

А.В. Остапчук

## ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПОДЗЕМНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ГЛУБОКИХ ШАХТ

*Критерии устойчивой работы системы подземного электроснабжения глубоких шахт. Оценка показателей. Технические решения по повышению устойчивости работы электрооборудования.*

*К л ю ч е в ы е с л о в а: система электроснабжения, питающие сети, устойчивость, асинхронный привод, высокое напряжение.*

*Критерії стійкої роботи системи підземного електропостачання глибоких шахт. Оцінка показників. Технічні рішення по підвищенню стійкості роботи електрообладнання.*

*К л ю ч о в і с л о в а: система електропостачання, мережі що живлять, стійкість, асинхронний привід, висока напруга.*

**Постановка проблемы.** В последние годы в горнорудной и угольной отрасли Украины строительство шахт для разработки новых месторождений подземным способом из-за значительных капитальных затрат практически не ведется, а существующие предприятия вынуждены разрабатывать полезные ископаемые на глубине больше 1000 м. Это приводит к удорожанию себестоимости продукции и требует использования оборудования с большей производительностью. Одним из основных условий эффективного использования нового подземного оборудования, повышения его производительности и улучшения качества продукции является применение в системе подземного электроснабжения соответствующей схемы передачи и распределения электрической энергии. При ее построении используют правила, утвержденные еще в 70-х годах прошлого столетия [1], которые не учитывают современных реалий технологии разработки полезных ископаемых. Поэтому использование новых принципов при построении схем электроснабжения шахтной сети, с исследованием факторов, влияющих на работу приемников электрической энергии, является актуальной научной задачей.

**Анализ исследований и публикаций.** В настоящее время для внутришахтных высоковольтных питающих и распределительных сетей применяется, в основном, напряжение 6 кВ [2], что в связи с повысившейся энергоемкостью шахт приводит к необходимости прокладки по стволу большого количества (до 4-5) кабелей [3], усложняет эксплуатацию системы электроснабжения, требует больших капиталовложений и, кроме того, приводит к усложнению распределительной сети, влечет за собой повышенный

расход цветных металлов, увеличивает потери электроэнергии, в особенности в подземных сетях большой протяженности, длина отдельных линий которых доходит до 5 км. Исследования надежности схем электроснабжения шахт [4] позволяют заключить, что необходимо стремиться к уменьшению числа кабелей, питающих центральную подземную подстанцию (ЦПП). Осуществление таких схем возможно путем повышения класса напряжения, подаваемого на ЦПП [5].

**Цель статьи.** Оценка устойчивости подземной системы электроснабжения шахт при различных уровнях питающего напряжения.

**Результаты исследований.** В процессе эксплуатации электроприемники подземной системы электроснабжения испытывают различного рода возмущения, что сказывается на работе всей системы в целом. Различают два основных показателя оценки устойчивой работы системы – статическую и динамическую устойчивость [6]. В процессе эксплуатации системы возникают различные режимы работы оборудования, связанные с технологическими операциями (нормальные переходные процессы), в виде резких и существенных изменений ее режима работы (изменение схемы соединения системы; технологические переключения агрегатов большой мощности или присоединений, несущих значительную нагрузку; нормальное включение или отключение линий с большой зарядной мощностью и т. д.). Кроме того, существуют режимы работы электрооборудования, связанные с нештатными ситуациями в системе (аварийные переходные процессы), вызванными короткими замыканиями (КЗ) различного характера, с последующими отключениями аварийных участков, а в некоторых случаях с их повторными включениями.

После нормального, благополучно заканчивающегося переходного или аварийного режима система возвращается к установившемуся режиму, исходному или практически близкому к нему. Как установившиеся, так и переходные режимы должны отвечать определенным требованиям, используемым при проведении расчетов. Так, в нормальном рабочем режиме, принимаемом, как правило, за исходный, должны быть обеспечены высокие значения следующих показателей:

а) *качество* – снабжение потребителей энергией, отвечающей установленным нормативам ГОСТ 13109-97 и ГОСТ 23875-88;

б) *надежность* – снабжение потребителей энергией без длительных перерывов и снижения ее качества, причем длительность перерыва или его отсутствие, возможность отклонения от заданного качества определяются соответствующими нормативами для данной системы и данного вида потребителей. Надежность системы обеспечивается безотказностью, ремонтопригодностью и долговечностью ее элементов. Надежная система должна длительно сохранять такие эксплуатационные показатели, как производительность, экономичность, рентабельность;

в) *живучесть* – способность так противостоять воздействию внешних сил, чтобы они не вызвали каскадного развития аварии с массовым нарушением питания потребителей, и длительное время сохранять это состояние. В качестве показателей живучести используют долю отключившейся нагрузки, недоотпуск продукции потребителям и т.д. При их использовании понятие живучести становится шире аналогичных понятий безотказности, ремонтпригодности или устойчивости;

г) *экономичность* – надежное снабжение потребителей энергией удовлетворительного качества при наименьших затратах на ее производство и передачу с экономией топливно-энергетических ресурсов и снижением потерь.

Переходные режимы электрических систем всегда должны заканчиваться некоторым установившимся режимом. Этот режим должен быть устойчив и достаточно надежен для того, чтобы система могла длительно работать при относительно небольших случайных изменениях (малых возмущениях), которые не должны приводить к нарушению её устойчивости. Особенно важно соблюдение этих условий для установившегося послеаварийного режима. Такие требования включают обеспечение реализации, возможности наблюдения и управления установившимся (самоустановившимся) режимом. В случае длительного существования этот режим должен отвечать и тем четырем требованиям, которые сформулированы выше применительно к исходному режиму и, прежде всего, устойчивости, как основной составляющей живучести. Если самоустановившийся режим не удовлетворяет каким-либо из предъявляемых требований, то он должен корректироваться и быть введен в допустимую область.

Статическую устойчивость рассматривают в двух аспектах:

а) как свойство заданного установившегося режима самовосстанавливаться при ничтожно малых отклонениях параметров его режима от исходных значений;

б) как свойство постепенно ухудшающегося установившегося режима противостоять малым отклонениям и малым колебаниям вплоть до некоторого предельного режима.

Динамическую устойчивость рассматривают при больших (обычно нелинейных) отклонениях параметров, часто сопровождающихся изменениями конфигурации и параметров электрической системы (числа работающих элементов) и значений этих параметров.

Для обеспечения устойчивости система должна работать с некоторым запасом, характеризуемым коэффициентом запаса  $K_3$ , т. е. при таких параметрах режима, которые отличаются в  $K_3 > 1$  раз от критических, при которых может произойти нарушение устойчивости. Для определения запаса устойчивости в данной (работающей или прогнозируемой) системе, параметры которой известны, и для выбора мероприятий, улучшающих устойчивость, необходим анализ (расчеты) устойчивости с определением

критических параметров. В ряде случаев необходим переход к задачам синтеза, например к поиску изменений параметров режима во времени  $P_p=f(t)$ , т.е. установлению вида переходного процесса с выявлением вносимых с помощью устройств системной автоматики воздействий, которые придадут переходному процессу желательный характер. Выбор устройств и мероприятий, действующих во время протекания процесса, например таких, которые способствуют восстановлению синхронизма после его нарушения и обеспечивают этим результирующую устойчивость, относится к задаче управления переходным процессом. Рассмотрим факторы, которые возникают в подземной системе электроснабжения и приводят к снижению ее устойчивости.

*Медленные понижения напряжения.* Длительные медленные понижения напряжения в питающих и распределительных шахтных сетях приводят к ряду явлений, которые необходимо учитывать при анализе переходных процессов в них. Так, понижение напряжения от  $U_0$  до  $U_1$  ведет к снижению запаса статической устойчивости двигателей.

У двигателей синхронных и соответственно асинхронных (АД) запас снижается

$$\text{а) от } K_{s1ch} = (EU_0/x - P_0)/P_0 \text{ до } K_{s2ch} = (EU_1/x - P_0)/P_0 ;$$

$$\text{б) от } K_{s1ac} = (P_{m1} - P_0)/P_0 \text{ до } K_{s2ac} = (P_{m2} - P_{01})/P_{01} ,$$

где  $P_0$  при снижении напряжения не изменяется.

Используя известные допущения, можно принять  $P=M$ , тогда  $P_{m1} \equiv U_0^2$ ;  $P_{m2} \equiv U_1^2$ .

Механический момент нагрузки  $M_0 \equiv P_0$  изменяется с изменением скольжения, которое, в свою очередь, зависит от напряжения. Значение  $P_0$  может определяться согласно известному выражению

$$P_0 = c(1 - s_0)^q ; P_{01} = c(1 - s_1)^q ,$$

где  $c$  – постоянный коэффициент;

$s_0$  и  $s_1$  – скольжение в нормальном режиме и режиме сниженного напряжения;

$q$  – показатель, характеризующий вид статической характеристики.

Для любого режима двигателя существует соотношение

$$U_0^2 Rs / [R^2 + (xs)^2] = 2P_m s_{kp} s / [s^2 + s_{kp}^2] = c(1 - s)^q ,$$

где  $s_{kp}$  – критическое скольжение.

Следовательно, скольжение  $s_1$  может быть найдено из соотношения

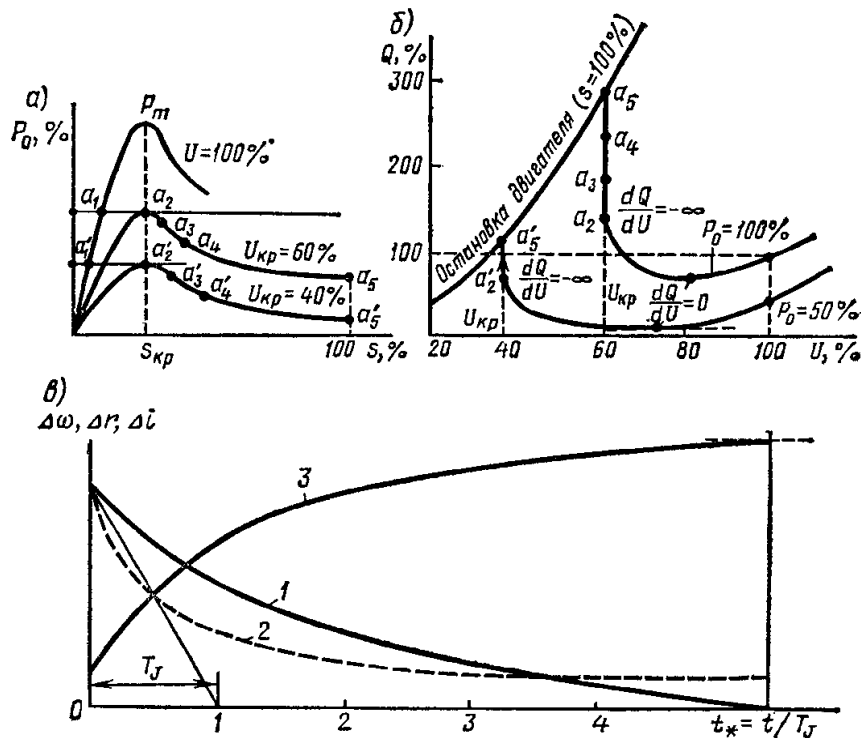
$$U_0^2 / s_0 / [(1 - s_0)^q (s_{kp}^2 + s^2)] = U_1^2 s_1 / [(1 - s_1)^q (s_{kp}^2 + s_1^2)] . \quad (1)$$

Для определения  $s_1$  преобразуем (1), тогда при  $q = 1$  получим уравнение вида

$$s_1^3 - s_1^2 + As_1 - B = 0.$$

Рассматривая процессы в АД подземных потребителей электрической энергии при снижении напряжения, необходимо заметить, что происходящее при этом увеличение силы тока приводит к более интенсивному снижению напряжения в питающей сети, что, с одной стороны, неблагоприятно сказывается на работе всей системы, а с другой – приводит к увеличению тепловых потерь и повышенному нагреву оборудования. Особенно это относится к АД, у которых сила тока статора  $I_1$  и ротора  $I_2$  резко возрастает со снижением напряжения.

*Переход в режим заторможенного двигателя.* У АД имеется только одна область устойчивой работы – область, лежащая между синхронной скоростью вращения и скоростью, соответствующей критическому скольжению. Область между критическим скольжением и скольжением, равным единице, оказывается неустойчивой. В нормальных условиях АД работает на устойчивой части характеристики (участок  $0-s_{кр}$  на рисунке 1а) при скольжении меньше критического.



а) характеристика  $P_0 = f(s)$  при  $P_0=100\%$  и  $P_0=50\%$ , когда напряжение не зависит от режима работы двигателя; б) характеристики  $Q = \varphi(U)$  при  $P_0=100\%$  и  $P_0=50\%$ , соответствующие характеристикам  $P_0 = f(s)$ ; в) переход в режим заторможенного двигателя во времени: 1 – изменение частоты вращения  $n/n_0 = f(t)$ ; 2 – изменение сопротивления; 3 – изменение силы тока

Рисунок 1 – Характеристики асинхронного двигателя при различных значениях питающего напряжения, не зависящего от режима работы

Однако при снижении напряжения или увеличении механического момента нагрузки АД может оказаться в критическом режиме (точка  $a_2$ ). При дальнейшем снижении напряжения точка, характеризующая режим, перейдет на спадающую часть характеристики (участок  $a_3a_4$ ), АД будет тормозиться, сила тока и реактивная мощность (рисунок 1б) будут резко увеличиваться, а затем АД остановится (точка  $a_5$ ). При неизменном напряжении, равном критическому, процесс остановки идет так, как это показано на рисунке 1в.

*Резкие изменения режима в системах электроснабжения* обычно происходят в случае:

а) аварии (КЗ) или перегрузки в распределительной или питающей сети и последующего их устранения. Напряжение в момент  $t = 0$  уменьшается от значения  $U_0$  до  $U_1$ , а затем, по истечении времени  $t_1$ , вновь восстанавливается до  $U_0$ , причем режим нагрузки не влияет на характер изменения;

б) отключения АД (узла нагрузки) от напряжения и подключения его через время  $t_1$ , в этом случае  $U_1 = 0$ ;

в) изменения момента сопротивления в связи с увеличением нагрузки на приводном механизме ( $M_1 > M_0$ ) или уменьшением ее ( $M_1 < M_0$ ) с последующим восстановлением (через  $t_1$ ) прежнего момента  $M_0$ .

Рассмотрим эти случаи сначала упрощенно, чтобы выяснить основную физическую картину процесса и особенности поведения АД привода, например, насосов напряжением 6 кВ. Можно принять, что механический момент нагрузки  $M_{мех}$  изменяется скачком только в моменты времени  $t = 0$  и  $t = t_1$ , электромеханический момент  $M$  может быть определен согласно статической характеристике, а электромагнитные переходные процессы в АД не учитываются, так как они в большинстве случаев сравнительно мало влияют на изучаемые процессы. Предположим, что напряжение изменяется так, как это представлено на рисунке 2а, а момент сопротивления  $M_{мех}$  – как на рисунке 2б. В любом случае происходит увеличение нагрузки, которое может вызвать неустойчивость работы АД.

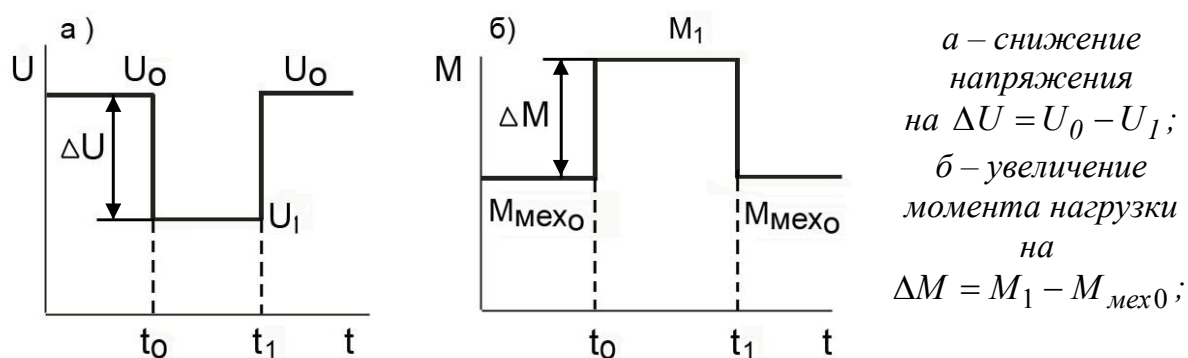


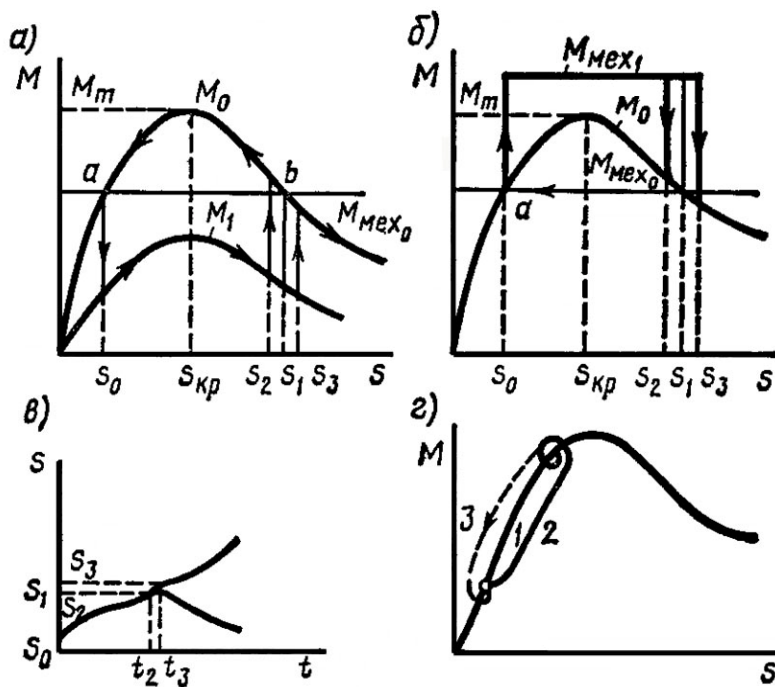
Рисунок 2 – Изменение режима

Изменение напряжения питающей сети или механической нагрузки на валу одинаково вызывает изменение скольжения. С уменьшением напряжения или увеличением момента оно увеличивается. Если при этом механический момент  $M_{\text{мех}}$  окажется больше максимального вращающего ( $M_{\text{мех}} > M_m$ ), то АД будет увеличивать скольжение до  $s = 1$ , т. е. до остановки. Во избежание этого надо своевременно восстановить напряжение (или уменьшить механический момент на валу).

Рассмотрим устойчивость АД, работающего при нагрузке, создающей на валу момент  $M_{\text{мех}} = M_{\text{мех}0} = \text{const}$  (рисунок 3). Пусть при этом моменте АД находится в установившемся состоянии (точка а на рисунке 3а) и работает со скольжением  $s_0$ . Если по каким-либо причинам напряжение на его зажимах уменьшилось от  $U_0$  до  $U_1$ , то электромагнитный момент снизится в  $(U_0/U_1)^2$  раз:

$$M_1 = M_0 \left( \frac{U_1}{U_0} \right)^2 = \frac{2M_m}{s/s_{\text{кр}} + s_{\text{кр}}/s} \left( \frac{U_1}{U_0} \right)^2.$$

Разумеется, допустимость того или иного увеличения мощности или снижения напряжения будет определяться не только устойчивостью АД, но и значением силы тока, возрастающим при резком увеличении нагрузки, так как увеличение силы тока ведет к недопустимому нагреву АД.



а) снижение напряжения от  $U_0$  до  $U_1$  и уменьшение момента нагрузки от  $M_0$  до  $M_1$ ; при восстановлении напряжения (от  $U_0$  до  $U_1$ ) и при  $s_2 < s_1$ , восстанавливается исходный режим; но при  $s_3 > s_1$ , двигатель останавливается; б) увеличение механического момента от  $M_{\text{мех}0}$  до  $M_{\text{мех}1}$ ; в) зависимость  $s = f(t)$ ; г) сопоставление статической и динамической характеристик:

1 – статическая характеристика; 2 – характеристика при увеличении нагрузки (динамическая); 3 – то же, что 2, но при уменьшении нагрузки

Рисунок 3 – Увеличение нагрузки на асинхронный двигатель

Уравнение движения при этом будет иметь вид  $M_{\text{мех}0} - M_1 = T_j ds/dt$ .

При снижении электромагнитного момента с  $M_0$  до  $M_1$  АД будет тормозиться и остановится. Время, в течение которого он будет останавливаться, и изменение скольжения в этот период времени можно найти, интегрируя уравнение движения. Обычно возникает задача: найти наибольшее время, на которое можно понизить напряжение с  $U_0$  до  $U_1$ , с тем, чтобы после восстановления напряжения АД мог продолжить нормальную работу. При этом скольжение (точка  $b$  на рисунке 3а) не должно увеличиваться до значения, большего  $s_1$ , так как при  $s > s_1$  АД попадает на неустойчивую часть характеристики и восстановление напряжения уже не сможет прекратить процесс его торможения и остановки. Поведение АД при увеличении нагрузки будет полностью аналогично его поведению при снижении напряжения.

На горном производстве наибольшее распространение получил короткозамкнутый АД, благодаря своей простоте и надежности. Повышение эффективности не только такого вида мощного нерегулируемого электропривода, но и некоторых видов регулируемого привода, использующего АД с частотным регулированием, требует более внимательного рассмотрения особенностей его работы.

Известно, что для АД изменение скорости вращения (скольжения) приводит к резкому изменению его эквивалентного сопротивления [6]. Это обстоятельство вызывает изменение силы тока статора и ротора, а также соответственное перераспределение той доли электромагнитной энергии, которая при установившемся скольжении преобразовалась в механическую. Часть ее расходуется на изменение запаса энергии в индуктивности АД, что приведет к запаздыванию изменения моментных характеристик (динамических) по отношению к характеристикам при медленных изменениях режима (статическим). Примерный вид динамической характеристики АД показан на рисунке 3в. Из приведенных зависимостей следует, что электромагнитный момент в динамике изменяется с некоторым запаздыванием по отношению к статической характеристике. Соответственно значения скольжения АД, изменения его силы тока и условия устойчивости будут отличаться от определенных применительно к статической характеристике (рисунок 3г).

Обычно АД, независимо от их режима работают с большим запасом устойчивости (рабочее скольжение значительно меньше критического, а максимальный вращающий момент больше рабочего в 1,5–1,7 раза). В этих условиях отклонения напряжения на зажимах единичного АД не опасны с точки зрения его устойчивости и только очень большое снижение напряжения (20...30 %) приводит к торможению. Рост потребления реактивной мощности может привести к уменьшению напряжения в сети и вызвать развитие «лавины напряжения». При питании группы АД от источника со-



измеримой мощности в результате этого у них может появиться режим с заторможенным ротором и при малых (2...3 %) отклонениях напряжения.

Рассмотренная ситуация характерна для той шахтной сети, в которой группа мощных приводов подключается к силовому трансформатору со измеримой мощности. Так как электроснабжение осуществляется последовательно, то снижение напряжения на ЦПП приведет к снижению напряжения на распределительных подземных пунктах и далее на участковых. Эта особенность построения шахтной системы подземного электроснабжения вызывает опасность потребления силы рабочего тока выше номинальной и остановки АД. При возникновении такого режима эффективным средством будет срабатывание защиты, с последующим отключением неответственных потребителей. Данное мероприятие повысит устойчивость системы, но приведет к снижению производительности шахты. С увеличением глубины разрабатываемых горизонтов увеличится количество электроприемников так, что такое отключение повлечет за собой значительные убытки предприятия. Действенным способом повышения статической устойчивости электроснабжения глубоких шахт является разделение сети с использованием повышенного напряжения класса 35 кВ для питания ствольных кабелей и с установкой в ЦПП силовых трансформаторов напряжением 35/6 кВ. Такой вариант открывает дальнейшую перспективу развития шахтной сети и исключает влияние (и связь в нормальном режиме эксплуатации) существующей системы подземного электроснабжения.

Принципиальную схему питания подземных трансформаторов напряжением 35/6 кВ предлагается реализовать по схеме блока «линия – трансформатор» [7], что позволит исключить необходимость установки на ЦПП как минимум трех (двух вводных и одного секционного) распределительных устройств напряжением 35 кВ в рудничном исполнении. Последнее будет способствовать как снижению капитальных затрат, так и повышению надежности системы за счет уменьшения числа её элементов. Применение сухих трансформаторов со степенью защиты IP54, имеющих в комплекте заземляющие ножи, позволяет выполнить одно из основных требований отраслевых Правил безопасности также без установки распределительного устройства. На сегодняшний день проведена большая работа с учетом замечаний ведущих отраслевых институтов и специалистов по разработке отраслевых Правил [8] использования напряжения 35 кВ для рудничных шахт с глубиной разработки полезных ископаемых выше 1000 м.

### ***Выводы:***

1. При оценке устойчивости системы подземного электроснабжения используют два основных показателя – статическую и динамическую устойчивость. Статическая устойчивость связана с выполнением технологических операций в системе (нормальными переходными процессами), ди-

намическая устойчивость проявляется в связи с нештатными ситуациями (аварийные переходные процессы), вызванными КЗ различного характера.

2. Дальнейшее повышение мощности рудных и угольных шахт требует детального изучения вопросов устойчивой работы электрооборудования шахтной сети и изменения принципов построения системы электроснабжения глубоких шахт.

3. Использование напряжения 35 кВ для питания шахтных ЦПП раскрывает дальнейшую перспективу развития шахтной сети и исключает влияние на показатели устойчивости (и связь в нормальном режиме эксплуатации) существующей системы подземного электроснабжения.

### Список литературы

1. Единые правила безопасности при разработке рудных, нерудных и россыпных месторождений подземным способом: НПАОП 0.00-1.34-71 [Электронный ресурс]/ Всеукраинский портал по вопросам охраны труда. – Режим доступа:

[www/URL: http://dnop.com.ua/dnaop/act4277.htm/](http://dnop.com.ua/dnaop/act4277.htm/) – Загл. с экрана.

2. Электрификация горного производства: учеб. для вузов: в 2 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.

3. Шишкин Н.Ф. Основные направления электрификации современных шахт / Н.Ф. Шишкин, В.Ф. Антонов.– М.: Наука, 1981.– 116 с.

4. Анализ параметров и процессов в шахтных электрических сетях / [Шкрабец Ф.П., Шидловская Н.А., Дзюбан В.С., Вареник Е.А.]– Днепропетровск: Национальный горный университет, 2003.– 151 с.

5. Электроснабжение угольных шахт / [ Волотковский С.А., Разумный Ю.Т., Пивняк Г.Г. и др.]. – М.: Недра, 1984.– 376 с.

6. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах: учеб. для электроэнергетич. спец. вузов / В.А. Веников.– [4-е изд.]. – М.: Высш. шк., 1985. – 536 с.

7. Шкрабец Ф.П. Глубокий ввод напряжения 35 кВ для питания потребителей глубоких горизонтов шахты ЗАО «Запорожский ЖРК» /Ф.П. Шкрабец, А.В. Остапчук, Ю.Н. Безручко // Гірнична електромеханіка та автоматика: наук.- техн. зб. – 2010. – №84. – С. 69-76.

8. Временные нормативы по безопасности применения напряжения 35 кВ для систем электроснабжения подземных электроприемников ЗАО «Запорожский железорудный комбинат.– МАКНИИ, ЗАО «ЗЖРК», НГУ, 2012.– 55 с.