

деформаций крупных инженерных сооружений / Д. Ш. Михелев, И. В. Рунов, А. И. Голубцов. – М.: Недра, 1977. – 152 с.

11. Перепечкин А.А. Об оптимальной длине визирного луча при измерении осадок сооружений / Геодезия и картография. – 1976. – № 2. – С. 27–31.

12. <http://www.topcon.ua/>

13. Черников В.Ф. Создание высотной опорной сети для наблюдения за осадками промышленных сооружений // В.Ф. Черников / Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка, 1963. – № 3. – С. 37–42.

14. Нивелирование I и II классов. – М.: Недра, 1982. – 264 с.

15. Зайцев А.К. Геодезические методы исследования деформаций сооружений / А.К. Зайцев, П.В. Марфенко, Д.Ш. Михелев и др. – М.: Недра, 1991. – 272 с.

16. Luccio M. The concrete and the clay: monitoring large structure deformation // GPS World, Vol. 13, No. 8. – 2002. – P. 16.

17. Костецька Я. Дослідження методів визначення нестабільності висот реперів у нівелірних мережах / Я. Костецька, Р. Озімбловський, Н. Турчин // Сучасні досягнення геодезичної науки і техніки. – Львів, 2011. – №1(121). – С. 121–125.

18. <http://www.geosystema.net/digitals/>

Рукопис надійшов 16.09.2013 г.

УДК 622.625.28-83

О.Н.Синчук, докт. техн. наук, профессор,

ГВУЗ «Криворожский национальный университет»

Ф.И.Караманиц, председатель правления

«ПАО Криворожский железорудный комбинат»

Э.С.Гузов, канд. техн. наук, доцент, **И.О.Синчук**, канд. техн. наук, доцент,

В.Н.Колотилин, канд. техн. наук, доцент,

ГВУЗ «Криворожский национальный университет»

К ВОПРОСУ СОЗДАНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО И БЕЗОПАСНОГО В ЭКСПЛУАТАЦИИ 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.

Ключевые слова: энергоэффективность, контактно-аккумуляторный электровоз, электробезопасность, тяговый асинхронный электропривод.

В статті приведені результати досліджень з пошуку і створенню енергоефективного та безпечного в експлуатації електровозу для рудникових шахт – контактної-акумуляторного. Приведено розроблений закон і алгоритм керування тяговим електротехнічним комплексом, його структура для даного виду електровозу.

Ключові слова: енергоефективність, контактної-акумуляторний електровоз, електробезпека, тяговий асинхронний двигун.

In article results of probes on search and creation of a power effective and safe electric locomotive in operation for ore mines – contact-charging are resulted. The developed law and algorithm of steering by a traction electrotechnical complex, its structure for the given kind of an electric locomotive is resulted.

Keywords: energy efficiency, contact-charging Electric locomotive, electrical safety, the traction asynchronous electric drive.

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

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 не привередливость 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 произошел ряд 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. Безусловно, что такая постановка задачи обеспечения безопасности – это явное непонимание состояния вопроса, но

важно, безусловно, и то, что проблему безопасности людей в шахтах от касания КЛ необходимо решать.

Исследования всех «за» и «против» высветили возможным и одновременно реальным направлением технического компромисса – создание или точнее реинжиниринг на базе контактных видов нового подвида электровозов – контактно-аккумуляторных [3-5].

Вместе с тем, 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);

- отсутствия 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 [6-7].

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.

Известные исследования в области разработки тяговых электротехнических систем с асинхронными ТЭД для рудничных электровозов (как впрочем и самих электровозов) имели направленность скорее конструктивной реализации. 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 [6].

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 [6], 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 малоприспособные 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 к.п.д. и коэффициент мощности [6]. Согласно этому закону соотношение между вращающим моментом, частотой и напряжением на двигателе:

$$\frac{u_H}{u} = \frac{f_H}{f} \sqrt{\frac{M}{M_H}} , \quad (1)$$

где u и u_H – действительное и номинальное значение напряжения, В; f и f_H – действительное и номинальное значение частоты, Гц; M и M_H – действительное и номинальное значение вращающего момента, Н·м.

Преобразуя уравнение (1) путем подстановки вместо моментов силу тяги, получим:

$$\frac{u_H}{u} = \frac{f_H}{f} \sqrt{\frac{F}{F_H}} , \quad (2)$$

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

$$f = f_H \frac{u}{u_H} \sqrt{\frac{F_H}{F}} , \text{ Гц} \quad (3)$$

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 ($U_6=80В$).

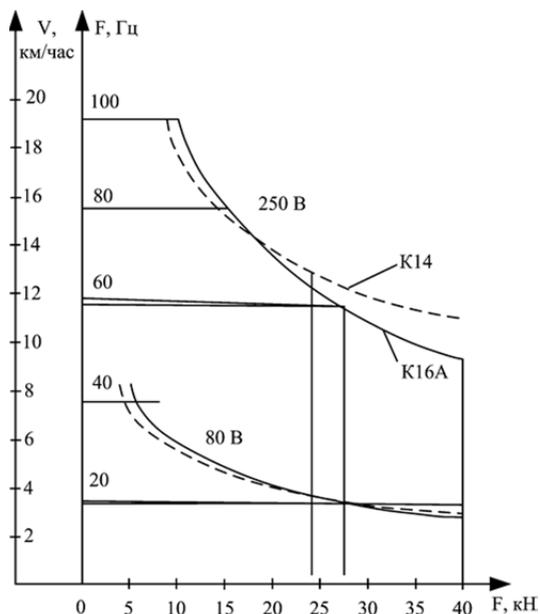


Рис. 1. Тяговые характеристики электровозов К14 и К16А при напряжениях питания 250 и 80В при коэффициенте сцепления колес с рельсами: ($\psi = 0,25$)

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 [8-9].

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.

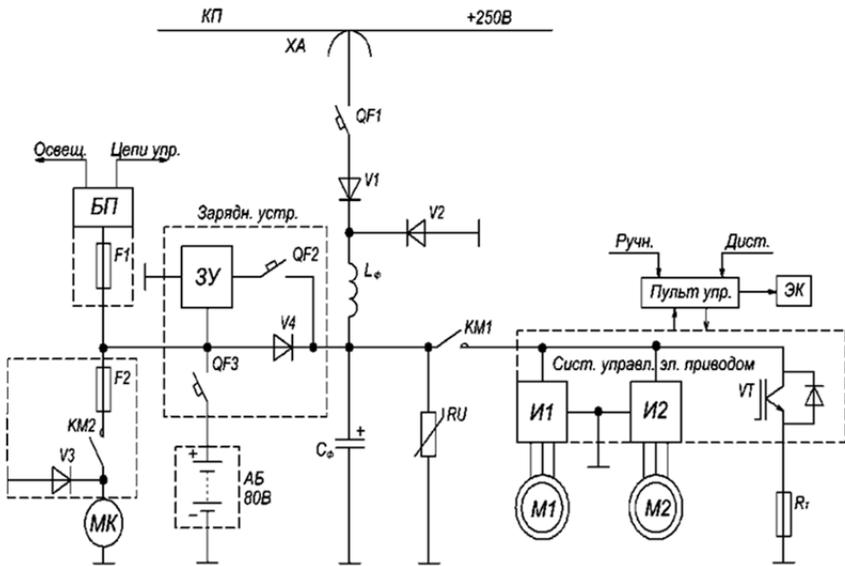


Рис. 2. Упрощенная принципиальная схема рудничного контактно-аккумуляторного электровоза с асинхронным тяговым электроприводом

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, её достаточная требуемая и необходимая емкость должна быть 350-400 Аг, ($U_H=80$ 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 реализует алгоритм управления ТЭТК, что обеспечивает плавное регулирование тока и тягового усилия, а также защиту от буксования. При этом максимальное тяговое усилие может быть дополнительно увеличено на 10-20%. В итоге максимальная сила тяги электровоза увеличится на 20-30% и он будет устойчиво перевозить составы не из 10, а из 12 вагонеток грузоподъемностью 10 т.

За счет полного регулирования можно ожидать реального снижения вероятности и интенсивности буксования, что уменьшит износ колес и рельсов, а также потребление электрической энергии.

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

Стендовые испытания тягового электромеханического комплекса контактно-аккумуляторного электровоза.

Исследованием подвергался авторский вариант системы управления приводом электровоза [3]. Для реальной оценки эффективности предложенного варианта, исследовались и его классический вариант [7].

Исследования проводились в режимах - пуска, тяги, торможения и отрывах пантографа электровоза от контактной сети. При проверке режима пуска осуществлялся плавный разгон тяговых электродвигателей по данным регулируемым ускорением.

Осциллограмма на рис. 3 показывает нарастание амплитудного значения тока в момент включения системы в режим "ТЯГА" (временной отсчет ведется от момента включения на пульте машиниста).

На рис. 4 (а), показана осциллограмма трехфазного тока двигателя, в режимах холостого хода, а на рис. 4 (б) - при работе под нагрузкой при ШИМ напряжения

При моделировании режима "ТОРМОЗ" проводился анализ форм кривых выходного тока инвертора по трем фазам двигателя.

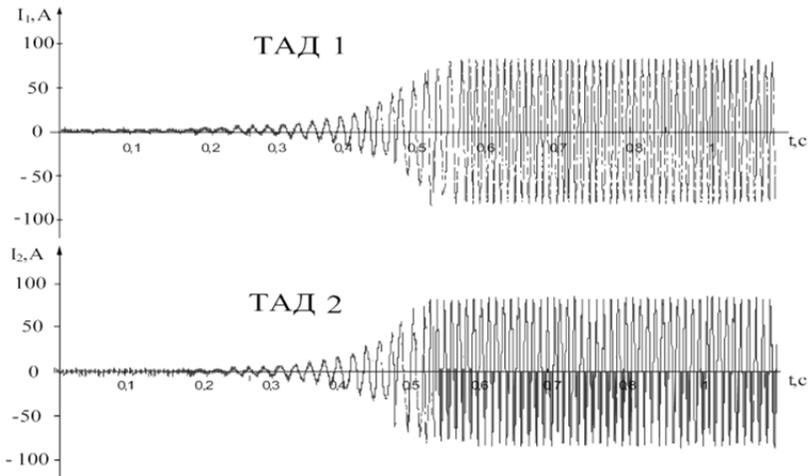


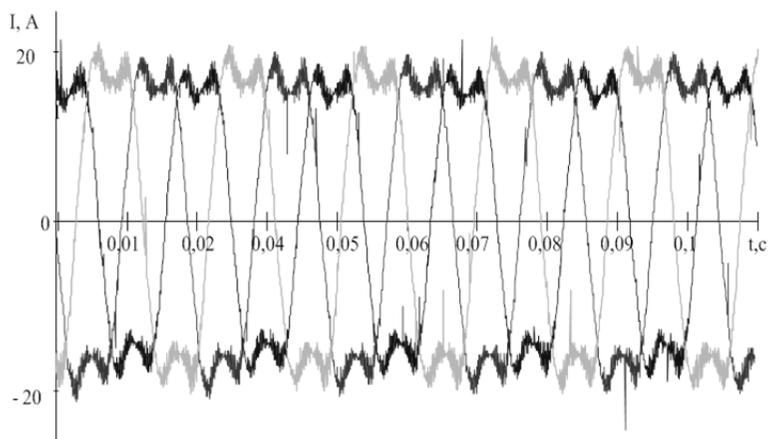
Рис. 3. Осциллограммы токов тяговых асинхронных двигателей рудничного контактно-аккумуляторного электровоза в режиме режима "ТЯГА"

На рис. 5 (а), (б) приведены осциллограммы переходных процессов в ТАД электропривода при несанкционированном допустимом исчезновении напряжения питания на входе контура преобразователя электрической энергии, возникающей в момент исчезновения питания ТАП с нагрузкой равной 0,25 номинальной (режим, установившийся, "ТЯГА ", ротор двигателя вращается на стабильной скорости).

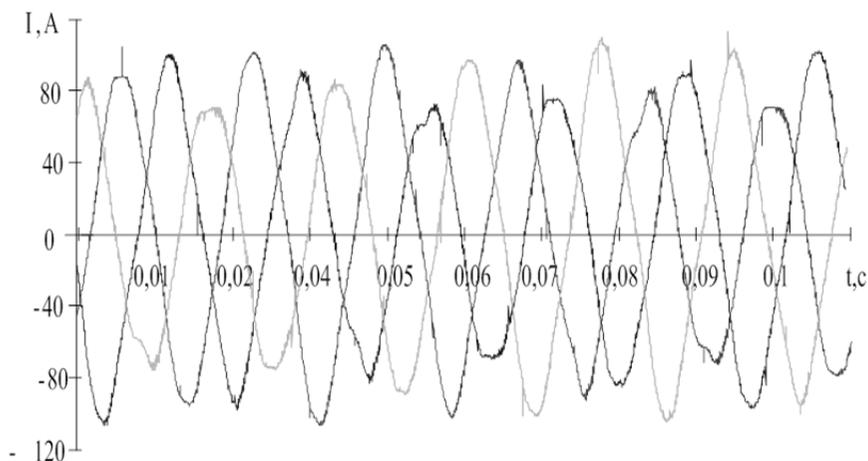
Имитация отрыва пантографа временной участка = 0,15 с. Спад напряжения с уровня 230 В до уровня 0 В происходит за время менее 200 мс.

"Подхват" напряжения (питание от аккумуляторной батареи) осуществляется через 0,15 с после режима, который установился, что соответствует расчетной модели ТЭП.

На рис. 5 (в), (г) представлена осциллограмма переходных процессов в тяговом двигателе ТАП при отключении питания электровоза от контактной сети под номинальной нагрузкой на валу двигателя.



а) в режиме нерабочего хода



б) с нагрузкой на валу

Рис. 4. Осциллограммы трехфазных токов асинхронного тягового двигателя

Как следует из осциллограмм протекания электрических переходных процессов в тяговых асинхронных двигателях при различных системах питания – КМ и ТАБ практически идентичны.

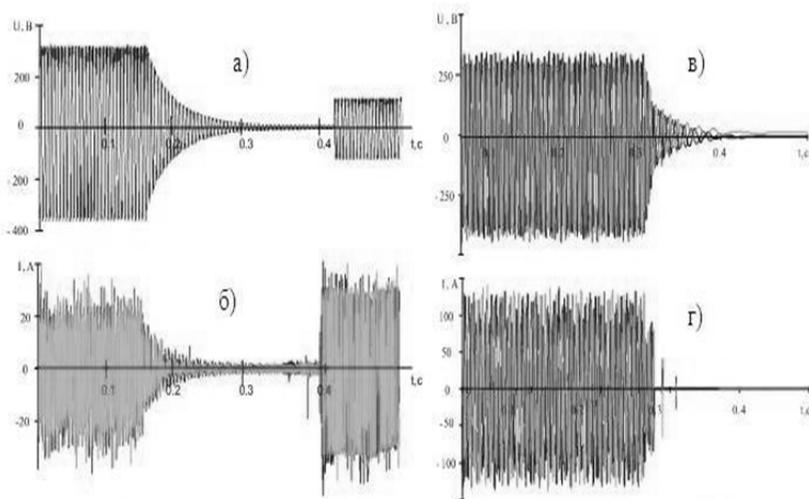


Рис. 5. Осциллограммы переходного процесса а) напряжения б) токов на выходе ТАД в момент кратковременного исчезновения питания от КМ на входе ИГВТ - инвертора электропривода электровоза и переключением на питание от аккумуляторной батареи в) напряжение и г) токи на фазах тягового асинхронного двигателя ТАД в момент исчезновения напряжения на входе преобразователя с нагрузкой на валу двигателя

В ходе эксперимента также осуществлялись (моделировались на физической модели - стенде) пуски ТАП под полной нагрузкой , при $U=250V$ и $U=80V$ резкий сброс и резкий наброс нагрузки , переключение источника питания: КМ - ТАБ. Сигнал задания скорости вращения ротора ТАД на всем всем интервале времени эксперимента оставался неизменным. Полученные экспериментальные характеристики режимов работы тягового асинхронного закону U/f представлены на рис. 6.

Параметрами для наблюдения были выбраны: сигнал задания скорости вращения ротора ТАД, сигнал фактической скорости вращения ротора ТАД, полученный из тахогенератора и сигнал с датчика тока,

характеризующий момент сопротивления создаваемый погрузочной машиной.

В ходе эксперимента осуществлялся пуск привода под полной нагрузкой, резкий сброс и наброс полной нагрузки и пошаговое сброса и наброс полной нагрузки при неизменном сигнале задания скорости вращения ротора ТАД.

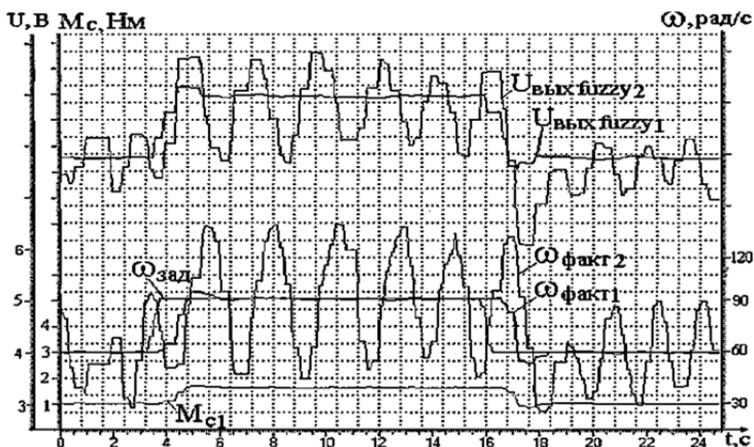


Рис. 6. Электромеханические характеристики двух двигателей асинхронного электропривода при неодинаковых нагрузках и неодинаковых электромеханических характеристиках тяговых асинхронных двигателей

Оценивалось также поведение системы и ее показатели в функции ряда других факторов [8,9].

Выводы.

1. Эффективным направлением создания энерго-эффективного и безопасного в эксплуатации рудничного электровоза является контактно-аккумуляторный с асинхронным тяговым приводом.

2. Предложены и разработана система тягового асинхронного электропривода для контактно-аккумуляторного рудничного электровоза, отличительные черты которой:

- состоит из двух блоков ИГВ транзисторных преобразователей, каждый из которых в свою очередь состоит из трех однофазных инверторных мостов;

- обмотки двигателей образуют схему "разомкнутый треугольник";

- каждая обмотка двигателя присоединена к своему однофазному инверторному мосту;

- одноименные обмотки двигателей соединены между собой – концы обмоток первого двигателя соединены с началами обмоток второго, строятся тем самым, спаренные мосты;

- тормозные резисторы подключены каждый к своему однофазного моста через пару параллельно соединенных тиристоров.

3. Возможности предложенной структуры тягового асинхронного электропривода делают ее универсальной – способной эффективно работать, как при питании от аккумуляторной батареи, так и при питании от контактной сети. При этом:

- по сравнению со структурами тяговых комплексов на основе двигателей постоянного тока в 4-5 раз снижаются затраты на ремонт и эксплуатацию асинхронных тяговых двигателей;

- бесконтактное регулирование вместо силовых контроллеров в несколько раз повышает надежность системы управления и рудничного электровоза;

- плавное регулирование силы тяги и ограничение максимальных усилий позволяет более чем в 3 раза увеличить надежность элементов механических передач электровоза;

- за счет увеличения массы электровоза и плавного регулирования масса состава может быть увеличена на 20-30%;

- применение структуры ПЧ – ТАД позволит уменьшить расход электроэнергии на электровозном транспорте шахт на 25-35%.

4. Устранение контактного провода в наиболее опасных местах – погрузочных выработках – существенно повышается безопасность всех видов работ в погрузочных выработках. Одновременно устраняются значимые для предприятий затраты на сооружение и эксплуатацию контактных сетей в погрузочных выработках, общая протяженность которых составляет около 30% протяженности контактной сети шахты.

5. Применение автоматического (дистанционного) управления электровозами при погрузочно-разгрузочных работах позволяет повысить эффективность их функционирования, упрощает работу машиниста, сводя ее фактически к наблюдательно-контролирующему процессу с его старением, уменьшить затраты труда и увеличить производительность работы ВШТ на 15-25%;

6. 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%.

7. Стендовые испытания экспериментального образца ТЭП подтвердили теоретические исследования и эффективность функционирования тягового электропривода в целом и элементов, составляющих его, в частности.

Список использованных источников

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) – часть 1.

4. Материалы сайта: www.asea.com

5. Материалы сайта: www.abb.com

6. 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.

7. Синчук О.Н., Юрченко Н.Н., Чернышев А.А., и другие. Комбинаторика преобразователей напряжения современных тяговых электроприводов рудничных электровозов // Под ред. д.т.н., проф. Синчука О.Н. // К.: 2006. – 250 с.

8. Шокарев Д.А. Энергоэффективный тяговый электротехнический комплекс двухсистемного рудничного электровоза / Е.И. Скапа, И.О. Синчук. // журнал «Електротехнічні та комп'ютерні системи» – 2011. – №03(79).

9. О.Н.Синчук Синергетическая система асинхронного электропривода контактно-аккумуляторного двухосного электровоза / Д.А. Шокарев, И.О. Синчук // Научно-технический сборник «Електромеханічні і енергозберігаючі системи» Кременчуг – № 3/2011 (12).

Рукопись поступила 15.08.2013 г.