

УДК 621.313.2: 621.7.08

ПОВЫШЕНИЕ КОММУТАЦИОННОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ЭДП-800 КАРЬЕРНЫХ САМОСВАЛОВ

Харламов Виктор Васильевич¹,
emoe@omgups.ru

Чупрына Евгений Юрьевич²,
chuprina@ssep.ru

Сергеев Роман Владимирович¹,
emoe@omgups.ru

Шкодун Павел Константинович¹,
emoe@omgups.ru

Попов Денис Игоревич¹,
emoe@omgups.ru

Москалев Юрий Владимирович¹,
emoe@omgups.ru

¹ Омский государственный университет путей сообщения,
Россия, 644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

² ООО «СибЭлектроПривод»,
Россия, 630088, г. Новосибирск, ул. Петухова, 69.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью обеспечения бесперебойной добычи угля открытым способом при работе на угольном карьере. Как свидетельствуют результаты проведенного анализа статистики отказов тяговых электродвигателей ЭДП-800 карьерных самосвалов БелАЗ, основная часть данных отказов непосредственно связана с неудовлетворительным состоянием коммутации. Таким образом, повышение коммутационной устойчивости тяговых электродвигателей ЭДП-800 является неотъемлемой частью задачи повышения надежности карьерных самосвалов БелАЗ и, следовательно, всего процесса добычи угля, обеспечиваемой самосвалами данного типа.

Цель исследования: разработка методики настройки коммутации тяговых двигателей карьерных самосвалов, позволяющей повысить их коммутационную устойчивость и снизить износ элементов коллекторно-щеточного узла.

Объект исследования – тяговый электродвигатель ЭДП-800 карьерных самосвалов БелАЗ.

Методы анализ статистики отказов, математический анализ данных бортовой системы мониторинга самосвала, экспериментальные исследования процесса коммутации тяговых электродвигателей, синтез методики настройки коммутации.

Результаты. Анализ данных по эксплуатации тяговых электродвигателей ЭДП-800 карьерных самосвалов БелАЗ выявил высокий процент отказов, связанных с неудовлетворительным состоянием коммутации, обусловивший высокую интенсивность выхода из строя элементов коллекторно-щеточного узла и, в первую очередь, электрических щеток. Анализ данных бортовой системы мониторинга самосвалов и выполненные на испытательной станции экспериментальные исследования позволили дать рекомендации по повышению коммутационной устойчивости тяговых электродвигателей ЭДП-800 карьерных самосвалов и разработать методику настройки коммутации данных электродвигателей с учетом параметров эксплуатации, позволяющую добиться удовлетворительной настройки коммутации, исходя из критерия минимизации износа электрических щеток.

Ключевые слова:

Карьерный самосвал, тяговый двигатель, коммутационная устойчивость, методика настройки, износ щеток, режимы работы, коммутационные испытания.

Введение

Обеспечение бесперебойной добычи угля открытым способом при работе на угольном карьере требует наличия высоких показателей надежности применяемых для данной цели тяговых электродвигателей постоянного тока. Тяговые электродвигатели ЭДП-800 используются в качестве привода ведущих колес карьерных автосамосвалов БелАЗ. Данные двигатели работают в двигательном и в генераторном режиме (в режиме электрического торможения на тормозные резисторы) и являются реверсивными [1]. Электродвигатель ЭДП-800 имеет

следующие номинальные параметры: $P_{ном} = 800$ кВт; $U_{ном} = 850$ В; $I_{д.ном} = 1023$ А; $n_{ном}/n_{max} = 570/2000$ об/мин; $M_{ном}/M_{max} = 13,4/26,8$ кН·м; $\eta_{ном} = 92$ %.

Тяжелые условия эксплуатации таких двигателей обуславливают проблемы с состоянием коммутации и как следствие вызывают повышенный износ поверхности коллектора и электрических щеток. Эксплуатация показывает значительное снижение ресурса щеток по сравнению с существующими требованиями, а также неудовлетворительное состояние коммутации, которое приводит к почернению и повышенному износу каждой четвер-

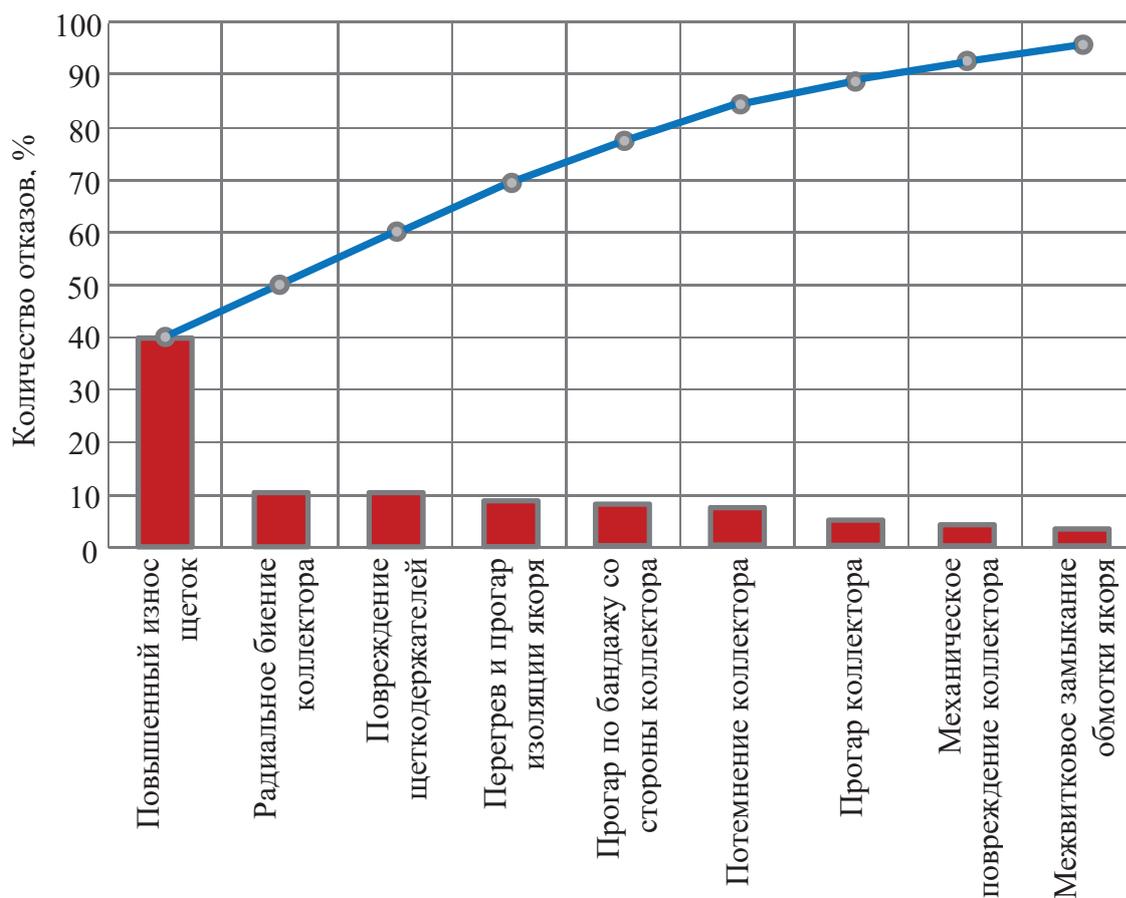


Рис. 1. Диаграмма Парето постепенных и внезапных отказов тяговых электродвигателей ЭДП-800

Fig. 1. Pareto chart of the gradual and sudden failures of traction motors EDP-800

той коллекторной пластины (эффект «зебры») [2–6].

Анализ данных по отказам тяговых электродвигателей ЭДП-800

По данным ряда эксплуатирующих организаций процентное соотношение отказов по причинам за период с 2012 по 2016 гг. приведено на рис. 1.

Анализ данных по отказам тяговых электродвигателей ЭДП-800 (рис. 1) позволяет сделать вывод о том, что причины 80 % отказов (повышенный износ щеток, радиальное биение коллектора, превышающее норму, повреждение щеткодержателей, перегрев или прогар изоляции якоря, а также прогар по бандажу со стороны коллектора) связаны с неудовлетворительной коммутацией [2–4, 7–10].

Обработка и анализ данных бортовой системы мониторинга

Для выяснения причин неудовлетворительного состояния коммутации выполнен анализ режимов работы тяговых электродвигателей ЭДП-800 в условиях эксплуатации по данным, полученным из системы мониторинга самосвала БелАЗ.

На рис. 2 приведены временные диаграммы напряжения мотор-колеса, тока силовой цепи (красная линия), тока возбуждения (синяя линия) и частоты вращения якоря, в различных режимах работы электрической машины: полное возбуждение (ПВ), ослабление возбуждения (ОВ), динамическое торможение (ДТ).

На рис. 3 приведена часть схемы управления тяговыми электродвигателями ЭДП-800, для плавного регулирования тока возбуждения в схеме использованы тиристоры. Установленная система мониторинга позволяет фиксировать ток якоря (силовой цепи), протекающий по шунту $RS1$, и ток, протекающий по шунту $RS2$, в цепи ослабления возбуждения, подключаемой параллельно цепи возбуждения. Для анализа режимов работы машины был определен ток возбуждения путем вычитания из тока якорной цепи тока цепи ослабления возбуждения.

Коэффициент пульсации тока определен как отношение наибольшего значения переменной составляющей пульсирующего тока к его среднему значению [1]:

$$k_{\text{п}} = \frac{I_{\text{пуль}}}{I_{\text{ср}}},$$

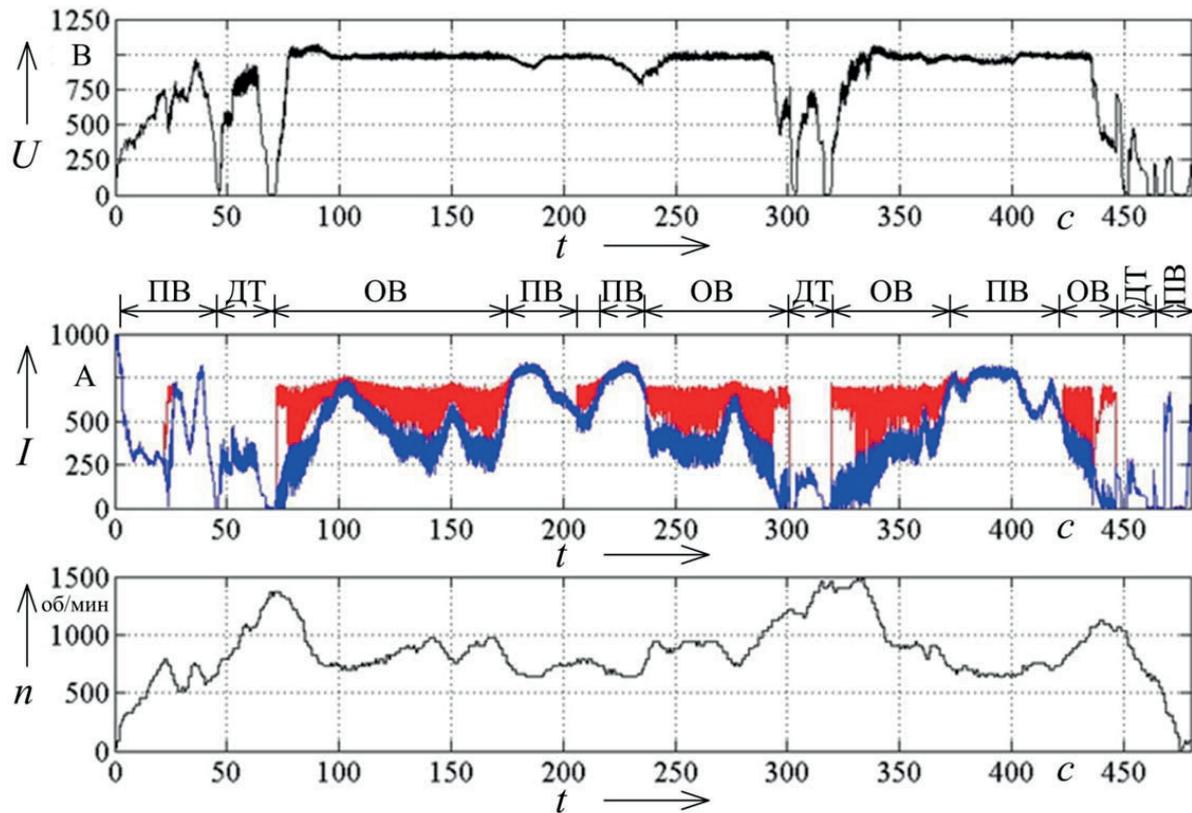


Рис. 2. Временные диаграммы режимов работы тягового электродвигателя: U – напряжение мотор-колеса; I – ток силовой цепи и ток возбуждения; n – частота вращения якоря

Fig. 2. Timing diagram of the operation modes of the electric traction motor: U is the voltage of the motor-wheel; I is the current of the power circuit and the excitation current; n is the rotation frequency of the anchor

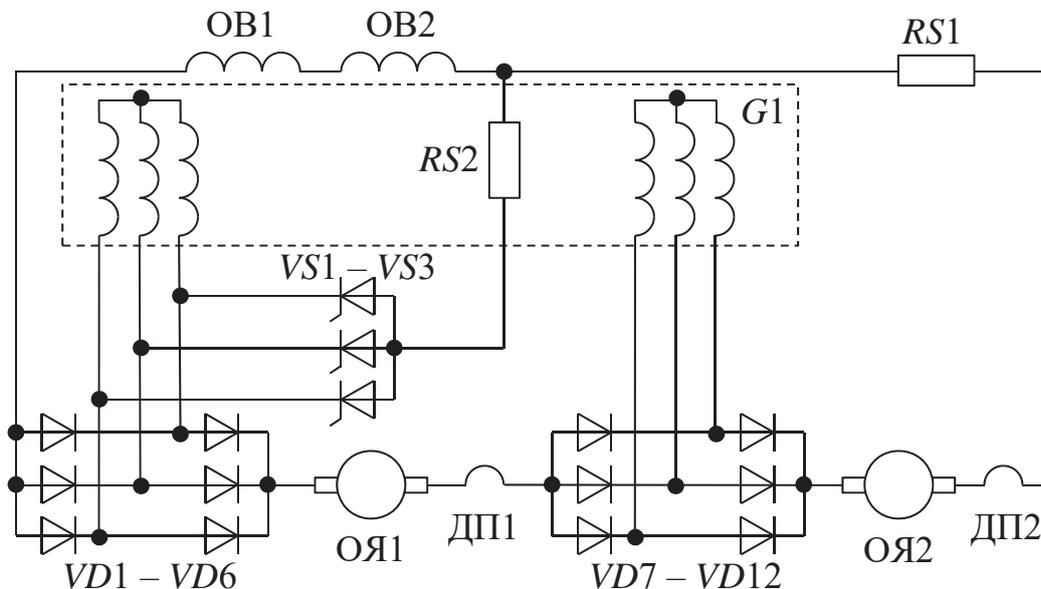


Рис. 3. Часть схемы автоматического плавного регулирования тока возбуждения тяговых электродвигателей ЭДП-800

Fig. 3. Part of the circuit of automatic smooth regulation of the excitation current of the traction motors EDP-800

где $I_{\text{пул}}$ – наибольшее значение переменной составляющей пульсирующего тока, А; I_{cp} – среднее значение тока якоря, А:

$$I_{\text{cp}} = \frac{\sum_{i=1}^N I_i}{N},$$

где N – количество измеренных значений тока за 0,1 с ($N=10$).

По данным системы мониторинга значение тока силовой цепи и тока цепи ослабления поля фиксировались 100 раз в секунду. Расчет коэффициента пульсации тока был выполнен для интервала времени 0,1 с, т. е. было определено среднее значение по данным десяти измерений I_{cp} , наибольшее значение переменной составляющей пульсирующего тока было рассчитано по выражению [1]:

$$I_{\text{пул}} = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{2},$$

где I_{max} – максимальное значение тока на рассматриваемом интервале времени, А; I_{min} – минимальное значение тока на рассматриваемом интервале времени, А.

Тяговый электродвигатель ЭДП-800 карьерного самосвала БелАЗ работает в режиме двигателя с полным возбуждением и ослаблением поля, которое реализуется с использованием тиристорного преобразователя, шунтирующего обмотку возбуждения, а также в режиме электрического торможения. Следовательно, для установления причин неудовлетворительной коммутации необходимо анализировать работу тягового двигателя с учетом всех режимов работы. На круговой диаграмме (рис. 4) приведено процентное соотношение длительности режимов работы тягового электродвигателя ЭДП-800 по данным системы мониторинга самосвала БелАЗ.

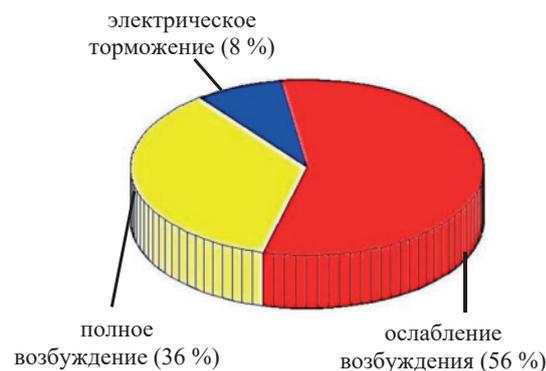


Рис. 4. Круговая диаграмма режимов работы тягового электродвигателя

Fig. 4. Pie chart of operation modes of traction motor

В результате анализа данных системы мониторинга (рис. 4) установлено, что тяговый электродвигатель ЭДП-800 36 % времени в рассматриваемом интервале работает с полным возбуждением, 56 % – с ослаблением возбуждения, 8 % – в режиме динамического торможения.

Изменение коэффициента пульсации тока силовой цепи и тока возбуждения во времени приведено на рис. 5, 6 соответственно. Необходимо отметить, что из-за особенности схемы подключения датчиков тока системы мониторинга (рис. 3) ток возбуждения в режиме динамического торможения (рис. 6) не фиксировался.

График изменения тока силовой цепи при полном возбуждении приведен на рис. 2, пусковой ток ТЭД составил 987 А, частота вращения якоря в среднем равна 676 об/мин, в короткие интервалы времени (10–20 с) достигала 1300–1400 об/мин. Напряжение якоря находилось в диапазоне от 900 до 1000 В. В этом режиме коэффициент пульсации тока якоря и тока возбуждения изменялся в диапазоне 0,05–0,4 (рис. 5, 6), превышая этот диапазон кратковременно при переходе в режим ослабления поля или электрического торможения (до 0,8).

При ослаблении возбуждения ток силовой цепи изменялся от 200 до 780 А, ток возбуждения изменялся от 10 до 780 А, частота вращения якоря в среднем составила 932 об/мин, в короткие интервалы времени (10–20 с) достигала 1500 об/мин. Напряжение якоря находилось в диапазоне от 950 до 1000 В. В этом режиме коэффициент ослабления поля в среднем составил 0,75.

При ослаблении поля имеют место значительные пульсации тока возбуждения (рис. 6), значение коэффициента пульсации изменяется в диапазоне 0,3–1,0 (на некоторых кратковременных интервалах времени даже превышая значение 1,0), что является причиной пульсации основного магнитного потока и поля реакции якоря и оказывает негативное влияние на процесс коммутации [3, 11, 12].

Причиной значительных пульсаций тока возбуждения при ослаблении поля является способ его реализации. Силовая часть схемы автоматического плавного регулирования тока возбуждения (рис. 3) представляет собой трехфазный нулевой управляемый выпрямитель на тиристорах VS1–VS3, образуя при включении тиристоров цепь, шунтирующую обмотки возбуждения OB1 и OB2 двигателей с обмотками якоря OЯ1 и OЯ2 соответственно. Силовая цепь двигателей питается от двух трехфазных мостовых схем выпрямления (VD1–VD6 и VD7–VD12), подключенных к обмоткам статора тягового генератора G1. Относительная продолжительность включенного состояния тиристоров определяет соотношение между значениями тока возбуждения ТЭД и тока якоря, т. е. коэффициент регулирования возбуждения. Изменение этого коэффициента производится посредством регулирования угла управления тиристоров.

В режиме динамического торможения ток силовой цепи изменялся от 60 до 410 А. Частота вращения якоря изменялась в диапазоне от 1350 до 670 об/мин. Напряжение якоря находилось в диапазоне от 10 до 920 В.

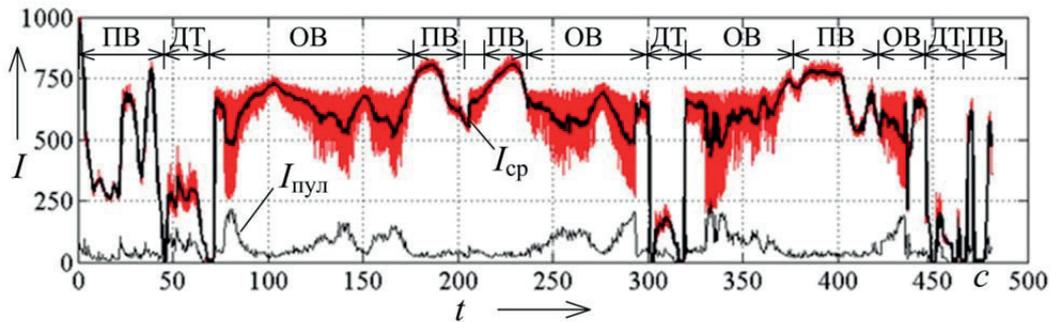
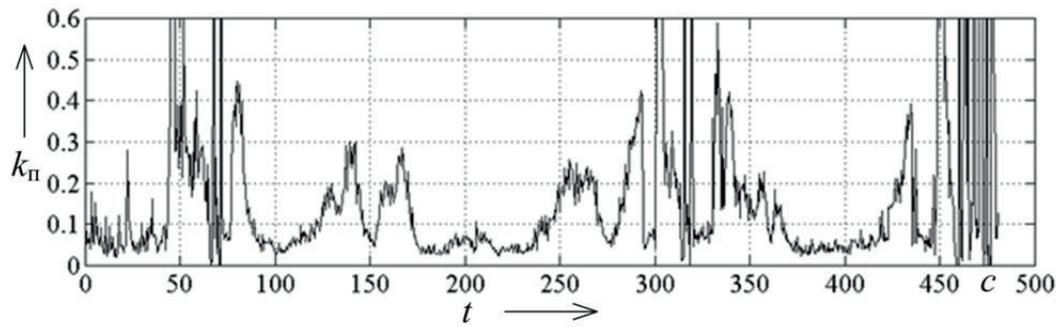


Рис. 5. Временные диаграммы электродвигателя: коэффициент пульсации тока силовой цепи; среднее значение тока силовой цепи ($I_{ср}$) и наибольшее значение переменной составляющей тока силовой цепи ($I_{пульс}$)

Fig. 5. Timing diagrams of the motor: factor of ripple of power circuit's current; average current of the power circuits ($I_{ср}$) and the highest value of the variable component of the power circuit's current ($I_{пульс}$)

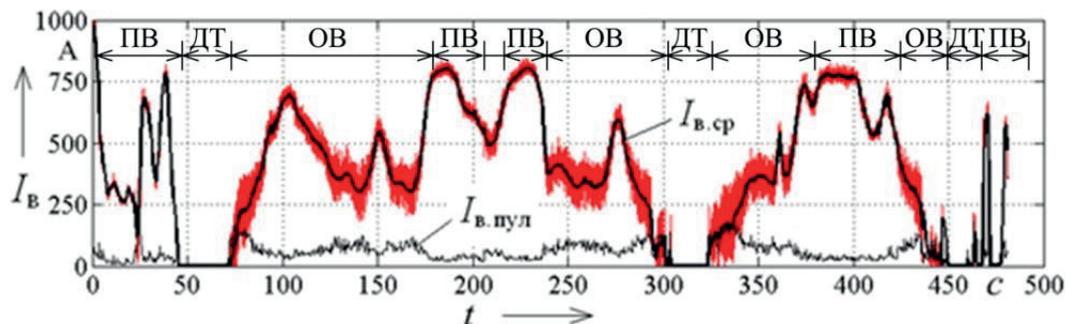
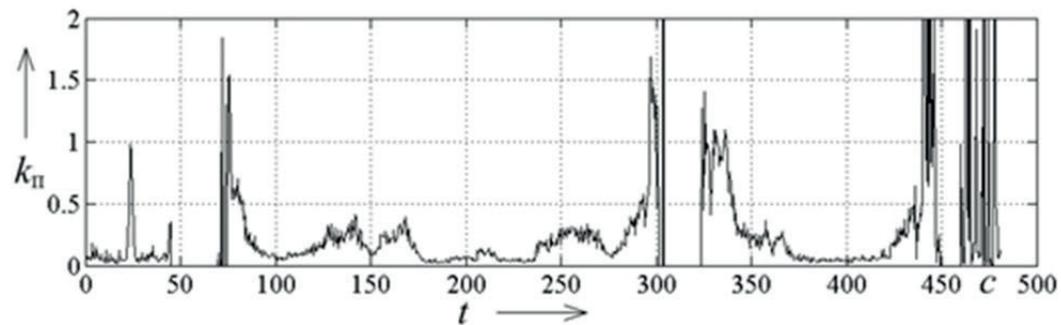


Рис. 6. Временные диаграммы электродвигателя: коэффициент пульсации тока возбуждения ($I_{в.ср}$) и наибольшее значение переменной составляющей тока возбуждения ($I_{в.пульс}$)

Fig. 6. Timing diagrams of the motor: the ripple factor of the excitation current; the mean value of the excitation current ($I_{в.ср}$) and the highest value of the variable component of excitation current ($I_{в.пульс}$)

Экспериментальные исследования процесса коммутации тяговых двигателей ЭДП-800

С целью выявления возможных причин неудовлетворительной коммутации на испытательной станции проведены коммутационные испытания тяговых электродвигателей ЭДП-800. Испытания проводились в стационарном режиме методом взаимной нагрузки с подпиткой/отпиткой добавочных полюсов [3, 5]. В качестве линейного генератора и вольтодобавочной машины использовались генераторы постоянного тока, что обуславливает низкий уровень пульсаций тока в обмотках испытуемых электродвигателей («гладкое» питание). Регистрация параметров искрения щеток и состояния поверхности коллектора тяговых двигателей осуществлялась приборами ПКЖ-5М и ПКП-4М, разработанными в ОмГУПСе.

Характерный пример полученных в результате испытаний безыскровых зон для различных режимов работы (полное и ослабленное возбуждение) приведен на рис. 7, 8.

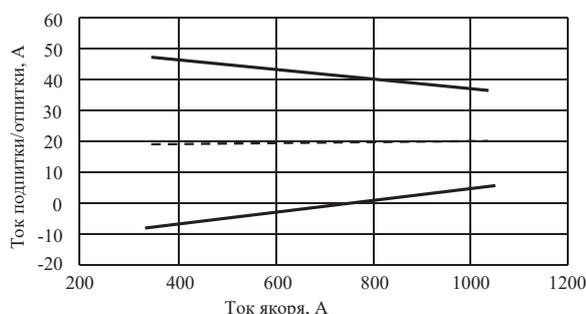


Рис. 7. Безыскровые зоны в режиме полного поля

Fig. 7. Non-sparking zone in full-field mode

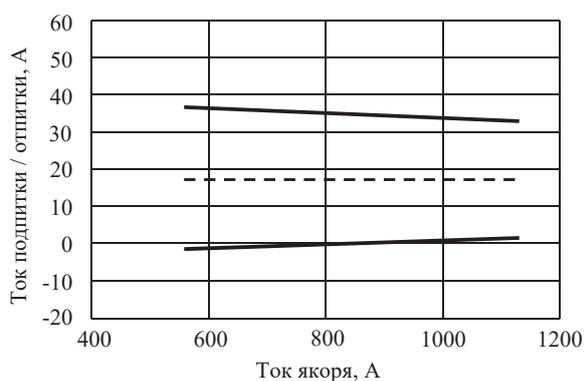


Рис. 8. Безыскровые зоны в режиме ослабленного поля

Fig. 8. Non-sparking zone in the weakened field mode

Как показывают результаты экспериментальных исследований, зона безыскровой работы испытуемых электродвигателей в режиме полного возбуждения смещена вверх, что свидетельствует о недокоммутации ТЭД, вызванной насыщением магнитной цепи добавочных полюсов (ДП).

При ослаблении поля зона безыскровой работы испытуемых электродвигателей смещается вниз, в связи с тем, что степень насыщения магнитной це-

пи добавочных полюсов уменьшается, и они в большей степени обеспечивают усиление коммутационной ЭДС с ростом реактивной ЭДС.

Как показал анализ результатов экспериментальных исследований тяговые электродвигатели ЭДП-800 имеют достаточно широкую зону безыскровой работы при «гладком» питании электродвигателя. Однако такие условия не соответствуют реальным условиям эксплуатации двигателя, работающего большую часть времени в переходных нестационарных режимах с пульсирующими токами якоря и возбуждения.

Как известно, на коммутацию в коллекторно-щеточном узле машины постоянного тока оказывают влияние в различной степени множество факторов: вибрация, климатические факторы, режимы работы машины, работа системы управления [3, 4]. В процессе анализа работы системы управления и стендовых испытаний было установлено, что из-за особенностей работы системы управления и режимов работы машины на процесс коммутации значительное влияние оказывают два фактора:

- 1) насыщение магнитной цепи, по которой замыкается поток ДП, при больших значениях тока возбуждения приводит к сложности настройки безыскровых зон для различных режимов работы электродвигателей, особенно соответствующих различной степени ослабления возбуждения (при полном возбуждении зона безыскровой работы «лежит» выше, чем при ослабленном);
- 2) при ослаблении возбуждения в машине наблюдается усиление пульсаций, как тока возбуждения, так и тока якоря, что приводит к значительному усилению вихревых токов в массивных элементах магнитопровода и, как следствие, к сдвигу фазы переменной составляющей потока ДП (которая оказывается не в противофазе к потоку реакции якоря), что, в свою очередь, ухудшает коммутационную устойчивость электродвигателей.

Рекомендации по повышению коммутационной устойчивости тяговых электродвигателей ЭДП-800 карьерных самосвалов БелАЗ

Для повышения коммутационной устойчивости электродвигателей данного типа предлагаются следующие мероприятия:

- проведение коммутационных испытаний с ослаблением возбуждения по схеме, реализующей пульсирующий характер ослабления возбуждения, аналогично схеме, применяемой на карьерных самосвалах;
- совершенствование методики настройки коммутации, которая должна учитывать значимость (относительную продолжительность работы) в условиях эксплуатации различных режимов (полное поле, ослабление поля, тормозной режим) и пульсирующее ослабление возбуждения. Необходимая величина корректировки МДС ДП и соответствующая ей толщина

немагнитных прокладок должна рассчитываться с учетом относительной продолжительности работы в этих режимах [13–19].

Методика настройки коммутации тяговых электродвигателей ЭДП-800 карьерных самосвалов БелАЗ

Для электродвигателей типа ЭДП-800 предлагается следующая методика настройки коммутации, позволяющая минимизировать износ электрических щеток, которую условно можно разделить на три этапа.

Первый этап методики состоит в проведении коммутационных испытаний на тяговом электродвигателе и определении зависимостей интенсивности искрения щеток от магнитодвижущей силы (МДС), определяемой током подпитки/отпитки, добавочных полюсов в различных режимах работы, соответствующих реальной эксплуатации: $W_{н1}(F)$, $W_{н2}(F)$, ..., $W_{нN}(F)$.

При этом должна быть заранее установлена зависимость МДС добавочных полюсов от толщины немагнитных прокладок $F(\delta_{дп})$ [3, 4].

На втором этапе формируется целевая функция износа электрических щеток [20], который обусловлен фрикционной, электрокоррозионной и электроэрозионной составляющей и зависит от параметров режима работы двигателя, в следующем виде:

$$\Delta И(F) = (nP_{ср.щ})K_{\phi} + (n^4 I^2 P_{ср.щ}^2)K_{экр} + nW_{н1}(F)K_{эп}\Delta t_1^* + nW_{н2}(F)K_{эп}\Delta t_2^* + \dots + nW_{нN}(F)K_{эп}\Delta t_N^*,$$

где Δt_1^* , Δt_2^* , Δt_N^* – относительные продолжительности работы в различных режимах; n – частота вращения якоря двигателя, об/мин; $P_{ср.щ}$ – средняя величина давления на щетку; I – ток, протекающий по щетке, А; K_{ϕ} – коэффициент фрикционного износа; $K_{экр}$ – коэффициент электрокоррозионного из-

носа; $K_{эп}$ – коэффициент электроэрозионного износа.

И далее решается оптимизационная задача [21, 22] по нахождению $F_{опт}$, соответствующего глобальному минимуму функции износа:

$$\Delta И(F) \rightarrow \min.$$

Решением оптимизационной задачи является значение $F_{опт}$, соответствующее минимальному значению износа.

Ввиду того, что средняя величина давления на щетку $P_{ср.щ}$ определяется по известным методикам и рекомендациям, сила тока I и частота вращения n являются параметрами режима работы, а функцией искрения является только электроэрозионная составляющая износа, целевая функция поставленной оптимизационной задачи может быть упрощена до следующего вида:

$$\Delta \dot{E}(F) = W_{н1}(F)\Delta t_1^* + W_{н2}(F)\Delta t_2^* + \dots + W_{нN}(F)\Delta t_N^*.$$

На третьем этапе по полученной зависимости $F(\delta_{дп})$ и найденному решению оптимизационной задачи $F_{опт}$ определяется необходимая толщина немагнитных прокладок $\delta_{дп\text{ опт}}$, которой соответствует минимальный износ щеток.

Заключение

В результате проведенного анализа данных по эксплуатации тяговых электродвигателей ЭДП-800 карьерных самосвалов БелАЗ выявлен высокий процент отказов, связанных с неудовлетворительным состоянием коммутации.

Осуществленный анализ данных бортовой системы мониторинга самосвала БелАЗ и выполненные экспериментальные исследования позволили предложить методику настройки коммутации тяговых электродвигателей ЭДП-800 с учетом параметров эксплуатации, позволяющую добиться оптимальной настройки коммутации, исходя из критерия минимизации износа щеток.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 2582–81. Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 37 с.
2. Гемке Р.Г. Неисправности электрических машин. – Л.: Энергия, 1975. – 296 с.
3. Авилов В.Д. Методы анализа и настройки коммутации машин постоянного тока: монография. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 237 с.
4. Авилов В.Д. Оптимизация коммутационного процесса в коллекторных электрических машинах постоянного тока: монография. – Омск: Омский гос. у-нт путей сообщения, 2013. – 356 с.
5. Харламов В.В. Методы и средства диагностирования технического состояния коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей и других коллекторных машин постоянного тока: монография. – Омск: Омский гос. у-нт путей сообщения, 2002. – 233 с.
6. Hughes A., Drury B. Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications. – Burlington: Newnes, 2013. – 440 p.
7. Вольдек А.И. Электрические машины. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.
8. Binder A. Elektrische Maschinen und Antriebe: Grundlagen, Betriebsverhalten. – Berlin: Springer, 2012. – 1249 p.
9. Kothari D., Nagrath I. Electric Machines. 4th ed. – New Delhi: Tata McGraw Hill Education, 2010. – 778 p.
10. Veltman A., Pulle D., De Doncker R. Direct Current Machine // Fundamentals of Electrical Drives, Power Systems. – Cham: Springer, 2016. – 341 p.
11. Drubel O. Converter Applications and their Influence on Large Electrical Machines. – Berlin: Springer, 2013. – 190 p.
12. Chiasson J. Modeling and High Performance Control of Electric Machines. – New York: John Wiley & Sons, Inc., 2005. – 709 p.
13. Курбасов А.С., Седов В.И., Сорин Л.Н. Проектирование тяговых электродвигателей. – М.: Транспорт, 1987. – 536 с.
14. Проектирование тяговых электрических машин / М.Д. Находкин, Г.В. Василенко, В.И. Бочаров, М.А. Козорезов. – М.: Транспорт, 1976. – 624 с.
15. Проектирование электрических машин / И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев. – М.: Высшая школа, 2002. – 757 с.

16. Tong W. Mechanical Design of Electric Motors. – London, New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2014. – 702 p.
17. Pyrhonen J., Jokinen T., Hrabovcova V. Design of Rotating Electrical Machines. 2nd ed. – Chichester: John Wiley & Sons, Ltd., 2014. – 584 p.
18. Mukerji S.K., Khan A.S. Electromagnetics for Electrical Machines. – London, New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015. – 421 p.
19. Gerling D. Electrical Machines: Mathematical Fundamentals of Machine Topologies. –Berlin: Springer, 2015. – 472 p.
20. Харламов В.В., Попов Д.И., Байсадыков М.Ф. Алгоритм прогнозирования ресурса работы электрических щеток тяговых электродвигателей // Известия Транссиба. – 2017. – № 1 (29). – С. 47–56.
21. Кочегурова Е.А. Теория и методы оптимизации. – М.: Изд-во «Юрайт», 2017. – 133 с.
22. Сухарев А.Г., Тимохов А.В., Федоров В.В. Методы оптимизации: учебник и практикум для бакалавриата и магистратуры. 3-е изд., испр. и доп. – М.: Изд-во «Юрайт», 2017. – 367 с.

Поступила 22.01.2018 г.

Информация об авторах

Харламов В.В., доктор технических наук, профессор кафедры электрических машин и общей электротехники Омского государственного университета путей сообщения.

Чупрына Е.Ю., технический директор ООО «СибЭлектроПривод».

Сергеев Р.В., кандидат технических наук, доцент кафедры электрических машин и общей электротехники Омского государственного университета путей сообщения.

Шкодун П.К., кандидат технических наук, доцент кафедры электрических машин и общей электротехники Омского государственного университета путей сообщения.

Попов Д.И., кандидат технических наук, доцент кафедры электрических машин и общей электротехники Омского государственного университета путей сообщения.

Москалев Ю.В., кандидат технических наук, доцент кафедры электрических машин и общей электротехники Омского государственного университета путей сообщения.

UDC 621.313.2: 621.7.08

ENHANCEMENT OF COMMUTATION STABILITY OF TRACTION MOTORS EDP-800 TRUCKS**Victor V. Kharlamov¹,**
emoe@omgups.ru**Evgeny Yu. Chupryna²,**
chuprina@ssep.ru**Roman V. Sergeev¹,**
emoe@omgups.ru**Pavel K. Shkodun¹,**
emoe@omgups.ru**Denis I. Popov¹,**
emoe@omgups.ru**Yuriy V. Moskalev¹,**
emoe@omgups.ru¹ Omsk State Transport University,
35, Marx avenue, Omsk, 644046, Russia.² SibElectroPrivod,
69, Petukhov street, Novosibirsk, 630088, Russia.

The relevance of the research is caused by the necessity of ensuring the uninterrupted extraction of coal by opencast methods when working in the coal mine. As the results of the analysis of the statistics of failures of traction motors EDP-800 BelAZ dump trucks, the main part of these failures is directly related to the unsatisfactory state of commutation. Thus, increasing the commutation stability of traction motors EDP-800 is an integral part of the task of improving the reliability of BelAZ dump trucks and, consequently, the entire process of coal mining provided by this type of dump trucks.

The main aim of the research is to develop the technique for setting up the commutation of traction engines of dump trucks, which allows increasing their switching stability and reducing wear of the elements of the collector-brush unit.

The object of study is the traction electric motor EDP-800 dump trucks BelAZ.

Methods: methods failure statistics analysis, mathematical analysis of the data of the on-Board truck monitoring system, experimental studies of commutation of traction motors, synthesis of the method for setting up the commutation.

Results. Analysis of data on operation of traction motors EDP-800 BelAZ mining trucks revealed a high percentage of failures associated with poor commutation, which caused a high intensity of failure of the elements of the collector-brush unit and, first of all, electric brushes. The analysis of the data of the on-Board monitoring system of dump trucks and the experimental studies carried out at the test station made it possible to give recommendations for improving the switching stability of the traction motors of the EDP-800 pit dump trucks and to develop a method of configuring the commutation of these motors taking into account the operating parameters, which allows achieving a satisfactory commutation state, based on the criterion of minimizing the wear of electric brushes.

Key words:

Dump truck, traction motor, commutation stability, commutation correction method, brush wear, operating mode, commutation tests.

REFERENCES

1. GOST 2582–81. *Mashiny elektricheskoye vrashchayushchiesya tyagovoye. Obshchie tekhnicheskoye usloviya* [State Standard 2582–81. Rotating electrical machines for rail and road vehicles. General specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 1981. 37 p. TOCT
2. Gemke R.G. *Neispravnosti elektricheskikh mashin* [Malfunction of electric machines]. Leningrad, Energiya Publ., 1975. 296 p.
3. Avilov V.D. *Metody analiza i nastroyki kommutatsii mashin postoyannogo toka* [Methods of analysis and setting of commutation of DC machines]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1995. 237 p.
4. Avilov V.D. *Optimizatsiya kommutatsionnogo protsessa v kollektornykh elektricheskikh mashinakh postoyannogo toka* [Optimization of switching process in collector electrical machines DC]. Omsk, OmGUPS Publ., 2013. 356 p.
5. Kharlamov V.V. *Metody i sredstva diagnostirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya kollektorno-shchetchnogo uzla tyagovoykh elektrodvigateley i drugikh kollektornykh mashin postoyannogo toka* [Methods and means of diagnosing the technical condition of collector brush knot of traction electric motors and other collector machines DC]. Omsk, OmGUPS Publ., 2002. 233 p.
6. Hughes A., Drury B. *Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications*. Burlington, Newnes, 2013. 440 p.
7. Voldek A. I. *Elektricheskoye mashiny* [Electrical machines]. Leningrad, Energiya Publ., 1978. 832 p.
8. Binder A. *Elektrische Maschinen und Antriebe: Grundlagen, Betriebsverhalten* [Electrical machines and drives: basics, characteristics]. Berlin, Springer, 2012. 1249 p. In Ger.
9. Kothari D., Nagrath I. *Electric Machines*. 4th ed. New Delhi, Tata McGraw Hill Education, 2010. 778 p.
10. Veltman A., Pulle D., De Doncker R. *Direct Current Machines. Fundamentals of Electrical Drives, Power Systems*. Cham, Springer, 2016. 341 p.

11. Drubel O. *Converter Applications and their Influence on Large Electrical Machines*. Berlin, Springer, 2013. 190 p.
12. Chiasson J. *Modeling and High Performance Control of Electric Machines*. New York, John Wiley & Sons, Inc., 2005. 709 p.
13. Kurbasov A.S., Sedov V.I., Sorin L.N. *Proektirovanie tiagovykh elektrodvigatelye* [Design of traction motors]. Moscow, Transport Publ., 1987. 536 p.
14. Nakhodkin M.D., Vasilenko G.V., Bocharov V.I., Kozorezov M.A. *Proektirovanie tiagovykh elektricheskikh mashin* [Design of traction electric machines]. Moscow, Transport Publ., 1976. 624 p.
15. Kopylov I.P., Klokov B.K., Morozkin V.P., Tokarev B.F. *Proektirovanie elektricheskikh mashin* [The design of electrical machines]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2002. 757 p.
16. Tong W. *Mechanical Design of Electric Motors*. London, New York, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2014. 702 p.
17. Pyrhonen J., Jokinen T., Hrabovcova V. *Design of Rotating Electrical Machines*. 2nd ed. Chichester, John Wiley & Sons, Ltd., 2014. 584 p.
18. Mukerji S.K., Khan A.S. *Electromagnetics for Electrical Machines*. London, New York, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015. 421 p.
19. Gerling D. *Electrical Machines: Mathematical Fundamentals of Machine Topologies*. Berlin, Springer, 2015. 472 p.
20. Kharlamov V.V., Popov D.I., Baisadykov M.F. The algorithm of forecasting of resource of electric brushes traction motors. *Izvestiia Transsiba*, 2017, no. 1 (29), pp. 47–56. In Rus.
21. Kochegurova E.A. *Teoriya i metody optimizatsii* [Theory and methods of optimization]. Moscow, Urayt Publ., 2017. 133 p.
22. Sukharev A.G., Timokhov A.V., Fedorov V.V. *Metody optimizatsii* [Methods of optimization]. Moscow, Urayt Publ., 2017. 367 p.

Received: 22 January 2018.

Information about the authors

Victor V. Kharlamov, Dr. Sc., professor, Omsk State Transport University.

Evgeny Yu. Chupryna, technical director, SibElectroPrivod.

Roman V. Sergeev, Cand. Sc., senior lecturer, Omsk State Transport University.

Pavel K. Shkodun, Cand. Sc., senior lecturer, Omsk State Transport University.

Denis I. Popov, Cand. Sc., senior lecturer, Omsk State Transport University.

Yuriy V. Moskalev, Cand. Sc., senior lecturer, Omsk State Transport University.