

землю і зі зменшенням коефіцієнта обмеження. За  $k_{opr} = 1,8$  і різних значеннях параметрів мережі за час півперіоду напруги мережі  $T_c/2$  виділяється енергія  $W=690-2100$  Дж.

#### Список літератури

1. Толмачов С.Т., Барановська М.Л. Моделирование процессов дуговых замыканий на землю в сетях с изолированной нейтраллю // Вісник ВПШ. - 1997. - №4. - С. 36-40.
2. Барановская М.Л. Влияние междуфазной емкости на частоту и затухание переходных процессов при однофазных замыканиях на землю // Разработка рудных месторождений. - Кривой Рог. - 1998. - №65 - С. 30-34.
3. Барановская М.Л. Моделирование переходных процессов в распределительной сети при замыканиях на землю с учетом активных проводимостей изоляции // Книга за матеріалами п'ятої міжнар. конф. "Контроль і управління в технічних системах" (КУТС-97). - Том 3. - Вінниця: "УНІВЕРСУМ-Вінниця". - 1999. - С. 21-26.
4. Барановская М.Л. Влияние высокоомного резистора в нейтрали на дуговые перенапряжения в распределительных сетях // Разработка рудных месторождений. - Кривой Рог. - 2000. - №72. - С. 72-78.
5. Сінолиций А.П., Барановська М.Л. Вплив міжфазної ємності на процес відновлення напруги на пошкодженій фазі в кар'єрних розподільчих мережах // Научные труды КГПИ "Проблемы создания новых машин и технологий". - Выпуск 1. - Кременчуг: Научно-исследовательская часть КГПИ. - 2001. - С. 297-299.
6. Барановская М.Л. Рациональные методы ограничения перегрузок по напряжению карьерного электрооборудования при однофазных замыканиях на землю в питающих цепях. // Научно-технический сборник. Разработка рудных месторождений. 85выпуск. Криворожский технический университет. - Кривой Рог. -2004. - С. 99-102.

Рукопис продано до редакції 19.03.12  
УДК 622.625.28-83

О.Н. СИНЧУК, д-р техн. наук, проф., Э.С. ГУЗОВ, И.О. СИНЧУК, кандидаты техн. наук, доц.,  
А.В. ОМЕЛЬЧЕНКО, ассистент, ГВУЗ «Криворожский национальный университет»  
Д.А. ШОКАРЕВ, ст. преподаватель, Е.И. СКАПА, аспирант  
Кременчугский национальный университет им. Михаила Остроградского

### К ВОПРОСУ СТРАТЕГИИ СОЗДАНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО И БЕЗОПАСНОГО В ЭКСПЛУАТАЦИИ ДВУХОСНОГО ЭЛЕКТРОВОЗА ДЛЯ РУДНЫХ ШАХТ

В статье приведены результаты исследований по поиску и созданию энергоэффективного и безопасного в эксплуатации электровоза для рудных шахт – контактно-аккумуляторного. Приведен разработанный закон и алгоритм управления тяговым электротехническим комплексом, его структура для данного вида электровоза.

**Проблема и ее связь с научными и практическими заданиями.** На отечественных предприятиях горно-металлургического комплекса с технологиями подземной добычи полезных ископаемых (шахты, рудники) эксплуатируется около 3,5 тысяч - двадцати типов двоосных контактных и аккумуляторных электровозов [1]. Около 80 % данного электровозного парка составляют аккумуляторные виды и 20 % - контактные.

Последние используются на всех рудных шахтах и частично, в ряде случаев, регламентированных соответствующими правилами [2], на угольных. Контактные электровозы за более чем столетний опыт эксплуатации в подземных выработках показали свою непривередливость в обслуживании и эксплуатации, а главное, при прочих равных факторах то, что они значительно дешевле своих прототипов - аккумуляторных, которые ко всему имеют недостаточный для рудных шахт сцепной вес и требуют дополнительно специальных дорогостоящих аккумуляторов и стационарных зарядных станций.

Вместе с тем, контактные электровозы в силу наличия контактного провода (КП) как элемента тяговой сети в условиях подземных выработок являются причиной поражения горнорабочих электрическим током при их несанкционированном, но весьма вероятном по технологии ведения горных работ прикосновении к нему.

Только в 2011 г. на шахтах (рудниках) Криворожского железорудного бассейна произошло несколько несчастных случаев поражения горнорабочих электрическим током при касании КП, в т.ч. со смертельным исходом. Парадоксально, но возникают, хотя и наивные по своей сути, но все же предложения замены электровозной откатки в шахтах Кривбасса на альтернативные - другие виды. Такая постановка задачи обеспечения безопасности - это явное непонимание состояния вопроса, но важно и безусловно то, что проблему безопасности людей в шахтах от касания КП необходимо решать.

Исследования всех «за» и «против» высветили возможным и одновременно реальным направлением технического компромисса создание на базе контактных видов нового подвида электровозов - контактно-аккумуляторных [3].

Достижение желаемой эффективности (в том числе энергоэффективности) путем создания такого электровоза должно базироваться на современном типе и структуре тягового электротехнического комплекса (ТЭТК).

Существующие же ТЭТК не отвечают современным условиям по причине:

значительных потерь энергии в реостатах, составляющих около 30 % от общей потребляемой энергии;

низкой надежности тяговых двигателей постоянного тока, срок службы которых часто не превышает нескольких месяцев и больших затрат на их ремонт и эксплуатацию;

низкой надежности контроллеров и контакторов системы управления;

большой опасности для машиниста электровоза по причине присутствия силового контроллера, коммутирующего значительные по величине токи в кабине машиниста, крышки которых легко прожигаются электрической дугой;

невозможности в полной мере реализовать тяговые возможности электровоза ступенчатого регулирования в силу напряжения питания на зажимах тяговых электрических двигателей (ТЭД);

отсутствии возможности применить устройства автоматизации управления режимами работы электровозосоставов.

Как показывают результаты исследований [3], достичь требуемой эффективности функционирования рудничных видов электровозов можно, применив на них ТЭТК типа: IGBT-преобразователь - асинхронные тяговые двигатели с микропроцессорной системой управления. При этом по сравнению с ТЭТК постоянного тока ожидаемы следующие преимущества данного варианта:

повышение в 4-5 раз надежности тяговых асинхронных двигателей (ТАД) и безопасности их эксплуатации в условиях повышенной опасности, каковыми являются шахты и рудники;

возможность ожидаемого снижения габаритов тяговых двигателей и увеличения их мощности на 20 % в рамках существующих массогабаритных показателей;

снижение стоимости ТАД по сравнению с ТЭД постоянного тока при тех же мощностях;

исключение частот вращения тяговых двигателей, превышающих допустимые (разносные);

получение более высокого к.п.д. всей тяговой системы на 2-4%;

значительное снижение (в 2-3 раза) затрат на обслуживание и ремонт ТАД;

плавное бесступенчатое регулирование тягового и тормозного усилия электровоза;

возможность функционирования в синергетическом варианте - контактно-аккумуляторный электровоз.

Однако воплощение всех достоинств ТЭТК с ТАД в новый вид рудничного электровоза возможно только на основе обоснованного алгоритма управления, реализующего закон оптимального управления эффективной структурой тягового комплекса [4].

**Анализ исследований и публикаций.** Основной из причин задержки в освоении серийного выпуска ожидаемых промышленностью новых энергоэффективных образцов, каковыми являются ТЭТК: «IGBT-преобразователи асинхронные тяговые двигатели», является отсутствие обоснования тяговых координат (параметров) - слагаемых для реализации закона управления всем тяговым комплексом в целом [3, 4].

Известные исследования в области разработки тяговых электротехнических систем с асинхронными ТЭД для рудничных электровозов (как впрочем и самих электровозов) имели направленность скорее конструктивной реализации [3]. При этом по ряду причин не был решен в частности один из главных вопросов на пути реализации таких ТЭТК - минимизация до требуемого уровня степени жесткости электромеханических характеристик тяговых асинхронных электрических двигателей [3].

**Постановка вопроса.** Целью исследований является обоснование и разработка алгоритма управления частотой вращения асинхронных тяговых электрических двигателей и на этой основе - эффективной структуры ТЭТК для нового вида отечественных рудничных электровозов - контактно-аккумуляторных.

**Изложение материала и результаты.** Разработка закона и алгоритма управления. Тактику строения систем управления тяговых электротехнических комплексов целесообразно рассматривать в увязке с совершенствованием характеристик электровозов и добавлением новых тяговых возможностей, т.е. решать задачу комплексно.

Главнейшими техническими параметрами электровозов являются масса, скорость и сила тяги. При этом мощность равна

$$P = F \cdot v,$$

где  $F$  - сила тяги, Н;  $v$  - скорость, м/с.

При сохранении мощности привода для условий движения в рудных шахтах целесообразно увеличить силу тяги и уменьшить скорость, т.к. скоростные характеристики существующих электровозов не реализуются, – по условиям безопасности движения скорости ограничиваются значениями 5-10 км/час.

Как известно [4], сила тяги может быть увеличена как за счет увеличения веса электровоза, так и за счет применения плавного автоматизированного управления электроприводом.

В данной статье предлагается для новых электровозов при сохранении тех же параметров привода увеличить массу электровозосостава приблизительно на 20% путем реализации закона оптимального управления ТЭТК. Обозначим этот тип электровоза К16А – контактный (контактно-аккумуляторный), массой 16 тонн, с асинхронным тяговым приводом.

В частности, при выборе параметров ТАД необходимо, конечно, учитывать тот факт, что естественные механические характеристики асинхронных двигателей очень жесткие и мало-пригодные для условий электрической тяги. Но современные способы и средства регулирования ТЭТК позволяют получить более совершенные ожидаемые тяговые характеристики.

Академиком М.П. Костенко установлен закон оптимального регулирования, в соответствии с которым получают наилучшие ККД и коэффициент мощности [2]. Согласно этому закону

$$\frac{u_n}{u} = \frac{f_n}{f} \sqrt{\frac{M}{M_n}}, \quad (1)$$

где  $u$  и  $u_n$  – действительное и номинальное значение напряжения, В;  $f$  и  $f_n$  – действительное и номинальное значение частоты, Гц;  $M$  и  $M_n$  – действительное и номинальное значение вращающего момента, Нм.

Преобразуя уравнение (3) путем подстановки вместо моментов силу тяги, получим

$$\frac{u_n}{u} = \frac{f_n}{f} \sqrt{\frac{F}{F_n}}. \quad (2)$$

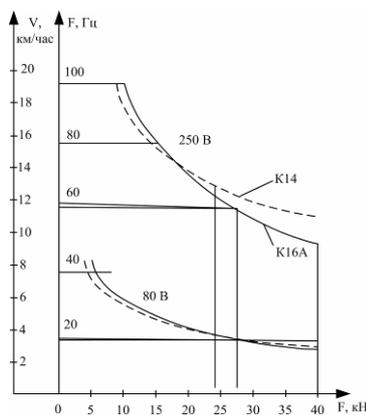
Если в процессе регулирования задавать напряжение  $u$ , а тяговое усилие  $F$  будет определяться условиями движения, то частота  $f$  должна быть, Гц

$$f = f_n \frac{u}{u_n} \sqrt{\frac{F_n}{F}}. \quad (3)$$

В соответствии рассмотренным законам оптимального регулирования построены (рис. 1) рабочие тяговые характеристики электровоза К16А (сплошная линия) при работе в режиме питания от контактной сети ( $U_c=275В$ ) и при питании от аккумуляторной батареи ( $U_6=80В$ ).

**Рис. 1.** Тяговые характеристики электровозов К14 и К16А при напряжениях питания 250 и 80В при коэффициенте сцепления колес с рельсами: ( $\psi = 0,25$ )

Как видим, получен требуемый вид тяговых характеристик, напоминающий «мягкие» и даже близкие к форме характеристик двигателей постоянного тока последовательного возбуждения (пунктирные линии), которые, как известно, в условиях электрической тяги по сравнению с жесткими характеристиками имеют ряд преимуществ: более равномерное распределение нагрузок между тяговыми двигателями, меньшее влияние изменений условий движения и изменений напряжения в контактной сети, а также меньше мощность, потребляемая из сети [4].



При необходимости в данном виде ТЭТК может быть предусмотрено также ограничение скорости по условию допустимого тормозного пути.

Т.е. реализация полученного закона (алгоритма) управления позволяет получить ожидаемые тяговые координаты электровоза, но при условии выбора эффективной структуры ТЭТК.

Структура тягового электротехнического комплекса.

Упрощенная схема контактно-аккумуляторного электровоза с асинхронным приводом приведена на рис. 2.

Двигаясь по главным выработкам, электровоз работает в контактном режиме, получая питание от контактного провода КП через токосъемник ХА. Далее через автоматический выключатель QF1 напряжение поступает на входной фильтр, который является общим для системы управления электроприводом и зарядного устройства.

Частота вращения тяговых электрических двигателей регулируется автономными инверторами напряжения И1, И2, собранными на силовых транзисторах IGBT. Диапазон регулирования частоты на выходе инверторов 2-100 Гц. При регулировании задается напряжение на двигателях, а частота автоматически перестраивается в зависимости от задаваемого напряжения и существующей в данный момент силы тяги электровоза.

В результате такого способа регулирования электромеханические характеристики привода получаются мягкими, напоминающими по форме характеристики двигателей постоянного тока последовательного возбуждения. Это обеспечивает оптимальный режим работы как самого электропривода, так и системы тягового электроснабжения.

Предусматривается также электрическое торможение тяговых двигателей. При этом отключается контактор КМ1 и энергия торможения от двигателей М1, М2 через инверторы отдается тормозному резистору RТ. Интенсивность торможения регулируется тормозным чоппером на транзисторе VT.

Для режима автономного функционирования, когда питание ТЭТК электровоза осуществляется от вспомогательной аккумуляторной батареи АБ, достаточная требуемая емкость батареи - 350-400 Аг, ( $U_n=80$  В).

При работе электровоза на главных выработках - под контактной сетью - происходит автоматическая подзарядка аккумуляторной батареи от контактной сети с помощью зарядного устройства ЗУ.

Система управления электроприводом обеспечивает плавное регулирование тока и тягового усилия, а также защиту от буксования. За счет этого максимальное тяговое усилие может быть дополнительно увеличено на 10-20 %. В итоге максимальная сила тяги электровоза увеличивается на 20-30 % и он будет устойчиво перевозить составы не из 10, а из 12 вагонеток грузоподъемностью 10 т.

За счет полного регулирования также снижается вероятность и интенсивность буксования, что уменьшит износ колес и рельсов, а также расход энергии.

Микропроцессорная система управления легко приспосабливается для дистанционного управления электровозами при выполнении погрузочных и разгрузочных работ.

**Выводы и направление дальнейших исследований.** 1. Эффективным направлением создания энергоэффективного и безопасного в эксплуатации рудничного электровоза является контактно-аккумуляторный с асинхронным тяговым приводом.

2. Применение закона оптимального регулирования электротехническим комплексом на базе IGBT-инверторов и ТАД позволит:

получить требуемые «мягкие» характеристики тягового комплекса;

увеличить тяговое усилие электровоза на 20 % при сохранении мощности за счет увеличения сцепной массы и понижения скорости движения локомотива;

повысить за счет увеличения массы электровоза и плавного бесступенчатого регулирования частоты вращения ТАД производительность электровозов на 20 %.

3. За счет устранения контактного провода в наиболее опасных местах - погрузочных выработках - существенно повышается безопасность всех видов работ в погрузочных выработках.

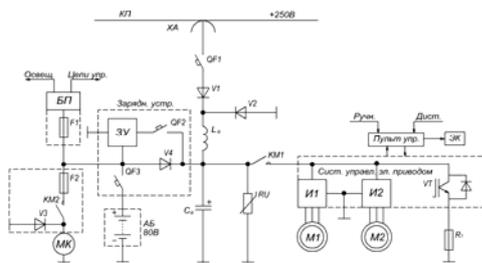


Рис. 2. Упрощенная принципиальная схема рудничного контактно-аккумуляторного электровоза с асинхронным тяговым электроприводом

4. Одночасно усуваються значимі для підприємств затрати на спорудження і експлуатацію контактних мереж в погрузочних виробках, загальна протяжність яких становить приблизно 30 % протяжності контактної мережі шахти.

5. Використання асинхронного частотно управляемого привода дозволяє зменшити витрати електроенергії на електровозному транспорті на 25-35 %.

6. Порівняно з двигачами постійного струму в 4-5 раз зменшуються затрати на ремонт і експлуатацію асинхронних тягових двигачей.

7. Використання бесконтактного регулювання замість силових контролерів в декілька раз підвищує надійність системи управління і рудничного електровоза.

8. Плавне регулювання сили тяги і обмеження максимальних зусиль дозволяє більш ніж в 4 рази збільшити надійність елементів механічних передач електровоза.

9. За рахунок збільшення маси електровоза і плавного регулювання маса складу може бути збільшена на 20-30 %.

10. Використання автоматичного (дистанційного) управління електровозами при погрузочно-розгрузочних роботах дозволяє зменшити затрати праці і збільшити продуктивність праці ВШТ на 15-25 %.

11. Автоматизація процесів управління підвищує їх ефективність, безпеку і спрощує роботу машиніста, зводячи її фактично до спостережливості-контролюючого процесу з його сторони.

12. Відсутність контактної мережі в зонах завантаження виключає небезпечні технологічні маніпуляції з токоємником, а видалення силового контролера з кабіни машиніста додатково сприяє підвищенню безпеки праці.

#### *Список літератури*

1. Дебелый В.Л. Основные направления развития шахтного локомотивного транспорта / В.Л. Дебелый, Л.Л. Дебелый, С.А. Мельников // Уголь Украины.-2006.-№6.-С.30-31.

2. Единые правила безопасности при разработке рудных, нерудных и рассыпных месторождений полезных ископаемых подземным способом. К.: Техніка, 2009. – 385 с.

3. Синчук О.Н. Контактно-аккумуляторный шахтный электровоз с тяговым электротехническим комплексом: IGBT-инвертор-асинхронный электрический двигатель / О.Н. Синчук, И.О. Синчук, Д.А. Шокарев, Е.И. Скапа, Ф.И. Караманиц // Науковий журнал. Вісник СНУ ім. В.Даля – №4 (158) – частина 1.

4. Синчук О.Н. О реализации закона оптимального управления тяговым электротехническим комплексом/Шокарев Д.А., Скапа Е.И., Гузов Э.С., Синчук И.О.//Журнал «Електротехнічні та комп'ютерні системи» - 2011.-№03(79).-С.140-141.

Рукопись поступила в редакцию 16.02.12

УДК 622.794

В.С. БІЛЕЦЬКИЙ, д-р техн. наук, проф., Донецький національний технічний університет  
О.А. КРУТЬ, д-р техн. наук, УкрНДІПроект, Ю.Г. СВІТЛИЙ, канд. техн. наук, доц.,  
заступник директора з наукових питань НВО „Хаймек”

#### **ВИКОРИСТАННЯ ЕФЕКТУ РЕБІНДЕРА ПРИ ПІДГОТОВЦІ ВОДОВУГІЛЬНОГО ПАЛИВА**

Досліджено прояв ефекту Ребіндера (адсорбційне зниження міцності) при подрібненні вугілля в процесі підготовки водовугільного палива. Установлено, що зволоження вугілля перед його подрібненням зменшує його міцність, підвищує дробимість, що спричиняє суттєве збільшення виходу тонких класів крупності. Це, у свою чергу, обумовлює покращення технологічних характеристик водовугільного палива (ВВП), а саме: зменшення в'язкості суспензії, збільшення агрегативної і седиментаційної стійкості водовугільного палива.

Ключові слова: водовугільне паливо, подрібнення вугілля, ефект Ребіндера.

**Постановка проблеми та стан її вивчення.** Проникнення води в поровий простір викликає зміну механічних властивостей твердих тіл унаслідок фізико-хімічних процесів, що обумовлюють зменшення поверхневої (міжфазної) енергії тіла (так званий ефект Ребіндера, 1928 р.) [1-3]. Зокрема, проникнення водної фази проявляється в зниженні міцності і підвищенні крихкості, пластичності твердих тіл, що полегшує їх руйнування, диспергування. Сучасне теоретичне пояснення механізму дії ефекту Ребіндера включає, по-перше, розклинювальну дію адсорбованих у верхів'ях тріщин (дислокацій) молекул, особливо молекул поверхнево-активних речовин (ПАР), по-друге, охолодження мікротріщин розміром у декілька атомів кристалічної ґратки у водному середовищі й у такий спосіб унеможливлення їх «закристалізації». Наступні механічні