

Исследование температурного поля коллектора электрической машины

Н. М. Малышева¹, Н. В. Тимина²

¹кандидат технических наук, доцент кафедры электрических машин и аппаратов, Вятский государственный университет. Россия, г. Киров. E-mail: nm_malysheva@vyatsu.ru
²доцент кафедры электрических машин и аппаратов, Вятский государственный университет. Россия, г. Киров. E-mail: timina@vyatsu.ru

Аннотация. Коллектор и щетки выполняют важные функции в электрической машине, обеспечивают ее работоспособность, определяют ее надежность. Цель исследования – получить картину температурного поля коллектора в стационарном и нестационарном режиме, провести расчетно-теоретический анализ влияния различных факторов на нагрев коллектора. Поставлена задача расчета температурного поля, предложена расчетная область определения температуры коллектора и щеток. Расчет выполнен численным методом конечных элементов. Представлены результаты исследования температурного поля коллектора, проведено исследование влияния щеток на нагрев коллектора в нестационарном режиме, а также потерь в щетках и их охлаждения на тепловой режим коллектора. Результаты можно использовать для расчета коллекторов машин как постоянного, так и переменного тока. Результаты работы можно использовать при исследовании узлов токосъема турбогенераторов, гидрогенераторов и других электрических машин, имеющих скользящие контакты.

Ключевые слова: нагрев, охлаждение, щетка, электрическая машина.

Введение. Коллектор и щетки выполняют следующие основные функции в электрических машинах: обеспечивают передачу электрической энергии со щеток на коллектор и наоборот; участвуют в коммутационном процессе секций и обеспечивают выполнение двух предыдущих функций во время коммутации.

Надежность таких машин во многом определяется надежностью работы щеточно-коллекторного узла. При высоких значениях потерь в скользящем контакте при повышенной плотности тока под щетками и окружной скорости увеличивается нагрев элементов коллектора, контактных колец и щеток. При повышенном нагреве изменяются физико-механические свойства щеток, происходит их температурное расширение, ускоренный износ, повреждение изоляции, нарушение цилиндрической формы и монолитности коллектора, возникают температурные напряжения в элементах контактного устройства и нарушения коммутации.

Метод расчета температуры коллектора представлен в [3, с. 111], расчет температурного поля в стационарном режиме – [1, с. 5–16], в работах не учитывают влияние щеток на нагрев коллектора.

Цель исследования – получить картину температурного поля коллектора в стационарном и нестационарном режиме, провести расчетно-теоретический анализ влияния различных факторов на нагрев коллектора.

На рис. 1 показаны тепловые потоки, от которых зависит нагрев коллектора и щеток.

При расчете температурного поля коллектора следует учесть, что при работе машины в момент времени τ только часть коллекторных пластин находится в контакте со щетками. Время контакта щетки с коллекторной пластиной ограничено периодом коммутации, то есть только в этот период между ними происходит теплообмен. Расчетная область в период коммутации имеет вид, представленный на рис. 2, а в межкоммутационный период – на рис. 3. При этом изменяются дифференциальные уравнения теплопроводности и граничные условия, которые описывают процесс нагревания.

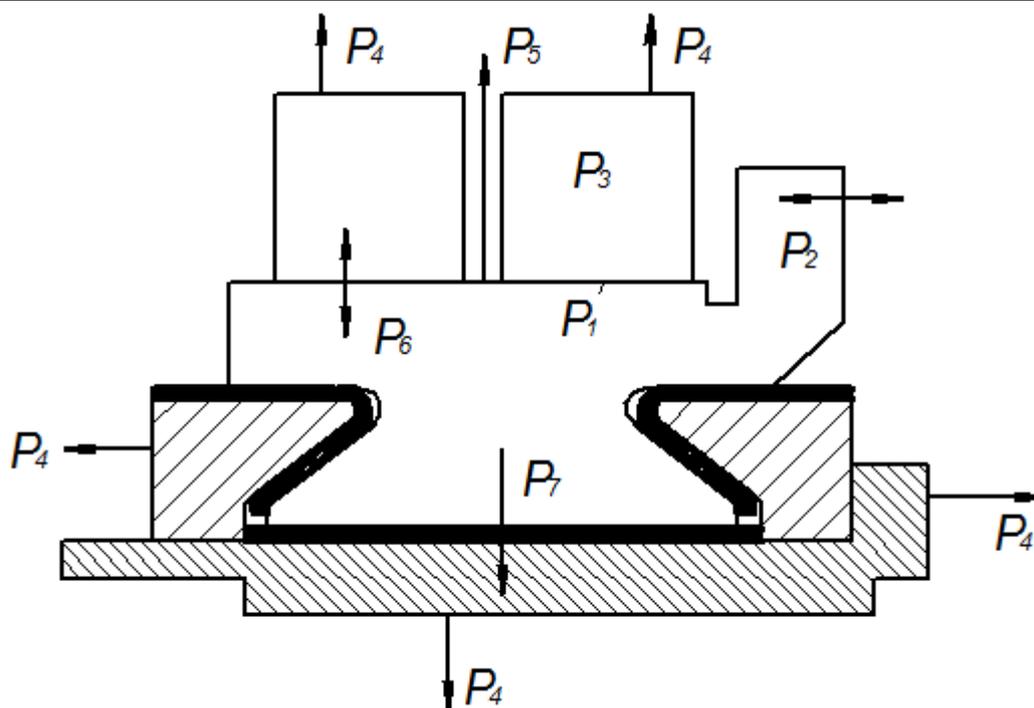


Рис. 1. Тепловые потоки щеточно-коллекторного узла:

P_1 – потери в скользящем контакте; P_2 – тепловой поток между обмоткой якоря и коллектором;
 P_3 – потери в щетках от прохождения электрического тока; P_4 – конвективный тепловой поток;
 P_5 – тепловой поток, обусловленный излучением; P_6 – тепловой поток, обусловленный теплообменом со щетками; P_7 – тепловой поток в элементы крепления

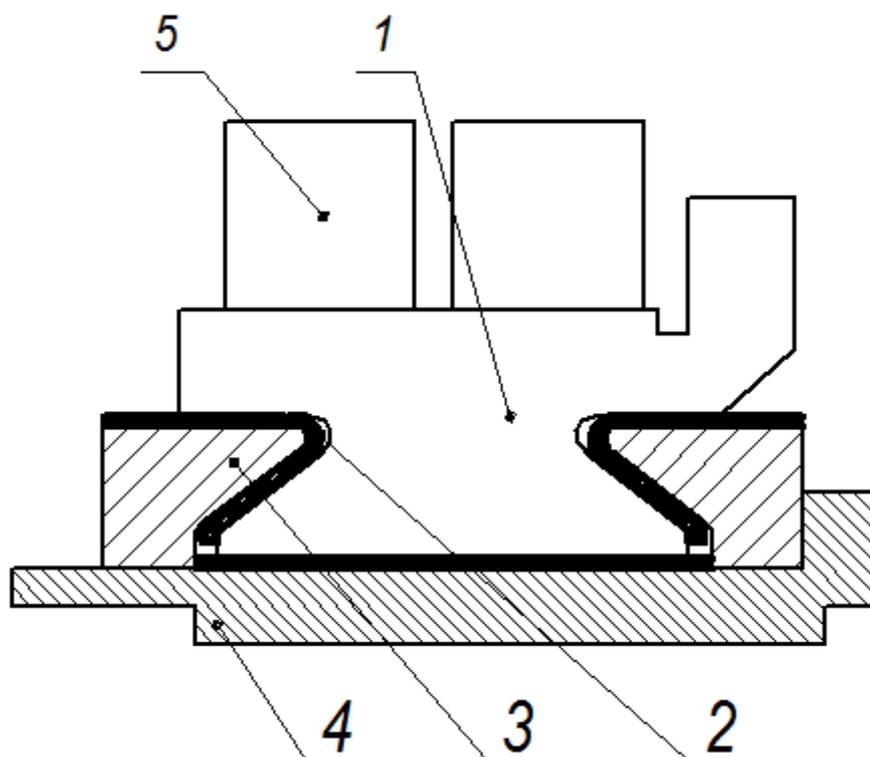


Рис. 2. Расчетная область в коммутационный период: 1 – коллекторная пластина; 2 – корпусная изоляция; 3 – нажимной конус; 4 – втулка; 5 – щетка

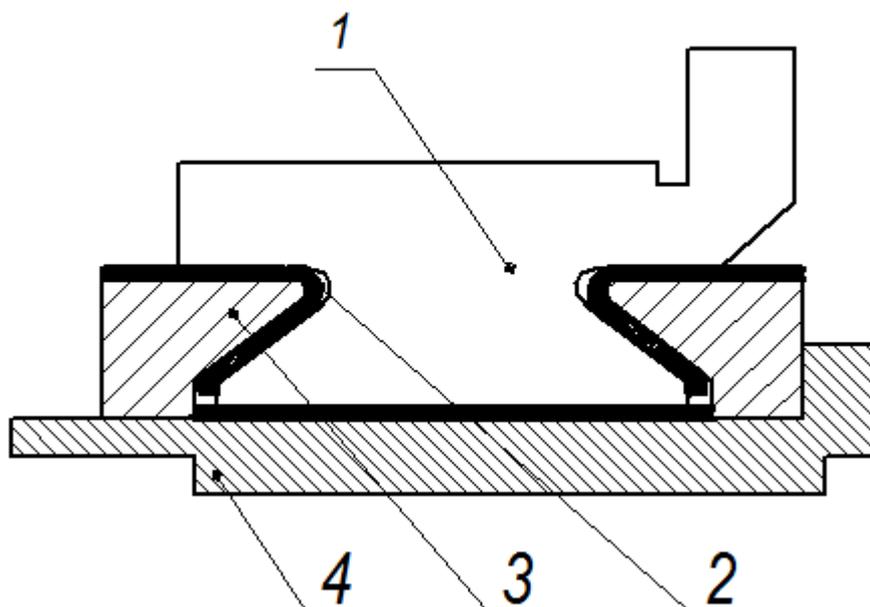


Рис. 3. Расчетная область в межкоммутационный период: 1 – коллекторная пластина; 2 – корпусная изоляция; 3 – нажимной конус; 4 – втулка

Для расчета температурного поля была разработана расчетная область с эквивалентной щеткой, которая находится в непрерывном контакте с коллекторной пластиной, с эквивалентными граничными условиями и эквивалентными потерями. При расчете эквивалентной щетки отражено ее участие в теплообмене с коллекторными пластинами, которое характеризуется ее теплоемкостью, теплопроводностью, потерями и условиями теплообмена с окружающей средой. Размеры эквивалентной щетки рассчитывались по следующим формулам.

Высота щетки рассчитывалась из условия постоянства объема реальной и эквивалентной щетки.

$$hэ = R_{нар} - D_k / 2,$$

$$\text{где } R_{i\dot{\alpha}\dot{\alpha}} = \sqrt{\frac{2pbh}{2} + \left(\frac{D_k}{2}\right)^2},$$

$R_{нар}$ – наружный диаметр расчетной области; D_k – диаметр коллектора; $2p$ – число полюсов, равно количеству щеточных брикетов; b – тангенциальный размер щетки; h – радиальный размер щетки.

В связи с изменением размеров щетки необходимо изменить коэффициент теплообмена верхней поверхности щетки

$$\alpha_{энар} = \frac{\alpha_{щ}pb}{\pi R_{нар}},$$

где $\alpha_{щ}$ – реальный коэффициент теплообмена щетки.

Коэффициент теплообмена боковых поверхностей щетки

$$\alpha_{эбок} = \alpha_{щ} + \alpha_{щ} \cdot K_1,$$

где K_1 – коэффициент для учета теплообмена передней и задней лицевых граней щетки; a – аксиальный размер щетки.

Потери в щетке от прохождения тока определялись по формуле:

$$q_5 = j^2 \gamma,$$

где γ – удельное электрическое сопротивление; j – плотность тока в щетке.

Удельные поверхностные потери в области контакта щетки с коллектором рассчитывались по формуле:

$$P_k' = P_k / (\pi D_k n_{щ} a),$$

где P_k – потери на коллекторе; $n_{щ}$ – количество щеток на брикете.

Расчетная область представлена на рис. 4.

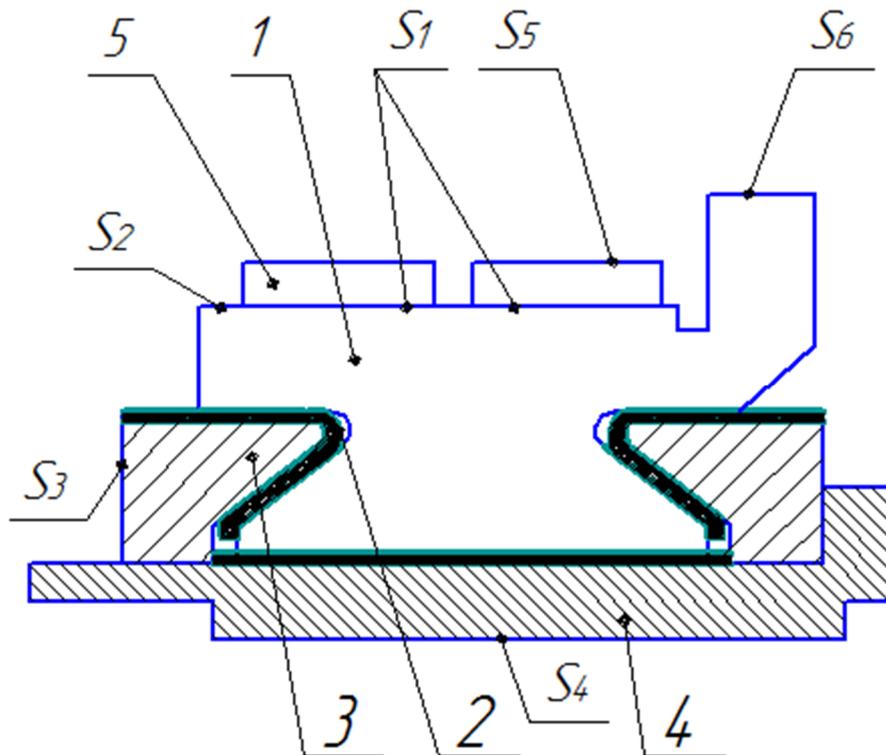


Рис. 4. Расчетная область в коммутационный период: 1 – коллекторная пластина; 2 – корпусная изоляция; 3 – нажимной конус; 4 – втулка; 5 – эквивалентная щетка

Расчет температурного поля сводится к решению системы дифференциальных уравнений относительно превышения температуры T :

$$\begin{cases} c_i \cdot \rho_i \frac{\partial T_i}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial z} \right), i = 1, \dots, 4 \\ c_5 \cdot \rho_5 \frac{\partial T_5}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial z} \right) + q_5 \end{cases}$$

где c – удельная теплоемкость материалов, ρ – плотность, λ – коэффициент теплопроводности, q_5 – потери в щетке.

Граничные условия

$$\begin{aligned} \text{на } S_1 \quad \lambda_1 \left(\frac{\partial T_1}{\partial n} \right)_{S_1} &= -\alpha'_1 \cdot T_{s_1} + p'_k; \quad \text{на } S_2 \quad \lambda_1 \left(\frac{\partial T_1}{\partial n} \right)_{S_2} = -\alpha_1 \cdot T_{s_1}; \\ \text{на } S_3, S_4 \quad \lambda_i \left(\frac{\partial T_i}{\partial n} \right)_{S_i} &= -\alpha_i \cdot T_{s_i}, i=3,4; \quad \text{на } S_5 \quad \lambda_5 \left(\frac{\partial T_5}{\partial n} \right)_{S_5} = -\alpha'_5 \cdot T_{s_5}; \\ \text{на } S_6 \quad \lambda_1 \left(\frac{\partial T_1}{\partial n} \right)_{S_6} &= p_{ei\dot{y}}. \end{aligned}$$

Начальное условие $T_i(r,z,0) = T_0$.

Поставленная задача решена методом конечных элементов.

Для оценки математической модели температурного поля коллектора проведено сопоставление результатов моделирования с экспериментальными данными [2, с. 504].

Результаты исследований. Результаты исследования температурного поля коллектора представлены на рис. 5 и 6.

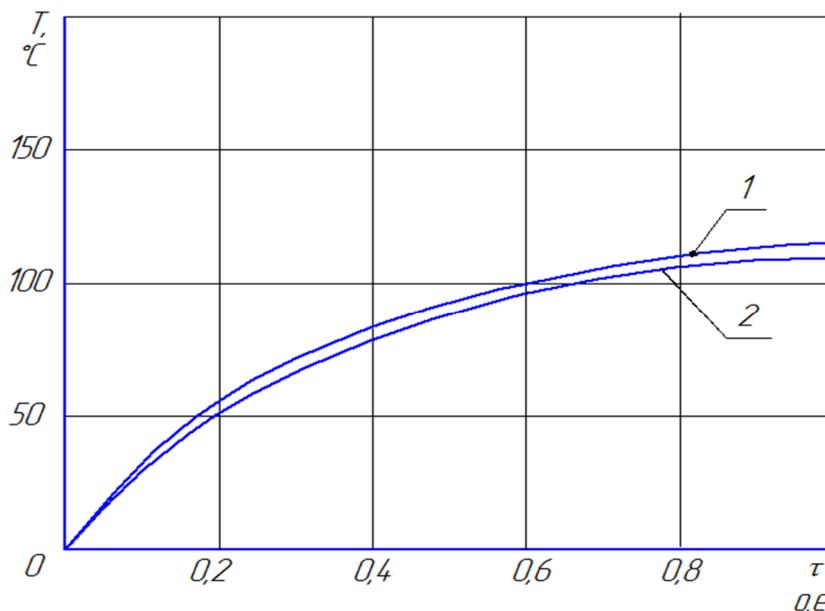


Рис. 5. Нагрев коллектора во времени: 1 – с учетом щетки; 2 – без учета щетки

Результаты расчетов и анализ стационарного температурного поля с учетом влияния щеток на нагрев коллектора представлены в [2, с. 506]. Влияние щетки в нестационарном режиме показано на рис. 5, откуда видно, что щетка ускоряет рост температуры во времени. Влияние щетки на температурное поле коллектора зависит от потерь в ней и условий ее охлаждения. Результаты численных экспериментов представлены на рис. 8. По графикам видно, что при каждом значении потерь в теле щетки есть определенное значение коэффициента теплообмена щетки, при котором тепло, выделившееся в скользящем контакте, отходит в щетку и рассеивается ею в окружающую среду. По данному рисунку можно определить значение установившейся температуры коллектора при различных соотношениях потерь и условий охлаждения щетки.

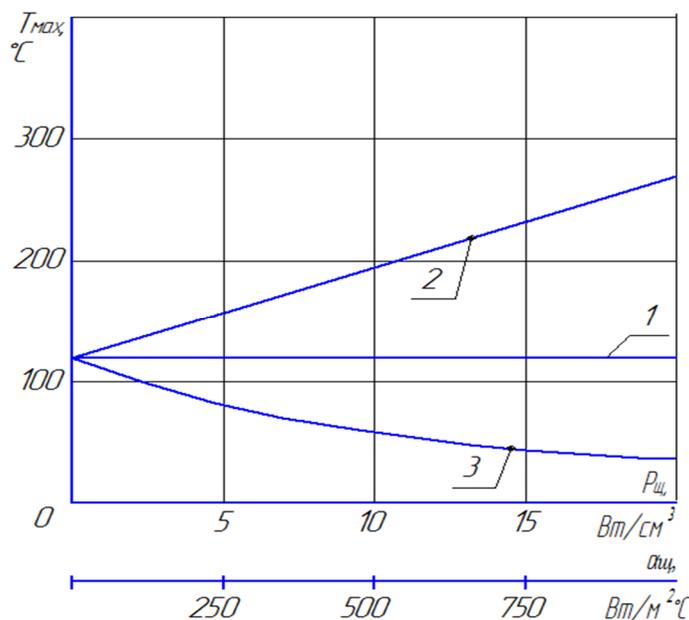


Рис. 6. Влияние потерь в щетке и ее теплоотдачи на нагрев коллектора:
 1 – максимальная температура коллектора без учета влияния щеток;
 2 – расчет при $\alpha_{щ}=0, p_{щ}=var$; 3 – расчет при $p_{щ}=0, \alpha_{щ}=var$

Выводы. Предложена расчетная область определения температуры коллектора и щеток; проведенные исследования показали существенное влияние щеток на нагрев коллектора, особенно при большой плотности тока, когда потери в щетках возрастают. Результаты можно использовать для расчета коллекторов машин постоянного и переменного тока, а также других электрических машин, имеющих скользящие контакты.

Список литературы

1. Дуюн Т. А. Математическое моделирование теплового и напряженно-деформированного состояния коллектора машины постоянного тока : автореф. дис. ... канд. наук. Белгород : БГТУ, 2000. 16 с.
2. Малышева Н. М., Тимина Н. В. Исследование температурного поля коллектора машины постоянного тока // Общество. Наука. Инновации (НПК-2018) : сб. ст. Т. 2. Технические и физико-математические науки. Киров : Изд-во ВятГУ, 2018. С. 550–557.
3. Проектирование электрических машин / под ред. И. П. Копылова. М. : Юрайт, 2015. 766 с.

Investigation of temperature field of a collector of electric machine

N. M. Malysheva¹, N. V. Timina²

¹PhD of technical sciences, associate professor of the Department of electrical machines and apparatus, Vyatka State University. Russia, Kirov. E-mail: nm_malysheva@vyatsu.ru

²associate professor of the Department of electrical machines and apparatus, Vyatka State University. Russia, Kirov. E-mail: timina@vyatsu.ru

Abstract. Collector and brushes perform important functions in an electric machine, ensure its performance, determine its reliability. The purpose of the study is to obtain a picture of the temperature field of the collector in stationary and non-stationary mode, to conduct a theoretical analysis of the influence of various factors on the heating of the collector. The task of calculating the temperature field is set, the calculated area of determining the temperature of the collector and brushes is proposed. The calculation is performed by the numerical finite element method. The results of the study of the temperature field of the collector, the study of the effect of brushes on the heating of the collector in a non-stationary mode, as well as losses in the brushes and their cooling on the heat regime of the collector are represented. The results can be used to calculate the collectors of both direct and alternating current machines. The results of the work can be used in the study of current collector units of turbo generators, hydro generators and other electric machines with sliding contacts.

Keywords: heating, cooling, brush, electric machine.

References

1. Дуюн Т. А. *Matematicheskoe modelirovanie teplovogo i napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya kollektora mashiny postoyannogo toka : avtoref. dis. ... kand. nauk* [Mathematical modeling of thermal and stress-strain state of the collector of a DC machine: abstr. dis. ... PhD]. Belgorod. BSTU. 2000. 16 p.
2. *Malysheva N. M., Timina N. V. Issledovanie temperaturnogo polya kollektora mashiny postoyannogo toka* [Study of the temperature field of the collector of the DC machine] // Society. Science. Innovation (NPK (Scientific and practical conference)-2018): collection of articles. Vol. 2. Technical and physics and mathematical sciences. Kirov. Publ. house of VyatSU. 2018. Pp. 550–557.
3. *Proektirovanie elektricheskikh mashin* – The design of electrical machines / edited by I. P. Kopylov. M. Yurayt. 2015. 766 p.