni vimogi do sistemi elektropostachannja pidzemnih spozhivachiv napругoju 35 kV. [*Technical requirements for the electricity supply system of underground consumers with a voltage of 35 kV*]. O.V. Ostapchuk. Girnicha elektromehanika ta avtomatika: Sci.-Tech. Collection, 2013, vol. 91, pp. 9-12. [in Ukrainian].

37. Ugol'naja promyshlennost' za rubezhom [*Coal industry abroad*]. V.E. Zajdenvarg, N.I. Garkavenko, V.S. Afendikov, et. al. Moscow, Gornaja promyshlennost', 1993, 389 p.

38. Fedorov A.A. Osnovy jelektrosnabzhenija promyshlennyh predpriyatij [*Basics of power supply of industrial enterprises*]. 2-nd Ed., revised and enlarged. Moscow, Energia, 1972, 416 p.

39. Shishkin N.F. Osnovnye napravlenija jelektrifikacii sovremennyh shaht [*The main directions of electrification of modern mines*]. N.F. Shishkin, V.F. Antonov. Moscow, Nauka, 1981, 116 p.

40. Shkrabets F.P. Glubokij vvod naprjazhenija 35 kV dlja pitanija potrebitelej glubokih gorizontov shahty ZAO «Zaporozhskij ZhRK» [*Deep voltage input of 35 kV for power supply to consumers of deep horizons of CJSC Zaporizhzhya ZhRK*]. F.P. Shkrabets, A.V. Ostapchuk, Ju.N. Bezruchko. Girnicha elektromehanika ta avtomatika: Sci.-Tech. Collection, 2010, no. 84, pp. 69-76.

41. Shkrabets F.P. Sozdanie sovremennyh sistem zashhity jelektricheskikh setej gornyh predpriyatij [*Creation of modern systems of protection of electric networks of mining enterprises*]. Gornyi Zhurnal = Mining Journal, spec. issue, Moscow, Publ. Ore&Metals, 2010, pp. 34-40.

42. Shkrabets F.P. Puti povyshenija bezavarijnosti raspreditel'nyh setej gornyh predpriyatij [*Ways to improve the trouble-free distribution networks of mining enterprises*]. F.P. Shkrabets. Naukovij visnik NSU, 2009, vol. 1, pp. 59-65.

43. Shrajber A.A. Sovremennye i perspektivnye tehnologii dobychi uglja [*Modern and promising technologies of coal mining*]. A.A. Shrajber, V.B. Red'kin. Problemi zagal'noi energetiki, 2008, vol. 1(17), pp. 7-13. Available at: <http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/2999/Shraiber.pdf>

44. Shhuckij V.I. Zashhitnoe shuntirovanie odnofaznyh povrezhdenij jelektroustanovok [*Protective shunting of single-phase faults in electrical installations*]. V.I. Shhuckij, V.O. Zhidkov, Ju.N. Il'in. Moscow,



- Jenergoatomizdat, 1986, 152 p.
45. Shhuckij V.I. Nadezhnost' i bezopasnost' jelektrosnabzhenija podzemnyh gornyh rabot: Spravochnoe posobie [*Reliability and safety of electric power supply of underground mining operations: A reference book*]. V.I. Shhuckij, M.I. Makarov, Je.R. Osipov. Moscow, Nedra, 1994, 255 p.
46. Jekspluatacionnye rezhimy jelektrojenergeticheskikh sistem i ustanovok [*Operational modes of electric power systems and installations*]. R. Rjudenberg; trans. from German I.Z. Boguslavskii, B.A. Cvetkov, 3-rd ed., abb. Leningrad, Jenergija, Leningrad branch, 1981, 576 p.
47. Jelektifikacija gornogo proizvodstva [*Electrification of mining*]. Textbook for high schools, in 2 vol. Ed. L.A. Puchkov, G.G. Pivnjak. Publ. MSMU, 2007, vol. 1, 511 p., vol. 2, 595 p.
48. Jelektifikacija gornyh rabot [*Electrification of mining operations*]. Ed. S.A. Volotkovskii. Kiev, Vishha shkola, 1980, 448 p.
49. Jelektrobezopasnost' v gornodobyvajushhej promyshlennosti [*Electrical safety in the mining industry*]. L.V. Gladilin, V.I. Shhuckij, Ju.G. Bazhencev, et. al. Moscow, Nedra, 1977, 327 p.
50. Jelektrooborudovanie i jelektrosnabzhenie gornorudnyh predpriyatij [*Electrical equipment and power supply of mining enterprises*]. Ed. V.S. Vinogradov. Moscow, Nedra, 1983, 335 p.
51. Jelektrosnabzhenie ugol'nyh shaht [*Electricity supply of coal mines*]. S.A. Volotkovskij, Ju.T. Razumnyj, G.G. Pivnjak, F.P. Shkrabets. Moscow, Nedra, 1984, 376 p.
52. Damiano N., Homce G., Jacksha R. *A review of underground coal mine emergency communications and tracking system installations*. Coal Age, 2014, 119 (11), pp. 34-35.
53. *Gas-Insulated Switchgear up to 36 kV*. Electronic resource. Available at: <http://www.schneider-electric.com/en/product-range-presentation/60712-flusarc-36>.
54. Marinovic, N. *Electrotechnology in Mining*. N. Marinovic, Rudarska elektrotehnika, Amsterdam, Elsevier Science Publishers B.V., 1990, 613 p.
55. Mitra D.K. *Earth-fault diversion - A novel technique for safer use of electricity in underground coal mines*. Coal International Mining and Quarry World, 1996, 244 (3), p. 123.
56. Shcrabets F. *Modern development principles of protection and diagnostics in mining facilities mains and distribution grids*. F. Shcrabets, O. Ostapchuk. Girnicha elektromehanika ta avtomatika. Sci.-Tech. Collection, 2014, vol. 92, pp. 40-48.
57. Società Elettromeccanica Arzignanese. Via L Galvani, 8, 36070 Tezze di Arzignano (VI) Italia. Available at: www.seatrasformatori.it.
58. Wang Xi-Fan *Modern Power Systems Analysis*. Xi-Fan Wang, Yonghua Song, Malcolm Irving. New York, NY, USA: Springer Science+Business Media, LLC, 2008, 559 p.