

**Ф.П. Шкрабец, д-р техн. наук, А.В. Остапчук, канд. техн. наук**  
(Украина, Днепропетровск, Национальный горный университет)

**Ю.Н. Безручко**

(Украина, Днепропетровское, ЗАО "Запорожский ЖРК")

## **ГЛУБОКИЙ ВВОД НАПРЯЖЕНИЯ 35 кВ ДЛЯ ПИТАНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ГЛУБОКИХ ГОРИЗОНТОВ ШАХТЫ ЗАО "ЗАПОРОЖСКИЙ ЖРК"**

При добыче полезных ископаемых подземным способом наблюдается тенденция углубления шахт, а интенсификация производства сопровождается ростом электрических нагрузок подземных потребителей. Уже в настоящее время установленная мощность подземных потребителей на ряде шахт превышает 10 МВт, а глубина залегания разрабатываемых пластов – более 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 на напряжении 6 кВ. С учетом перспектив развития отраслей, повышение эффективности электроснабжения глубоких шахт может быть достигнуто за счет перевода их на более высокий класс напряжения как минимум питающих (стволовых) шахтных сетей. Это предусматривает установление непосредственно в шахте подстанции с первичным напряжением 20–35 кВ, что в свою очередь требует решения комплекса вопросов, связанных с технической реализацией и обеспечением безопасности эксплуатации высоковольтных электроустановок в условиях шахт.

Не последнюю роль в обеспечении устойчивой работы шахт играют системы электроснабжения, их надежность, безопасность, экономическая эффективность. Зависят эти показатели от многих факторов, но в основном от напряжения питающих и распределительных сетей и параметров элементов этих сетей, выбор которых зависит от ожидаемых нагрузок.

В настоящее время для внутришахтных высоковольтных распределительных сетей применяется напряжение 6 кВ. С ростом мощности строящихся шахт и особенно суммарной мощности электродвигателей на проходческих и добычных участках, усложняется стволовая 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.

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 путем повышения напряжения, которое подается на центральную подземную подстанцию. Определение целесообразного значения напряжения шахтных высоковольтных распределительных сетей с учетом перспективы рос-

та подземных нагрузок 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. Предварительные расчеты показывают, что значение оптимального напряжения питающих сетей для горизонтов на глубине больше 1000 м составляет 15–25 кВ.

Проблема оптимизации напряжений питающих и распределительных сетей появилась и на шахте ЗАО "Запорожский ЖРК" в связи с началом подготовки отработки горизонтов 940 м и далее до 1600 м. На первой ступени распределения энергии в схеме электроснабжения шахты применяется напряжение 154 кВ. Преобразование энергии и питание электроприемников осуществляется от ГПП, которая имеет два трехобмоточных трансформатора мощностью 63 МВА и выполнена по упрощенной схеме на стороне высшего напряжения (с отделителями и короткозамыкателями). Напряжением 6 кВ осуществляется питание поверхностных и подземных потребителей. На стороне 35 кВ применена одиночная секционированная система шин.

Прежде, чем приступить к усовершенствованию (реконструкции) системы электроснабжения шахты и обоснованию необходимых технических решений, следует оценить возможности существующей системы электроснабжения с точки зрения возможных увеличений электрических нагрузок при обеспечении требуемого качества электроэнергии [3]. В нашем случае следует оценить пропускную способность ствольных кабелей до конкретных горизонтов с учетом параметров существующих кабелей без их усиления или замены. Для решения поставленной задачи воспользуемся зависимостью передаваемой мощности в функции от потери напряжения  $\Delta U$  при заданном номинальном напряжении питающих сетей и физических параметрах кабелей:

$$S = \frac{10\Delta U U^2}{(R \cdot \cos j + X \cdot \sin j)} 10^{-3}, \text{ МВ}\cdot\text{А} \quad (1)$$

Характеристика пропускной способности ствольных кабелей при номинальном напряжении 6 кВ для различных горизонтов шахты представлена на рис. 1. Анализ результатов показывает, что для горизонта 940 м (и тем более глубже) напряжения 6 кВ для подачи электроэнергии на горизонт оказывается недостаточно, так как более половины допустимых потерь напряжения приходится на ствольные кабели, а еще предстоит многокилометровая передача электроэнергии по распределительным сетям горизонта.

Для реконструкции системы электроснабжения подземного электроснабжения шахты ЗАО "Запорожский ЖРК" с целью дальнейшего развития предприятия и отработки горизонтов от 940 до 1600 м следует рассмотреть следующие возможные базовые варианты [4]:

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

2. Электроснабжение горизонта 940 м шахты по схеме глубокого ввода напряжением 35 кВ с установкой подземной подстанции 35/6 кВ с дальнейшим распределением электроэнергии при напряжении 6 кВ.

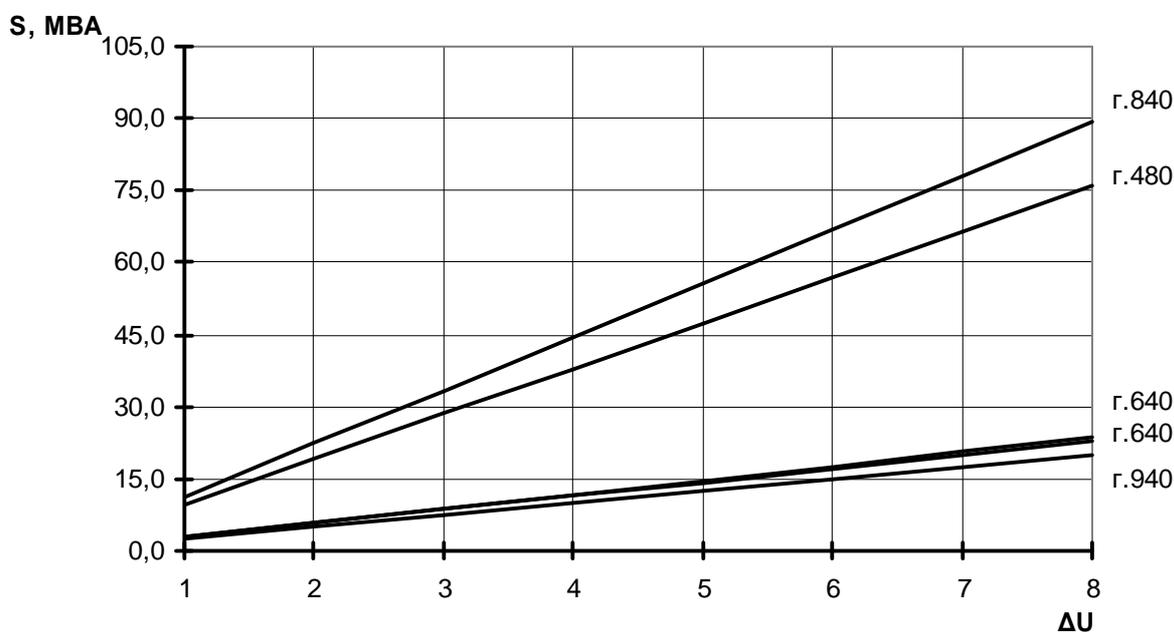


Рис. 1. Пропускная способность ствольных кабелей при напряжении 6 кВ для одной из секций подстанции ЗЖРК

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 будут 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 запишется как

$$\frac{\Delta U_2}{\Delta U_1} = \frac{U_{н1}}{U_{н2}}, \quad (2)$$

а отношение потерь мощности:

$$\frac{\Delta P_2}{\Delta P_1} = \left( \frac{U_{н1}}{U_{н2}} \right)^2 \quad (3)$$

где  $\Delta U_1$ ,  $\Delta P_1$  – потери напряжения и мощности при напряжении  $U_{н1}$ ;  $\Delta U_2$ ;  $\Delta P_2$  – 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.

$U_{н1}$ , кВ	$U_{н2}$ , кВ	$\frac{\Delta U_2}{\Delta U_1}$ , %	$\frac{\Delta P_2}{\Delta P_1}$ , %
6	10	60	36
	35	17	3

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 отметить, что перевод сетей напряжением с 6 на 10 кВ облегчается тем, что трансформаторы мощностью 630 кВ·А 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 электрообеспечения [2, 4].

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

Стоимость аппаратуры на напряжение 6 и 10 кВ в большинстве случаев одинакова. Если предположить линейную зависимость стоимости аппаратуры

от применяемого напряжения, то удорожание аппаратуры по сравнению с аппаратурой на напряжение 6 кВ составляет порядка 7 %.

Повышение напряжения в высоковольтных распределительных сетях с 6 до 10 кВ, очевидно, не будет связано с существенным увеличением 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.

*Применение напряжения 35 кВ для подземного электроснабжения.* Такая задача 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 железорудной шахты может ставиться только как применение системы глубокого ввода напряжения 35 кВ на энергоемкий горизонт с установкой трансформаторной подстанции 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.

Наиболее перспективным, из возможных, вариантом электроснабжения потребителей гор. 940 м шахты ЗЖРК является вариант глубокого ввода напряжения 35 кВ с установкой подземной подстанции 35/6 кВ. Этот вариант обусловлен уровнем ожидаемых и предусматривающих развитие шахты электрических нагрузок (до 10 МВт), глубиной расположения электроприемников (с учетом расстояния от источника до ствола на поверхности и от ствола до подстанционной камеры под землей) и сосредоточением основных по мощности и ответственности электроприемников (подъемные машины слепого ствола, приводы водоотливных установок) в районе ствола. Кроме того, такой вариант предусматривает дальнейшую перспективу развития шахты и исключает влияние (и связь в нормальном режиме эксплуатации) существующей системы подземного электроснабжения шахты.

Принципиальную схему питания подземных трансформаторов 35/6 кВ предлагается реализовать по схеме блока линия – трансформатор (рис. 2), 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.

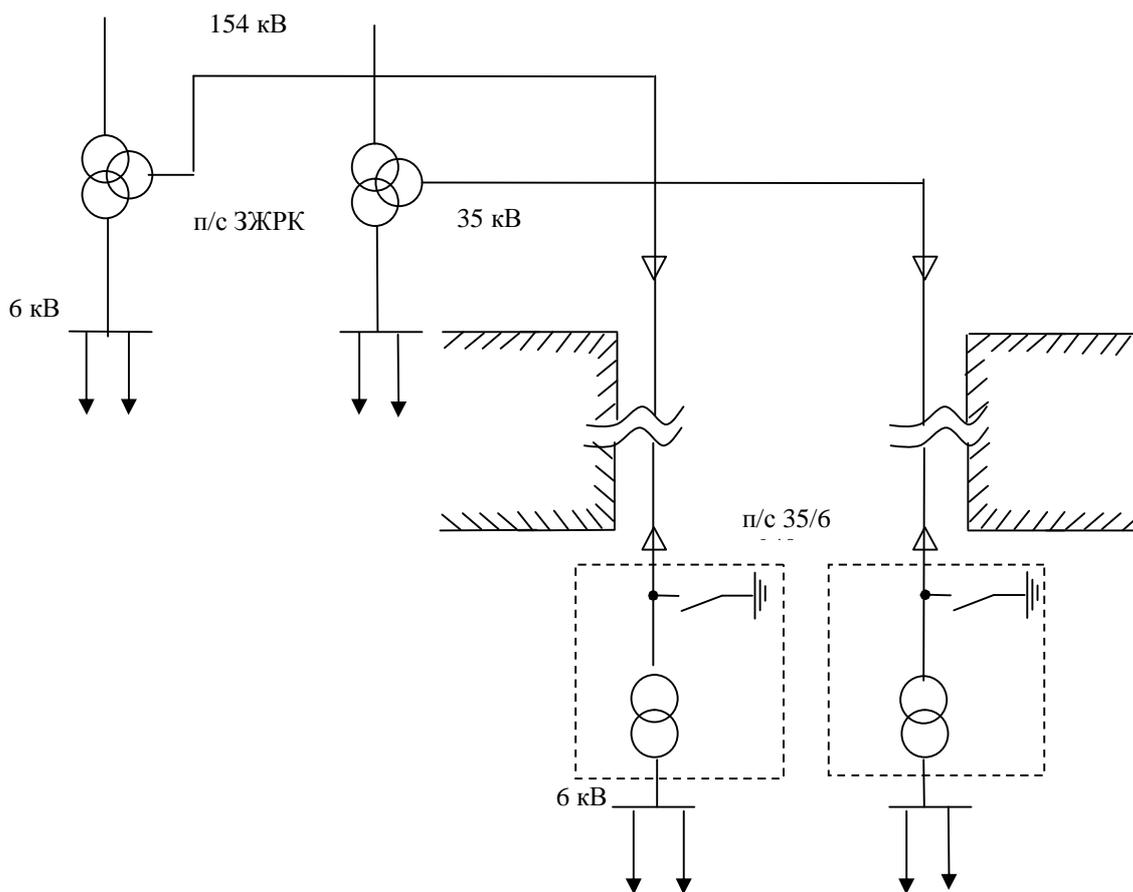


Рис. 2. Принципиальная схема питания подземных трансформаторов 35/6 кВ по схеме блок линия – трансформатор

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 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.

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 достигается уменьшением значения активного сопротивления изоляции сети относительно земли, которое включено параллельно реактивным сопротивлениям изоляции. 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 уменьшением (до значения 2,4 фазного напряжения при равенстве активного и емкостного тока замыкания) внутренних перенапряжений, сопровождающих однофазные замыкания на землю [1].

### **Выводы**

1. Наиболее перспективным для шахты ЗЖРК при реконструкции системы электроснабжения в связи с разработкой глубоких горизонтов представляется вариант использования глубокого ввода напряжения 35 кВ только на гор. 940 м с установкой подземной подстанции 35/6 кВ и распределением электроэнергии по гор. 940 м и далее на напряжении 6 кВ.

2. Параметры и характеристики разработанного и выпускаемого промышленностью серийно или по заказу электрооборудования в рудничном исполнении позволяют реализовать вариант реконструкции системы электроснабжения шахты по схеме глубокого ввода напряжения 35 кВ на гор. 940 м и сооружения подстанции 35/6 кВ на этом горизонте.

3. 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.

### **Список литературы**

1. Пивняк Г.Г., Шкрабец Ф.П. Несимметричные повреждения в электрических сетях карьеров: Справ. пособие. – М.: Недра, 1993. – 192 с.
2. Электрооборудование и электроснабжение горнорудных предприятий / Под. ред. В.С. Виноградова. – М.: Недра, 1983. – 335 с.
3. Справочник по электроснабжению промышленных предприятий. Промышленные электрические сети. – 2-е изд., перераб. и доп. / Под общей ред. А.А. Федорова и Г.В. Сербиновского. – М.: Энергия, 1980. – 576 с.
4. Шишкин Н.Ф., Антонов В.Ф. Основные направления электрификации современных шахт. – М.: Наука, 1981. – 116 с.