

Як самі тягові електромеханічні комплекси, так і вітчизняні шахтні електровози, не відповідають вимогам енергоефективності та безпеки експлуатації в умовах сучасних вітчизняних залізничних шахт. Запропоновано структуру тягового комплексу: IGBT перетворювач – асинхронні електродвигуни для нового типу шахтного електровоза – контактно-аккумуляторного. Доведено, що закон академіка Костенка М. П. є базою для отримання очікувано м'яких електромеханічних характеристик даної тягової системи

Ключові слова: асинхронний електротехнічний комплекс, електровози, електроенергоефективність, електромеханічні характеристики, тягові електричні двигуни

Как сами тяговые электромеханические комплексы, так и отечественные шахтные электровозы, не соответствуют требованиям энергоэффективности и безопасности эксплуатации в условиях современных отечественных железорудных шахт. Предложена структура тягового комплекса: IGBT преобразователь – асинхронные электрические двигатели для нового типа шахтного электровоза – контактно-аккумуляторного. Доказано, что закон академика Костенко М. П. является базой для получения ожидаемо мягких электромеханических характеристик данной тяговой системы

Ключевые слова: асинхронный электротехнический комплекс, электровозы, электроэнергоэффективность, электромеханические характеристики, тяговые электрические двигатели

АСПЕКТЫ РАЗРАБОТКИ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ШАХТНЫХ КОНТАКТНО-АККУМУЛЯТОРНЫХ ЭЛЕКТРОВОЗОВ

О. Н. Юрченко

Доктор технических наук,
старший научный сотрудник

Отдел транзисторных преобразователей
Институт электродинамики НАН Украины
пр. Победы, 56, г. Киев, Украина, 03680

E-mail: ied1@ied.org.ua

И. О. Синчук

Кандидат технических наук, доцент*

E-mail: speet@ukr.net

Э. С. Гузов

Кандидат технических наук, профессор*

E-mail: speet@ukr.net

Д. А. Шокарев

Старший преподаватель**

Е. И. Скапа

Ассистент кафедры**

*Кафедра автоматизированных
электромеханических систем
в промышленности и транспорте

ГВУЗ «Криворожский национальный университет»
ул. XXII Партсъезда, 11, г. Кривой Рог, Украина, 50027

**Кафедра систем электропотребления и
энергетического менеджмента

Кременчугский национальный университет
им. М. Остроградского

ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, Украина, 39600

E-mail: seem@kdu.edu.ua

1. Введение

Различные виды рудного сырья в т. ч. железорудного (ЖРС), добываемого в шахтах и рудниках Украины, являются основным и устойчивым источником пополнения валютных запасов страны [1, 2].

Для сохранения на мировом рынке приоритета украинского ЖРС необходимо постоянное сдерживание естественного, в связи с понижением уровня (глубин)

добычи, процесса повышения себестоимости добываемого сырья [2].

В общей структуре себестоимости ЖРС [2], добываемого подземным способом, немаловажной составляющей предстаёт технологический внутришахтный транспорт (ВШТ), основным видом которого в железорудных шахтах, в отличие от угольных, является электровозный [3].

К сожалению, в последние десятки лет показатели функционирования ВШТ в железорудных шахтах

Украины (рис. 1), да и большинства зарубежных [2], неутешительны.

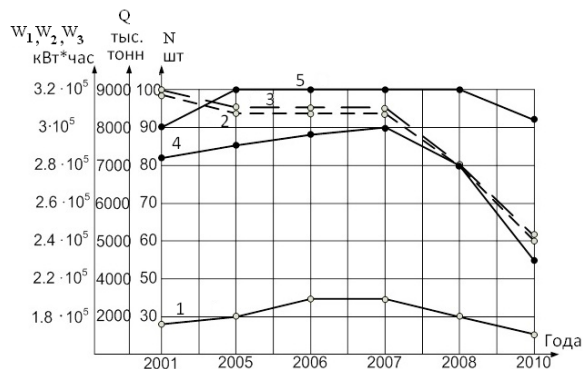


Рис. 1. Динамика технологических показателей ВШТ на предприятии ПАО «Криворожский железорудный комбинат» (г. Кривой Рог): 1 (W₁) – потребление электроэнергии на подземное производство; 2 (W₂) – производственное потребление электроэнергии; 3 (W₃) – общее потребление электроэнергии; 4 – добыча сырой руды; 5 – количество эксплуатируемых электровозов

Так, при уменьшении в 2010 году по сравнению с 2008 годом объемов грузоперевозок в подземных выработках шахт крупнейшего в стране комбината ПАО «Криворожский железорудный комбинат» на 36 % потребление электрической энергии за этот период времени уменьшилась лишь на 50 %. Такие, как впрочем, и ряд других показателей функционирования ВШТ не могут удовлетворить горных технологов, предпринимающих меры по повышению эффективности добычи ЖРС [2].

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Из 20-ти видов рудничных электровозов, выпускаемых машиностроительными предприятиями Украины, в железорудных шахтах эксплуатируются лишь контактные виды сцепной массой 14-ть и 10-ть тонн [3, 4]. Основным недостатком этих, как, впрочем, и других типов отечественных контактных электровозов являются:

- энергоэнегонеэффективная система тягового электромеханического комплекса;
- повышенная опасность поражения горнорабочих электрическим током при несанкционированном, но реально возможном прикосновении их к контактному проводу, который по технологии проходки горных выработок имеет высоту подвески в местах погрузки ЖРС около 2,2 метра (рис. 2);
- неэргономичная конструкция механической части корпуса электровоза;
- недостаточная сцепная масса, которую необходимо увеличить до 16÷18 т.

Вышеотмеченные задачи в той или иной мере решались в различных временных периодах развития ВШТ [4–9]. В частности, следует отметить достаточную активность в проведении изыскательных работ по

разработке конструкций шахтных электровозов таких отечественных предприятий, как Дружковский машиностроительный завод, ГП НПО «Электровозостроение» (г. Днепропетровск), ПАО «Завод Амплитуда» (г. Донецк), а также коллективов учёных национального горного университета (г. Днепропетровск), Криворожского национального университета, Научно-исследовательского горнорудного института (г. Кривой Рог) и ряда других научных учреждений [3–7].

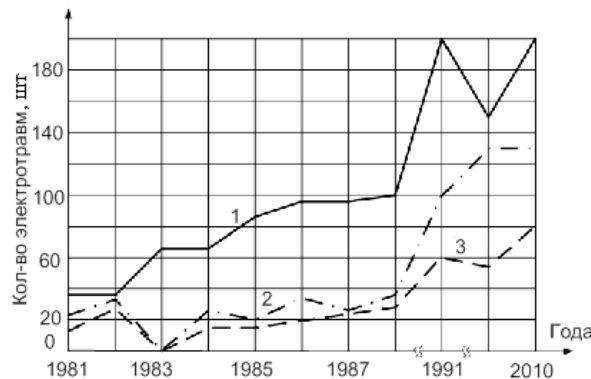


Рис. 2. Динамика изменения электротравматизма на внутришахтном электровозном транспорте железорудных предприятий Украины с подземным способом добычи железной руды: 1 – общее количество электротравм; 2, 3 – электротравмы соответственно со смертельным исходом, и при касании контактного провода в местах погрузки и выгрузки ископаемых

Известно ряд исследований в направлении устранения основного очага поражения горнорабочих при эксплуатации ВШТ – контактного провода (КП) в местах погрузки-разгрузки полезных ископаемых. В решении этой проблемы просматривается несколько направлений вектора исследований [5–11]. Так в работе [5] предлагается решить проблему изъятия КП в местах погрузки путём применения на электровозе кабельного барабана, позволяющего подключаться электровозу для питания к независимому источнику в ортах и других выработках, опасных с точки зрения поражения горнорабочих электрическим током. Другим направлением были и есть работы по созданию комбинированных видов шахтных электровозов: контактно-аккумуляторных, получающих питание от контактной сети в главных откаточных выработках и от тяговых батарей в местах погрузки-разгрузки ЖРС [6].

В исследования [7] предлагалось автоматизировать электровозную откатку путём создания в шахтах специальных транспортных горизонтов.

В свою очередь в работах академика НАН Украины Пивняка Г. Г. и его учеников [11] предлагалось создать шахтный электровоз с индуктивной передачей энергии питания от тяговой сети к электровозу. Однако результаты вышеприведенных, как равно и других необозначенных исследований, несмотря на их актуальность, не были реализованы в практику создания новых высокоэффективных (в т. ч. энергоэффективных) и безопасных в обслуживании образцов электровозов для отечественных шахт и рудников. На категоричный взгляд авторов, главной причиной такой ситуации было то, что носители идей создания таких электровозов, по

ряду причин не увидели того, что приоритет в разрешении проблемы должен лежать, прежде всего, в создании ТЭМК и уже на их базе электровозов, а не наоборот.

Именно такой подход был реализован фирмой ASEA (Швеция) при создании линейки шахтных контактно-аккумуляторных электровозов [8]. Данные типы электровозов успешно эксплуатировались в ряде зарубежных рудников. Однако, в силу значительной цены, приобретение их для шахт Украины, России и других постсоветских стран так и не состоялось.

Вместе с тем нельзя не отметить, что с позиций сегодняшнего состояния элементной базы преобразовательной техники и развития электромашиностроения прогрессивные на тот период времени разработки, как самих электровозов, так и их ТЭМК, фирмы ASEA более, чем тридцатилетней давности нельзя признать достаточными современными.

Отрадно, что работы по созданию ТЭМК требуемого уровня эффективности для отечественных рудничных электровозов возобновились как в Украине, так и в России в начале 21 века [9, 10, 12–14].

В свою очередь, обобщая результаты как вышеприведенных, так и ряда других, не так уж и многочисленных исследований [14], подчеркнем, что, несмотря на общую стратегию – создание энергоэффективного ТЭМК, тактика реализации этой идеи различными авторами подвергалась процессу варьирования. При этом достаточно эффективного варианта, ТЭМК для шахтных комбинированных электровозов с двумя независимыми источниками питания: контактная сеть, тяговые аккумуляторы, так и не получилось.

В связи с этим, в 2010–2011 годах ПАО «Электромашина» (г. Харьков) совместно с коллективом учёных ГВУЗ «Криворожский национальный университет» и Кременчугский национальный университет им. Михаила Остроградского по заказу ПАО «Криворожский железорудный комбинат» был создан и прошёл этап предварительных испытаний прототип шахтного контактного электровоза К14 – К6А с ТЭМК: IGBT преобразователь напряжения – тяговые асинхронные электрические двигатели (ТАД) [10]. Вместе с тем, как естественный процесс, в ходе испытаний проявились и некоторые упущения, и в частности, в структуре схемотехнических решений.

Однако, всё же главным недостатком, не позволяющим достичь ожидаемой эффективности функционирования новых видов шахтных электровозов на основе эффективных по принципу преобразования электрической энергии тяговых асинхронных электроприводов, являлось естественное для ТАД, в отличие от двигателей постоянного тока, жесткость их электромеханических характеристик, а равно и тяговых комплексов в целом. Последнее, без принятия соответствующих мер, не позволяет, в частности, реализовать требуемый коэффициент сцепления колёсных пар электровоза с рельсами, что в условиях постоянной запыленности и обводненности в условиях шахт естественно [4].

В свою очередь, как известно [9] достижение требуемого уровня «мягкости» тяговых электромеханических характеристик искусственно достижимо для ТАП с импульсными системами преобразования электрической энергии питания тяговых двигателей. Для этого необходимо лишь разработать соответствующий алгоритм управления ИП [9].

Более того, в ряде научных изданий, как отечественных, так и зарубежных, подобные вопросы, хотя и по-разному, да и для разных целей в той или иной мере рассматривались [9, 10, 12, 14]. Однако специфика тяговых комплексов как многомодульных (в данном случае двухмодульных, когда каждый модуль работает параллельно на свою колесную пару) систем ТАП требует своего индивидуального решения [12].

3. Цель и задачи исследования

Целью исследования является анализ, оценка, формализация недостатков и разработка на этой основе научно-обоснованных предложений по созданию эффективных тяговых электромеханических комплексов для новых типов отечественных рудничных электровозов – контактно-аккумуляторных с оптимальными по уровню жёсткости электромеханическими характеристиками их тягового асинхронного комплекса.

Для достижения цели в данном исследовании были поставлены для следующие научные задачи:

- обоснование и разработка синергетической структуры с двумя источниками питания тягового электромеханического комплекса для контактно-аккумуляторного шахтного электровоза;
- разработка закона управления тяговым комплексом с асинхронными электрическими двигателями для получения требуемых по уровню жесткости – мягких электромеханических характеристик.

4. Разработка структуры тягового электромеханического комплекса шахтного контактно-аккумуляторного электровоза

Авторский вариант упрощенной схемы ТЭМК контактно – аккумуляторного электровоза с асинхронными тяговыми электрическими двигателями (ТАД) приведен на рис. 3.

Основными блоками тягового комплекса двоосного шахтного электровоза являются: пульт управления, система управления электроприводом с инверторами И1, И2 и тормозным чоппером VT, блок питания цепей управления и освещения БП, зарядное устройство ЗУ, аккумуляторная батарея АБ, тяговые асинхронные двигатели М1, М2.

Входной фильтр выполняется отдельным блоком и состоит из индуктивности L и емкости. Кроме этого в состав блока фильтра включены запирающий диод, обратный диод, ограничитель перенапряжений.

Ограничитель перенапряжений исключает появление опасных перенапряжений на конденсаторах, в том числе возникающих при резонансном заряде конденсаторов. При этом не требуется схема предварительного заряда конденсаторов через резистор и потери рабочего времени на заряд.

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

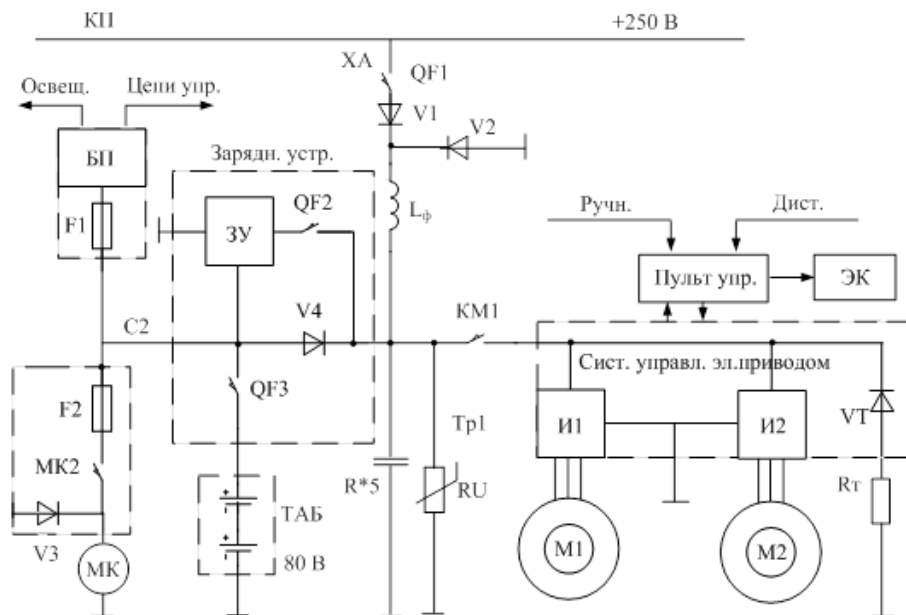


Рис. 3. Упрощённая электрическая схема шахтного контактно-аккумуляторного электровоза

5. Обоснование и разработка алгоритма управления асинхронным тяговым электромеханическим комплексом шахтного двосного контактно-аккумуляторного электровоза

5. 1. Определение тяговых параметров и конструкций тягового электромеханического комплекса

В [10] приведены результаты исследований по выбору параметров ряда слагаемых ТЭМК рудничного контактно-аккумуляторного электровоза. В частности ёмкости тяговой аккумуляторной батареи и т.д. Вместе с тем, важнейшей слагаемой параметров ТЭМК являются параметры ТАД и способ управления уровнем напряжения на его зажимах. Проанализируем это утверждение. Как известно [11], скорость движения электровозосоставов в подземных условиях отечественных шахт регламентируется и находится в пределах 2–20 км/час, при этом значительный (до 25%) объем всех транспортных операций составляют маневры при погрузочно-разгрузочных работах, движение по закруглениям и стрелкам, местам с плохим состоянием путей, где скорости движения составляют лишь 2–5 км/час.

Существующие шахтные контактные электровозы К14 – прототип предлагаемому – имеют необоснованные конструктивно завышенные скоростные характеристики, которые не могут быть реализованы в практике эксплуатации в подземных условиях, поэтому для новых типов электровозов номинальную часовую скорость целесообразно снизить. Приведем некоторые авторские соображения в этом направлении исследований.

Мощность, реализуемая двусосным рудничным электровозом независимо от его вида и типа ТЭМК, определяется:

$$P = F \cdot V, \text{ кВт}, \tag{1}$$

где F – сила тяги, кН; V – скорость, м/с.

При той же мощности ТЭМК постоянного тока, которая присуща 14-ти тонным рудничным электро-

возам (2·45=90 кВт) предлагается увеличить силу тяги F и уменьшить скорость V электровоза посредством иного типа и структуры тягового привода – асинхронного.

При этом ожидаемые паспортные характеристики часового режима электровоза К16А будут следующие: сила тяги – 24,5 кН; скорость – 3,56 м/с (12,8 км/час); мощность – 87 кВт.

Расчетные характеристики часового режима электровоза К16А: сила тяги – 27,4 кН; скорость – 3,56 м/с (12,8 км/час); мощность – 87 кВт.

В обоих случаях часовая мощность, реализуемая электровозом с новым ТЭМК, составит 87 кВт, а часовая мощность тяговых двигателей, с учетом потерь в редукторах – 90 кВт (2х45 кВт).

Расчетная частота вращения тягового асинхронного двигателя в часовом режиме составит 1180 об/мин, с учетом скольжения вращение идеального холостого хода (синхронная скорость) равна 1200 об/мин.

Как известно [16], частота вращения идеального холостого хода ТАД определяется

$$n_0 = \frac{f \cdot 60}{p}, \text{ об/мин}, \tag{2}$$

где f – частота на выходе инвертора напряжения, Гц; p – число пар полюсов асинхронного двигателя.

Для получения ожидаемой частоты вращения ТАД $n_0 = 1200$ об/мин могут быть использованы, к примеру, два варианта тяговых асинхронных двигателей: с 2 или 3 парами полюсов. При этом номинальные частоты инвертора напряжения будут равны:

- для двигателей с 2 парами полюсов – 40 Гц;
- для двигателей с 3 парами полюсов – 60 Гц.

Здесь отметим, что вопрос выбора варианта является противоречивым: с увеличением числа пар полюсов затраты на изготовление тягового двигателя возрастают, но с увеличением номинальной частоты его оборотов – они уменьшаются. Для определения какой из этих факторов более существенен – требуются специальные исследования, выходящие за рамки данных исследований. При выборе варианта следует учитывать также изменение потерь в инверторе и изменение параметров входного фильтра.

Учитывая, что при более высокой частоте коммутации импульсов напряжения снижаются требования к параметрам входного фильтра, авторами предпочтение отдается варианту с номинальной частотой инвертора 60 Гц и асинхронным двигателем с 3 парами полюсов [10].

Для данного случая основные номинальные параметры часового режима трехфазного ТАД с короткозамкнутым ротором будут:

- мощность – 50 кВт;
- напряжение – 173 В (фазное 100 В);
- ток – 185 А;

- частота тока – 60 Гц (диапазон регулирования 1–100 Гц);
- частота вращения – 1180 об/мин (синхронная частота 1200 об/мин).

5. 2. К разработке алгоритма управления тяговым электротехническим комплексом шахтного контактно-аккумуляторного электровоза

Возвращаясь к соображениям, изложенным впереди, подчеркнем в очередной раз, что с целью достижения желаемого уровня эффективности функционирования ТЭМК с ТАД важны параметры последнего. В свою очередь, как отмечалось впереди, при выборе параметров ТАД необходимо учитывать и тот факт, которым апеллируют «противники» асинхронных ТЭМК, что естественные механические характеристики асинхронных тяговых двигателей очень жесткие и не совсем пригодны для условий электрической тяги. Но, по мнению авторов, современные способы и средства регулирования напряжения питания и частоты вращения ТАД позволяют получить более совершенные тяговые характеристики, весьма близкие к необходимым по тяговым свойствам.

Обоснуем это утверждение следующим. Как известно, в свете установленного академиком Костенко М. П. [16] закона оптимального регулирования, в соответствии с которым получают наилучшие к.п.д. и коэффициент мощности ТЭМК, соотношение между вращающим моментом, частотой и напряжением на ТАД должно быть:

$$\frac{u_n}{u} = \frac{f_n}{f} \sqrt{\frac{M}{M_n}}, \tag{3}$$

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, Н·м.

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

$$\frac{u_n}{u} = \frac{f_n}{f} \sqrt{\frac{F}{F_n}}, \tag{4}$$

или в относительных единицах

$$u_* = f_* \sqrt{F^*}.$$

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

$$f_* = \frac{u_*}{\sqrt{F^*}}, \tag{5}$$

или в абсолютных величинах

$$f = f_n \frac{u}{u_n} \sqrt{\frac{F_n}{F}}, \text{ Гц.} \tag{6}$$

Полученные аналитические выражения (4)–(6) являются трансформацией закона оптимального регулирования М. П. Костенко в направлении получения соответствующего алгоритма управления уровнем напряжения питания ТАД применительно к условиям электрической тяги [16]. Используя полученные зави-

симости, авторами были рассчитаны и построены электромеханические тяговые характеристики перспективного типа электровоза – К16А (сплошная линия) с ТАД при двух значениях напряжения их питания от тяговой аккумуляторной батареи (80 В) и от тяговой контактной сети (250 В). Как видим, эти характеристики удовлетворяют требованиям, изложенным ранее (рис. 4) для условий тяговых многодвигательных комплексов, поскольку в данном случае, получены ожидаемо мягкие характеристики, своим видом приближаются по «мягкости» к характеристикам двигателей постоянного тока последовательного возбуждения (пунктирные линии).

В табл. 1 представлены расчетно ожидаемые характеристики рудничного контактно-аккумуляторного электровоза КА16А с новым типом ТАД и эксплуатируемым прототипом – К14

Таблица 1

Характеристики рудничного электровоза с новым типом ТАП (К16А)

Параметры	К14	К16А (разрабатываемый)
Масса, т	14	16
Параметры часового режима: Сила тяги, кН	24,5	27,4
Скорость электровоза, м/с (км/час)	3,56 (12,8)	3,18 (11,46)
Мощность двигателей, кВт	2x45 пост. тока	2x45 перем. тока
Частота вращения, об/мин	1320	1180 (50 Гц)
Напряжение двигателей, В	250 (пост)	173 (перем) (100 В фазное)
Ток двигателя, А	204 (пост)	185 (перем)
Ток сети, А	204x2	210x2
Максимальная сила тяги, кН ($\psi = 0,25$)	35	40
Максимальная скорость, м/с (км/час)	Не ограничена	5,3 (19,2) (100 Гц)

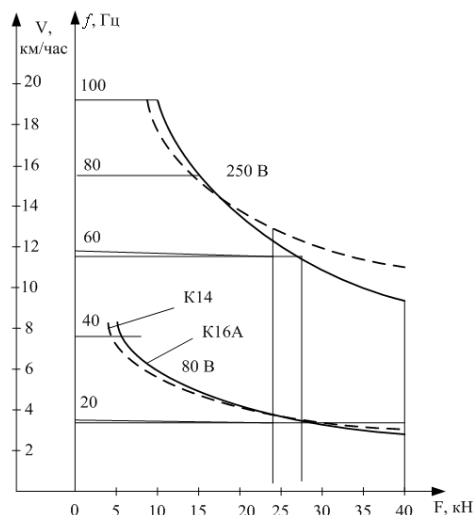


Рис. 4. Тяговые характеристики электровозов К14 с тяговыми двигателями постоянного тока и К16А с асинхронными тяговыми двигателями при напряжениях питания 250 и 80В ($\psi = 0,25$)

Т. е. в варианте с асинхронным ТЭМК достигаются требуемые «мягкие» виды тяговых характеристик. По-

следние, как известно, в условиях электрической тяги по сравнению с жесткими характеристиками имеют ряд преимуществ:

- более равномерное распределение нагрузок между тяговыми двигателями многомодульных ТЭМК;
- меньше влияние изменений условий движения и изменений напряжения в контактной сети, а также меньше электрическая мощность, потребляемая из сети [10].

7. Выводы

1. Существующие виды тяговых электромеханических систем, как и сами шахтные электровозы, не удовлетворяют современным требованиям горнорудных

производств и требуют замены на эффективные и безопасные в эксплуатации виды – контактно-аккумуляторные электровозы с энергоэффективными асинхронными тяговыми электротехническими комплексами.

2. Для достижения достаточной эффективности тяговых электромеханических комплексов для новых отечественных видов рудничных электровозов – контактно-аккумуляторных с тяговыми асинхронными электрическими двигателями и IGBT преобразователями в направлении достижения требуемого уровня мягкости тяговой электромеханических характеристик асинхронных двигателей и комплекса в целом целесообразно использование закона академика Костенко М. П. для построения соответствующего алгоритма управления напряжением питания тяговых асинхронных электрических двигателей.

Литература

1. Шидловський, А. К., Півняк Г. Г., Рогоза М. В., Випанасенко С. І. Гоекономіка та геополітика України [Текст] : навч. пос. / А. К. Шидловський, Г. Г. Півняк, М. В. Рогоза, С. І. Випанасенко. – Д.: Національний гірничий університет, 2007. – 282 с.
2. Бабец, Е. К. Сборник технико-экономических показателей горнодобывающих предприятий Украины в 2009 – 2010 гг. Анализ мировой конъюнктуры рынка ЖРС 2004–2011 гг. [Текст] / Е. К. Бабец, Л. А. Штанько, В. А. Салганик и др. – Кривой Рог: Видавничий дім, 2011 – 329 с.
3. Бутт, Ю. Ф. Шахтный подземный транспорт: справочное издание. Шахтный локомотивный и рельсовый транспорт. Т. 1 [Текст] / Ю. Ф. Бутт, В. Б. Грядущий, В. Л. Дебелый, А. Н. Коваль, А. Л. Фурман, В. М. Щука, В. А. Яценко; под общ. ред. Б. А. Грядущего. – Донецк: «ВИК», 2009. – 481 с.
4. Волотковский, С. А. Рудничная электровозная тяга [Текст] / С. А. Волотковский. – М.: Недра, 1986. – 389 с.
5. Карагаев, В. И., Хаймин А. Д., Быстров С. А. Применение кабельного барабана для электропитания электровоза в ортах. В сб. Безопасность и надёжность электроснабжения горнорудных предприятий [Текст] : тез. докл. и сообщ. III-й Всес. науч.-тех. конф. / В. И. Карагаев, А. Д. Хаймин, С. А. Быстров; под общ. ред. А. В. Николайчука // Электробезопасность на горнорудных предприятиях чёрной металлургии. – Днепропетровск, 1988. – С. 104–105.
6. Бинус, М. С. Повышение надёжности и электробезопасности работы электровозной откатки шахт. В сб. Безопасность и надёжность электроснабжения горнорудных предприятий [Текст] : тез. докл. и сообщ. III-й Всес. науч.-тех. конф. / М. С. Бинус, В. И. Кунин, В. Ф. Кобевник; под общ. ред. А. В. Николайчука // Электробезопасность на горнорудных предприятиях чёрной металлургии СССР. – Днепропетровск, 1988. – С. 23–26.
7. Оат, Г. П. Промышленные испытания аппаратуры автоматического вождения шахтных поездов [Текст] / Г. П. Оат, Н. И. Литун, В. Н. Дардалан // Уголь. – 1980. – № 11. – С. 38–39.
8. Bertil, O. Computer-controller ore transformation at the LKAB mine in Kiruna [Text] / O. Bertil. – Sweden Information of ASEA, 1979. – 212 p.
9. Беридзе, Т. М. Системы управления рудничным электровозным транспортом [Текст] / Т. М. Беридзе, Э. С. Гузов и др.; под ред. О. Н. Синчука. – М.: Недра, 1993. – 225 с.
10. Синчук О. Н., Шокарев Д. А., Скапа Е. И., Гузов Э. С., Караманич Ф. И. Синергетический тяговый асинхронный электротехнический привод для контактно-аккумуляторного двухосного электровоза [Текст] / О. Н. Синчук, Д. А. Шокарев, Е. И. Скапа, Э. С. Гузов, Ф. И. Караманич // Електромеханічні та енергозберігаючі системи. – 2011. – Вип. 4 (16). – С. 65–68.
11. Рогоза, М. В. Тягово-энергетические характеристики шахтных бесконтактных электровозов с тиристорными преобразователями переменного напряжения [Текст] / М. В. Рогоза, Ю. А. Папаика, В. А. Бородай, С. Н. Якимец // Кременчуг: Вісник КрНУ ім. Михайла Остроградського. – 2014. – Вип. 2 (85). – С. 9–14.
12. Кардаков, В. Н., Анискин Б. Г., Лакота О. Б., Коржев А. А. Электровозный транспорт на горнах предприятиях [Текст] / В. Н. Кардаков, Б. Г. Анискин, О. Б. Лакота, А. А. Коржев // Проблемы и их решения. Горные машины и автоматика. – 2003. – Вып. 5. – С. 13–15.
13. Жеребкин, Б. В. Система нечеткого векторного управления асинхронным тяговым приводом. Проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов на промышленных предприятиях и ТЭС [Текст] / Б. В. Жеребкин. – Межвузовский сборник научных трудов. СПбГТУРП, СПб., 2002. – С. 230–236.
14. Li, Y. Simulation and experimental studies of speed sensorless control of permanent magnet synchronous motors for mine electric locomotive drive [Text] / Y. Li, Y. Zhang, T. Zhang // International Journal of Control and Automation (IJCA). – 2014. – Vol. 7, Issue 1. – P. 55–68. doi: 10.14257/ijca.2014.7.1.05.
15. Единые правила безопасности при разработке рудных, нерудных и россыпных месторождений подземным способом [Текст] / М.: Недра, 1972. – 225 с.
16. Костенко, М. П. Электрические машины [Текст] / М. П. Костенко, Л. М. Пиотровский. – Л.: Энергия, 1973. – 648 с.