

КАТЯЩИЙСЯ ТОКОСЪЕМ В МАШИНАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В.Д. Авилов, Д.И. Попов

Омский государственный университет путей сообщения
E-mail: emoe@omgups.ru

Разработан новый способ катящегося токосъема, проведено его теоретическое исследование, изготовлен действующий макетный образец токосъемного устройства, использующего контакт качения.

Значительные трудности при настройке коммутации машин постоянного тока (МПТ) связаны с известными недостатками скользящего контакта щетка-коллектор и его ограниченной коммутающей способностью.

Отсутствие влияния механических факторов, а также разряженной атмосферы или химически агрессивной внешней среды на катящийся токосъем делает его в приведенных условиях весьма перспективным для использования.

Анализ существующих токосъемных устройств (ТУ) для машин постоянного тока, использующих контакт качения, показывает, что все подобные устройства не обладают коммутающей способностью, подобной той, которой обладает скользящий контакт.

В связи с этим, был предложен новый способ катящегося токосъема [1], суть которого заключается в использовании дополнительного звена — катящихся роликов (колец), обеспечивающих электрический контакт между вращающимся коллектором и неподвижными «щетками» (рис. 1).

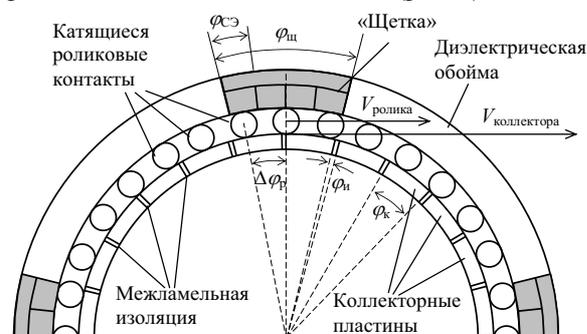


Рис. 1. Токосъемное устройство для МПТ

Для обеспечения коммутающей способности такого устройства его «щетки» должны быть составными с нарастающими сопротивлениями их элементов к сбегающему краю [2, 3].

На рис. 2 приведены характерные примеры зависимостей сопротивлений «щеток» от места контакта с ними для реверсивной (сплошная линия) и нереверсивной машин (пунктирная линия). R_{min} и R_{max} обозначены минимальное и максимальное сопротивления составных элементов (СЭ) «щетки», $b_{щ}$ — ширина «щетки».

Термин «щетки» используется в кавычках, так как в новом устройстве они имеют иное, чем у тра-

диционных графитовых щеток техническое исполнение (могут быть выполнены из металлических пластин, соединенных с резисторами) и иначе функционируют. Увеличение сопротивления контакта «щетки» со сбегающей пластиной обеспечивается не уменьшением площади их взаимного контакта, а увеличением сопротивления крайних СЭ. Приведенная конструкция «щеток» может обеспечить управление коммутающей способностью нового устройства.

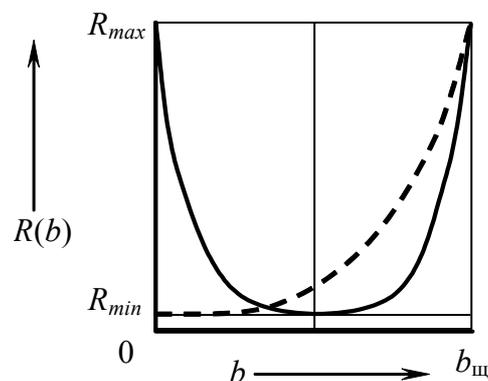


Рис. 2. Сопротивление «щетки» от места контакта с ней ролика

Анализ конструкции нового ТУ позволил определить минимальные значения количества роликов (N_p) и СЭ ($N_{сэ}$), необходимые для обеспечения его работоспособности, связанные с параметрами элементов ТУ следующими соотношениями:

$$\begin{cases} N_p > \frac{360^\circ I_{щ} k}{\varphi_{щ} I_{p, доп}}; \\ N_p > \frac{360^\circ}{\varphi_k}; \\ N_p \approx K(i + 0,5); \\ \left(N_{сэ} > \frac{\varphi_{щ}}{\varphi_i} \right) \text{ или } \left(\frac{\varphi_{щ}}{\Delta\varphi_p} < N_{сэ} < \frac{\varphi_{щ}}{\varphi_i} \right); \\ N_p, N_{сэ} \rightarrow \min, \end{cases} \quad (1)$$

где $I_{щ}$ — ток щетки; k — коэффициент, учитывающий неравномерность загрузки роликов; $I_{p, доп}$ — допустимый по нагреву ток, протекающий через ролик; K — число пластин коллектора; i — любое натуральное число; $\varphi_{щ}$, φ_k , φ_i , $\Delta\varphi_p$ — угловые размеры элементов ТУ по рис. 1.

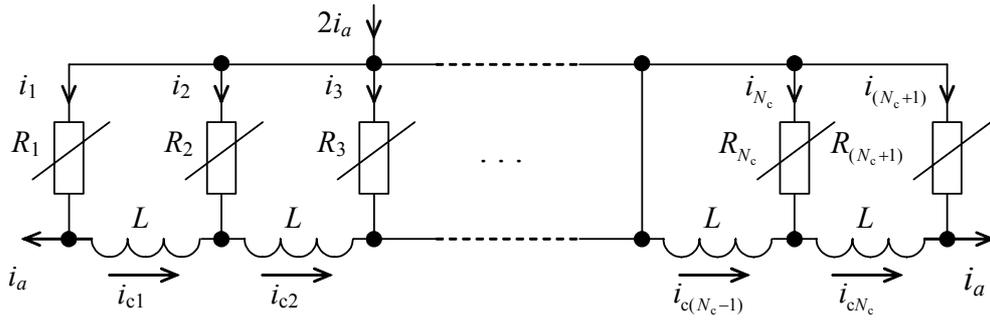


Рис. 3. Схема замещения коммутируемых контуров

Для оценки оптимальности условий коммутационного процесса используем критерий, принимаемый многими ведущими исследователями [4–6], определяемый отсутствием тока в разрывающемся контакте «щеткой» с коллекторной пластиной заблаговременно до окончания коммутации:

$$i_{c6} \approx 0, \quad \frac{di_{c6}}{dt} \approx 0, \quad t \rightarrow T_p, \quad (2)$$

где i_{c6} – ток сбегающего края «щеткой» в момент T_p разрыва контакта; t – время.

Условие (2) может быть проверено по виду кривой тока коммутирующей секции.

В общем случае при любых вариантах щеточно-перекрытия и простой якорной обмотки с двумя параллельными ветвями схема замещения коммутируемых секций будет иметь вид, приведенный на рис. 3.

На рис. 3 введены следующие обозначения: i_a – ток параллельной ветви обмотки якоря; $i_1, i_2, \dots, i_{(N_c+1)}$ – токи, протекающие через контакт «щеткой» с коллекторными пластинами соответствующих номеров; $R_1, R_2, \dots, R_{(N_c+1)}$ – электрические сопротивления протеканию токов $i_1, i_2, \dots, i_{(N_c+1)}$; N_c – число секций, коммутируемых в течение одного рассматриваемого периода; L – индуктивность секции; $i_{c1}, i_{c2}, \dots, i_{cN_c}$ – токи в секциях с соответствующими номерами.

Введем следующие соотношения:

$$t = xT, \quad i_{cj} = 2i_a y_{cj}, \quad E_{Lcp} = L \frac{2i_a}{T}, \quad (3)$$

где x – величина относительного времени; T – время поворота коллектора от положения наиболее раннего возможного замыкания до положения наиболее позднего возможного размыкания коммутируемой секции при различных начальных положениях роликов; $j=1, 2, \dots, N_c$ – номера токов и сопротивлений в схеме замещения; i_{cj} – ток j -ой секции; i_a – ток параллельной ветви обмотки якоря; y_{cj} – величина относительного тока j -ой секции; E_{Lcp} – величина средней за период коммутации ЭДС самоиндукции; L – индуктивность секции.

Если записать для схемы замещения уравнения по законам Кирхгофа и применить подстановки (3), то можно получить следующую систему дифференциальных уравнений с нелинейными коэф-

фициентами, описывающую процесс коммутации:

$$\begin{cases} \frac{dy_{c1}}{dx} = \frac{T}{L} [(y_{c2} - y_{c1})R_2 - (y_{c1} + 1)R_1] + \\ + \frac{E_{к.ср}}{E_{Lcp}} \quad (\text{для } j=1); \\ \frac{dy_{cj}}{dx} = \frac{T}{L} [(y_{c(j+1)} - y_{cj})R_{(j+1)} - (y_{cj} - y_{c(j-1)})R_j] + \\ + \frac{E_{к.ср}}{E_{Lcp}} \quad (\text{для } j=2, 3, \dots, N_c - 1); \\ \frac{dy_{cN_c}}{dx} = \frac{T}{L} [(1 - y_{cN_c})R_{(N_c+1)} - (y_{cN_c} - y_{c(N_c-1)})R_{N_c}] + \\ + \frac{E_{к.ср}}{E_{Lcp}} \quad (\text{для } j=N_c), \end{cases} \quad (4)$$

где $E_{к.ср}$ – величина средней за период коммутации ЭДС, создаваемой полем дополнительных полюсов; $R_1, R_2, \dots, R_{(N_c+1)}$ – электрические сопротивления элементов схемы замещения по рис. 3.

Нелинейность коэффициентов в системе уравнений (4) обусловлена скачкообразным изменением сопротивлений контакта «щеткой» с коллекторными пластинами R_j при появлении и исчезновении катящегося контакта ламели с каждым из СЭ.

Сопротивление контакта «щеткой» с j -ой коллекторной пластиной можно определить из выражения:

$$R_j(x) = \frac{1}{\sum_{i=1}^{N_{сэ}} (\text{КЩР}_{i,j}(x) \cdot Y_{сэ,i})},$$

где $Y_{сэ,i}$ – проводимость i -го СЭ; $\text{КЩР}_{i,j}(x)$ – логическая функция, значение которой равно единице, если есть роликовый контакт между i -ым СЭ и j -ой ламелью, и нулю, если контакта нет.

Логическая функция $\text{КЩР}_{i,j}(x)$ определяется исходя из уравнений движения роликов и краев коллекторных пластин при введении угловой системы координат.

Приведенные теоретические исследования позволили спроектировать и изготовить действующий макет нового токосъемного устройства для серийной машины постоянного тока типа ПБСТ (но-

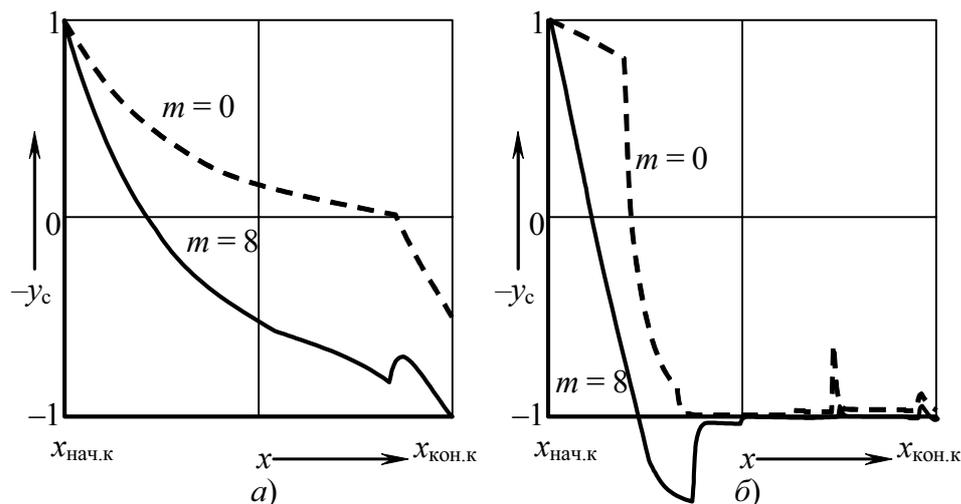


Рис. 4. Кривые тока коммутируемой секции: а) при минимальной продолжительности коммутации, б) при максимальной продолжительности коммутации

минальные мощность 1,2 кВт, напряжение 110 В), взамен установленного на ней ранее щеточного узла. Параметры изготовленного ТУ были получены из соотношения (1) и проверены в математической модели на соответствие критерию оптимальности условий коммутации (2) путем расчета кривых тока секции (рис. 4).

На рис. 4 показаны токи секции при отсутствии ($m = 0$, пунктирная линия) и наличии коммутируемой ЭДС E_k ($m = E_k / E_{Lcp} = 8$, сплошная линия). По виду кривых можно сказать, что разработанная конструкция ТУ может удовлетворять требованиям оптимальности коммутации при определенной настройке машины и, следовательно, может быть использована для создания работоспособного макетного образца.

Предварительно перед изготовлением элементов ТУ был обработан коллектор. Пазы между ламелями были залиты самозатвердевающей при комнатной температуре пластмассой типа протакрил. После затвердевания пластмассы коллектор был проточен на токарном станке, а с его торца снята фаска под углом 45° для обеспечения монтажа ТУ.

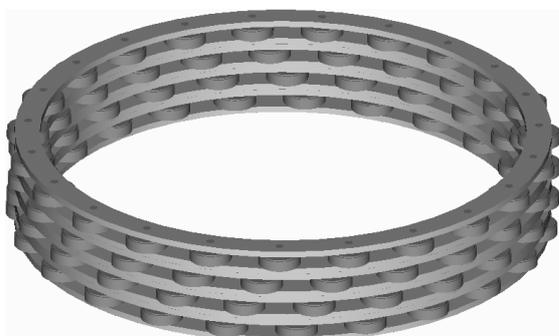


Рис. 5. Ролики, собранные в сепараторы

В связи с высокой стоимостью изготовления роликовых контактов для ТУ, их количество в макете было сведено к минимально необходимому ($N_p = 92$). В качестве роликовых контактов были применены тонкостенные (толщиной стенки 0,2 мм) бронзовые кольца. Они были равномерно размещены по коллектору в четыре ряда и собраны в сепараторы. При этом все ряды равномерно сдвинуты по окружности относительно друг друга (рис. 5).

В макете были использованы «щетки» из шести медных СЭ, изолированных друг от друга и соединенных с резисторами из нихромовой проволоки различной длины, обладающими сопротивлениями:

$$R_i = (0,1; 0,1; 0,9; 8,1; 75; 75) \text{ Ом},$$

где $i = 1, 2, \dots, 6$ номера СЭ от набегающего к сбегающему краю «щетки» (рис. 6).

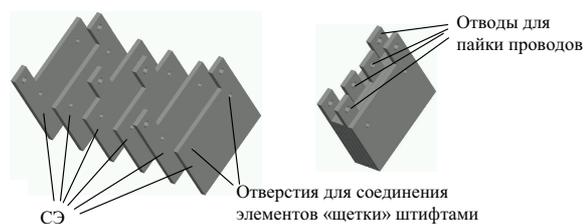


Рис. 6. Конструкция «щетки»

«Щетки» были вклеены в пазы выточенной из текстолита цилиндрической обоймы, ролики вставлены внутрь этой обоймы, и получившаяся конструкция с торца была помещена на коллектор путем постепенной накатки под нажатием (рис. 7).

После сборки ТУ «щетки» были выставлены по линии геометрической нейтрали, а обойма и траверса жестко закреплены.

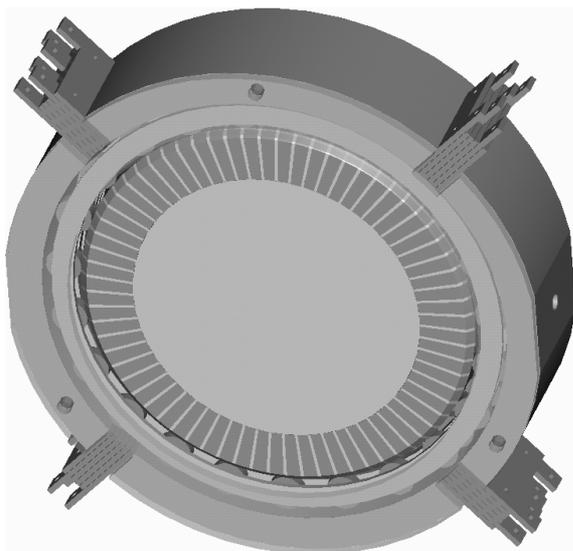


Рис. 7. Токосъемное устройство

Макет электрической машины с разработанным токосъемным устройством был испытан в генераторном и двигательном режимах. При этом была произведена регулировка токовой нагрузки и скорости вращения ТУ.

Результаты проведенного исследования:

1. Разработаны новые технические решения, позволяющие осуществлять катящийся токосъем в МПТ.
2. Определены соотношения параметров элементов ТУ, определяющие минимально необходимые значения количества роликов и СЭ для обеспечения работоспособности машины.
3. Разработана математическая модель, позволяющая получить кривую тока коммутируемой секции при использовании нового токосъемного устройства.
4. Предложен и реализован один из вариантов изготовления элементов ТУ и их последующей сборки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2291531 РФ. МКИ Н02К 13/00. Токосъемное устройство / В.Д. Авилов, М.П. Сергиенко, А.А. Шаров, Д.И. Попов. – № 2005116815/09; Заявлено 01.06.2005. Оpubл. 10.01.2007. Бюл. № 1.
2. Пат. 65309 РФ. МКИ Н02К 13/00. Токосъемное устройство / В.Д. Авилов, Д.И. Попов, П.Г. Петров. – № 2007112148; Заявлено 02.04.2007. Оpubл. 27.07.2007. Бюл. № 21.
3. Авилов В.Д., Попов Д.И. Катящийся токосъем и процесс коммутации в коллекторных электрических машинах // Электромеханические преобразователи энергии: Матер. Междунар. научно-техн. конф. – Томск: Томский гос. тех. ун-т, 2005.
4. Толкунов В.П. Теория и практика коммутации машин постоянного тока. – М.: Энергия, 1979. – 224 с.
5. Вегнер О.Г. Теория и практика машин постоянного тока. – М.: Госэнергоиздат, 1961. – 272 с.
6. Карасев М.Ф. Коммутация коллекторных машин постоянного тока. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 224 с.

Поступила 17.09.2007 г.