

14. Rotov P. V., Orlov M. E., Sharapov V. I. The concept of better regulation of the load domestic heat supply systems (О концепции совершенствования технологий регулирования тепловой нагрузки теплофикационных систем) // Transaction of Academenergo (Труды Академэнерго). 2012. № 2. P. 76–87.

ПТИЦЫНА Елена Витальевна, доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретическая и общая электротехника» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), член-корреспондент Российской академии электротехнических наук.
SPIN-код: 4415-9705

AuthorID (РИНЦ): 416340

Адрес для переписки: evptitsyna@yandex.ru

ПТИЦЫН Дмитрий Вячеславович, ассистент кафедры «Теоретическая и общая электротехника» ОмГТУ.

Адрес для переписки: ptitsyndv@mail.ru

КУВАЛДИН Александр Борисович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт», академик Российской академии электротехнических наук.

SPIN-код: 4507-4908

AuthorID (РИНЦ): 250862

Адрес для переписки: a.kuvaldin2013@yandex.ru

Для цитирования

Птицына Е. В., Птицын Д. В., Кувалдин А. Б. Низковольтные электродные водоподогреватели с питанием током сложной формы // Омский научный вестник. 2018. № 2 (158). С. 20–27. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-158-20-27.

Статья поступила в редакцию 16.02.2018 г.

© Е. В. Птицына, Д. В. Птицын, А. Б. Кувалдин

УДК 621.313

DOI: 10.25206/1813-8225-2018-158-27-32

В. В. ХАРЛАМОВ
С. Н. НАЙДЕН
А. С. ХЛОПЦОВ
П. Г. ПЕТРОВ

Омский государственный
университет путей сообщения,
г. Омск

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРЕВЫШЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В УЗЛАХ КОЛЛЕКТОРНО-ЩЕТОЧНОГО УСТРОЙСТВА ТЯГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ ЭДП-800 КАРЬЕРНОГО САМОСВАЛА БелАЗ В СТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ

В статье приведена математическая модель коллекторно-щеточного устройства тягового двигателя ЭДП-800 карьерного самосвала БелАЗ и выполнен расчет превышения температуры в стационарном режиме. С помощью тепловизора получены превышения температуры в узлах коллекторно-щеточного устройства при номинальном режиме работы двигателя. Дана оценка математической модели путем сопоставления экспериментальных и расчетных данных.

Ключевые слова: коллекторно-щеточный узел, зона контакта, тепловая схема замещения, превышение температуры, тепловое сопротивление, тепловой поток, стационарный режим.

Тепловые процессы в коллекторно-щеточном узле (КЩУ) машины постоянного тока являются весьма сложными для анализа, так как имеют множество составляющих [1].

Основными процессами, имеющими отношение к температуре в зоне скользящего контакта,

являются: механическое трение щетки по пластине коллектора, протекание тока через коллектор и щетку, различной степени искрение в зависимости от условий коммутации [2].

Для оценки влияния факторов электрической и механической природы на нагрев элементов

КЩУ, требуется сформировать достоверную математическую модель и методику расчета.

В КЩУ МПТ можно выделить следующие источники тепла: $P_{щ1}, P_{щ2}, P_{щ3}$ — потери на щетке, представляющие собой выделение тепла при протекании тока; $P_{кон1}, P_{кон2}, P_{кон3}$ — потери в зоне контакта, обусловленные механическим трением в контакте, протеканием тока, а также электродуговым искрением на сбегавшем крае щетки; P_k — потери тепла в коллекторе при протекании тока. В представленной схеме на рис. 1 приняты обозначения тепловых сопротивлений: R_1, R_1', R_1'' — от графита щетки к воздуху; R_4, R_5 — от графита щетки к щеткодержателю; R_6, R_7, R_8 — от графита щетки к зоне контакта «щетка–коллектор»; R_2, R_2', R_2'' — от зоны контакта к воздуху, R_9, R_10, R_11 — от зоны контакта к пластине коллектора, R_3 — от пластины коллектора к воздуху [3].

Используя закон теплопроводности Фурье, из уравнений теплового баланса для каждого источника теплоты и каждого узла можно составить систему, число уравнений в которой равно числу искомых превышений температуры.

$$\begin{cases} \frac{\Delta T_1}{R_1} + \frac{\Delta T_1 - \Delta T_1'}{R_4} + \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{R_6} = P_{щ1} \\ \frac{\Delta T_1'}{R_1'} + \frac{\Delta T_1' - \Delta T_1}{R_4} + \frac{\Delta T_1' - \Delta T_2'}{R_7} + \frac{\Delta T_1' - \Delta T_2''}{R_5} = P_{щ2} \\ \frac{\Delta T_1''}{R_1''} + \frac{\Delta T_1'' - \Delta T_1'}{R_5} + \frac{\Delta T_1'' - \Delta T_2''}{R_8} + \frac{\Delta T_2 - \Delta T_3}{R_9} = P_{щ3} \\ \frac{\Delta T_2}{R_2} + \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{R_6} + \frac{\Delta T_2 - \Delta T_3}{R_9} = P_{кон1} \\ \frac{\Delta T_2'}{R_2'} + \frac{\Delta T_2' - \Delta T_1'}{R_7} + \frac{\Delta T_2' - \Delta T_3}{R_{10}} = P_{кон2} \\ \frac{\Delta T_2''}{R_2''} + \frac{\Delta T_2'' - \Delta T_1''}{R_8} + \frac{\Delta T_2'' - \Delta T_3}{R_{11}} = P_{кон3} \\ \frac{\Delta T_3}{R_3} + \frac{\Delta T_3 - \Delta T_2}{R_9} + \frac{\Delta T_3 - \Delta T_2'}{R_{10}} + \frac{\Delta T_3 - \Delta T_2''}{R_{11}} = P_k \end{cases} \quad (1)$$

Будем считать, что токи, протекающие через щетки, равны, тепловые и электрические сопротив-

ления щеток равны, сила трения у каждой щетки одинаковая и искрение отсутствует.

$$P_{щ1} = P_{щ2} = P_{щ3}; P_{кон1} = P_{кон2} = P_{кон3}; R_1 = R_1'; R_4 = R_5; R_6 = R_7 = R_8; R_2 = R_2' = R_2''.$$

Для решения системы уравнений необходимо рассчитать все источники потерь и все тепловое сопротивление.

Тепловое сопротивление, обозначенное на схеме, обозначает результирующее тепловое сопротивление, действующее на нескольких участках пространства [4]. К примеру, тепловое сопротивление R_1 от графита щетки к воздуху является результирующим тепловым сопротивлением, действующим как в ширину, так и в длину сечения. Для расчета теплового сопротивления щеток учитывается площадь открытой поверхности щеток, непосредственно контактирующая с воздухом, а также площадь поверхности, закрытой щеткодержателем (рис. 2) [5].

Щетку условно разбиваем на три участка, представляющих для теплового потока P_1'' последовательно соединенные тепловые сопротивления (рис. 3а). $R_{1общ}$ — результирующее тепловое сопротивление открытой части щетки со стороны нажимной пружины; $R_{2общ}$ — результирующее тепловое сопротивление щетки ограниченная щеткодержателем; $R_{3общ}$ — результирующее тепловое сопротивление открытой части щетки со стороны коллектора. В свою очередь, тепловой поток P_1'' на каждом из участков разделяется на тепловые потоки P_{ij}'' , направленные от центра к грани участка через тепловые сопротивления P_{ij}'' .

Тепловые сопротивления на пути потоков P_{21}'' и P_{35}'' не учитываются, так как поток P_{21}'' направлен в стенку щеткодержателя, смежную со второй щеткой, а P_{35}'' направлен в пластину коллектора. В итоге получим тепловую схему замещения, представленную на рис. 3б.

Тепловое сопротивление P_1'' определим по формуле:

$$R_1'' = R_{1общ} + R_{2общ} + R_{3общ}. \quad (2)$$

$R_{1общ}$ определяется как сумма параллельных сопротивлений:

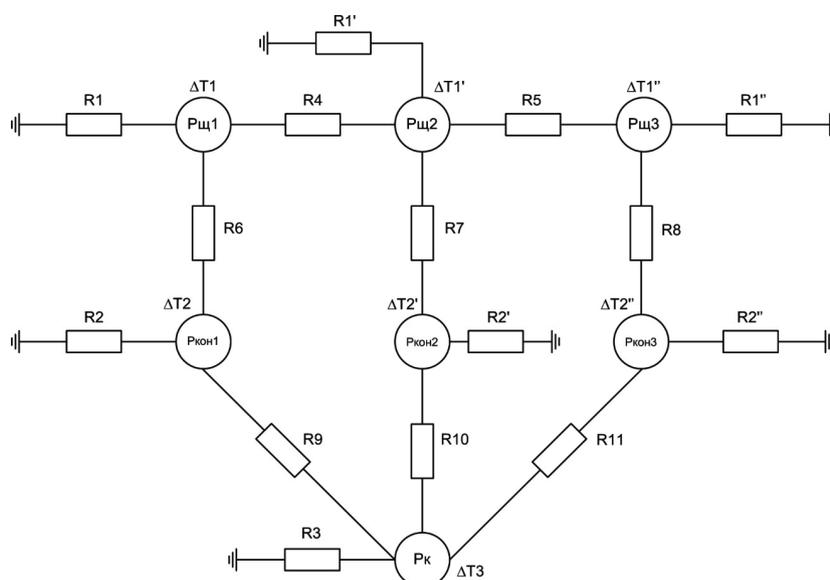


Рис. 1. Тепловая схема замещения КЩУ тягового электродвигателя ЭДП-800

$$R_{1общ} = \frac{1}{\frac{1}{R''_{11}} + \frac{1}{R''_{12}} + \frac{1}{R''_{13}} + \frac{1}{R''_{14}} + \frac{1}{R''_{15}}}, \quad (3)$$

где

$$R''_{11} = R''_{12} = \frac{h_1}{2\lambda_g h_2 l_1}; \quad (4)$$

$$R''_{13} = R''_{14} = \frac{h_2}{2\lambda_g h_1 l_1}; \quad (5)$$

$$R''_{15} = \frac{l_1}{2\lambda_g h_1 h_2}. \quad (6)$$

Для тепловых потоков $P''_{22}, P''_{23}, P''_{24}$ полное тепловое сопротивление на пути от источника потерь к воздуху будет суммироваться из теплового сопротивления материала щетки и теплового сопротивления материала щеткодержателя:

$$R''_{22} = R''_{22g} + R''_{11}, \quad (7)$$

$$R''_{22g} = \frac{h_1}{2\lambda_g h_2 l_2}; \quad (8)$$

$$R''_{22it} = \frac{h_4}{\lambda_{it} h_2 l_2}. \quad (9)$$

где

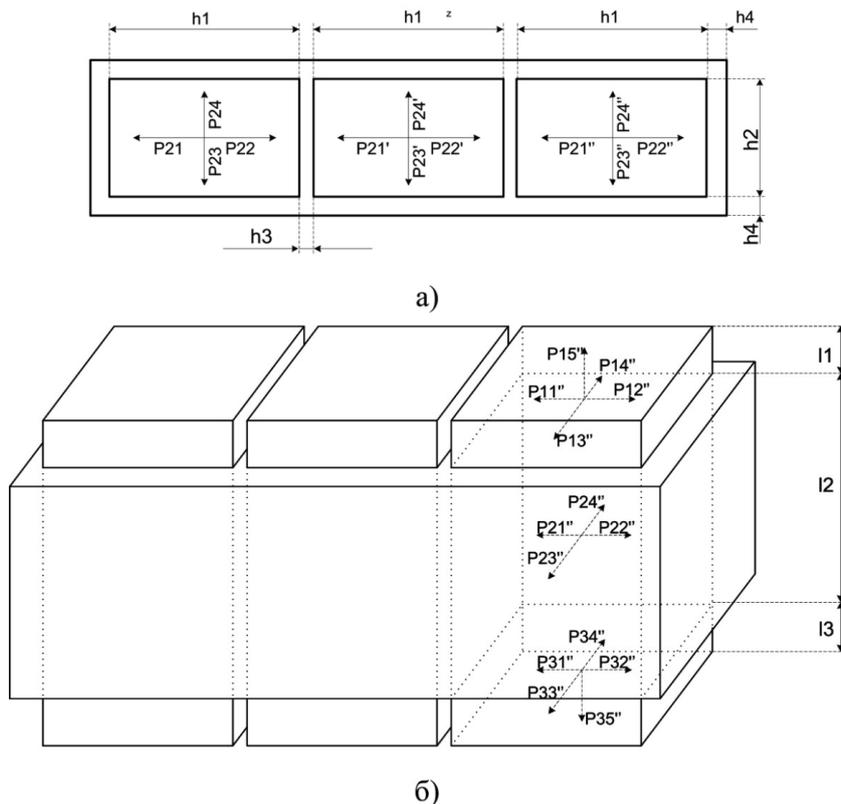


Рис. 2. Теплопроводящая площадь щеток и щеткодержателя:
а) — вид сверху, б) — вид сбоку

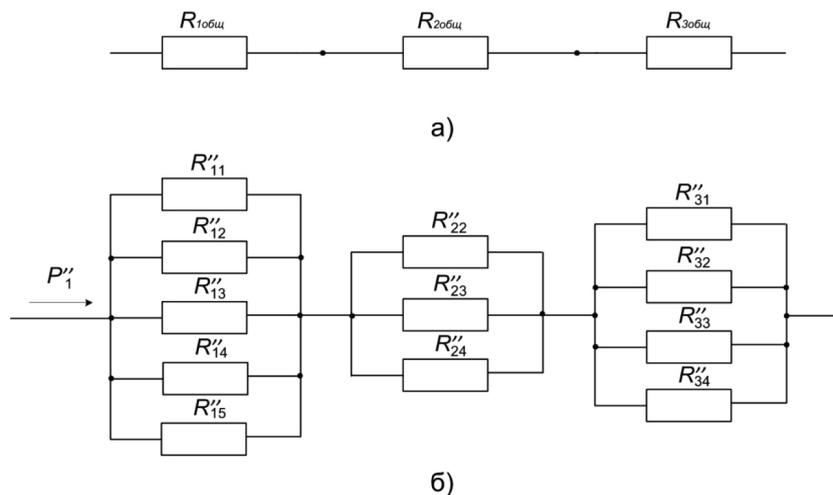


Рис. 3. Соединение тепловых сопротивлений на пути теплового потока от первой и третьей щетки к воздуху через щеткодержатель

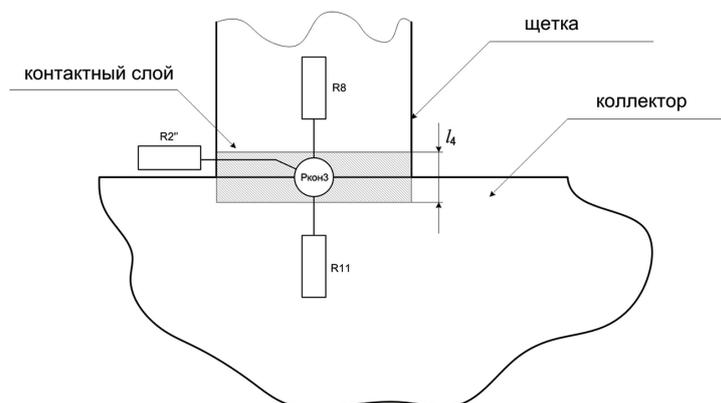


Рис. 4. Тепловая модель зоны контакта

Аналогично находим сопротивления R_{23}'' и R_{24}'' .
Определим $R_{2общ}''$

$$R_{2общ}'' = \frac{1}{\frac{1}{R_{22}''} + \frac{1}{R_{23}''} + \frac{1}{R_{24}''}} \quad (10)$$

Определим $R_{3общ}''$:

$$R_{3общ}'' = \frac{1}{\frac{1}{R_{31}''} + \frac{1}{R_{32}''} + \frac{1}{R_{33}''} + \frac{1}{R_{34}''}} \quad (11)$$

где

$$R_{31}'' = R_{32}'' = \frac{h_1}{2\lambda_g h_2 l_3}; \quad (12)$$

$$R_{33}'' = R_{34}'' = \frac{h_2}{2\lambda_g h_1 l_3}. \quad (13)$$

Для тепловых потоков P_{22}' , P_{21}' полное тепловое сопротивление R_4 и R_5 на пути от источника потерь к щеткодержателю будет суммироваться из теплового сопротивления графита и материала щеткодержателя:

$$R_4 = R_5 = \frac{h_1}{2\lambda_g h_2 l_2} + \frac{h_3}{2\lambda_{II} h_2 l_2}. \quad (14)$$

Зона контакта учитывает три тепловых сопротивления (рис. 4):

1) R_6' , R_7' , R_8' учитывают грань щетки со стороны зоны контакта. Его можно рассчитать по формуле:

$$R_6' = R_7' = R_8' = \frac{l_4}{2\lambda_{gks} h_1 h_2}; \quad (15)$$

где l_4 — толщина контактного слоя, м;

λ_{gks} — коэффициент теплопроводности материала щетки в контактном слое, Вт/(м·°C);

2) R_9' , R_{10}' , R_{11}' учитывают сопротивление зоны контакта со стороны коллектора. Его можно рассчитать по формуле:

$$R_9' = R_{10}' = R_{11}' = \frac{l_4}{2\lambda_{kks} h_1 h_2}; \quad (16)$$

где λ_{kks} — коэффициент теплопроводности материала щетки в контактном слое, Вт/(м·°C);

3) $R_2 = R_2' = R_2''$ учитывают сопротивление перехода контакт–воздух, при этом рассматривается

контактный слой со стороны щетки, так как он взаимодействует с окружающей средой. При этом сопротивления $R_2 = R_2' = R_2''$ состоят из четырехпараллельных тепловых сопротивлений, представляющих собой каждую грань контактного слоя щетки.

$$R_2 = R_2' = R_2'' = \frac{h_1}{2\lambda_{kks} l_4 h_2} + \frac{h_2}{2\lambda_{kks} l_4 h_1}. \quad (17)$$

Тепловое сопротивление коллектора рассчитать сложно ввиду вращения коллектора и наличия миканитовых вставок, которые являются теплоизолятором [6]. В определенный момент времени под щеткой находится постоянная площадь, включающая в себя несколько коллекторных пластин. В расчетах коллектор будем считать медной трубкой с толщиной стенки l_m' равной толщине ламели. Тогда тепловое сопротивление коллектор–воздух определим:

$$R_3 = \frac{l_m'}{\lambda_m S_{кол}}, \quad (18)$$

где l_m' — толщина ламели коллектора, м; λ_m — коэффициент теплопроводности материала коллектора, Вт/(м·°C); $S_{кол}$ — площадь коллектора, м².

$$S_{кол} = a \cdot b \cdot n_{л.кол}, \quad (19)$$

где a , b — ширина и длина ламели коллектора, м; $n_{л.кол}$ — количество ламелей в коллекторе.

Потери в теле щетки $P_{щ}$ и в коллекторной пластине P_k при протекании электрического тока рассчитываются по формулам (20) и (21) соответственно [7].

$$P_{щ} = P_{щ} = P_{щ} = \left(\frac{I_a}{n_{nn}} \right)^2 R_{щ}, \quad (20)$$

где I_a — ток якоря, А; n_{nn} — количество пар полюсов электродвигателя; $R_{щ}$ — электрическое сопротивление щетки.

$$P_k = I_a^2 \cdot R_k, \quad (21)$$

где R_k — электрическое сопротивление коллекторной пластины.

Тепло, выделяемое в зоне контакта, складывается из трех составляющих:

$$P_{конт} = P_{эл.конт} + P_{мех} + P_{g'}, \quad (22)$$

где $P_{эл.конт}$ — потери, связанные с протеканием электрического тока через переходное сопротивление контакта при падении напряжения $\Delta U_{щ}$, Вт; $P_{мех}$ — потери, выделяющиеся в контакте за счет трения; P_g — потери, связанные с искрением в зоне контакта.

$$P_{эл.конт} = \frac{I_a}{n_{пл}} \cdot \Delta U_{щ}, \quad (23)$$

Нажатие на щетку также является влияющим на процесс нагрева параметром. Количество тепла, выделяющегося в контакте за счет трения, определяется по формуле [8]:

$$P_{мех} = \mu P v h_1 h_2, \quad (24)$$

где μ — коэффициент трения; P — сила нажатия на щетку, кг; v — скорость вращения коллектора, об/мин.

В данной работе не учитывается искрение, поэтому $P_g = 0$.

Учитывая параметры КЩУ ЭДП 800, рассчитаем систему (1) в программе MathCAD [9]. Полученные значения представлены в табл. 1.

На испытательной станции завода «Сибэлектропривод» были проведены тепловые испытания двигателя ЭДП-800 в номинальном режиме работы [10]. Измерение температуры элементов КЩУ проводилось бесконтактным способом с помощью тепловизора TESTO 875-1, обработка данных выполнялась в приложении TestoIRsoft (рис. 5).

В результате обработки получили превышение температуры в зоне контакта и коллектора, из-за конструктивной особенности щеткодержателя нет данных по температуре самих щеток. Результаты эксперимента представлены на рис. 6 и в табл. 1.

Разница между данными, полученными в результате расчета и эксперимента, не превышает 10 %, следовательно, можно сделать вывод о том, что вы-

Таблица 1

Превышение температуры элементов КЩУ ЭДП-800

Превышение температуры	Щетка № 1, ΔT_1 , °C	Щетка № 2, $\Delta T_1'$, °C	Щетка № 3, $\Delta T_1''$, °C	Точка контакта щетки № 1, ΔT_2 , °C	Точка контакта щетки № 2, $\Delta T_2'$, °C	Точка контакта щетки № 3, $\Delta T_2''$, °C	Коллектора, ΔT_3 , °C
Расчет	76	76	76	91	97	91	63
Эксперимент	Нет данных	Нет данных	Нет данных	87	95	88	59

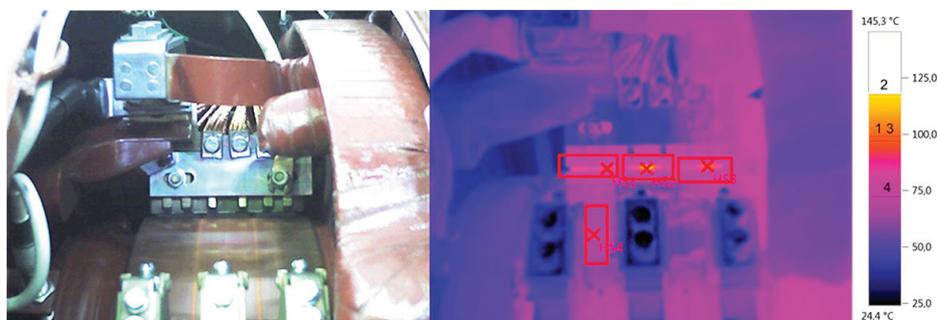


Рис. 5. Термограмма КЩУ ЭДП-800

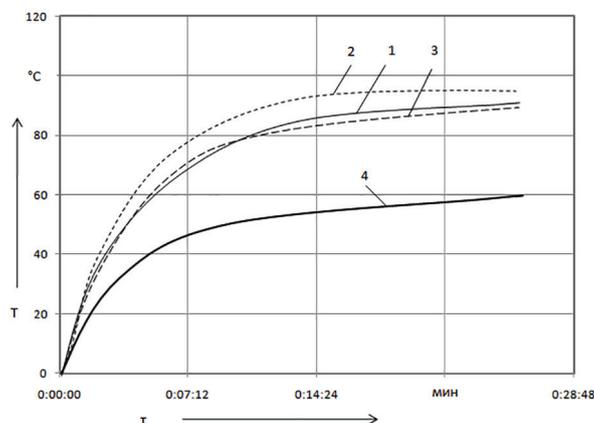


Рис. 6. Превышение температуры в узлах КЩУ ЭДП-800:
1 — точка контакта щетки № 1; 2 — точка контакта щетки № 2; 3 — точка контакта щетки № 3; 4 — коллектора

бранная математическая модель является справедливой для КЩУ ЭДП-800.

Разработанная математическая модель может быть адаптирована для расчета нагрева зоны контакта «щетка – коллектор» и других тяговых электродвигателей. При адаптации потребуются учитывать геометрические параметры элементов коллекторно-щеточного узла, а также теплофизические свойства материалов.

Библиографический список

1. Харламов В. В., Шкодун П. К. Анализ тепловых процессов в КЩУ // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: материалы науч. конф. Омск, 2015. С. 172 – 178.
2. Вегнер О. Г. Теория и практика коммутации машин постоянного тока. Л.: Госэнергоиздат, 1961. 156 с.
3. Хлопцов А. С. Совершенствование методики и средств диагностирования технического состояния коллекторно-щеточного узла машин постоянного тока: дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2016. 154 с.
4. Харламов В. В., Найден С. Н., Стретенцев А. И., Хлопцов А. С. Методика расчета потерь в зоне контакта щетка – коллектор при электродуговом искрении // Вестник Псковского государственного университета. Сер. Технические науки. 2016. № 4. С. 51 – 57.
5. Хлопцов А. С., Байсадыков М. Ф., Найден С. Н. Исследование интенсивности нагрева контакта щетка – коллектор машины постоянного тока // Современные научные исследования: инновации и опыт: материалы XII Междунар. науч.-практ. конф. Екатеринбург, 2015. С. 68 – 71.
6. Авилов В. Д., Бублик В. В. Особенности механических условий контактирования щетки на коллекторе в крупных машинах постоянного тока // Коммутация в тяговых двигателях и других коллекторных машинах: сб. науч. тр. Омск, 1985. С. 47 – 53.
7. Хольм Р. Электрические контакты. М.: Иностранная литература, 1961. 464 с.
8. Лепеш Г. В., Лепеш А. Г. Исследование математической модели процесса высокоскоростного трения и изнашивания // Техничко-технологические проблемы сервиса. 2015. № 2 (32). С. 60 – 66.

9. Очков В. Ф. Mathcad 14 для студентов, инженеров и конструкторов. СПб.: БХВ-Петербург, 2007. 368 с. ISBN 978-5-9775-0129-3.

10. Винарский М. С., Лурье М. В. Планирование эксперимента в технологических исследованиях. Киев: Техніка, 1975. 168 с.

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

SPIN-код: 5093-8463

AuthorID (РИНЦ): 465264

Адрес для переписки: hvv-omgups@mail.ru

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

Адрес для переписки: Sergeynayden@gmail.com.

ХЛОПЦОВ Андрей Сергеевич, кандидат технических наук, инженер кафедры «Автоматика и системы управления».

SPIN-код: 1089-9182

AuthorID (РИНЦ): 674378.

Адрес для переписки: khloptsov@mail.ru.

ПЕТРОВ Павел Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические машины и общая электротехника».

SPIN-код: 9236-9284

AuthorID (РИНЦ): 657888

Адрес для переписки: petrovomgups@mail.ru

Для цитирования

Харламов В. В., Найден С. Н., Хлопцов А. С., Петров П. Г. Математическая модель и методика расчета превышения температуры в узлах коллекторно-щеточного устройства тягового двигателя ЭДП-800 карьерного самосвала БелАЗ в стационарном режиме // Омский научный вестник. 2018. № 2 (158). С. 27 – 32. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-158-27-32.

Статья поступила в редакцию 01.02.2018 г.

© В. В. Харламов, С. Н. Найден, А. С. Хлопцов, П. Г. Петров