

УДК 621.315.052.7 - 621.395.14

Р.А. ПАРХОМЕНКО, преподаватель, ГВУЗ «Криворожский национальный университет»

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ В ШАХТНЫХ СЕТЯХ КАК ОДИН ИЗ ПУТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ПРОДУКЦИИ

В работе исследуются режимы электропотребления электроприводов шахтного оборудования и проводится анализ путей повышения эффективности электроснабжения шахт, что в конечном итоге приведет к росту производительности горного оборудования за счет улучшения режимных показателей качества электроэнергии. На основе экспериментальных исследований обособленно работающих электроприемников определено их воздействие на режимы электропотребления остальных потребителей электрической энергии шахтных сетей, проведен анализ режимов напряжения.

Ключевые слова: эффективность, качество электроэнергии, режим напряжения, шахтная сеть.

**Проблема и ее связь с научными и практическими заданиями.** Украина на сегодня обладает мощным топливно-энергетическим комплексом, в котором, к сожалению, большую часть составляет морально устаревшее и технически изношенное оборудование. Таким образом, проблема энергообеспечения нашей страны перерастает в проблему национальной безопасности как политическом, экономическом, так и в экологическом аспекте. Пути решения данной проблемы очевидны - модернизация топливно-энергетического комплекса нашей страны, что, к сожалению, в сегодняшних экономических условиях это возможно реализовывать лишь постепенно и в долгосрочной перспективе. В краткосрочной же перспективе также возможно принять меры, позволяющие улучшить экономическую ситуацию, в которой оказалась Украина. Это, прежде всего, эффективное использование имеющихся ресурсов в производственном комплексе во всех отраслях промышленности, особенно это касается горно-металлургического комплекса, который является экономико-образующим. Речь идет об эффективном использовании электрической энергии и эффективной работе систем электроснабжения предприятий, что в конечном итоге также позволит повысить конкурентоспособность продукции, так как доля электроэнергии в энергозатратах железорудных шахт составляет приблизительно 90 %, что, в свою очередь, существенно влияет на себестоимость продукции украинских горных предприятий.

**Анализ исследований и публикаций.** Одним из действенных резервов повышения эффективности электроснабжения шахт и в конечном итоге роста производительности выемочно-погрузочного оборудования является улучшение режимных показателей качества электроэнергии.

Современное состояние, как показал проведенный анализ режимов напряжения, характеризуется тенденцией к снижению качественных показателей, связанных функциональной зависимостью с параметрами электрической нагрузки. Дальнейшая интенсификация добычи железной руды, осуществляемая в соответствии с основным направлением технического прогресса в горнорудной промышленности, влечет за собой увеличения числа блоков, а следовательно и числа технологического оборудования, потребного для обеспечения заданной производственной мощности шахт. Особенностью ведения технологического процесса добычи железной руды подземным способом является отсутствие жестких технологических связей при работе электроприводов шахтного оборудования: горные машины работают обособленно и независимо друг от друга, что обуславливает создание специфических условий, оказывающих воздействие на режимы электропотребления.

**Постановка задания.** Цель работы - определение режимов электропотребления электроприводов шахтного оборудования на основе экспериментальных исследований обособленно работающих электроприемников и определения их воздействия на режимы электропотребления остальных потребителей электрической энергии шахтных сетей.

**Изложение материала и результаты.** Для определения фактических значений потерь напряжения  $\Delta U_i$  вдоль наиболее протяженных загруженных ЛЭП измерения проведены в начале сети на шинах ЦПП1, в качестве промежуточного узла нагрузки предусмотрена регистрация  $\delta U_i$ ; на п/ст. "Тяговая-Совмещенная", как правило, в месте соединения крыльев шахтного поля, и в конце - непосредственно на добычных участках.

Как показал анализ гистрограмм распределения  $\delta U_i$  при отсутствии средств централизованного и местного регулирования напряжения в сети,  $\Delta U_i$  в конце ЛЭП может быть снижено применением средств компенсации реактивной мощности. При этом определяется диапазон возможных значений относительного уровня напряжения.

$$K_{U_i} = U_i / U_{\text{ном}}, \text{ или } 0,9 < K_{U_i} < 1,15 \quad (1)$$

где  $K_{U_i}$  - коэффициент кратности действующего значения напряжения к номинальному.

Выполненные исследования по оценке качества напряжения, результаты которых представлены в таблице 1, позволяют установить необходимые ограничения при разработке мероприятий и средств, повышающих качественные показатели в характерных узлах нагрузки до нормируемых пределов. К результатам проведенных исследований следует отнести основные положения, касающиеся фактического режима напряжения в системах электроснабжения шахт.

Анализ эмпирических рядов распределения указывает на отклонения исследуемой величины от нормативных требований. С интегральной вероятностью  $P \gg 0,95$  уровень напряжения превышает верхний предел ГОСТ 13109-67 (шахта "Саксагань"), допустимый из требований экономичности и обеспечения нормальных условий электрической изоляции электрооборудования.

Режим электроснабжения шахт характеризуется изменениями напряжения на зажимах электроприемников в пределах  $\delta U_{\text{макс}} = 10,5\%$  от  $U_{\text{ном}}$ , что диктуется необходимостью поддержания удовлетворительного напряжения для успешной работы электроприводов горных машин. Как видно из анализа полученных результатов, представленных в табл. 1, закон изменения напряжения в контролируемых узлах нагрузки определяется доминирующим влиянием составляющей математического ожидания  $\delta U_i$ , что обусловлено эксплуатацией силовых трансформаторов на рабочих ответвлениях, соответствующих нижнему положению анцапф с повышенным уровнем напряжения на вторичной обмотке трансформатора. Это приводит к смещению кривой напряжения от оси  $U_{\text{ном}}$  без существенного искажения или деформации его характера во времени; при этом рассеяние напряжения от среднего отклоняется незначительно  $\delta^2_{\text{макс}} = 26,2 \text{ В}^2$  в самой удаленной точке сети на подстанции квершлага "160" гор. -1015 м ш. "Родина". Подобное положение обусловлено отсутствием средств централизованного и местного регулирования напряжения, в том числе встречного регулирования в соответствии с режимами наибольших и наименьших нагрузок.

На выбор способов улучшения качественных показателей электроснабжения оказывают воздействие результаты исследований возможной ширины диапазона изменений напряжения в функции времени, которые служат основой при разработке технических требований на изготовление местных средств регулирования.

Следует отметить, что узкий диапазон изменений напряжения (ввиду малого рассеяния  $\delta_i^2$ ) упрощает требования к созданию, выбору средств регулирования, позволяет удешевить конструкцию, так как отпадает необходимость в осуществлении глубокого регулирования с широким спектром изменения исследуемых параметров.

Результаты обработки экспериментальных измерений и основные числовые характеристики распределения отклонений напряжения в распределительных сетях железорудных шахт.

В силовых сетях железорудных шахт основным фактором, влияющим на снижение показателей эффективности электроснабжения, является дефицит реактивной мощности, обусловленный отсутствием, либо слабым использованием источников реактивной мощности в узлах нагрузки, что приводит к невозможности обеспечения нужного режима напряжения и вызывает нарушения устойчивости работы шахтных ЭП. Средства компенсации реактивной мощности, обеспечивающие снижение потери напряжения в сети направлены на уменьшение величины народнохозяйственного ущерба и продление ресурса работоспособности электродвигателей путем обеспечения их работы в более экономичном режиме.

Таблица 1

Место проведения измерений		Математическое ожидание	Стандартное отклонение	Дисперсия	Неодинаковость напряжения	Отклонение напряжения
присоединение	рудник	$\delta U_i, \text{ В}$	$\sigma, \text{ В}$	$D, \text{ В}^2$	$N, \text{ В}^2$	$\delta U_i, \%$
1. П/ст. Тяговая, ввод	ш. Родина	0,66	2,18	4,74	5,19	-2,28
2	гор.-1015 м					
2. ГПП - 6 кВ	ш. Родина	-5,2	1,79	3,21	30,4	-5,53

3. П/ст."кв.160", 0,4 кВ	ш. Родина	-4,75	5,12	26,2	48,84	-6,95
4. Уч. №1, кв.178	ш. Родина	-9,76	2,17	4,73	100,1	-10
5. Уч. №17, ОРТ-229, гор.-605 м	ш. Саксагань	-1,61	2,37	5,64	8,24	-2,88
6. Уч. №21, ОРТ-205, хоз.орт -620м	ш. Саксагань	-2,26	1,97	3,88	9,0	-3
7. ШПП №11, ЩРДУ-0,4 кВ гор.-630 м	ш. Саксагань	10,3	2,06	4,25	110,6	10,5
8. ШПП № 10, гор.-630 м	ш. Саксагань	9,52	2,27	5,18	95,96	9,8
9. ЦРП-6 главная	ш. Саксагань	2,76	1,25	1,56	9,19	3
10. ШПП № 11, осв.сев.полев.штрека, 127 В	ш. Саксагань	-3,73	2,65	7,06	21,0	-4,59
11. П/ст "Южносаксаганская" поверхность 0,4 кВ, ш.В-4	ш. Саксагань	6,07	1,59	2,53	39,4	6,25
12. П/ст "Южносаксаганская" поверхность 6 кВ, ш. В-4	ш. Саксагань	1,19	2,63	6,91	8,35	2,89
13. П/ст. "Саксагань" поверхность 6 кВ	ш. Саксагань	7,43	0,98	0,97	56,1	7,5

В силовых сетях железорудных шахт основным фактором, влияющим на снижение показателей эффективности электроснабжения, является дефицит реактивной мощности, обусловленный отсутствием, либо слабым использованием источников реактивной мощности в узлах нагрузки, что приводит к невозможности обеспечения нужного режима напряжения и вызывает нарушения устойчивости работы шахтных ЭП. Средства компенсации реактивной мощности, обеспечивающие снижение потери напряжения в сети направлены на уменьшение величины народнохозяйственного ущерба и продление ресурса работоспособности электро-двигателей путем обеспечения их работы в более экономичном режиме.

При постановке вопроса повышения качества напряжения в шахтных сетях исходной информацией служат результаты проведенной комплексной оценки, а также существующие средства и способы обеспечения благоприятного уровня напряжения на зажимах шахтных ЭП. Для конкретных условий электроснабжения шахт оптимизация качественных показателей достигается путем выбора наиболее приемлемых решений и разработки рациональных устройств по технико-экономическим соображениям. Из проведенного анализа соответствия показателей качества электроэнергии ГОСТ 13189-67 очевидна целесообразность проведения мероприятий в направлениях:

обеспечения централизованного встречного регулирования напряжения в соответствии с режимом электропотребления;

местного регулирования напряжения для сокращения диапазона отклонений напряжения;

компенсации реактивной мощности и потерь напряжения во всех узлах;

совершенствования систем электроснабжения с выбором рациональных повышенных уровней напряжения на всех ступенях трансформации; регулирование (с целью ограничения) напряжения в осветительных сетях.

Выражением для комплексного решения вопросов регулирования напряжения служит обобщенная зависимость  $U=f(t)$  баланса значений напряжения у потребителей и в центре питания [1]

$$U_{ЭП} = U_{ЦП} + U_{доб} - \frac{P_m R_i + (Q_m - Q_k)(X_i - X_c)}{U_{ном}}, \quad (2)$$

где  $U_{доб}$  - добавочное напряжение, создаваемое регулируемыми устройствами;  $Q_k$  - реактивная компенсирующая мощность, вырабатываемая синхронными двигателями и компенсационными преобразователями;  $X_i$  - индуктивное сопротивление элементов сети;  $X_c$  - емкостное сопротивление установок продольной компенсации.

Слагаемые данного уравнения определяют эффективность применения и степень воздействия устройств регулирования напряжения на исследуемую функцию  $\delta U_i$ .

В общем виде качество напряжения соответствует произведению нагрузки на сопротивление. Однако, повышение качественных показателей не сводится к определению потерь в сетях и во многих случаях является вопросом технологическим. Действительно, воздействие на результирующую нагрузку возможно путем упорядочения организационных мероприятий и рационального использования электроприводов горных машин оптимизацией технологического процесса добычи руды. Снижение сопротивления элементов сети зависит от выбора соответствующей схемы электроснабжения горизонта.

Результаты исследований показывают, что групповая стабилизация для ЭП с различными требованиями нецелесообразна, так как приводит к излишнему ужесточению условий и, следовательно, не эффективному удорожанию системы электроснабжения. Согласно выполненному анализу изменение производительности (скорости) в зоне экстремального значения имеет столь пологий характер, что значительному отступлению от оптимальных параметров  $\delta U$  соответствует небольшое изменение производительности выемочно-погрузочного оборудования.

Наиболее эффективным представляется регулирование реактивной мощности, которое позволяет одновременно снизить потери напряжения в сети и поддержать величину напряжения. Возможности компенсации реактивной мощности вытекают из выражения для потери напряжения

$$\Delta U = I_a r_k + (I_p + I_k) X_k, \quad (3)$$

где  $I_a, I_p$  - активная и реактивная составляющие тока нагрузки;  $I_k$  - ток компенсации;  $X_k, r_k$  - сопротивление короткого замыкания в рассматриваемом узле нагрузки.

Считая, что  $U_0$  в ближайшем узле сети отклоняется на величину  $\delta U_i$  независимо от рассматриваемой нагрузки, напряжение в данной точке

$$U = U_0 \pm \delta U_i - \Delta U \quad (4)$$

В этом случае ток компенсации, необходимый для поддержания напряжения на заданном уровне

$$I_k = I_p + I_a \frac{r_k}{X_k} - \frac{\Delta U - 2\delta U}{X_k} \quad (5)$$

Целесообразность и экономичность реализации этого способа повышается с увеличением  $X_k$  снижением  $r_k$ .

Одним из наиболее перспективных способов ограничения влияния быстроизменяющейся нагрузки на напряжение является компенсация реактивной мощности, осуществляемая посредством установок статических конденсаторов, синхронных двигателей и компенсаторов, а также компенсационных преобразователей.

Применение технических средств компенсации реактивной мощности сейчас гораздо выгоднее, чем удорожание сетей за счет реконструкции. Весьма перспективно внедрение статических источников реактивной мощности (ИРМ), у которых выпрямленным током тиристорного преобразователя индуктивность (реактор или дроссель с железом) заряжается магнитной энергией с последующим ее инвертированием в сеть переменного тока при опережающем коэффициенте мощности. Преобразователи, разработанные по схеме с искусственной коммутацией, где в качестве устройства коммутации используются конденсаторы, наряду со своими активными функциями выполняют задачу генерирования реактивной мощности в сеть, существенно снижают колебания напряжения при резкопеременных и толчковых нагрузках.

Для повышения уровней напряжения на зажимах удаленных ЭП железорудных шахт приемлемым вариантом является обеспечение централизованного регулирования изменением коэффициента трансформации трансформаторов ЦРП в соответствии с режимом суточного графика нагрузки. Однако следует отметить недостаточность проектных надежных способов централизованного встречного регулирования напряжения ввиду несовершенства и низкой надежности устройств РПН регулирования под нагрузкой трансформаторов. Кроме того, опыт эксплуатации трансформаторов с РПН показывает на частоту переключения анцапф трансформаторов несколько раз в течение года, в основном для сглаживания сезонных колебаний нагрузки.

Наиболее приемлемым и технически возможным направлением повышения качественных показателей в системах электроснабжения шахт является перевод подземных участков сетей на повышенные напряжения. Это позволит не только снизить потери электроэнергии и расход

цветных металлов в сетях низкого напряжения, но и в ряде случаев увеличить радиус действия участков подстанций и единичную мощность трансформаторов или обеспечить наиболее полную их загрузку. Это значительно упрощает схему электроснабжения предприятия, сокращает необходимое количество электрооборудования напряжением выше 1000 В, капитальные вложения и потери электроэнергии.

Эффективность применения напряжения 660 В неодинакова для всех отраслей промышленности. Напряжение 660 В в первую очередь рекомендуется для предприятий с более высокой средней единичной мощностью электроприемников, а также для тех предприятий, в которых по условиям генплана, технологии или окружающей среды не могут быть использованы дробление подстанций и приближение трансформаторов к центрам питаемых ими нагрузок.

Экономичность напряжения 660 В определяется тем, что стоимость трехфазных электродвигателей 660/380 В практически одинакова со стоимостью электродвигателей - 380/220 В. Если же стоимость отдельных новых типов электродвигателей в связи с улучшением изоляции и показателей надежности несколько увеличивается, то это удорожание можно не учитывать. Стоимость трансформаторов с вторичным напряжением 0,4 и 0,69 кВ одинакова. По сравнению с напряжением 380 В пропускная способность сети при напряжении 660 В возрастает в 3 раза, а потери электроэнергии уменьшаются, в 3 раза при одинаковом расходе цветных металлов и примерно в 2-1,8 раза, если сечения токопроводящих жил, выбранные при напряжении 380 В, снизить на одну-две ступени.

При технико-экономических расчетах часто ограничиваются сравнением электроустановок напряжением до 1000 В, не меняя технических решений по предприятию в целом. При этом, выгода от применения напряжения 660 В оказывается заниженной. Наряду с уменьшением потерь в электрических сетях до 1000 В, напряжение 660В обладает двумя существенными преимуществами:

верхний предел номинальной мощности трехфазных электродвигателей 380 В в особенности синхронных при напряжении 660 В может быть повышен, по крайней мере, в  $\sqrt{3}$  раз, т.е. до 630 кВт, а в отдельных случаях еще выше;

экономический радиус действия подстанций увеличивается почти в 2 раза; в отдельных случаях за счет небольшого увеличения длины питающей сети до 1000 В допустимо повысить единичную мощность трансформаторов, сократить число подстанций, линий и аппаратуры напряжением, выше 1000 В; одновременно снижается примерно в 2 раза расход цветных металлов.

При переводе шахтных распределительных сетей с напряжения 380 В на 660 В возможны следующие варианты выбора сечения кабельных линий:

*по механической прочности.* В этом случае сечение сети не меняется. Следовательно, потери электроэнергии при напряжении 660 В снижаются в 3 раза;

*по потере напряжения.* В этом случае сечение сети при 660 В снижается в 3 раза, сохраняя на том же уровне потери энергии;

*по нагреву.* В этом случае сечение сети при напряжении 660В снижается примерно в 2-2,5 раза, а потери энергии уменьшаются соответственно в 1,5-1,2 раза.

**Выводы и направление дальнейших исследований.** Использование напряжения 660/380 В обеспечивает неоспоримые экономические преимущества по сравнению с напряжением 380/220 В при возможности глобального перевода всех трехфазных нагрузок на напряжение 660 В. При этом обеспечивается снижение потерь мощности и затрат на пропускную способность сети. В среднем экономический эффект по зависимой части приведенных затрат составит 73%. Не менее существенны и технические преимущества, даваемые напряжением 660В. Они заключаются в обеспечении экономии цветного металла, снижении потерь и режимов напряжения, снижении номинальных потоков нагрузки, возможности укрупнения единиц трансформаторной мощности и мощности токоприемников, а также возможности полного исключения напряжения 6 кВ и замены его напряжением 10 кВ.

Дальнейшие исследования сводятся к совершенствованию тактики оценки эффективности функционирования систем электроснабжения и электропотребления в условиях неопределенности и неполноты информации с целью повышения качества напряжения в шахтных сетях.

*Список литературы*

1. Кудрин Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий. – М.: Интермет Инжиниринг, 2006. – 672 с.

Рукопись поступила в редакцию 21.03.12