

На правах рукописи

ПОПОВ ДЕНИС ИГОРЕВИЧ

РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ КАТЯЩЕГОСЯ ТОКОСЪЕМА
ДЛЯ КОЛЛЕКТОРНЫХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Специальность 05.09.01 –
«Электромеханика и электрические аппараты»

Автореферат диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Томск – 2008

Работа выполнена в Омском государственном университете путей сообщения

Научный руководитель: заслуженный работник транспорта РФ,
доктор технических наук, профессор Авилов Валерий Дмитриевич

Официальные оппоненты:
доктор технических наук, профессор Бекишев Рудольф Фридрихович;
кандидат технических наук Абдрахманова Татьяна Борисовна

Ведущая организация: Омский государственный технический университет.

Защита состоится 24 декабря 2008г. в 15-00 ч. на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.11 при Томском политехническом университете по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского политехнического университета.

Автореферат разослан « 20 » ноября 2008 г.

Ученый секретарь
совета по защите докторских
и кандидатских диссертаций

Дементьев Ю. Н.

Актуальность работы. Коллекторные машины постоянного тока (МПТ), не смотря на свои недостатки, продолжают сохранять позиции в своих традиционных областях применения: металлургия, электрическая тяга и др. Также МПТ находят применение как специальные типы машин в военной и космической технике.

Главным фактором, сдерживающим развитие МПТ, является ряд проблем, связанных с коммутацией. Значительный вклад в исследования данного вопроса внесли такие ученые как М.Ф. Карасев, В.П. Толкунов, О.Г. Вегнер, В.В. Фетисов, А.И. Скороспешкин, В.Д. Авилов, Р.Ф. Бекишев, Р.Г. Идиятуллин, И.Б. Битюцкий, С.И. Качин, В.В. Харламов и др.

Скользкий токосъем в МПТ имеет существенный недостаток: необходимость в постоянном образовании и поддержании политуры на поверхности коллектора. Это обуславливает значительные трудности для применения МПТ в условиях, препятствующих образованию политуры: химически агрессивная внешняя среда, разряженная атмосфера и др. Такие условия встречаются у машин, работающих в химических производствах, в летательных аппаратах, в том числе космических, а также у некоторых специальных машин.

В технике достаточно широко известно применение катящегося токосъема. При его использовании нет необходимости образования политуры, а также возможно обеспечение более надежного электрического контакта и меньшего износа контактирующих элементов.

Основная область применения катящегося токосъема не связана с электрическими машинами, хотя известны токосъемные устройства (ТУ) с катящимся контактом, разработанные для МПТ. Однако известные ТУ для МПТ не обладают коммутирующей способностью, а также имеют другие недостатки. Это обуславливает низкую надежность таких устройств, применяемых в МПТ, значительный уровень создаваемых ими радиопомех и другие проблемы, связанные с неудовлетворительной коммутацией.

Целью диссертационной работы является разработка научных основ создания и совершенствования токосъемного узла, использующего катящийся контакт, для коллекторных машин постоянного тока.

Для реализации поставленной цели сформулированы следующие задачи:

1. Проведение анализа существующей техники, использующей катящийся токосъем.
2. Теоретическое исследование особенностей катящегося токосъема при его использовании в коллекторной МПТ.
3. Разработка на основании проведенных теоретических исследований нового технического решения ТУ для МПТ с катящимся токосъемом.
4. Определение конструктивных параметров элементов нового ТУ, обеспечивающих его работоспособность.

5. Разработка математической модели коммутационного процесса в секции якорной обмотки МПТ с учетом конструктивных параметров нового ТУ.

6. Разработка конструкции, изготовление и испытание макетного образца нового ТУ.

Научная новизна работы состоит в следующем.

1. Теоретически обоснован новый, отличающийся от предыдущих аналогов, принцип осуществления токосъема и коммутации секций якорной обмотки МПТ с использованием катящегося контакта.

2. Выявлены соотношения параметров элементов нового токосъемного устройства, необходимые для обеспечения его принципа работы.

3. Представлена математическая модель коммутационного процесса в секции якорной обмотки МПТ, позволяющая учесть особенности конструкции разработанного устройства.

Новизна предложенных технических решений подтверждена патентами РФ на изобретение (№ 2291531) и полезную модель (№ 65309).

Положения, выносимые на защиту.

1. Новый, отличающийся от предыдущих аналогов, принцип осуществления токосъема и коммутации секций якорной обмотки МПТ с использованием катящегося контакта.

2. Математическая модель коммутационного процесса в секции якорной обмотки МПТ, учитывающая особенности конструкции разработанного устройства.

Методы исследования. Теоретические исследования проведены на основе математического моделирования, анализа сложных электрических цепей, методов теории электрических цепей, теории дифференциальных уравнений. Результаты математического моделирования получены с использованием средств современной вычислительной техники в среде *Mathcad*. Экспериментальные исследования проведены методом непосредственных натурных испытаний макетного образца разработанного устройства.

Достоверность научных положений и результатов диссертационной работы обоснована теоретически и подтверждена результатами испытаний макетного образца ТУ для МПТ с катящимся токосъемом.

Практическая и теоретическая ценность работы заключается в следующем.

1. Разработанные технические решения позволяют применить МПТ в условиях с агрессивной внешней средой, где невозможна работа традиционного скользящего щеточного контакта.

2. Разработанные технические решения позволяют обеспечить и производить регулировку коммутирующей способности токосъемного узла МПТ с катящимся токосъемом.

3. Проведенные теоретические исследования и полученная математическая модель позволяют определить необходимые параметры разработанного ТУ и получить кривую тока коммутируемой секции для различных параметров устройства.

4. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили дать рекомендации по совершенствованию предложенного типа ТУ.

Апробация работы. Основные положения и выводы диссертационной работы обсуждались и были одобрены на двух Международных научно-технических конференциях «Электромеханические преобразователи энергии» в Томском политехническом университете в 2005 и 2007 гг., а также на научно-техническом семинаре ОмГУПС «Повышение эффективности работы железнодорожного транспорта, объектов промышленной теплоэнергетики, телекоммуникационно-информационных систем, автоматики и телемеханики».

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 9 печатных работах, в том числе 7 статей (из них три – в изданиях, определенных ВАК Минобрнауки России), патент на изобретение и патент на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка использованных источников. Общий объем – 136 страниц, в том числе 61 иллюстрация, 2 таблицы, 106 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана краткая характеристика работы, обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, определены научная новизна и научно-практическая значимость работы.

В первом разделе проведен анализ коммутационной проблемы в машинах постоянного тока и существующих способов ее решения. Рассмотрена сущность коммутационного процесса. Проведен анализ взглядов на коммутационную проблему трех научных течений: классической теории коммутации, теории О.Г. Вегнера и теории оптимальной коммутации М.Ф. Карасева. Не смотря на их противоречия, в особенности касающиеся объяснения влияния щетки на коммутационный процесс, все они сходятся в методе анализа условий коммутации: по кривой тока коммутируемой секции.

Исходя из анализа известных научных взглядов был выбран критерий оптимальности условий коммутации, предложенный и обоснованный в работах М.Ф. Карасева, и впоследствии принятый большинством ведущих ученых: *ток сбегającego контакта и производная этого тока по времени в момент разрыва должны быть равными нулю.*

Рассмотрены физические особенности скользящего токосъема и его влияние на степень неидентичности коммутационного процесса, являющейся, по мнению М.Ф. Карасева, одной из главных причин сложности настройки МПТ.

Рассмотрены факторы, определяющие неидентичность коммутации, а также известные методы ее настройки.

Сделаны выводы о перспективах использования в некоторых случаях катящегося токосъема в МПТ.

Во втором разделе проведен анализ существующей техники, использующей катящийся токосъем. Известен ряд токосъемных устройств, использующих катящийся контакт: а) сыпная щетка, предложенная В.С. Платовым и В.Г. Зайчиковым, представляющая собой металлические шарики, помещенные в металлическую обойму и прижимающиеся к коллектору нажимным механизмом; б) катящаяся щетка, используемая для токосъема с контактного кольца (предложена М.Л. Дриздо и др.); в) токосъемное устройство для коллекторной МПТ, использующее две катящиеся щетки, имеющие раздвижку несколько большую ширины межламельной изоляции (предложено Д.Д. Захарченко). Недостаток сыпной щетки – возможность заклинивания шариков. Общий недостаток всех приведенных конструкций – отсутствие у них коммутирующей способности.

Известен ряд токосъемных устройств (предложенных С.М. Кирилловым, Г.А. Цветковой и др.), в которых контакт между двумя соосными цилиндрически-

ми электродами, вращающимися друг относительно друга, обеспечивается зажатými между ними (на 0,1-0,2 мм) металлическими колечками (роликами). В таком устройстве заклинивание роликов исключено.

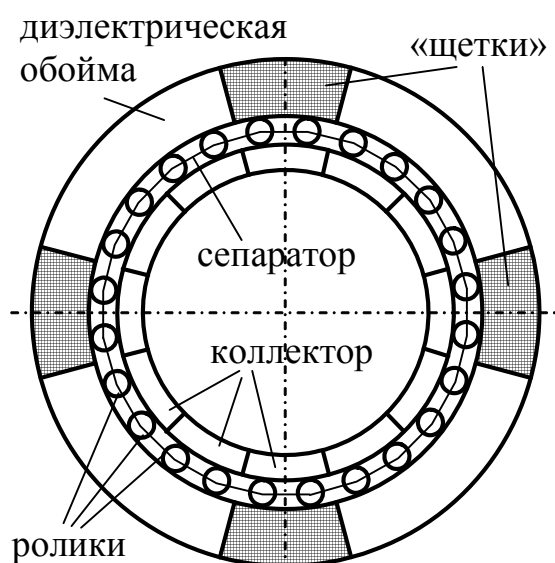


Рисунок 1 – Токосъемное устройство

Для использования идеи такого ТУ в МПТ автором предложено заменить внутренний электрод на гладкий коллектор, а внешний – выполнить в виде нескольких токопроводящих частей – «щеток», разделенных диэлектриком (рисунок 1). «Щетки» должны находиться в тех же местах по окружности коллектора, что и традиционные

графитовые и иметь такую же ширину коммутационной зоны. Данное техническое решение защищено патентом РФ на изобретение № 2291531.

В машине с традиционной щеткой в конце периода коммутации растет сопротивление ее сбегающего края. Это обеспечивает ее коммутирующую способность.

Чтобы осуществить подобный процесс в предложенном ТУ необходимо иметь увеличивающееся контактное сопротивление к сбегающему краю «щетки»,

что будет обеспечивать уменьшение в нем плотности тока. Это является необходимым требованием к ВАХ «щеток», обеспечивающим коммутационную способность такого устройства. Примеры таких зависимостей приведены на рисунке 2.

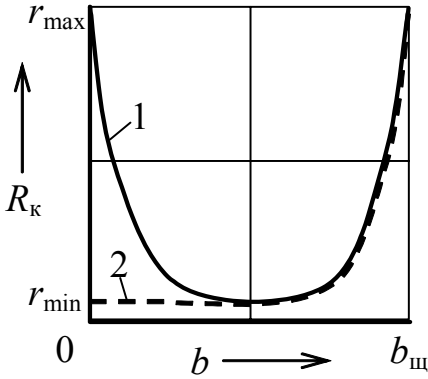


Рисунок 2 – Зависимость контактного сопротивления «щеток» от места контакта

Например, для реверсивной машины можно применить «щетки» с характеристикой, соответствующей кривой 1, которую можно аппроксимировать в виде многочлена:

$$R_k = (r_{\max} - r_{\min}) \left| \frac{2b}{b_{\text{щ}}} - 1 \right|^n + r_{\min}, \quad (1)$$

где R_k – контактное сопротивление, Ом; b – расстояние от набегающего края «щетки» до места контакта, мм; $b_{\text{щ}}$ – ширина «щетки», мм.

Для нереверсивной машины можно применить «щетки» с характеристикой, соответствующей кривой 2. Такую зависимость можно представить в виде следующего выражения:

$$\begin{cases} R_k = r_{\min} & \text{при } 0 \leq b \leq \frac{b_{\text{щ}}}{2}; \\ R_k = (r_{\max} - r_{\min}) \left| \frac{2b}{b_{\text{щ}}} - 1 \right|^n + r_{\min} & \text{при } \frac{b_{\text{щ}}}{2} < b \leq b_{\text{щ}}. \end{cases} \quad (2)$$

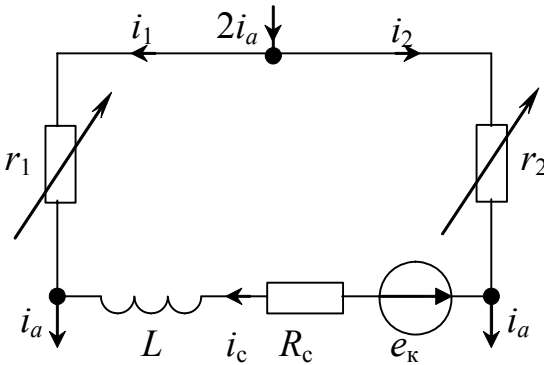


Рисунок 3 – Схема замещения

На основе предложенной конструкции ТУ, требования к ВАХ «щеток», выражений (1) и (2), а также ряда допущений было проведено математическое моделирование коммутационного процесса в секции якорной обмотки МПТ, основанное на известной схеме замещения (рисунок 3). Коммутационный процесс, в такой схеме описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$\frac{dy(x)}{dx} = -2yk(r_1^*(x) + r_2^*(x) + r_c^*) + k(2r_1^*(x) + r_c^*) - m, \quad (3)$$

где $y = i_2/(2i_a)$ – относительный ток сбегающего края «щетки»; $x = t/T$ – относительное время, t – время, с; T – период коммутации, с; $k = RT/(2L)$ – коэффициент уравнения; $r_1^*(x) = r_1(x)/r_{\max}$, $r_2^*(x) = r_2(x)/r_{\max}$ – относительные сопротивления набегающего и сбегающего краев «щетки»; $r_c^* = R_c/r_{\max}$ – относительное сопротивление секции; $m = e_k/E_{Lcp}$ – отношение коммутационной ЭДС к средней за период коммутации реактивной ЭДС.

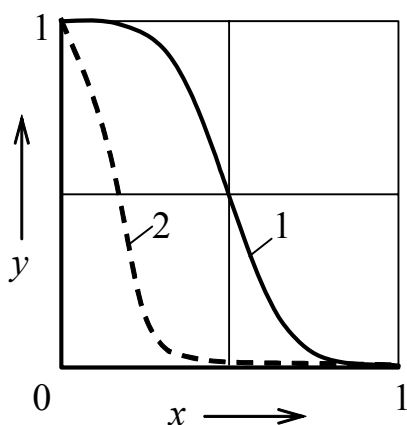


Рисунок 4 – Зависимость относительного тока сбегающего края «щеток» от относительного времени

На примере серийной машины 2ПН при использовании программы *Mathcad* были получены кривые относительного тока сбегающего края «щеток» (рисунок 4). При расчете коммутационная ЭДС принята равной нулю. Кривые сопротивления «щеток» приняты по выражениям (1) и (2) (кривые 1 и 2 соответственно) со следующими параметрами: $n = 3$, $r_{\min} = 0,1 \text{ Ом}$, $r_{\max} = 100 \text{ Ом}$.

В рассчитанном варианте практически выполняются условия оптимальности коммутации, сформулированные в теории М.Ф. Карасева и принятые нами.

Анализ соответствующих кривых 1 и 2 на рисунках 2 и 4 показывает, что увеличение контактного сопротивления сбегающего края «щеток» по отношению к набегающему приводит к значительному ускорению коммутации.

В третьем разделе проведено более детальное теоретическое исследование коммутации в МПТ с предложенным ТУ.

Для обесточивания сбегающего края «щеток» ее необходимо выполнить из составных элементов (СЭ). Тогда увеличение контактного сопротивления к сбегающему краю такой «щетки» достаточно просто обеспечить путем подбора либо материалов с различным удельным сопротивлением, либо сопротивлений резисторов, подключенных к СЭ. При этом характеристика контактного сопротивления «щеток» будет отличаться от характеристик, приведенных на рисунке 2, т.к. будет иметь ступенчатый вид.

Известны щетки, состоящие из элементов с различным сопротивлением (различные конструкции предложены Н.А. Панфиловым, М.Е. Изосимовым и др.). Однако для катящегося токосъема такие щетки ранее не применялись. При использовании их для катящегося токосъема появляется существенное отличие – необходимость изготовления СЭ из твердых токопроводящих материалов (например, металлов) вместо графита. Конструкция ТУ с катящимся токосъемом, использующего составные щетки, защищена патентом РФ на полезную модель № 65309.

Анализ конструкции ТУ с составными «щетками», СЭ которых соединены с резисторами, позволил получить выражения, определяющие необходимые для обеспечения работоспособности такого устройства минимальные числа роликов (N_p) и составных элементов ($N_{СЭ}$):

$$\left\{ \begin{array}{l} N_p > \frac{360^\circ I_{\text{щ}} k_3}{\varphi_{\text{щ}} I_{\text{р.доп}}}; \\ N_p > \frac{360^\circ}{\varphi_{\text{к}}}; \\ N_p \approx K(i + 0,5); \\ \left(N_{\text{сэ}} > \frac{\varphi_{\text{щ}}}{\varphi_{\text{и}}} \right) \text{ или } \left(\frac{\varphi_{\text{щ}}}{\Delta \varphi_{\text{р}}} < N_{\text{сэ}} < \frac{\varphi_{\text{щ}}}{\varphi_{\text{и}}} \right); \\ N_p, N_{\text{сэ}} \rightarrow \min, \end{array} \right. \quad (4)$$

где $I_{\text{щ}}$ – ток щетки, А; k_3 – коэффициент, учитывающий неравномерность загрузки роликов током, $k_3 \in \left[1; \frac{I_a N_p \varphi_{\text{щ}}}{I_{\text{щ}} 360^\circ} \right]$; $I_{\text{р.доп}}$ – допустимый по нагреву ток, протекающий через ролик, А; K – число пластин коллектора; $i = 1, 2, 3, \dots$ – любое натуральное число; $\varphi_{\text{щ}}$, $\varphi_{\text{к}}$, $\varphi_{\text{и}}$, $\Delta \varphi_{\text{р}}$ – угловые размеры «щетки», коллекторной пластины, межламельной изоляции, расстояния между соседними роликами, $^\circ$.

Для наглядности математического описания коммутационного процесса произведем условное геометрическое преобразование рассматриваемых элементов МПТ. Без учета взаимной индукции одновременно коммутируемых секций и при четном числе роликов в машине с волновой обмоткой и четырьмя полюсами достаточно рассмотреть следующий фрагмент (рисунок 5).

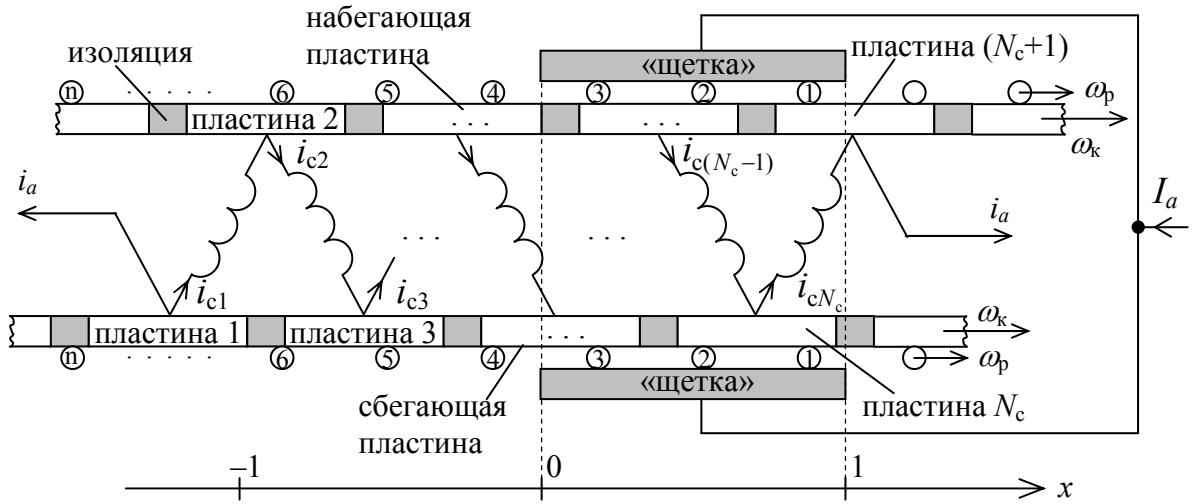


Рисунок 5 – Фрагмент развернутой схемы МПТ с новым ТУ

На рисунке 5 приведены две «щетки» одной полярности. Траектории движения роликов, поверхности «щеток» и коллектора развернуты и параллельны введенной оси $0x$. Нижняя часть рисунка отображена слева направо.

При введенных оси координат и нумерации элементов ТУ (см. рисунок 5) достаточно просто найти уравнения движения этих элементов для заданной скорости вращения якоря.

При петлевой обмотке и любом числе главных полюсов машины достаточно рассмотреть одну «щетку» и соответственно один ряд роликов и одну часть коллектора с якорной обмоткой, находящуюся под этой «щеткой». При этом принцип нумерации элементов ТУ не изменится. Следовательно, уравнения движения роликов останутся те же, что и для верхнего ряда в предыдущем случае. Не изменятся и координаты СЭ. Изменятся лишь уравнения движения ламелей, что достаточно просто учесть.

Уравнения движения роликов:

$$\begin{cases} P_{vi}(x) = 1 - x_{p0в} - (i-1)\Delta x_p + \frac{x}{2K_d}; \\ P_{hi}(x) = 1 - x_{p0н} - (i-1)\Delta x_p + \frac{x}{2K_d}, \end{cases} \quad (5)$$

где P_{vi} , P_{hi} – координаты i -ых роликов верхнего и нижнего рядов; $x_{p0в}$, $x_{p0н}$ – смещение первых роликов верхнего и нижнего рядов влево от правого края «щеткой»; $K_d = 1 + D_p/D_k$ – коэффициент, учитывающий отношение диаметров роликов и коллектора.

Координата левого края i -ой коллекторной пластины:

$$K_{li}(x) = \begin{cases} x + \frac{(x_k + x_n)}{2}(i - N_{с.вс}) - x_k, & \text{если обмотка волновая;} \\ x + (x_k + x_n)(i - N_{с.вс}) - x_k, & \text{если обмотка петлевая,} \end{cases} \quad (6)$$

где $N_{с.вс}$ – число секций, которые вступят в коммутацию после момента начала и до момента ее завершения.

Координата правого края i -ой коллекторной пластины:

$$K_{pi}(x) = K_{li}(x) + x_k. \quad (7)$$

Координаты левого и правого краев j -х составных элементов:

$$\Pi_{lj} = \frac{j-1}{N_{сэ}}, \quad \Pi_{pj} = \frac{j}{N_{сэ}}. \quad (8)$$

Для обоих рассмотренных случаев обмоток схема замещения известна и приведена на рисунке 6.

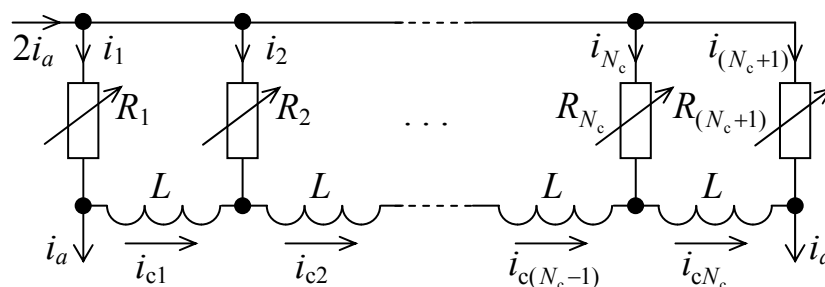


Рисунок 6 – Схема замещения коммутируемых контуров

Для представленной схемы замещения можно получить следующую систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dy_{c1}}{dx} = \frac{T}{L} [(y_{c2} - y_{c1})R_2 - (y_{c1} + 1)R_1] + \frac{E_{к.ср}}{E_{Lср}} \text{ (для } i = 1); \\ \frac{dy_{ci}}{dx} = \frac{T}{L} [(y_{c(i+1)} - y_{ci})R_{(i+1)} - (y_{ci} - y_{c(i-1)})R_i] + \frac{E_{к.ср}}{E_{Lср}} \text{ (для } i = 2, 3, \dots, N_c - 1); \\ \frac{dy_{cN_c}}{dx} = \frac{T}{L} [(1 - y_{cN_c})R_{(N_c+1)} - (y_{cN_c} - y_{c(N_c-1)})R_{N_c}] + \frac{E_{к.ср}}{E_{Lср}} \text{ (для } i = N_c), \end{cases} \quad (9)$$

где y_{ci} – относительный ток i -ой секции; R_i – сопротивления контакта «щеток» с i -ой коллекторной пластиной (см. рисунок 6), Ом; $E_{к.ср}$ – средняя за период коммутующая ЭДС, В.

Сопротивление контакта «щеток» с i -ой коллекторной пластиной R_i можно определить из следующего выражения, Ом:

$$R_i(x) = \frac{1}{\sum_{j=1}^{N_{сэ}} (КЩР_{i,j}(x) \cdot Y_{сэj})}, \quad (10)$$

где $Y_{сэj}$ – проводимость j -го СЭ, Ом⁻¹; $КЩР_{i,j}(x)$ – логическая функция, значение которой единица, если есть роликовый контакт между j -ым СЭ и i -ой ламелью, и ноль, если – нет.

Функцию $КЩР(x)$ можно получить из уравнений движения элементов ТУ (5)-(8), например, в программе *Mathcad*, используя элементы алгебры логики.

Результаты проведенного в третьем разделе теоретического исследования использованы при проектировании ТУ с параметрами, обеспечивающими током с коллектора.

В четвертом разделе приведены результаты проектирования, создания и испытания макетного образца нового ТУ с катящимся токосъемом.

Макет нового ТУ выполнен на основе серийной машины ПБСТ мощностью 1,2 кВт.

Предварительно по выражению (4) рассчитаны минимально необходимые числа роликов и СЭ.

Исходя из технической возможности изготовления роликов для ТУ, их число было принято равным 92 – немного больше минимально необходимого (88 шт.) – для учета возможных технологических отклонений размеров коллектора и элементов макета. Число СЭ было принято равным шести (минимально необходимое число равно трем) для обеспечения больших возможностей при задании кривых контактного сопротивления «щетоков».

Для принятых параметров макета ТУ по выражению (9) рассчитаны кривые тока коммутируемой секции для номинального режима работы машины при

различных расположениях роликов в начальный момент времени, соответствующих: а – минимальной и б – максимальной продолжительности коммутации (рисунок 7). Кривые 1 рассчитаны при отсутствии коммутирующей ЭДС, кривые 2 – при оптимально подобранной величине коммутирующей ЭДС.

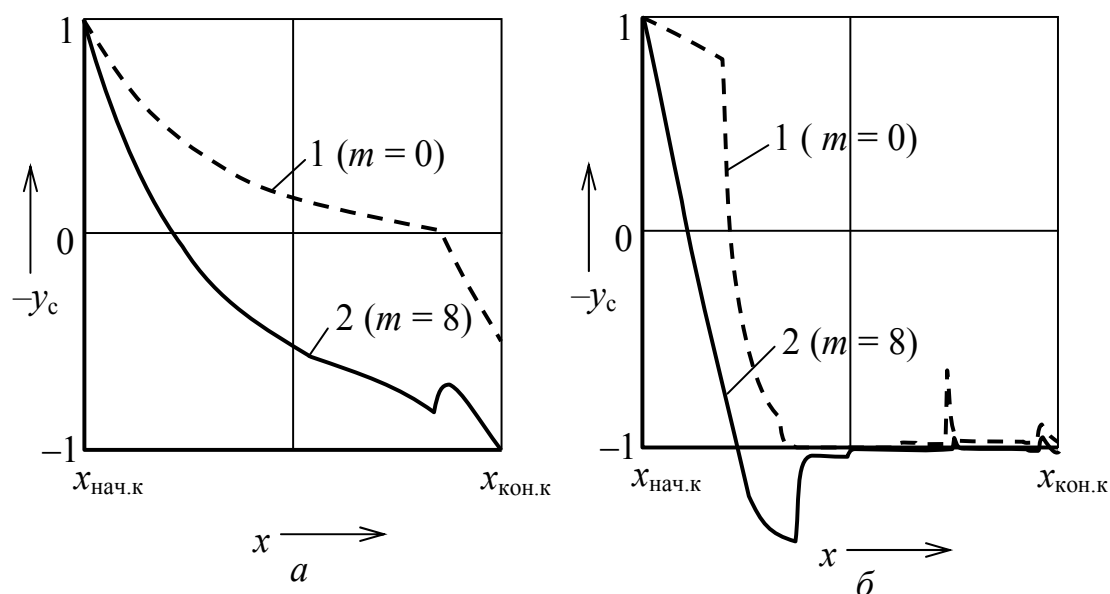


Рисунок 7 – Расчетные кривые тока коммутируемой секции при принятых параметрах макета токосъемного устройства

Из расчетных кривых видно, что в данном случае при отсутствии поля добавочных полюсов (ДП), коммутирующей способности «щеток» не достаточно для безыскровой работы машины. Однако при увеличении поля ДП можно добиться оптимальной настройки машины.

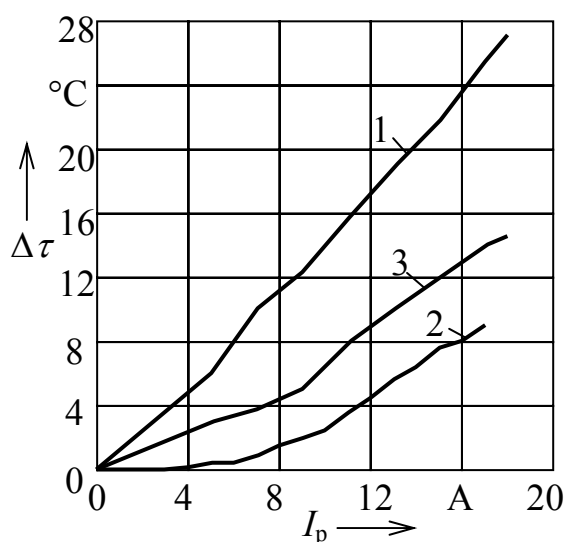


Рисунок 8 – Зависимость превышения температуры ролика над температурой воздуха от тока ролика

Для проверки роликов на нагрев снята зависимость превышения температуры ролика над температурой окружающего воздуха (равной 23 °С) от протекающего по ролику тока (рисунок 8).

Приведенные кривые соответствуют различному прижатию ролика электродами в неподвижном состоянии. Кривая 1 получена при контакте недеформированного ролика с электродами, 2 – при деформации 0,1 мм – близкой к той, что имеет ролик, помещенный в ТУ, 3 – при той же деформации, но ролик поставлен на ребро. По

рисунку 8 видно, что даже один ролик при минимальной контактной поверхности (кривая 1) способен без значительного перегрева пропускать ток, на много превышающий номинальный для выбранной машины, равный 13 А.

Перед изготовлением ТУ поверхность коллектора была приведена к гладкой цилиндрической форме. Для этого пазы между ламелями залиты пластмассой, после чего коллектор проточен на токарном станке.

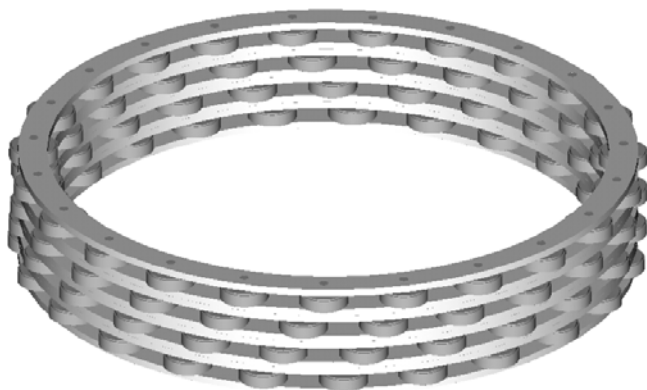


Рисунок 9 – Роликовый узел

В качестве роликовых контактов применены кольца из бериллиевой бронзы марки БрБ2 с толщиной стенки 0,2 мм. Кольца поровну разделены на четыре части, которые размещены в четырех сепараторах, равномерно сдвинутых по окружности относительно друг друга и скрепленных между собой (рисунок 9).

«Щетки» выполнены из медных СЭ, изолированных друг от друга и соединенных с резисторами сопротивлением (0,1 – 75) Ом. Сопротивление на набегающем крае (0,1 Ом) принято примерно равным сопротивлению графитовой щетки, изначально использовавшейся в данной машине. «Щетки» вклеены в пазы выточенной из текстолита обоймы. Роликовый узел помещен внутрь обоймы, а с торца закрыт крышкой из стеклопластика.

Получившаяся конструкция с торца надвинута на коллектор (рисунок 10). «Щетки» выставлены на геометрической нейтрали, а обойма и траверса жестко закреплены.



Рисунок 10 – Макет токосъемного устройства

Электрическая машина с установленным в ней макетом ТУ испытана в генераторном и двигательном режимах. Цель экспериментальных исследований заключалась в оценке: а) работоспособности предложенного конструктивного решения; б) плавности вращения якоря; в) характера контактирования роликов с элементами «щетки»; г) влияния тока подпитки на распределение тока по элементам «щетки».

Для этого собрана специальная испытательная установка, снабженная первичными преобразователями токов элементов «щетке», якоря и других параметров нагрузки. Информация с преобразователей передавалась и обрабатывалась на ЭВМ.

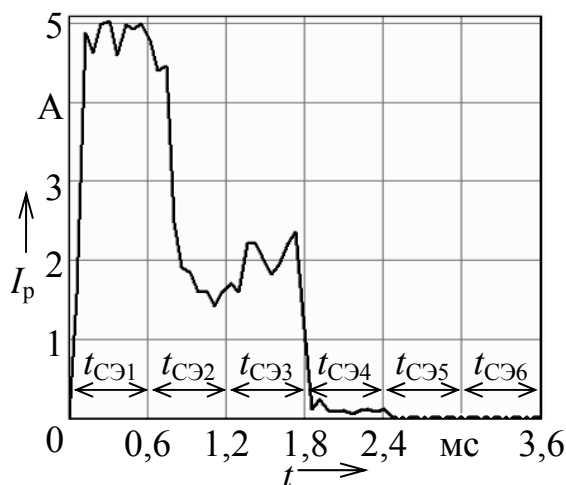


Рисунок 11 – Осциллограмма тока ролика

Последовательное изображение на одном графике импульсов токов в СЭ с учетом временных сдвигов дает ток ролика за время его прохода по «щетке», а также характер распределения тока по ее ширине, что иллюстрирует коммутирующую способность «щетке». Одна из наиболее характерных осциллограмм, полученных таким образом, приведена на рисунке 11, где $t_{CЭj}$ – время контактирования ролика с j -ым СЭ.

Экспериментально установлено, что изменение намагничивающей силы ДП приводит к перераспределению тока между СЭ, что находится в полном соответствии с расчетами, и показывает на возможность настройки коммутации традиционным способом – изменением коммутирующего поля ДП.

В процессе математического моделирования, а также при проектировании, создании и испытании макета ТУ обозначились вопросы, которые необходимо решить при продолжении данных исследований: а) оптимизация конструктивных параметров ТУ: числа роликов и СЭ, размеров элементов ТУ; б) совершенствование технических решений некоторых узлов ТУ; в) определение оптимальных материалов для элементов ТУ; г) определение оптимальных методов инструментальных исследований коммутации в МПТ с новым ТУ; д) проведение исследований по оценке ресурса ТУ и степени влияния на него различных факторов: числа роликов, особенностей крепления роликового узла и каждого ролика в отдельности, степени сжатия роликов, применяемых материалов, смазки контактных поверхностей и др.; е) разработка оптимальной технологии изготовления и сборки ТУ. Разработка перечисленных направлений также позволит дать оценку экономической эффективности использования нового ТУ в МПТ.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведен анализ коммутационной проблемы. В процессе анализа рассмотрены физические механизмы протекания коммутационного процесса, приведены известные способы его улучшения. В результате проведенного анализа предложено заменить в машинах постоянного тока скользящий способ токосъема, имеющий ряд недостатков, во многом обуславливающих коммутационные проблемы, на катящийся токосъем.

2. Выявлены недостатки существующих устройств, использующих катящийся токосъем, и предложен принципиально новый вариант катящегося токосъема для применения в машинах постоянного тока, обладающий коммутирующей способностью.

3. Проведено теоретическое исследование коммутационного процесса в секции якорной обмотки машины постоянного тока, использующей предложенный вариант катящегося токосъема.

4. Анализ решений разработанной математической модели доказал возможность влияния на кривую тока коммутируемой секции путем задания вольтамперной характеристики «щетке» аналогичного влиянию поля добавочных полюсов.

5. На основании проведенного анализа разработаны новые технические решения для токосъемного устройства машины постоянного тока, использующего контакт качения.

6. Получены выражения для расчета необходимых параметров предложенного токосъемного устройства с катящимся токосъемом, обеспечивающих его работоспособность.

7. Разработана математическая модель коммутационного процесса в машине постоянного тока с новым токосъемным устройством, учитывающая: а) диаметры траекторий вращения центров катящихся контактов и поверхности коллектора, б) случайное расположение катящихся контактов в начальный момент коммутации, в) ступенчатый характер изменения контактного сопротивления составной «щетке» катящемуся контакту, г) ширину межламельной изоляции, д) использование щеточного перекрытия больше единицы, е) возможность расчета как простой петлевой обмотки при любом числе пар полюсов, так и простой волновой при числе полюсов равном двум.

8. Разработан, изготовлен и испытан макетный образец токосъемного устройства с катящимся токосъемом для серийной машины ПБСТ на основании полученных необходимых соотношений параметров элементов токосъемного устройства, а также результатов математического моделирования коммутационного процесса.

9. Наиболее перспективным представляется использование разработанного принципа токосъема в специальных электрических машинах небольшой мощности с ограниченным (коротким) сроком службы, предназначенных для работы в условиях, где невозможна работа машины с традиционными графитовыми щетками.

10. Сформулированы рекомендации по улучшению конструкции токосъемного устройства и определены направления дальнейших исследований катящегося токосъема, которые могли бы расширить предполагаемую область его применения.

Основное содержание работы отражено в следующих публикациях:

1. П о п о в Д. И. О возможности использования катящегося контакта в коллекторно-щеточном аппарате машин постоянного тока / Д. И. П о п о в // Совершенствование устройств подвижного состава, электроснабжения, автоматики и связи железнодорожного транспорта: Сб. науч. статей аспирантов университета / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2004. Выпуск 5. С. 22-27.

2. А в и л о в В. Д. Катящийся токосъем и процесс коммутации в коллекторных электрических машинах / В. Д. А в и л о в, Д. И. П о п о в // Электромеханические преобразователи энергии: Материалы международной науч.-техн. конф., 20-22 октября 2005 г., Томск: ТПУ 2005 г.

3. П о п о в Д. И. Перспективы использования катящегося контакта в коллекторных электрических машинах / Д. И. П о п о в // Электромагнитные процессы в электромеханических преобразователях энергии: Межвуз. темат. сб. науч. тр. / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2006. С. 11-16.

4. Пат. 2291531 Россия, МКИ Н 02 К 13/00. Токосъемное устройство / В. Д. А в и л о в, М. П. С е р г и е н к о, А. А. Ш а р о в, Д. И. П о п о в (Россия). – № 2005116815/09; Заявлено 01.06.2005. Оpubл. 10.01.2007. Бюл. № 1.

5. Пат. 65309 Россия, МКИ Н 02 К 13/00. Токосъемное устройство / В. Д. А в и л о в, Д. И. П о п о в, П. Г. П е т р о в (Россия). – № 2007112148; Заявлено 02.04.2007. Оpubл. 27.07.2007. Бюл. № 21.

6. А в и л о в В. Д. Макет машины постоянного тока с катящимся токосъемом / В. Д. А в и л о в, Д. И. П о п о в // Электромеханические преобразователи энергии: Материалы международной науч.-техн. конф., 17-19 октября 2007 г., Томск: ТПУ 2007 г., С. 24-26.

7. А в и л о в В. Д. Катящийся токосъем в машинах постоянного тока / В. Д. А в и л о в, Д. И. П о п о в // Известия Томского политехнического института. 2007. № 4. С. 123-126.

8. А в и л о в В. Д. Определение оптимальных параметров коллекторно-роликового узла машины постоянного тока / В. Д. А в и л о в, Д. И. П о п о в // Известия ВУЗов. Электромеханика. 2008. № 4. С. 13-15.

9. А в и л о в В. Д. Коммутация в машинах постоянного тока с катящимся токосъемом / В. Д. А в и л о в, Д. И. П о п о в // Электротехника. 2008. № 7. С. 18-22.

Личный вклад соискателя

Публикации [1] и [3] выполнены без соавторов. В публикациях [2], [7] и [9] соискателем разработана математическая модель и проведено математическое моделирование коммутационного процесса при различных параметрах коммутируемого контура (70 %), в [6] изготовлен и испытан макет нового токосъемного устройства (70 %), в [8] определены конструктивные параметры элементов нового ТУ, обеспечивающие его работоспособность (70 %), в [4] и [5] теоретически обоснованы конструктивные решения новых устройств и описаны их принципы действия (30 %).