УДК 621.398

Повышение энергетической эффективности электромеханической трансмиссии карьерного автосамосвала

А.Е.КОЗЯРУК, А.М.КАМЫШЬЯН✉

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

В статье проанализированы существующие системы электромеханической трансмиссии карьерных автосамосвалов «БелАЗ». Произведена оценка влияния характера нагрузки, создаваемой неуправляемым выпрямителем на коэффициент мощности и массогабаритные показатели электромеханической трансмиссии.

Предложены варианты модернизации системы электромеханической трансмиссии переменного тока, обеспечивающие коррекцию коэффициента мощности. Рассмотрено влияние предложенных вариантов на массогабаритные показатели электромеханической трансмиссии. С учетом выполненной оценки выбран вариант модернизации, обеспечивающий требуемый показатель коэффициента мощности при минимальном влиянии на массогабаритные показатели электромеханической трансмиссии.

Приведены результаты моделирования работы существующей системы электромеханической трансмиссии и модернизированной системы электромеханической трансмиссии с использованием наиболее перспективного варианта модернизации.

Ключевые слова: карьерный автосамосвал; электромеханическая трансмиссия; коэффициент мощности; активный фильтр; активный выпрямитель

Как цитировать эту статью: Козярук А.Е. Повышение энергетической эффективности электромеханической трансмиссии карьерного автосамосвала / А.Е.Козярук, А.М.Камышьян // Записки Горного института. 2019. Т. 239. С. 576-582. DOI: 10.31897/PMI.2019.5.576

Введение. Автомобильный карьерный транспорт является наиболее эффективным и востребованным средством транспортировки горной массы [6, 7, 12]. Достоинства данного вида транспорта определяются высокой маневренностью, сокращением длины транспортных коммуникаций, высокой оперативностью управления.

На автосамосвалах грузоподъемностью более 90 т наибольшее распространение получило применение электромеханической трансмиссии. Хотя по сравнению с гидромеханической данный вид трансмиссии обладает меньшим КПД, зато она отличается гибкостью компоновки и более высокими тяговыми свойствами привода.

В России производство электромеханической трансмиссии для карьерных автосамосвалов осуществляется на предприятии ПАО «Силовые машины» (филиал – завод «Электросила»). Компанией разработаны системы электромеханической трансмиссии переменного тока. Комплекты электромеханических трансмиссий для большегрузных карьерных автосамосвалов также создаются концерном «Русэлпром» (ПАО «НИПТИЭМ») и ВПО «НИУ МЭИ» [4, 11].

В электромеханической трансмиссии, разрабатываемой ВПО «НИУ МЭИ», в качестве тяговых двигателей применяются вентильно-индукторные двигатели с независимым возбуждением, однако, как показал опыт эксплуатации, трансмиссия переменного тока с частотно регулируемые асинхронными тяговыми двигателями, получающими питание от автономных инверторов напряжения на основе IGBT-транзисторов, является наиболее эффективным решением благодаря простоте изготовления, надежности, возможности работать в широком диапазоне скоростей [5, 10, 13, 14].

Обзор существующей схемы электромеханической трансмиссии. На рис.1 представлена схема электромеханической трансмиссии переменного тока автосамосвала «БелАЗ», получившая наибольшее распространение на серийно выпускаемых автосамосвалах грузоподъемностью 130 т. В качестве источника энергии в данной схеме выступает дизельный двигатель (Д), с валом которого соединен валом синхронный генератор (СГ) с системой самовозбуждения (В), питающий через два неуправляемых выпрямителя (ДВ1, ДВ2) и автономные инверторы напряжений (ИН1, ИН2) тяговые асинхронные двигатели (АД1, АД2) правого и левого мотор-колеса. На скоростях (до 8 км/ч) торможение осуществляется переводом тяговых двигателей в режим рекуперации электроэнергии и включением в цепь постоянного тока блоков тормозных резисторов (ТР1, ТР2).

Рис.1. Схема электромеханической трансмиссии переменного-переменного тока автосамосвала «БелАЗ»

Параметры электрической трансмиссии автосамосвала грузоподъемностью 130 т:

Номинальная мощность генератора, кВт	800
Частота вращения генератора, об/мин	
номинальная	1500
максимальная	1900
Коэффициент мощности генератора в номинальном режиме	0,95
Номинальная мощность АД, кВт	610
Номинальная частота вращения АД, об/мин	850
Коэффициент мощности АД в номинальном режиме	0,84
КПД АД, %	93
Номинальный момент M_n , кНм	6,9
Номинальное тяговое усилие, кг	29400
Максимальное тяговое усилие, кг	75000
Номинальное выпрямленное напряжение U_n , В	1000

На рис.2 представлены напряжения и токи в системе преобразователя частоты с диодным выпрямителем и автономным инвертором напряжения в установившемся режиме работы, где u_{sn} – трехфазная система напряжений сети, i_{s1} – ток одной фазы сети, i_d – выпрямленный ток диодного моста; u_{rc} – напряжение конденсатора; i_c – ток конденсатора, u_1 – напряжение одной фазы нагрузки, i_n – трехфазная система токов нагрузки, $u_{оп}$ – опорное напряжение, u_{yn} – трехфазная система напряжений управления [9].

Из графиков на рис.2 видно, что использование двухзвенного преобразователя частоты данной конструкции в составе электромеханической трансмиссии автосамосвала приводит к несинусоидальности токов, протекающих по обмоткам генератора [2, 5]. Искажения формы токов генератора, в свою очередь, приводит к существенному увеличению потерь энергии и сокращению срока службы обмоток статора генератора (Отчет о научно-исследовательской работе «Разработка комплексной системы оптимизации режимов электроснабжения и улучшения качества электрической энергии в распределительных сетях рудников ОАО «Норильская горная компания». Санкт-Петербург: СПбГИ. 2001. 123 с.). Кроме того, при работе на неуправляемый выпрямитель снижается коэффициент мощности системы генератор – диодный выпрямитель.

Рис.2. Напряжения и токи в схеме с диодным выпрямителем и автономным инвертором напряжения

Автосамосвалы грузоподъемностью 130 т оснащаются синхронным тяговым генератором ГСТ-800 номинальной мощностью 800 кВт. При работе генератора на неуправляемый выпрямитель с коэффициентом мощности 0,84 полезная мощность системы генератор-выпрямитель будет равна:

$$P_{гв} = P_{г} K_{г} K_{в}, \quad (1)$$

где $P_{гв}$ – мощность системы генератор – выпрямитель; $P_{г}$ – мощность генератора; $K_{г}$ – коэффициент мощности генератора, $K_{в}$ – коэффициент мощности генератора при работе на диодный выпрямитель.

Система электромеханической трансмиссии карьерного автосамосвала является энергетической системой с автономным источником, поэтому мощность, вырабатываемая синхронным тяговым генератором, определяет максимальную мощность, потребляемую тяговыми двигателями. При низком значении коэффициента мощности и высоком коэффициенте искажений токов и напряжений генератора возникают дополнительные потери активной мощности.

Наличие потерь активной мощности в системе электромеханической трансмиссии приводит к необходимости использования генератора завышенной мощности, что, согласно определению машинной постоянной Арнольда, связывающей между собой мощность электрической машины, число оборотов в минуту, длину и диаметр ротора, приводит к увеличению габаритов синхронного тягового генератора:

$$D^2 l = \frac{C_A P}{n_1}, \quad (2)$$

где D – диаметр ротора; l – длина ротора; C_A – машинная постоянная Арнольда; n_1 – синхронная скорость вращения ротора в об/мин; P – активная мощность электрической машины в кВт. Кроме того, потери мощности приводят к снижению показателя габаритной мощности синхронного генератора, определяемого как отношение активной мощности к габаритным показателям.

Варианты модернизации. Указанные выше недостатки возможно устранить путем модернизации существующей системы электромеханической трансмиссии, обеспечив коррекцию коэффициента мощности системы генератор – выпрямитель.

Увеличения коэффициента мощности системы можно добиться путем добавления в состав электромеханической трансмиссии электрических устройств, обеспечивающих возможность коррекции коэффициента мощности: активного фильтра или активного выпрямителя [8] (рис.3).

Коррекция коэффициента мощности в указанных топологиях обеспечивается за счет применения полностью управляемых транзисторных ключей (IGBT) и настройки системы управления ключами на минимизацию реактивной мощности. Кроме того, технические решения, представленные выше, позволяют поддерживать напряжение в звене постоянного тока на заданном уровне.

Существующая система электромеханической трансмиссии содержит единый шкаф преобразователя частоты, включающий в себя неуправляемые выпрямители и автономные инверторы (рис.4) и устанавливаемый под козырьком безопасности рядом с кабиной автосамосвала. В шкафу преобразователя реализована жидкостная система охлаждения [10].

Вариант модернизации, включающий активный фильтр, требует меньших затрат, поскольку выбор полупроводниковых ключей осуществляется не на полный ток генератора, как в случае активного выпрямителя, а на величину реактивного тока и тока искажений:

$$I_{AV} = \sqrt{I_a^2 + I_p^2 + I_u^2}, \quad (3)$$

$$I_{AF} = \sqrt{I_p^2 + I_u^2}, \quad (4)$$

где I_{AV} , I_{AF} – токи, протекающие через активный выпрямитель и активный фильтр соответственно; I_a – активный ток; I_p – реактивный ток; I_u – величина тока искажений.

Как показано в [1], применение параллельного активного фильтра с общим звеном постоянного тока в структуре автономного комплекса электроснабжения объектов нефтепромысла позволяет снизить коэффициент гармоник тока $THDi$ и напряжения $THDu$ источника с 22,99

Рис.3. Варианты модернизации электромеханической трансмиссии автосамосвала: *а* – с использованием активного фильтра (АФ1, АФ2); *б* – активного выпрямителя (АВ1, АВ2); Н1, Н2 – нелинейная нагрузка (инвертор, асинхронный двигатель)

и 16,09 % до 0,43 и 1,43 % соответственно, и, тем самым, увеличить коэффициент мощности системы. Кроме того, данная система позволяет уменьшить расход дизельного топлива первичного двигателя на 12,47 % [1].

Наиболее целесообразным является использование одного активного фильтра при работе на группу преобразователей [3], но, в связи с тем, что в электромеханической трансмиссии автосамосвала используется шестифазный синхронный генератор, возникает необходимость установки активного фильтра в каждую из двух трехфазных ветвей и двух дополнительных конденсаторных батарей (рис.3, *б*), а также дополнительной системы охлаждения. Данное решение, по сравнению с вариантом модернизации с использованием активного выпрямителя, окажет негативное влияние на массогабаритные параметры электромеханической трансмиссии и увеличит затраты на техническое обслуживание и ремонт за счет увеличения числа компонентов электромеханической трансмиссии.

Вариант модернизации с использованием активного выпрямителя является наиболее перспективным решением, позволяющим обеспечить коэффициент мощности системы генератор – активный выпрямитель, близким к 1. Реализация данного варианта потребует замены модулей неуправляемых диодных ключей модулями силовых управляемых IGBT-транзисторов, что не окажет значительного влияния на массогабаритные параметры электромеханической трансмиссии, при этом дополнительная система охлаждения не потребуется.

Математическое моделирование.

Для оценки влияния работы асинхронного тягового двигателя на показатели энергетической эффективности тягового генератора были созданы компьютерные модели электромеханической трансмиссии карьерного автосамосвала, позволяющие адекватно оценить энергетические и электромеханические процессы и синтезировать алгоритмы управления, обеспечивающие требуемые статические и динамические режимы работы.

Рис.4. Размещение шкафа преобразователя на карьерном автосамосвале

Рис.5. Математическая модель системы электропривода: а – структурная схема модели; б – структурная схема дизель генератора; в – коэффициент мощности K_m системы генератор – неуправляемый выпрямитель; г – напряжение звена постоянного тока U_d ; д – электромагнитный момент тягового асинхронного двигателя M

Первая модель (рис.5, а) выполнена по схеме, разработанной ПАО «Силовые машины» и используемой на серийно выпускаемых моделях автосамосвалов, включающей в себя модель тягового генератора, неуправляемого диодного выпрямителя и тягового асинхронного двигателя с векторным управлением. Поддержание заданного напряжения в звене постоянного тока в данной модели осуществляется обратной связью по напряжению, учитывающей постоянную времени возбудителя генератора.

Модель генератора выполнена на основе паспортных данных синхронного генератора и зависимости выходного напряжения от частоты вращения, полученной из протокола испытаний опытного образца асинхронного тягового электропривода автосамосвала «БелАЗ» (Отчет о результатах испытаний опытного образца электропривода асинхронного для самосвала «БелАЗ» грузоподъемностью 136 т. Санкт-Петербург: СПГГИ, 2006. 62 с.) (см. рис.5, б).

Эксперименты с моделью, представленной на рис.5, выполнялись в режиме пуска дизель-генератора (D) до достижения напряжением звена постоянного тока номинального значения U_{dn} (рис.5, г) (момент времени 0-1 с) с последующим пуском асинхронного двигателя под номинальной нагрузкой M_n (рис.5, д) (момент времени 1-2 с) и дальнейшим ее увеличением до двойного номинального значения $1,5 M_n$ (момент времени 1-3 с). Коэффициент мощности K_m , вычисленный в процессе моделирования, представлен на рис.5, в. Видно, что при работе асинхронного двигателя при номинальной нагрузке (момент времени 1-2 с) коэффициент мощности системы генератор – неуправляемый выпрямитель составил 0,76, а при увеличении нагрузки до двойной номинальной (момент времени 2-3 с) – 0,68.

Кроме того, был произведен Фурье-анализ гармонического состава напряжения системы генератор – неуправляемый выпрямитель и вычислен коэффициент несинусоидальности, который составил 13,94 %.

Вторая модель (рис.6, а) была разработана на основе предложенной схемы модернизации электромеханической трансмиссии с использованием активного выпрямителя с векторной системой управления (V) с ориентацией по вектору напряжения.

Рис.6. Математическая модель модернизированной системы электропривода: а – структурная схема модели; б – структурная схема векторной системы управления активным выпрямителем; в – коэффициент мощности K_m системы генератор – активный выпрямитель; г – напряжение звена постоянного тока U_d ; д – электромагнитный момент тягового асинхронного двигателя M

Результаты моделирования модернизированной схемы в аналогичных режимах работы, использованных в первой модели, представлены на рис.6.

Заключение. Из приведенных результатов видно, что использование активного выпрямителя с векторной системой управления с ориентацией по вектору напряжения в составе электромеханической трансмиссии карьерного автосамосвала позволяет обеспечить коэффициент мощности системы генератор – активный выпрямитель близким к единице (0,95-0,99) во всех режимах работы асинхронного двигателя, с номинальной и двойной номинальной нагрузкой (момент времени 1, 2 с).

Анализ напряжений системы генератор – активный выпрямитель показал снижение коэффициента несинусоидальности до 8,4 %, что в свою очередь позволит увеличить срок службы синхронной машины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамович Б.Н. Оценка эффективности гибридных систем коррекции формы кривых тока и напряжения в электрических сетях с распределенной генерацией / Б.Н.Абрамович, Ю.А.Сычев, Р.Ю.Зимин // Промышленная энергетика. 2018. № 1. С. 45-54.
2. Аномальные режимы работы крупных синхронных машин / Е.Я.Казовский, Я.Б.Данилевич, Э.Г.Кашарский, Г.В.Рубисов. Л.: Наука, 1969. 429 с.
3. Емельянов А.П. Электропривод машин и оборудования / А.П.Емельянов, В.И.Вершинин, А.Е.Козярук; Санкт-Петербургский горный университет. СПб, 2017. 297 с. URL: <http://www.iprbookshop.ru/78137.html> (Дата обращения: 14.01.2019).
4. Козаченко В.Ф. Электротрансмиссия на базе вентильно-индукторного двигателя с независимым возбуждением / В.Ф.Козаченко, В.Н.Остриров, М.М.Лашкевич // Электротехника. 2014. № 2. С. 54-60.

5. Козярук А.Е. Энергоэффективные электромеханические комплексы горно-добывающих и транспортных машин // Записки Горного института. 2016. Т. 218. С. 261-269.
6. Мариев П.Л. «БелАЗ» и современные тенденции развития карьерного автотранспорта / П.Л.Мариев, К.Ю.Анистратов // Горная Промышленность. 2001. № 6. С. 29-32.
7. Обзор мировых производителей карьерных самосвалов. Тенденции развития // URL: <https://maxi-exkavator.ru/articles/trucks/~id=626> (Дата обращения: 25.02.2000).
8. Патент № 2653945 РФ. Энергоэффективный тяговый электропривод автономного транспортного средства / А.Е.Козярук, А.М.Камышнян. Оpubл. 19.05.2018. Бюл. № 14.
9. Пронин М.В. Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи (моделирование и расчет) / М.В.Пронин, А.Г.Воронцов. СПб: Электросила, 2003. 172 с.
10. Пронин М.В. Электромеханотронные комплексы и их моделирование по взаимосвязанным подсистемам / М.В.Пронин, А.Г.Воронцов. СПб: Ладога, 2017. 177 с.
11. Тяговое электрооборудование переменного тока карьерных самосвалов БелАЗ грузоподъемностью 90 и 240 т / А.Б.Виноградов, А.Н.Сибирцев, В.Л.Чистосердов, Н.Е.Гнездов, А.А.Коротков // Сборник материалов III Всероссийской научно-практической конференции «Энергетика и энергосбережение: теория и практика» / КузГТУ. Кемерово, 2017. С. 303-309.
12. Ясюченя С.В. О повышении операционной эффективности открытых горных работ в компании ОАО «СУЭК» // Горная промышленность. 2013. № 6. С. 23-28.
13. Aspalli M.S. Three phase induction motor drive using IGBTs and constant V/F method / M.S.Aspalli, R. Asha, P.V. Hunagund // International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. 2012. Vol. 1. P. 463-469.
14. Design of unity power factor controller for three-phase induction motor drive fed from single phase supply / G.Rachana, M.Priya, K.Parmod, G.Rohit // Journal of Automation and Control Engineering. 2014. Vol 2. № 3. P. 221-227.

Авторы: **А.Е.Козярук**, д-р техн. наук, профессор, kozjaruk@mail.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), **А.М.Камышнян**, аспирант, dvorff@ya.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Статья поступила в редакцию 15.01.2019.

Статья принята к публикации 26.05.2019.