

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОПУСТИМЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТЯГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА КАРЬЕРНОГО САМОСВАЛА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНОЙ КОММУТАЦИИ

В статье рассмотрен подход к определению допустимых диапазонов изменения напряжения якоря, тока якоря и коэффициента ослабления возбуждения тягового двигателя постоянного тока карьерного самосвала для обеспечения удовлетворительной коммутации. При работе двигателя в заданных режимах вероятность появления искрения в коллекторно-щеточном узле со степенью 2 балла будет минимальна. Предложена методика определения допустимых режимов работы тягового двигателя карьерного самосвала для обеспечения удовлетворительной коммутации; методика позволяет на основании анализа экспериментальных данных определить допустимые диапазоны изменения напряжения, тока якоря и коэффициента ослабления возбуждения, при которых степень искрения не превышает 1½ балла.

**Ключевые слова:** тяговый электродвигатель, коллекторно-щеточный узел, режим работы, коммутация, степень искрения.

Электромеханическая трансмиссия карьерного самосвала с тяговым электродвигателем позволяет выбрать оптимальный тягово-скоростной режим его работы [1]. В качестве тяговых двигателей карьерных самосвалов «БЕЛАЗ» в настоящее время используют как асинхронные и вентильно-индукторные машины, так и тяговые двигатели постоянного тока (ТЭДПТ).

Как известно, ТЭДПТ находят применение на различных транспортных средствах [2–4]. В связи с этим хорошо известны недостатки таких машин, одним из которых является необходимость в обеспечении удовлетворительной коммутации [5–13].

В условиях эксплуатации нужно непрерывно изменять режимы работы ТЭДПТ для обеспечения необходимой скорости движения и силы тяги, при работе ТЭДПТ карьерных самосвалов в некоторых режимах имеет место появление неудовлетворительной коммутации КЩУ [14].

Для оценки коммутации ТЭДПТ в эксплуатации на карьерном самосвале был установлен автоматизированный видеоизмерительный комплекс [15], с использованием которого получены необходимые данные для анализа и моделирования работы ТЭДПТ с учетом искрения в коллекторно-щеточном узле (КЩУ) [16].

Во время эксплуатации карьерного самосвала в угольном разрезе тяговые машины работают в двигательном режиме с полным возбуждением и ослаблением поля, в режиме динамического торможения. Анализ данных, полученных с помощью видеоизмерительного комплекса, показал, что в двигательном режиме с ослаблением поля являются условия, приводящие к возникновению неудовлетворительной коммутации, в остальных же режимах преобладает «темная коммутация».

Степень искрения ТЭДПТ определялась через величину «процента засветки»  $P_z$  (процент площади белых пикселей от общей площади, контролируемой видеокамерой зоны сбегающего края щеток). Переход от «процента засветки» к баллам стандартной шкалы искрения производился через соответствие баллов стандартной шкалы и диапазонов «процента засветки» [15, 16]: 1 балл ( $0 \leq P_z < 0,005 \%$ ); 1¼ балла ( $0,005 \% \leq P_z < 0,01 \%$ ); 1½ балла ( $0,01 \% \leq P_z < 0,05 \%$ ); 2 балла ( $0,05 \% \leq P_z < 0,09 \%$ ); 3 балла ( $P_z \geq 0,09 \%$ ).

На рис. 1–4 приведены графики изменения тока якоря, коэффициента ослабления поля, напряжения якоря, величины «процента засветки».

На основании анализа работы ТЭДПТ с учетом искрения в КЩУ разработана регрессионная мо-

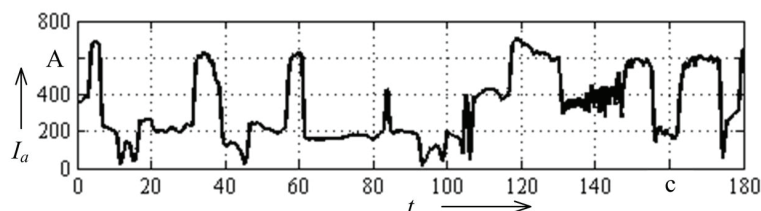


Рис. 1. Изменение тока якоря двигателя

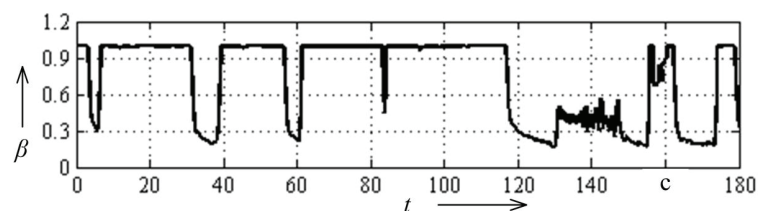


Рис. 2. Изменение коэффициента ослабления поля двигателя

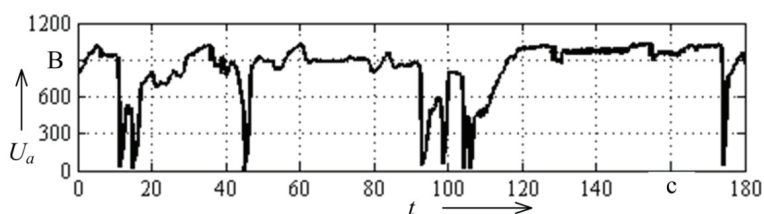


Рис. 3. Изменение напряжения якоря двигателя

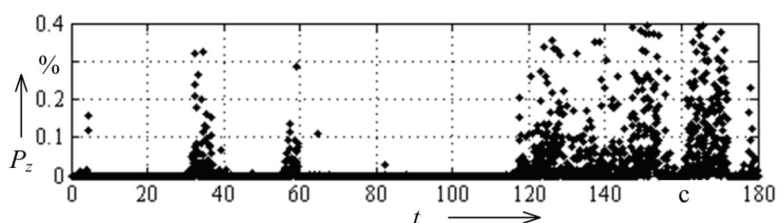


Рис. 4. Изменение величины «процента засветки»

дель [16], которая на основании графиков (см. рис. 1–4) позволяет рассчитывать математическое ожидание величины «процента засветки» в зависимости от тока якоря, тока возбуждения и напряжения якоря:

$$P_{z,model}(I_a, I_b, U_a) = a_0 + a_1 I_a^{d_1} + a_2 I_b^{d_2} + a_3 U_a^{d_3}. \quad (1)$$

Определены коэффициенты в уравнении (1):  $a_0 = -0,13742$ ;  $a_1 = 3,023 \cdot 10^{-3}$ ;  $a_2 = 361,048 \cdot 10^{-3}$ ;  $a_3 = 1,51 \cdot 10^{-15}$ ;  $d_1 = 0,5$ ;  $d_2 = -0,3$ ;  $d_3 = 4,5$ .

Закон распределения остатков регрессионной модели для рассматриваемого примера соответствует нормальному закону распределения с математическим ожиданием, равным нулю, и среднеквадратичным отклонением  $\sigma = 0,011$  [16].

Функция плотности вероятности «процента засветки» равна:

$$f(P_z) = \frac{A_{yc}}{\sqrt{2\pi} \cdot 0,011} \exp\left(-\frac{(P_z - P_{z,model})^2}{2 \cdot 0,011^2}\right), \quad (2)$$

где  $A_{yc}$  — нормирующий множитель для перехода от нормального закона распределения к усеченному [16]:

$$A_{yc} = \left(\int_0^{\infty} f(P_{z,oct}) dP_{z,oct}\right)^{-1}. \quad (3)$$

По известной плотности вероятности «процента засветки» (2) для заданных значений напряжения якоря, тока якоря и возбуждения можно определить закон распределения дискретной случайной величины возникновения искрения с различными баллами, соответствующими стандартной шкале:

$$B_i(x_k \leq P_z < x_{k+1}) = \int_{x_k}^{x_{k+1}} f(P_z) dP_z, \quad (4)$$

где  $x_k$  — граничные значения «процента засветки», соответствующие баллам стандартных классов коммутации.

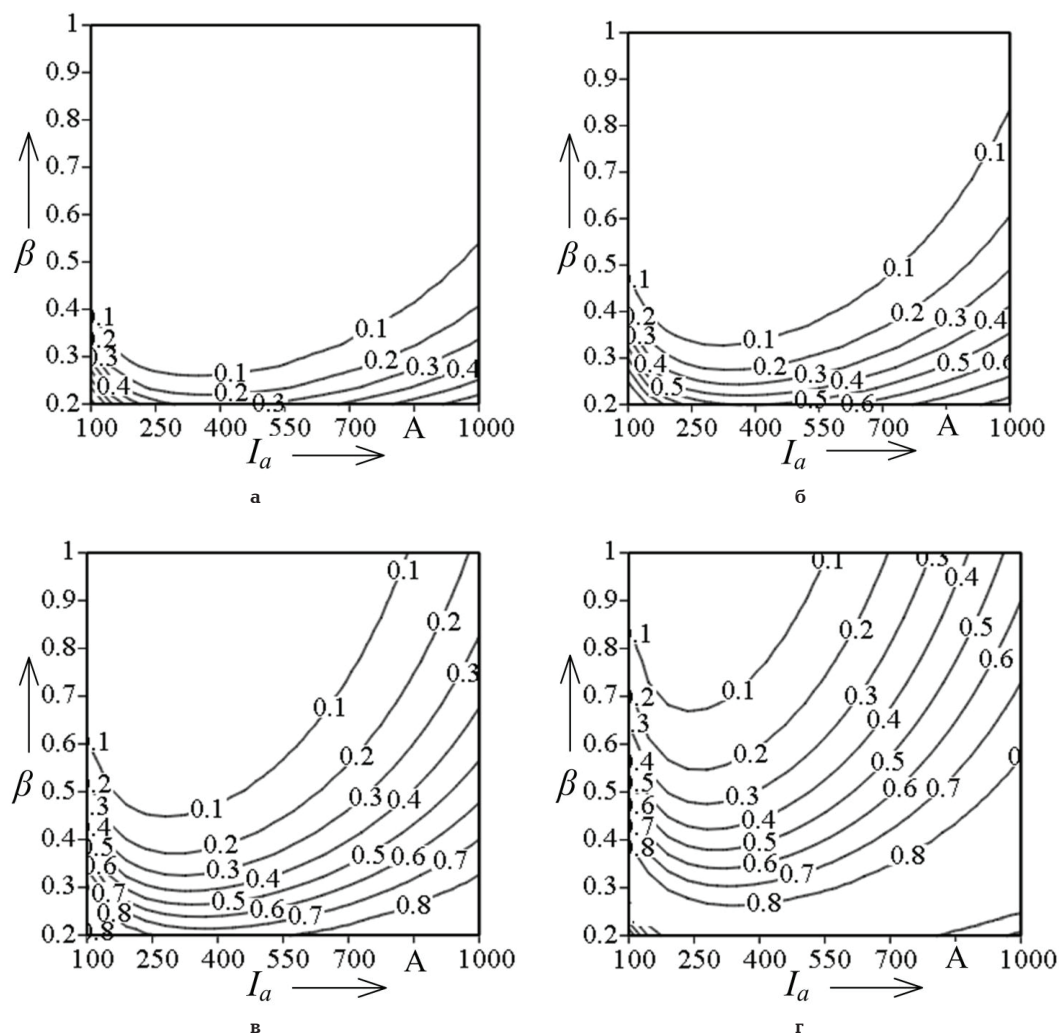


Рис. 5. Вероятности появления степени искрения в 2 балла ТЭДПТ при изменении тока якоря и коэффициента ослабления возбуждения для различных напряжений якоря: а —  $U_a = 850$  В; б —  $U_a = 900$  В; в —  $U_a = 950$  В; г —  $U_a = 1000$  В

Необходимо отметить, что область адекватности регрессионной модели соответствует следующим интервалам изменения токов и напряжения ТЭДПТ: диапазон изменения тока якоря и тока возбуждения [100; 1000] А, напряжения якоря — [100; 1100] В.

На рис. 5 приведены линии уровня вероятностей появления степени искрения в 2 балла при изменении тока якоря и коэффициента ослабления возбуждения ( $\beta = I_b/I_a$ ) для различных напряжений якоря, полученных в результате расчета по выражениям (1)–(4) с заданными граничными значениями «процента засветки» от 0,05 % до 0,09 %.

При увеличении напряжения якоря область допустимых значений тока якоря и коэффициента ослабления возбуждения, при которых вероятность появления искрения 2 балла ниже 0,1, уменьшается и смещается вверх (см. рис. 5).

Увеличение вероятности появления искрения в 2 балла имеет место в двух случаях: при увеличении напряжения якоря, что можно объяснить увеличением разности потенциалов между коллекторными пластинами и при уменьшении коэффициента возбуждения, что можно объяснить увеличением пульсаций токов якоря и возбуждения, обусловленных работой системы управления ТЭДПТ. Таким образом, режим работы, при котором напряжение якоря более 950 В и коэффициент ослабления воз-

буждения менее 0,3–0,4 приводит к появлению искрения КЩУ в 2 балла с высокой вероятностью (см. рис. 5в, г).

В соответствии со стандартом [10], коммутацию ТЭДПТ можно считать удовлетворительной, если степень искрения не превышает 1½ балла в длительных рабочих режимах в пределах рабочих характеристик.

С использованием регрессионной модели можно определить допустимые диапазоны изменения напряжения якоря, тока якоря и возбуждения ТЭДПТ, для которых вероятность появления искрения в КЩУ со степенью искрения 2 балла (и больше) будет равна минимальному заданному значению  $p$ .

В качестве примера зададим вероятность возникновения искрения со степенью 2 балла, равной  $p = 0,05$ . По выражению (2) можно найти значение  $P_{z,model,p}$  при котором вероятность искрения 2 балла будет равна значению 0,05 (нормирующий множитель  $A_{yc}$  равен 1,002),  $P_{z,model,p} = 0,032$  %. Для пояснения на рис. 6 приведена кривая распределения плотности вероятности «процента засветки» (2), площадь заштрихованной области равна заданной вероятности возникновения искрения 2 балла. Математическое ожидание величины «процента засветки», определяемое по выражению (1), не должно превышать 0,032 % для рассматриваемого примера.

Таким образом, с использованием выражения (1) можно определить максимально допустимое значение напряжения якоря при различных коэффициентах ослабления возбуждения и токе якоря, при котором вероятность возникновения искрения в 2 балла равна  $p$ :

$$U_a(I_a, \beta) = \sqrt[3]{\frac{P_{z,model,p} + a_0 - a_1 I_a^{d1} - a_2 (\beta I_a)^{d2}}{a_3}}. \quad (5)$$

Для величин, приведенных на графиках (см. рис. 1–4), и вероятности  $p = 0,05$  выражение (5) можно записать следующим образом:

$$U_a(I_a, \beta) = \sqrt[9]{\left(\frac{0,032 + 0,13742 - 3,023 \cdot 10^{-3} I_a^{0,5} - 0,361 (\beta I_a)^{0,3}}{1,51 \cdot 10^{-15}}\right)^2}. \quad (6)$$

На рис. 7 приведены области допустимых значений напряжения якоря при различных значениях коэффициента ослабления возбуждения и тока якоря. Для заданного коэффициента ослабления возбуждения область допустимых значений напряжения якоря и тока якоря ограничена соответствующей кривой и осями абсцисс и ординат.

Зависимость (5) позволяет рассчитать допустимые интервалы изменения напряжения якоря, тока якоря и тока возбуждения, при которых вероятность появления искрения в 2 балла будет равна заданному минимальному значению.

Для определения допустимых режимов работы ТЭДПТ карьерного самосвала для обеспечения удовлетворительной коммутации разработана методика, алгоритм которой приведен на рис. 8.

Предложенная методика состоит из следующих этапов:

1) получение данных измерений автоматизированного видеоизмерительного комплекса, установленного на борту карьерного самосвала (временные ряды данных изменения напряжения якоря, тока якоря, тока возбуждения, величины «процента засветки») (блок 2 на рис. 8);

2) построение регрессионной модели для выявления связей между величиной «процента засветки» и напряжением якоря, током якоря, током возбуждения (блок 3 на рис. 8) [16];

3) определение допустимых диапазонов изменения напряжения якоря, тока якоря, тока возбуждения, при которых обеспечивается удовлетворительная коммутация КЩУ ТЭДПТ карьерного самосвала (блок 4 на рис. 8).

В результате проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

1) при эксплуатации карьерного самосвала в угольном разрезе тяговые машины работают в двигательном режиме с полным возбуждением и ослаблением поля, а также в режиме динамического торможения. Неудовлетворительная коммутация (степень искрения более  $1\frac{1}{2}$  балла) возникает в двигательном режиме с ослаблением поля;

2) предложен подход к определению допустимых диапазонов изменения напряжения якоря, тока якоря и коэффициента ослабления возбуждения ТЭДПТ карьерного самосвала, для которых вероятность появления искрения в КЩУ со степенью искрения 2 балла (и больше) будет равна минимальному заданному значению;

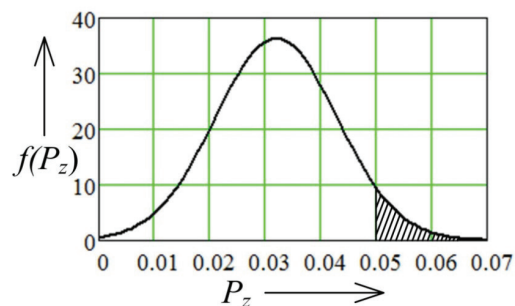


Рис. 6. Плотность распределения вероятности при  $P_{z,model} = 0,032$

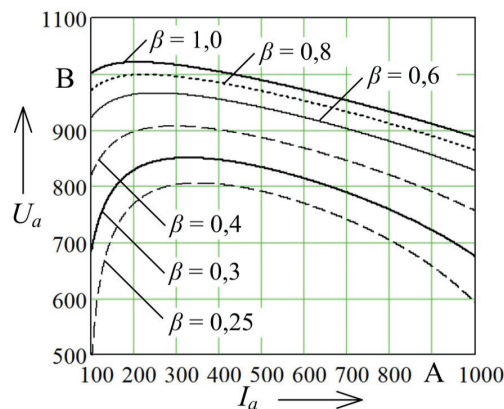


Рис. 7. Допустимые значения напряжения якоря при различных значениях тока якоря и коэффициента ослабления возбуждения для вероятности возникновения искрения 2 балла, равной  $p = 0,05$

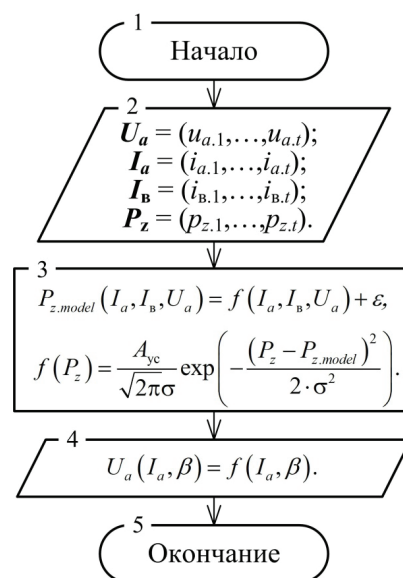


Рис. 8. Алгоритм определения допустимых режимов работы ТЭДПТ карьерного самосвала для обеспечения удовлетворительной коммутации

3) предложена методика определения допустимых режимов работы ТЭДПТ карьерного самосвала для обеспечения удовлетворительной коммутации. Методика позволяет на основании анализа экспе-

риментальных данных определить допустимые диапазоны изменения напряжения, тока якоря и коэффициента ослабления возбуждения, при которых степень искрения не превышает 1½ балла в соответствии с требованиями стандартов.

#### Библиографический список

1. Казубенко А. Ф. Самосвалы БелАЗ с электромеханической передачей // Уголь. 2019. № 5 (1118). С. 50–51.
2. Hughes A., Drury B. Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications. Burlington: Newnes, 2013. 440 p. ISBN 978-0-7506-4718-2, ISBN 0-7506-4718-3.
3. Steimel A. Electric Traction — Motive Power and Energy Supply: Basics and Practical Experience. Oldenbourg: Industrieverlag, 2008. 333 p. ISBN 978-3-8356-3132-8.
4. Chiasson J. Modeling and High Performance Control of Electric Machines. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2005. 709 p. ISBN 0-471-68449-X.
5. Veltman A., Pülle D., De Doncker R. Direct Current Machine // Fundamentals of Electrical Drives, Power Systems. Springer, 2016. 341 p. ISBN 978-1-4020-5503-4.
6. Gerling D. Electrical Machines: Mathematical Fundamentals of Machine Topologies. Berlin: Springer, 2015. 472 p. ISBN 978-3-642-17584-8.
7. Drubel O. Converter Applications and their Influence on Large Electrical Machines. Berlin: Springer, 2013. 190 p. ISBN 978-3-642-36282-8.
8. Вольдек А. И., Попов В. В. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы. Санкт-Петербург: Питер, 2008. 322 с. ISBN 978-5-469-01380-8.
9. Копылов И. П., Клоков Б. К., Морозкин В. П. [и др.]. Проектирование электрических машин. Москва: Высшая школа, 2002. 757 с. ISBN 5-06-004032-1.
10. ГОСТ 2582-2013. Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия. Введ. 2015–01–01. Москва: Стандартинформ, 2014. 52 с.
11. Авилов В. Д. Оптимизация коммутационного процесса в коллекторных электрических машинах постоянного тока: моногр. Омск: Изд-во ОмГУПС, 2013. 356 с. ISBN 978-5-91306-054-9.
12. Харламов В. В. Методы и средства диагностирования технического состояния коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей и других коллекторных машин постоянного тока: моногр. Омск: Изд-во ОмГУПС, 2002. 233 с. ISBN 5-94941-005-X.
13. Гемке Р. Г. Неисправности электрических машин. Ленинград: Энергия, 1989. 336 с. ISBN 5-283-04431-9.
14. Харламов В. В., Чупрына Е. Ю., Сергеев Р. В. [и др.]. Повышение коммутационной устойчивости тяговых электродвигателей ЭДП-800 карьерных самосвалов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 29, № 7. С. 138–147.
15. Харламов В. В., Найден С. Н., Шкодун П. К. [и др.]. Методика оценки состояния коммутации тяговых электродвигателей карьерных самосвалов в условиях эксплуатации // Омский научный вестник. 2019. № 4 (166). С. 23–28. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-166-23-28.
16. Харламов В. В., Москалев Ю. В., Найден С. Н. Моделирование процесса коммутации тягового двигателя постоянного тока карьерного самосвала // Омский научный вестник. 2020. № 2 (170). С. 31–36. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-170-31-36.

**ХАРЛАМОВ Виктор Васильевич**, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Электрические машины и общая электротехника».

SPIN-код: 5093-8463

AuthorID (РИНЦ): 465264

ORCID: 0000-0003-3621-3377

AuthorID (SCOPUS): 7006332004

Адрес для переписки: емое@omgups.ru

**МОСКАЛЕВ Юрий Владимирович**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электрические машины и общая электротехника».

SPIN-код: 1422-1951

AuthorID (РИНЦ): 657144

ORCID: 0000-0002-0970-937X

AuthorID (SCOPUS): 57200088110

Адрес для переписки: yuriyvm@mail.ru

**НАЙДЕН Сергей Николаевич**, аспирант кафедры «Электрические машины и общая электротехника».

Адрес для переписки: емое@omgups.ru

#### Для цитирования

Харламов В. В., Москалев Ю. В., Найден С. Н. Методика определения допустимых режимов работы тягового двигателя постоянного тока карьерного самосвала для обеспечения удовлетворительной коммутации // Омский научный вестник. 2021. № 2 (176). С. 36–40. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-176-36-40.

Статья поступила в редакцию 14.02.2021 г.

© В. В. Харламов, Ю. В. Москалев, С. Н. Найден