

УДК 629.423.31

DOI: 10.25206/1813-8225-2020-170-31-36

В. В. ХАРЛАМОВ
Ю. В. МОСКАЛЕВ
С. Н. НАЙДЕН

Омский государственный
университет путей сообщения,
г. Омск

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОММУТАЦИИ ТЯГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА КАРЬЕРНОГО САМОСВАЛА

В статье рассмотрена нелинейная множественная регрессионная модель, на основании которой построена модель процесса коммутации тягового двигателя постоянного тока карьерного самосвала. Построение регрессионной модели осуществляется с использованием экспериментальных данных работы тягового двигателя, полученных с автоматизированного видеоизмерительного комплекса оценки коммутации в эксплуатации. Предложенная математическая модель устанавливает связь между значениями напряжения якоря, тока якоря, тока возбуждения и интенсивностью искрения коллекторно-щеточного узла. Адекватность математической модели подтверждена сравнением степени искрения полученной экспериментально и с использованием предложенной модели. Относительное значение погрешности экспериментальных и расчетных данных для различных значений напряжения якоря, тока якоря, тока возбуждения из области адекватности модели не превышает допустимых значений.

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

В настоящее время в качестве тяговых двигателей карьерных самосвалов «БелАЗ» используются несколько типов электрических машин: машины постоянного тока, асинхронные и вентильно-индукторные машины. Появление электронных ключей, способных обеспечить надежную работу при коммутации токов в сотни ампер и выдерживать высокие напряжения, способствовало расширению применения асинхронных и вентильно-индукторных электрических машин в качестве мощных тяговых двигателей различного подвижного состава [1–4]. Стоимость полупроводниковых преобразователей для управления такими тяговыми двигателями остается пока достаточно высокой, для охлаждения преобразователей используются сложные системы охлаждения, а также необходим высококвалифицированный персонал для настройки и обслуживания таких систем, поэтому остаются актуальными вопросы эксплуатации и обслуживания тяговых машин постоянного тока.

Как известно, машины постоянного тока в качестве тяговых используются долгое время [4–6], поэтому хорошо известны практически все «слабые» стороны и проблемы при эксплуатации таких машин, одной из которых является обеспечение коммутационной устойчивости работы тягового электродвигателя постоянного тока (ТЭДПТ) [6].

Для оценки интенсивности искрения ТЭДПТ, используемых в карьерных самосвалах «БелАЗ», разработан автоматизированный видеоизмерительный комплекс оценки коммутации [7].

Интенсивность искрения щеток оценивалась с использованием величины «процента засветки» P_z . Эта величина определялась как процент площади белых пикселей от общей площади, контролируемой видеокамерой зоны сбегающего края щеток.

Для перехода от «процента засветки» к баллам стандартной шкалы искрения методом экспертных оценок устанавливались интервалы значений «про-

Соответствие процента засветки стандартной шкале искрения

Стандартная шкала искрения, балл				
1	1¼	1S	2	3
Диапазоны изменения процента засветки, %				
$0 \leq P_z < 0,005$	$0,005 \leq P_z < 0,01$	$0,01 \leq P_z < 0,05$	$0,05 \leq P_z < 0,09$	$P_z \geq 0,09$

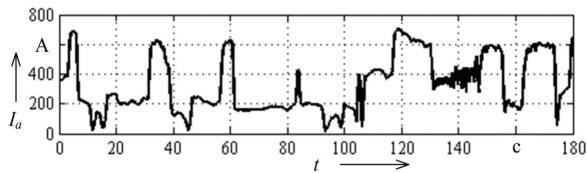


Рис. 1. Изменение тока якоря двигателя

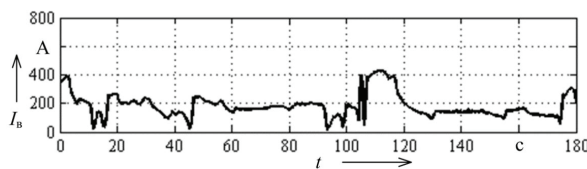


Рис. 2. Изменение тока возбуждения двигателя

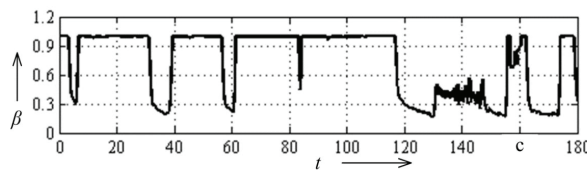


Рис. 3. Изменение коэффициента ослабления поля двигателя

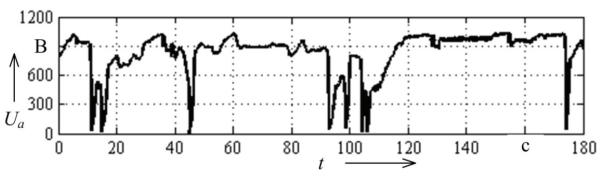


Рис. 4. Изменение напряжения якоря двигателя

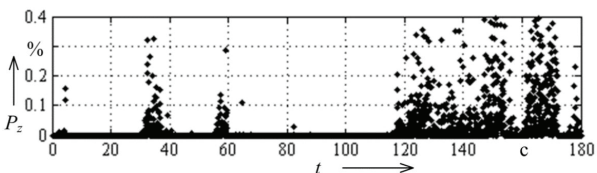


Рис. 5. Изменение величины «процента засветки»

центра засветки», для рассматриваемого примера интервалы приведены в табл. 1.

В результате мониторинга работы ТЭДПТ карьерного самосвала на угольном разрезе получены необходимые данные для анализа процесса коммутации двигателя (рис. 1–5).

На рис. 1–5 приведены графики изменения тока якоря, тока возбуждения, коэффициента ослабления поля, напряжения якоря, величины «процента засветки» при работе ТЭДПТ в двигательном режиме с полным возбуждением и ослаблением поля. Как можно видеть, искрение в коллекторно-щеточном узле (КЩУ) значительно возрастает при ослаблении возбуждения. Это связано с особенностью силовой цепи управления ТЭД, т.к. при этом значительно возрастают пульсации тока якоря и тока возбуждения.

Для определения влияния тока якоря, тока возбуждения и напряжения якоря на процесс коммутации составлена регрессионная модель, которая позволяет оценить влияние работы системы управления ТЭДПТ на процесс коммутации.

При построении регрессионной модели рассмотрены несколько линейных и нелинейных регрессионных уравнений [8]. Для каждого из них методом наименьших квадратов определены неизвестные коэффициенты регрессии. С использованием основных показателей качества регрессионных моделей, таких как коэффициент детерминации, среднее абсолютное отклонение и ошибка аппроксимации, выбрано одно нелинейное уравнение, для которого указанные показатели принимали наилучшие значения:

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

где a_0, a_1, a_2, a_3 — коэффициенты регрессии; d_1, d_2, d_3 — показатели степени регрессоров.

Для определения неизвестных a_0, a_1, a_2, a_3 и d_1, d_2, d_3 в уравнении (1) необходимо для заданного массива экспериментальных данных найти минимум следующего функционала:

$$F_{\min}(a_0, a_1, a_2, a_3) = \sum_{i=1}^N (a_0 + a_1 I_{a,i}^{d_1} + a_2 I_{b,i}^{d_2} + a_3 U_{a,i}^{d_3} - P_{z,exp,i})^2 \rightarrow \min, \quad (2)$$

где N — количество строк массива экспериментальных данных.

После определения первой производной для уравнения (2) по каждой переменной a_0, a_1, a_2, a_3 и приравнивания этих уравнений к нулю получена система уравнений:

$$\begin{pmatrix} N & \sum_{i=1}^N I_{a,i}^{d_1} & \sum_{i=1}^N I_{b,i}^{d_2} & \sum_{i=1}^N U_{a,i}^{d_3} \\ \sum_{i=1}^N I_{a,i}^{d_1} & \sum_{i=1}^N I_{a,i}^{2 \cdot d_1} & \sum_{i=1}^N I_{a,i}^{d_1} I_{b,i}^{d_2} & \sum_{i=1}^N I_{a,i}^{d_1} U_{a,i}^{d_3} \\ \sum_{i=1}^N I_{b,i}^{d_2} & \sum_{i=1}^N I_{a,i}^{d_1} I_{b,i}^{d_2} & \sum_{i=1}^N I_{b,i}^{2 \cdot d_2} & \sum_{i=1}^N I_{b,i}^{d_2} U_{a,i}^{d_3} \\ \sum_{i=1}^N U_{a,i}^{d_3} & \sum_{i=1}^N I_{a,i}^{d_1} U_{a,i}^{d_3} & \sum_{i=1}^N I_{b,i}^{d_2} U_{a,i}^{d_3} & \sum_{i=1}^N U_{a,i}^{2 \cdot d_3} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^N P_{z,экci} \\ \sum_{i=1}^N P_{z,экci} I_{a,i}^{d1} \\ \sum_{i=1}^N P_{z,экci} I_{b,i}^{d2} \\ \sum_{i=1}^N P_{z,экci} U_{a,i}^{d3} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

С использованием экспериментальных данных система алгебраических уравнений (3) решена многократно для различных значений коэффициентов d_1, d_2, d_3 , которые задавались с шагом 0,01 в диапазоне от -5 до 5 . Минимальное значение функционала (2) получено для следующих значений $d_1 = 0,5; d_2 = -0,3; d_3 = 4,5$. Для этих значений показателей степени d_1, d_2, d_3 система алгебраических уравнений (3):

$$\begin{pmatrix} 4,59 \cdot 10^3 & 7,84 \cdot 10^4 & 1,01 \cdot 10^3 & 8,69 \cdot 10^{16} \\ 7,84 \cdot 10^4 & 1,48 \cdot 10^6 & 1,7 \cdot 10^4 & 1,67 \cdot 10^{18} \\ 1,01 \cdot 10^3 & 1,7 \cdot 10^4 & 230,65 & 1,89 \cdot 10^{16} \\ 8,69 \cdot 10^{16} & 1,67 \cdot 10^{18} & 1,89 \cdot 10^{16} & 2,16 \cdot 10^{30} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 103,01 \\ 2,358 \cdot 10^3 \\ 23,999 \\ 3,201 \cdot 10^{15} \end{pmatrix}.$$

В результате решения системы уравнений определены коэффициенты регрессии $a_0 = -0,13742; a_1 = 3,023 \cdot 10^{-3}; a_2 = 361,048 \cdot 10^{-3}; a_3 = 1,51 \cdot 10^{-15}$ и сформировано уравнение регрессионной модели:

$$P_{z,model}(I_a, I_b, U_a) = -0,13742 + 3,023 \cdot 10^{-3} I_a^{0,5} + 0,361 I_b^{-0,3} + 1,51 \cdot 10^{-15} U_a^{4,5}, \quad (4)$$

Коэффициент детерминации для уравнения регрессионной модели рассчитан по выражению:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_{z,экci} - P_{z,model,i})^2}{\sum_{i=1}^N (P_{z,экci} - P_{z,ср})^2}, \quad (5)$$

где $P_{z,ср}$ — среднее значение «процента засветки», полученное в результате эксперимента.

Коэффициент детерминации для регрессионного уравнения (4) составляет 0,63, следовательно, имеет место заметная связь между переменной P_z и учитываемыми в модели факторами.

На рис. 6 представлены двумерные функции изменения значения «процента засветки», определенные с использованием уравнения (4).

Как видно из рис. 6, среднее значение процента засветки возрастает при увеличении напряжения якоря и уменьшении коэффициента ослабления возбуждения, т.к. в первом случае увеличивается разность потенциалов между коллекторными пластинами, а во втором случае увеличивается пульсация тока возбуждения, что оказывает негативное влияние на процесс коммутации КЩУ.

Процесс возникновения искрения в КЩУ имеет вероятностную природу [4, 5], поэтому необходимо определить закон распределения остатков регрессионной модели. Распределение остатков регрессионной модели и кривая теоретического закона распределения вероятности приведены на рис. 7.

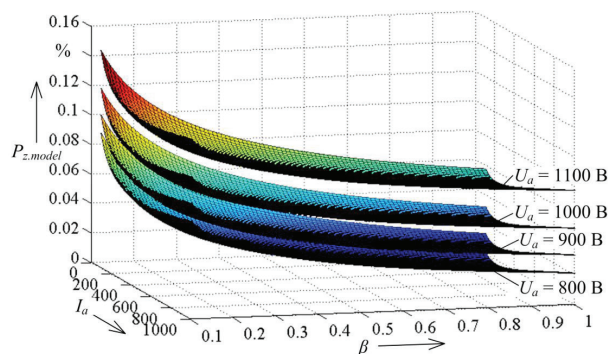


Рис. 6. Изменение значения «процента засветки», рассчитанное по выражению (4)

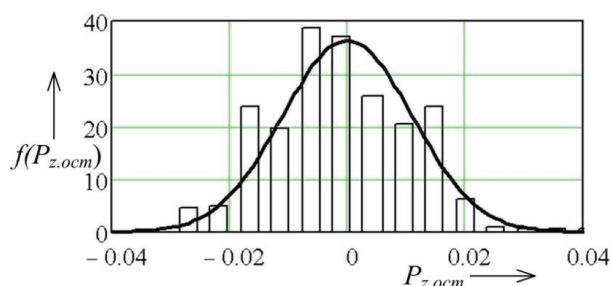


Рис. 7. Гистограмма остатков «процента засветки» и выравнивающая кривая нормального закона распределения ($\sigma = 0,011$)

Проверка правдоподобия гипотезы о нормальном распределении остатков регрессионной модели ($P_{z,ocm}$) выполнена с использованием критерия Пирсона. Распределение остатков регрессионной модели соответствует нормальному закону распределения с математическим ожиданием, равным нулю, и среднеквадратичным отклонением $\sigma = 0,011$. Функция плотности вероятности остатков регрессионной модели:

$$f(P_{z,ocm}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 0,011} \exp\left(-\frac{(P_{z,ocm} - 0)^2}{2 \cdot 0,011^2}\right). \quad (6)$$

При использовании регрессионной модели для средних значений, близких к нулю, появляется вероятность появления отрицательных значений величины «процента засветки». Для того, чтобы процент засветки был больше нуля, необходимо использовать усеченный нормальный закон распределения на интервале $[0, +\infty)$. В этом случае площадь, ограниченная кривой плотности распределения вероятности, должна быть равна единице, поэтому необходимо использовать нормирующий множитель.

Нормирующий множитель для перехода от нормального закона распределения к усеченному равен:

$$A_{yc} = \left(\int_0^{\infty} f(P_{z,ocm}) dP_{z,ocm} \right)^{-1}. \quad (7)$$

Плотность распределения усеченного нормального распределения на интервале $[0, +\infty)$ будет равна:

$$f(P_{z,ocm}) = \frac{A_{yc}}{\sqrt{2\pi} \cdot 0,011} \exp\left(-\frac{(P_{z,ocm} - 0)^2}{2 \cdot 0,011^2}\right). \quad (8)$$

В этом случае все случайные числа величины «процента засветки», полученные с использованием регрессионной модели, будут иметь положительные значения.

Таким образом, функция плотности вероятности процента засветки равна:

$$f(P_{z,\text{ост}}) = \frac{A_{\text{yc}}}{\sqrt{2\pi} \cdot 0,011} \exp\left(-\frac{(P_{z,\text{ост}} - 0)^2}{2 \cdot 0,011^2}\right). \quad (9)$$

По известному закону распределения величины процента засветки для различных значений тока якоря, тока возбуждения, напряжения якоря можно определить вероятность нахождения в заданном интервале значений P_z :

$$B_i(x_k \leq P_z < x_{k+1}) = \int_{x_k}^{x_{k+1}} f(P_z) dP_z, \quad (10)$$

где x_k — граничные значения процента засветки в соответствии с табл. 1.

В результате можно определить закон распределения дискретной случайной величины степеней искрения КЩУ, которые соответствуют стандартной шкале искрения 1; 1¼; 1½; 2 и 3 балла [9, 10].

Область адекватности математической модели определена на основании анализа диапазонов изменения тока якоря, тока возбуждения и напряжения якоря для различных самосвалов «БелАЗ»: диапазон изменения тока якоря и тока возбуждения [100; 1000] А, напряжения якоря — [100; 1100] В.

Для пояснения предложенной математической модели выполним моделирование с различными значениями напряжения, тока якоря и коэффициента ослабления возбуждения. Результаты моделирования приведены на рис. 8–10.

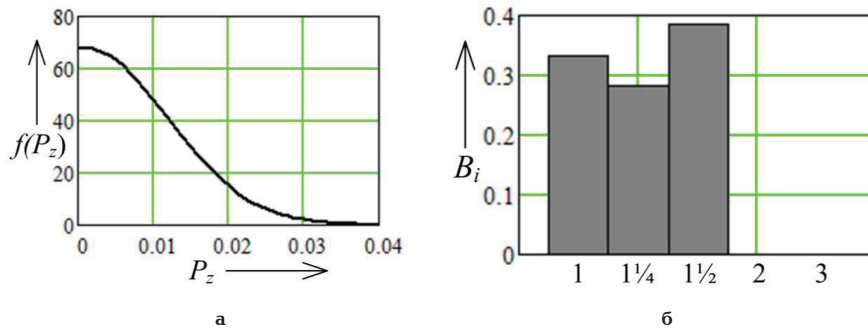


Рис. 8. Плотность распределения вероятности при $U_a = 750\text{В}$; $I_a = 550\text{А}$; $\beta = 1$; $P_{z,\text{model}} = 0,0009$: а — процента засветки; б — дискретной случайной величины степени искрения

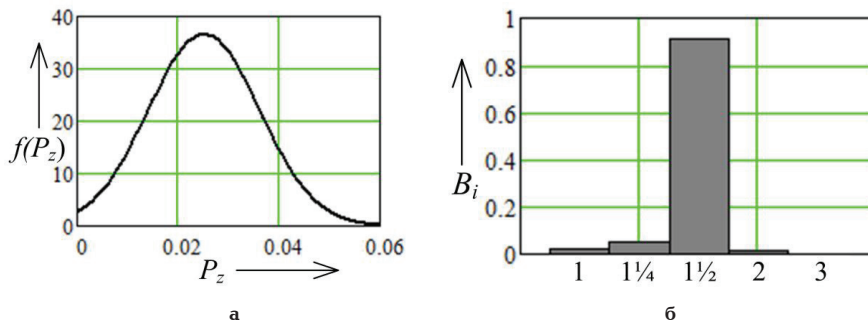


Рис. 9. Плотность распределения вероятности при $U_a = 900\text{В}$; $I_a = 500\text{А}$; $\beta = 0,6$; $P_{z,\text{model}} = 0,0251$: а — процента засветки; б — дискретной случайной величины степени искрения

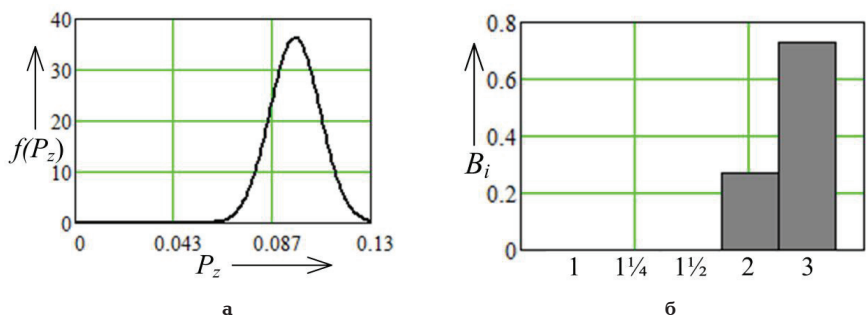


Рис. 10. Плотность распределения вероятности при $U_a = 1100\text{В}$; $I_a = 1000\text{ А}$; $\beta = 0,3$; $P_{z,\text{model}} = 0,0967$: а — процента засветки; б — дискретной случайной величины степени искрения

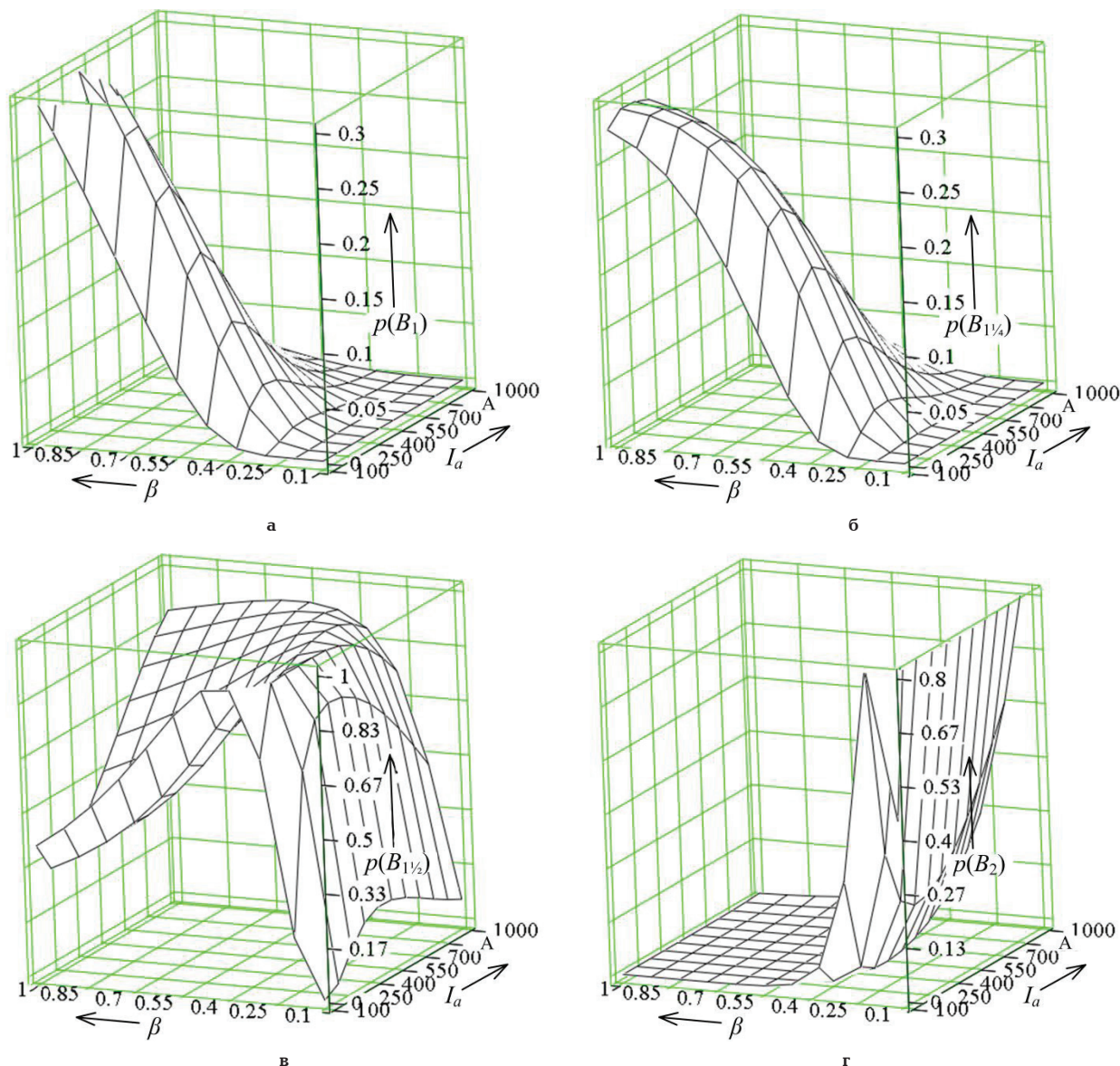


Рис. 11. Вероятности появления различных степеней искрения тягового двигателя карьерного самосвала в зависимости от тока якоря и коэффициента ослабления возбуждения при $U_a = 800\text{В}$: а — 1 балл; б — 1¼ балла; в — 1½ балла; г — 2 балла

Таким образом, с использованием предложенной математической модели для различных значений тока якоря, тока возбуждения и напряжения якоря из заданной области адекватности модели можно определить дискретную случайную величину появления искрения КЩУ карьерного самосвала с различными степенями искрения в соответствии со стандартной шкалой искрения.

Для оценки адекватности модели выполнено сравнение двух дискретных случайных величин при одинаковых значениях тока якоря, тока возбуждения и напряжения якоря: 1) степени искрения, полученные на основании анализа экспериментальных данных; 2) степени искрения, которые определены с использованием предложенной математической модели.

Погрешность моделирования определена по выражению:

$$\delta B = \frac{\sum |B_{i,\text{эсп}} - B_{i,\text{model}}|}{5} 100\%, \quad (11)$$

где B_i — вероятность появления искрения с одним из пяти стандартных степеней искрения [9, 10].

Погрешности вероятностей появления искрения ТЭДПТ карьерного самосвала для различных значений тока якоря, тока возбуждения и напряжения якоря из заданной области адекватности модели не превышают 12 %.

Необходимо отметить, что в выражении (11) при анализе погрешности учитывались вероятности B_i , которые принимали значение больше нуля.

Для определения вероятностей появления различных степеней искрения тягового двигателя карьерного самосвала в зависимости от тока якоря и коэффициента ослабления возбуждения в области адекватности математической модели построены зависимости, приведенные на рис. 11 (напряжение якоря 800 В).

Эти зависимости (рис. 11) позволяют определить диапазоны изменения напряжения якоря, тока якоря и тока возбуждения, которые соответствуют минимальной вероятности появления искрения в 2 балла. На основании этого можно осуществить изменения настроек системы управления ТЭДПТ

карьерного самосвала, чтобы обеспечить работу двигателя со степенью искрения не более 1½ балла [9, 10].

В результате проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

1) на угольном разрезе ТЭД самосвала «БелАЗ» работают в следующих режимах: с полным возбуждением, с ослаблением возбуждения, в режиме динамического торможения и выбега. Интенсивность искрения щеток больше 1½ балла возникает в основном при работе двигателя в тяговом режиме с ослаблением возбуждения, это зависит от работы системы управления при ослаблении поля, т.к. при этом увеличиваются пульсации тока якоря и возбуждения;

2) определение степени искрения в соответствии со стандартной шкалой искрения в КЩУ выполнялось с использованием величины «процента засветки», который рассчитывается как процент площади белых пикселей от общей площади, контролируемой видеокамерой зоны сбегающего края щеток;

3) на основании экспериментальных данных, полученных с использованием автоматизированного видеоизмерительного комплекса оценки коммутации составлена регрессионная модель, которая позволяет оценить влияние напряжения якоря, тока якоря и тока возбуждения на величину «процента засветки»;

4) предложена математическая модель для анализа искрения ТЭДПТ карьерного самосвала «БелАЗ». Модель позволяет выполнить анализ работы системы управления ТЭДПТ на процесс коммутации и определить степень искрения в соответствии со стандартной шкалой. Погрешности вероятностей появления искрения ТЭДПТ карьерного самосвала для различных значений тока якоря, тока возбуждения и напряжения якоря из заданной области адекватности модели не превышают 12 %;

5) предложенная модель позволяет проанализировать степень искрения в зависимости от работы системы управления ТЭДПТ, определить диапазоны изменения напряжения якоря, тока якоря и тока возбуждения, которые соответствуют минимальной вероятности появления искрения в 2 балла. В результате можно осуществить изменения настроек системы управления ТЭДПТ карьерного самосвала, чтобы обеспечить работу двигателя со степенью искрения не более 1½ балла.

Библиографический список

- Hughes A., Drury B. Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications. 4th ed. Burlington: Newnes, 2013. 440 p. ISBN 978-0-7506-4718-2; 0-7506-4718-3.
- Вольдек А. И., Попов В. В. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы. СПб.: Питер, 2008. 320 с. ISBN 978-5-469-01380-8.
- Копылов И. П. Электрические машины. В 2 т. Изд. 2-е, испр. и доп. М.: Юрайт, 2016. Т. 2. 407 с. ISBN 978-5-9916-7436-2; 978-5-9916-7437-9.
- Авилов В. Д. Оптимизация коммутационного процесса в коллекторных электрических машинах постоянного тока: моногр. Омск, 2013. 355 с. ISBN 978-5-91306-054-9.
- 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. 231 с. ISBN 5-94941-005-X.
- 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. 329, № 7. С. 138–147.
- 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.
- Chatterjee S., Simonoff J. Handbook of regression analysis. N. J.: Wiley, 2013. 236 p. ISBN 978-0-470-88716-5.
- ГОСТ 2582–2013. Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия. Введ. 2015–01–01. М.: Стандартинформ, 2014. 52 с.
- ГОСТ Р 52776–2007. Машины электрические вращающиеся. Номинальные данные и характеристики. Введ. 2008–01–01. М.: Стандартинформ, 2008. 68 с.

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: emoe@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: emoe@omgups.ru

Для цитирования

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.

Статья поступила в редакцию 30.01.2020 г.

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