

2. Сінчук О.М., Бойко С.М., Щербак М.А. Про залежність енергетичних координат вітроенергетичної установки з вертикальною віссю обертання від аеродинамічних умов шахт// Технічна Електродинаміка. Тематичний випуск «Силовая електроніка та енергоефективність». Частина 4 – Харків, Інститут Електродинаміки НАН України, 2012. – С.171-172.

3. Сінчук І.О., Бойко С.М., Щербак М.А. Обґрунтування можливості використання ортогональної вітрової установки в умовах підземних гірничих виробок шахт //Технічна Електродинаміка. Тематичний випуск «Силовая електроніка та енергоефективність». Частина 4 – Харків, Інститут Електродинаміки НАН України, 2012. – С. 179-181

4. Яворский Б.М. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф // – «Наука» М. – 1971. – С. 134 – 269.

5. Горбунов В.И. Вентиляция шахт / В.И. Горбунов // – Магнитогорск. – 2007. – С. 24–50.

Рукопись поступила 06.09.2013 г.

УДК 622.271.4: 621.316.34

**Е.К.Бабец**, канд. техн. наук, с.н.с., член-корреспондент АГНУ, директор,  
Научно-исследовательский горнорудный институт ГВУЗ «КНУ»

**Ю.Г.Осадчук**, канд. техн. наук, доцент, **Г.В. Крутов**, канд. техн. наук,  
доцент, ГВУЗ «Криворожский национальный университет»

**С.Г. Зуй**, главный специалист ООО «ГорПолфарм»,

**П.В. Полищук**, ген.директор ООО «Прайд»

## **ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИВОДОВ ПО СИСТЕМЕ ПЧ-СД ДЛЯ ОДНОКОВШОВЫХ КАРЬЕРНЫХ ЭКСКАВАТОРОВ ТИПА ЭКГ**

*В статье приведены сравнительные характеристики систем электропривода карьерных экскаваторов. Обоснована целесообразность применения электропривода по системе «Преобразователь частоты - синхронный двигатель» в контексте последних достижений в области преобразовательной техники*

*Ключевые слова: Карьерные экскаваторы, системы электропривода, преобразователи частоты, управляемые силовые транзисторы, вентиляционный двигатель, датчик положения ротора, энергетические показатели, фильтро-компенсирующие устройства, высшие гармоники.*

*В статті наведено порівняльні характеристики систем електроприводу кар'єрних екскаваторів. Обґрунтовано доцільність застосування електроприводу по системі «Перетворювач частоти – синхронний двигун» в контексті останніх досягнень в галузі перетворювальної техніки*

*Ключові слова: Кар'єрні екскаватори, системи електроприводу, перетворювачі частоти, керовані силові транзистори, вентильний двигун, датчик положення ротора, енергетичні показники, фільтро-компенсуючі пристрої, вищі гармоніки.*

*The comparative characteristics of electric drive systems of career excavators is present in the article. The expediency of the drive on an "inverter - synchronous motor" is substantiated in the context of recent advances in converter technology*

*Keywords: the Quarry power-shovels, systems of electromechanic, transformers of frequency, guided power transistors, valve engine, sensor of position of rotor, power indexes, filter-indemnification devices, ultraharmonics.*

**Актуальность проблемы.** Одна из бурно развивающихся областей электроники в XXI веке – это силовая электроника. Наиболее перспективным направлением в ней являются интеллектуальные силовые компоненты: интегрированные силовые микросхемы, ключи и модули.

Сегодня данный процесс стремительно развивается благодаря успехам в совершенствовании технологии изготовления и, как следствие, значительному улучшению параметров мощных полевых транзисторов (MOSFET), биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT), силовых драйверов более высокой степени интеграции [1]. Интеграция схем управления (драйверов, контроллеров) в силовые ключи и затем в исполнительные устройства и механизмы стала и необходимым, и оправданным шагом. В настоящее время, а тем более в будущем, интеллектуальным силовым компонентам в силовой электронике альтернативы не предвидится.

Совершенствование полупроводниковых ключевых элементов силовых преобразователей частоты (ПЧ) позволяет производить их переключение на все более высоких частотах и рабочих напряжениях, увеличивая, таким образом, энергетическую эффективность и снижая (при условии паритета передаваемой мощности) массогабаритные показатели ПЧ.

Достоинства силовых ключей, производимых по IGBT технологии, неоспоримы. Высокая плотность тока и хорошая перегрузочная способность, низкие статические и динамические потери, способность работать при напряжении промышленных сетей делают IGBT модули чрезвычайно привлекательными для использования в преобразовательных устройствах широкого диапазона мощности. Это относится и к приводам, применяющимся на электротранспорте - в трамваях, троллейбусах, метро, а, так же, грузоподъемных механизмах и экскаваторах.

Как известно, исторически область преобразовательной техники разделилась на два крупных направления:

- направление вращающихся преобразователей и
- направление статических преобразователей.

До недавнего времени вращающиеся преобразователи занимали в технике подавляющее положение, поскольку для их реализации не требовалось сложной электронной элементной базы, а статическим преобразователям небольших мощностей отводилась скромная ниша специальных применений, и при этом они несли клеймо «ненадежных», «сложных», «дорогих». И причины этого заключались вовсе не в порочности идеи статического преобразования электроэнергии, а в том, что для реализации статических преобразователей требовалась особая элементная база, которая появилась не так давно.

Недостатки вращающейся техники очевидны: это небольшой межремонтный ресурс, а значит, частая необходимость проведения регламентных работ, высокая шумность, невозможность быстрого ремонта после поломки или истечения межремонтного интервала, трудности с диагностикой исправного состояния, низкий коэффициент полезного действия (КПД), низкий коэффициент мощности, связанный с работой асинхронных двигателей, которые непосредственно подключены к питающей сети [2]. Комплекс этих задач решали обычными методами, проектируя специальные агрегатные помещения для размещения преобразователей, а также создавая специализированные диагностические комплексы. Однако задачу полнофункциональной диагностики вращающихся преобразователей до сих пор в полной мере решить не удалось – слишком много факторов определяют работоспособность вращающейся техники. А это означает лишь одно: диагностика и ремонт вращающихся преобразователей была и остается нетривиальной задачей, связанной с наличием высококвалифицированного персонала, обладающего, кроме базовых технических знаний, еще и опытом работы. Понятно, что число таких высококвалифицированных специалистов всегда ограничено, и они достаточно высоко оценивают свои услуги.

Ситуация коренным образом изменилась с появлением на рынке электронных компонентов управляемых силовых транзисторов IGBT и MOSFET. На основе этих компонентов были разработаны статические преобразователи электроэнергии, свободные от указанных выше недостатков вращающихся преобразователей. Удалось на несколько порядков снизить уровень излучаемого шума (что позволило размещать преобразователи в обычных производственных помещениях), создать развитую комплексную систему диагностики исправного состояния с применением микропроцессорных систем, построить приборы по модульному принципу, обеспечивающему быструю замену отказавшего узла, руководствуясь стандартной процедурой и минимальным набором инструментов, повысить КПД и коэффициент мощности.

Необходимость в высококвалифицированном эксплуатационном персонале, если и не отпала совсем, то значительно снизилась – ведь

блочную замену отказавшего узла можно поручить даже стажеру, мало-мальски знакомому с техникой и умеющему работать отверткой.

Конечно, первые образцы статических преобразователей оказались не столь надежны, как от них этого ожидали, и часто выходили из строя. Но на сегодняшний день технологии их производства стали столь совершенными, что, остановившись перед проблемой выбора того или иного класса преобразователя, разработчики отдают предпочтение именно статическим решениям, так как они действительно позволяют реализовать надежное функционирование питаемых ими устройств и значительно снизить эксплуатационные расходы при высоком уровне надежности. Другими словами, эра энерго- и ресурсосбережения, – время, в которое мы с вами живем, требует нового подхода к проектированию систем электропривода, отвечающего современным тенденциям энергоэффективного конкурентоспособного производства. В этих условиях современные статические преобразователи имеют неоспоримое преимущество по сравнению с вращающимися.

Промышленное производство в нашей стране до сих пор живет «по старинке», особо не заботясь о повышении эффективности использования энергии, или только мечтая об этом в условиях отсутствия свободных средств на модернизацию. Аналогичная ситуация складывается в области электротранспорта. Кроме проблем энергосбережения, здесь существенным является надежная работа тягового электродвигателя, поскольку, если ориентироваться на статистические данные, 50 % неисправностей электровозов, троллейбусов, вагонов метро и трамваев связаны именно с неисправностью электродвигателя. Та же ситуация справедлива и для карьерных экскаваторов типа ЭКГ.

Традиционно в этой области техники используются коллекторные двигатели постоянного тока, частоту вращения которых невозможно регулировать простыми и надежными методами. Применение асинхронных двигателей переменного тока (АД) с частотным регулированием позволяет не только коренным образом пересмотреть идеологию конструирования электротранспорта, но существенно сократить процент отказов, связанных с выходом из строя электродвигателей, расширить диагностические возможности, предупредить развитие отказов на ранней стадии. Более того, асинхронные электродвигатели при той же мощности, что и двигатели постоянного тока, имеют, в среднем, в 1,5 раза сниженные массогабаритные показатели.

Отметим основные преимущества статических преобразователей электроэнергии по сравнению с электромашинными.

Во-первых, повышенный КПД, составляющий в среднем 85...95 %.

Во-вторых, значительно сниженные габариты, сокращение которых является следствием повышения КПД. Так как рассеиваемые тепловые потери меньше, нет необходимости в наращивании размеров радиаторов силовых тепловыделяющих элементов.

В-третьих, поскольку статические преобразователи разрабатываются на основе электронной элементной базы, в их составе можно применять программируемые элементы (специализированные микроконтроллеры), что позволяет разрабатывать совершенную систему управления и диагностики.

В-четвертых, статические преобразователи легко могут быть построены на основе блочно-модульного принципа с быстрой заменой отказавших узлов. Преимущества такого построения очевидны: при отказе одного из блоков не потребуется демонтаж прибора целиком, необходимо лишь заменить отказавший блок на исправный за несколько минут и ввести преобразователь в строй. Более того, можно наращивать суммарную мощность преобразователей, обеспечив их синхронную параллельную работу.

В-пятых, статические преобразователи не нуждаются в сложной пускорегулирующей аппаратуре, которая традиционно является спутником электромашинных преобразователей, занимает много места и размещается внутри дополнительных громоздких электрощитов. По своей сути, статический преобразователь внешне представляет собой «черный ящик», который легко разместить в удобном месте, доступном для проведения регламентных работ.

В настоящее время в производстве и эксплуатации находятся три вида электропривода карьерных экскаваторов [3]:

- электропривод постоянного тока по системе генератор - двигатель (Г-Д);
- электропривод постоянного тока по системе тиристорный преобразователь-двигатель (ТП-Д);
- электропривод переменного тока на базе асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором со статическим преобразователем частоты по системе ПЧ-АД.

Сегодня одними из наиболее перспективных электромеханических преобразователей считаются вентильные двигатели (ВД). ВД представляют собой электропривод по системе преобразователь частоты - синхронный двигатель (ПЧ-СД). Преобразователь частоты выполняет роль полупроводникового коммутатора фазных обмоток, управление ключами которого производится системой управления в зависимости от положения ротора.

Наиболее серьезной проблемой для регулируемого экскаваторного электропривода по системе ПЧ-СД в настоящее время является отсутствие

серийно выпускаемых приводных синхронных двигателей в экскаваторном исполнении. Однако нельзя не учитывать очевидные преимущества данной системы именно в условиях экскаваторных приводов.

ВД обладают основными достоинствами ДПТ и АД и не имеют их недостатков. Часть достоинств ВД зависит от типа электрической машины, применяемой в ВД [4].

Одним из основных достоинств ВД является бесконтактность якорной цепи и отсутствие узлов, требующих обслуживания (нет щеточно-коллекторного узла и контактных колец). Если ротор синхронной машины выполнен на базе высококоэрцитивных постоянных магнитов Nd-Fe-B, то контактный узел отсутствует также в системе возбуждения СД. Даже при наличии обмотки возбуждения проблема щеточно-коллекторного узла не является актуальной в связи с тем, что ток возбуждения СД намного меньше тока якорной цепи ДПТ. Это достоинство присуще также АД с короткозамкнутым ротором и отсутствует у ДПТ и АД с фазным ротором.

Как следствие этого преимущества существенно повышается ресурс и надежность электропривода в условиях запыленности карьера, упрощается эксплуатация двигателя.

Другое важное преимущество ВД – широкие возможности по регулированию выходных показателей электропривода при относительной простоте реализации системы управления. Другими словами, – простота реализации механических характеристик, требуемых исполнительными механизмами экскаватора. ВД превосходит по этому качеству АД (у ВД возможно эффективное управление по напряжению), превосходит частотно-управляемый АД (у ВД более простая схема преобразователя) и превосходит ДПТ (возможность векторного управления). За счет этого обеспечивается более широкий диапазон регулирования частоты вращения, большая перегрузочная способность по моменту, имеется возможность оптимизации режимов работы при изменении скорости и нагрузки. Это также способствует повышению ресурса электродвигателя и всего агрегата.

Безусловными преимуществами ВД являются высокие энергетические показатели (КПД и  $\cos\varphi$ ). КПД вентильных двигателей могут превышать 90%,  $\cos\varphi$  ВД – более 0,95. У АД максимальный КПД составляет не более 86%.

Высокий  $\cos\varphi$  обеспечивается рациональным выбором угла включения фазы. А это может быть достигнуто путем соответствующей настройки датчика положения ротора или при векторном управлении. Кроме того, КПД вентильного двигателя мало меняется при изменении нагрузки и при колебаниях напряжения питающей сети, а у АД КПД более существенно зависит от изменения нагрузки и напряжения питания (момент пропорционален квадрату напряжения).

Более низкий перегрев ВД по сравнению с АД при одинаковой мощности и одинаковых размерах вследствие снижения потерь увеличивает ресурс изоляционных материалов, а значит и срок службы электропривода в целом. Это позволяет электроприводу работать в режимах с возможными перегрузками, характерными для режимов экскавации. Благодаря этому электродвигатель в системе ПЧ-СД имеет меньшую массу и габаритные размеры при одинаковых расчетных нагрузках.

К недостаткам ВД следует отнести следующие:

- наличие пульсаций в картине электромагнитного момента ввиду небольшого количества секций в обмотке якоря;

- необходимость наличия специального датчика положения ротора.

Решение проблемы пульсаций электромагнитного момента достигается за счет использования многофазных ВД, подбора требуемой формы фазных токов, выбора рациональной геометрии зубцовой зоны, введения скоса пазов статора или ротора.

Что касается необходимости наличия датчика положения ротора, то до недавнего времени этот недостаток препятствовал широкому распространению вентильных электроприводов в оборудовании, которое подвергается значительным механическим воздействиям вибрационного и ударного характера. В настоящее время эта проблема решается при бездатчиковом способе управления вентильными электроприводами, когда информацию о положении ротора получают из сигнала по напряжению в фазных обмотках.

Для оценки альтернативных вариантов применения той или иной системы привода отметим некоторые наиболее важные особенности электроприводов систем ТП-Д и ПЧ-АД.

Безусловным преимуществом электроприводов ТП-Д по отношению к предшествующим системам Г-Д являются сниженные массогабаритные показатели и более высокий КПД.

Выше упоминалось о недостатке системы ТП-Д, связанном с наличием щеточно-коллекторного узла ДПП. Как известно, массовое использование мощных тиристорных преобразователей приводит к значительному искажению синусоиды питающей сети, что в свою очередь приводит к сбоям синхронизации в системе СИФУ преобразователей. Кроме того, использование мощных тиристорных преобразователей расширяет так называемую «зону прерывистых режимов работы», что не лучшим образом сказывается на работе приводов экскаваторов при малых заданиях. Особенно это проявляется в работе приводов вращения (выбор зазоров) и хода экскаватора.

В целях компенсации реактивной мощности (РМ) и высших гармоник, возникающих при работе тиристорных преобразователей,

разработчики систем ТП-Д предусматривают комплектацию электропривода установками фильтро-компенсирующих устройств (ФКУ). Причем, чем глубже регулирование скорости электропривода, тем большей мощности требуется оборудование ФКУ.

Опыт эксплуатации ФКУ показывает, что эти устройства снижают надежность системы электропривода из-за возможности возникновения резонансных явлений в L-C-контурах ФКУ и электропривода, возможных режимов перекомпенсации с повышением напряжения и выходом из строя оборудования. Повышение отказоустойчивости ФКУ требует увеличения запасов по номиналам тока и напряжения для конденсаторов и реакторов, что приводит к значительному повышению стоимости оборудования ФКУ для обеспечения высокой надежности.

Электроприводы по системе ПЧ-АД с короткозамкнутым ротором имеют высокие эксплуатационные и энергетические показатели, однако применение асинхронных короткозамкнутых двигателей в экскаваторных электроприводах показало, что в силу их механических характеристик двигатель и преобразователь должны иметь запас мощности 2,2-2,5 от номинала, что приведет также к значительному увеличению стоимости.

Таким образом, более перспективным выглядит возможность применения частотных преобразователей с «векторным» управлением, работающих с синхронными двигателями, которые обеспечивают максимальный момент при скоростях привода близких к нулевым, что характерно для работы экскаваторов в режимах стопорения привода. Появление полностью управляемых силовых полупроводниковых приборов (IGBT, IGCT, GTO) с высокими значениями параметров привело к значительным изменениям соотношений эффективности использования различных систем электроприводов экскаваторных механизмов. При этом наиболее существенный прирост эффективности обеспечивается в системах ПЧ-СД. Силовые электронные преобразователи на IGBT, IGCT-силовых элементах совместно с СД способны не только регулировать потребляемую РМ привода, но и могут обеспечивать компенсацию РМ и высших гармоник, возникающих при работе других нелинейных потребителей, подключенных к сети, снижать колебания напряжения в сети, симметрировать его по фазам.

#### *Список использованных источников*

1. Каневский Г. SEMIX S2. Новая серия модулей IGBT с кристаллами SPT+ (Semikron)//Новости электроники, 2006. – №7. – С. 22-23.
2. Закладный О.М., Праховник А.В., Соловей О.И. Энергоэкономия засобами промислового електропривода: Навчальний посібник. – К: Кондор, 2005. – 408 с.
3. Т.З. Портной, Б.М. Парфёнов, А.И. Коган. Современное состояние и направления развития электротехнических комплексов одноковшовых



экскаваторов. ОАО «Электропривод», М.: Изд-во «ЗНАК», 2002. – 114 с.

4. А.Н. Закладной, О.А. Закладной. Энергоэффективный электропривод с вентильными двигателями. Монография. – К: Либра, 2012. – 187 с.

Рукопись поступила 19.09.2013 г.

УДК 658.8:622.8:621.311

**И.О. Синчук**, канд. техн. наук, доцент кафедры АЕСПТ  
**А.А. Харитонов**, старший преподаватель кафедры ЕПЕМ,  
ГВУЗ «Криворожский национальный университет»

## **КОНТАКТНЫЕ СЕТИ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ШАХТ КАК ИСТОЧНИК ПОРАЖЕНИЯ ГОРНОРАБОЧИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ**

*В статье проводится оценка параметров тяговых контактных сетей при эксплуатации в современных условиях, так как комплексное исследование параметров контактных сетей в условиях отечественных железорудных шахт, в требуемом для обобщения объёме, ранее не проводилось. Определены входные сопротивления контактной сети в режиме холостого хода и короткого замыкания для 5-ти процентной относительной погрешности. Приведенные методические принципы позволяют выполнить исследования КС как источника опасности.*

*Ключевые слова: контактный провод, электротравматизм, относительная погрешность, тяговая контактная сеть, сопротивление.*

*У статті проводиться оцінка параметрів тягових контактних мереж при експлуатації в сучасних умовах, тому що комплексне дослідження параметрів контактних мереж в умовах вітчизняних залізрудних шахт, у необхідному для узагальнення обсязі, раніше не проводилося. Визначені вхідні опори контактної мережі в режимі холостого ходу й короткого замикання для 5-ти процентної відносної погрешності. Наведені методичні принципи дозволяють виконати дослідження КС як джерела небезпеки.*

*Ключові слова: контактний провід, електротравматизм, відносна погрешність, тягова контактна мережа, опір.*

*In article the assessment of parameters of traction contact networks is carried out at operation in modern conditions as complex research of parameters of contact networks in the conditions of domestic iron ore mines, in the volume demanded for generalization, wasn't carried out earlier. Entrance resistance of a contact network in a mode of idling and short circuit for 5 percentage relative errors are determined. The given methodical principles allow to execute researches KS as danger source.*

*Keywords: contact wire, electrotraumatism, relative error, traction contact network, resistance.*

**Актуальность проблемы при решении научных и прикладных задач.** Основным видом транспорта железорудных шахт является