

Защита тяговых двигателей от круговых огней



Р. Я. Сулейманов,
канд. техн. наук, доцент
кафедры «Электрические
машины» Уральского
государственного
университета путей
сообщения

Подвижной состав железных дорог оснащен двигателями постоянного тока, обладающими широкими возможностями. Слабым местом этих двигателей является коллекторно-щеточный аппарат, под щетками которого возникает коммутационное искрение. Исследователи занимаются вопросами улучшения коммутации с момента появления коллекторных машин. Результаты успешных испытаний подтверждают эффективность применения шихтованных щеток, изготовленных из отдельных пластин щеточного материала, склеенных электроизоляционным клеем.

Современный подвижной состав железных дорог и городской электрический транспорт в подавляющем большинстве случаев оснащены коллекторными тяговыми двигателями постоянного тока последовательного возбуждения. Эти двигатели обладают повышенным пусковым моментом, режимы их работы просты в управлении. При импульсном регулировании они приобретают способность переходить в режим рекуперативного или реостатного торможения практически во всем диапазоне реализуемых скоростей [1–6].

Тяговый привод аккумуляторного электровоза Ленметрополитена, оснащенный импульсным регулятором, осуществляет торможение при независимом возбуждении под контролем системы автоматического управления по алгоритму поддержания заданного значения тормозного усилия.

В то же время общепризнано, что слабым местом двигателей постоянного тока является узел коммутации — коллекторно-щеточный аппарат. При больших токовых нагрузках, применении глубоких ослаблений возбуждения, в нестационарных режимах работы наблюдается повышенное искрение под щетками. В определенных условиях щеточное искрение может развиваться в круговой огонь на коллекторе между щетками противоположной полярности или в дуговой разряд на заземленные части. Последствия для машины носят катастрофический характер.

Теория и практика улучшения процесса коммутации привлекала внимание исследователей с момента создания коллекторных двигателей постоянного тока. Большой вклад в развитие современных представлений о природе коммутационного искрения внес Омский

институт железнодорожного транспорта в лице профессора М. Ф. Карасева и последователей его школы. В их работах впервые рассматривается идея о применении составных щеток как эффективном способе борьбы с коммутационным искрением [7; 8].

Данный способ основывается на том, что с позиций классической теории коммутации энергетическим источником возникновения щеточного искрения выступает так называемый добавочный ток коммутации из-за присутствия в коммутирующем контуре суммы несбалансированных электродвижущих сил (ЭДС)

$$i_k = i_{пр} + i_{доб} = i_a \left(1 - \frac{2t}{T_k} \right) + \frac{\sum e_{ki}}{\sum R_{ki}}, \quad (1)$$

где i_k — ток в коммутирующем контуре;

$i_{пр}$ — ток прямой коммутации;

$i_{доб}$ — добавочный ток коммутации;

i_a — ток параллельной ветви обмотки якоря;

$\sum e_{ki}$ — сумма ЭДС, действующих в коммутирующем контуре;

$\sum R_{ki}$ — суммарное сопротивление коммутирующего контура.

Большая часть теоретических и экспериментальных исследований сходится в том, что первоочередным условием коммутационной устойчивости коллекторных машин является снижение уровня небаланса ЭДС самоиндукции, взаимоиндукций и ЭДС вращения как главной физической причины образования добавочного тока в коммутирующем контуре.

Однако учитывая невозможность приведения к нулю равнодействующей всех ЭДС, следующим по эффективности методом снижения добавочного тока коммутации является повышение сопротивления коммутирующего контура (1).

Одним из практических способов реализации этого направления является применение составных щеток. Они

формируются из набора изолированных друг от друга пластин щеточного материала, электрически соединенных между собой с нерабочего конца щетки. Общая идея состоит в том, чтобы заставить коммутирующий ток в замкнутом контуре проходить не по локальной области щеток, прилегающей к контактной поверхности на коллекторе, а по удлиненной траектории вдоль всей высоты щеток (рис. 1).

Если признать, что изоляционные промежутки не оказывают существенного влияния на эффективную площадь щеточного контакта, обеспечивающего токосъем силового тока для питания двух смежных параллельных ветвей обмотки якоря, то можно сделать вывод, что значительное повышение сопротивления будет наблюдаться только для контурного тока коммутирующей секции.

Из этого следует, что для ограничения добавочного тока коммутации составные щетки должны иметь по возможности минимальную толщину изолирующих вставок и максимальное число элементов сегментирования. При этом возникает проблема не только конструктивной и технологической сложности изготовления такого композиционного изделия, но и его механической прочности, что особенно актуально с учетом реальных условий работы щеточного аппарата тяговых электродвигателей локомотивов.

Изначально предполагалось, что для придания механической прочности составной щеточной конструкции отдельные пластины должны скрепляться между собой болтами [9]. Однако при таком способе крепления толщина пластин не может быть меньше, чем требуется по условиям их механической прочности при воздействии усилий от болтовой стяжки.

В то же время из рис. 1 видно, что эффективная реализация идеи состав-

ных щеток возможна только в том случае, если толщина одного щеточного сегмента не будет превышать толщины межламельной изоляции.

В силу этого противоречия идея составных щеток не нашла своего практического воплощения, несмотря на положительные результаты множества исследований, а щеточный аппарат современных тяговых электродвигателей сохраняет свою изначальную конструкцию.

Для реализации идеи составных щеток мы предлагаем конструкторское решение, не требующее значительных изменений в коллекторно-щеточном аппарате действующих тяговых электродвигателей [10].

Суть предложения заключается в том, чтобы использовать «шихтованную» щетку, т. е. набранную по аналогии с якорным сердечником из предельно тонких щеточных пластин, склеенных между собой электроизоляционным клеем. Пластины на нерабочем конце электрически соединены между собой медным шунтом. После технологической обработки такая щетка должна иметь те же геометрические размеры, что и стандартная (рис. 2).

Конструкция шихтованной щетки обладает рядом важных преимуществ в сравнении с прототипом цельных щеток. Помимо значительного роста активного сопротивления для добавочного тока в коммутирующих под данной щеткой секциях, что стабилизирует процесс коммутации в целом, не менее важным представляется повышение сопротивления для так называемого разрывного тока на сбегающем крае щеточного контакта.

Впервые проблема коммутационного искрения была поднята в связи с процессами в разрывном контакте на сбегающем крае щетки в работах Г. Тилерса и нашла продолжение в исследованиях М. Ф. Карасева и В. Д. Авилова [7; 8]. Суть проблемы состоит в том, что в силу нестабильности контакта на сбегающем крае щетки период коммутации становится случайной величиной. По этой причине сход щетки с коллекторной пластины сопровождается образованием тока разрыва, под которым понимают разность между текущим значением тока коммутирующей секции и током параллельной ветви, к которой подключается коммутирующая секция. Согласно современным представлениям о природе коммутационного искрения, энергия разрывного тока, накопленная в индуктивности якорной секции на

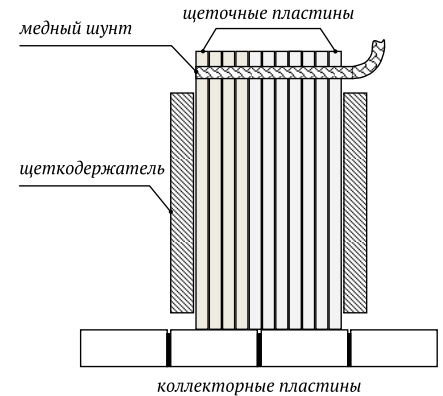


Рис. 2. Конструкция шихтованной щетки

момент разрыва, частично выделяется в виде тепла в месте контакта, а избыточная энергия идет на образование ионной формы проводимости разрывного тока в виде искровых разрядов на сбегающем крае щетки.

Проблему ограничения величины разрывного тока, а значит, и коммутационного искрения на сбегающем крае щетки О. Г. Вегнер предлагал решать за счет подбора щеточного материала с особой Г-образной вольт-амперной характеристикой, что весьма затруднительно реализовать на практике [9]. Более простым решением было бы использование щеток с повышенным удельным сопротивлением. Однако это ведет к повышению потерь в щетке и щеточном контакте и в конечном счете — к их дополнительному нагреву.

Предложенная конструкция шихтованной щетки в силу малой толщины пластин (близкой к толщине изоляции коллекторных пластин) делает щетку менее чувствительной к координате точки разрыва, поскольку при любом периоде коммутации гарантировано повышенное сопротивление для разрывного тока. По этой причине удельное сопротивление основного щеточного материала может быть снижено, что благоприятно скажется и на энергетических потерях в щетках.

Можно провести сравнительный анализ сопротивлений щеток. В ряде случаев вычисление точного значения сопротивления проводника сложной формы затруднительно [11]. В рассматриваемом случае форма прохождения тока в сплошной щетке особенно сложна (рис. 1).

Электрическое поле между двумя коллекторными пластинами в толще щетки можно представить с помощью конформных преобразований в комплексной форме. Согласно этому ме-

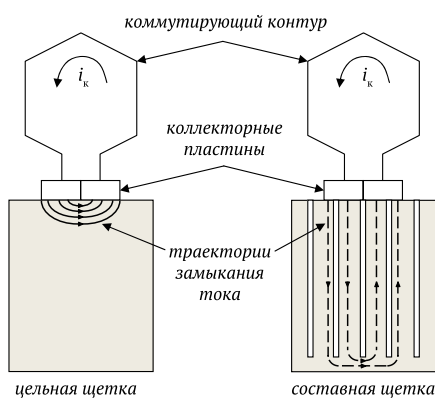


Рис. 1. Траектории замыкания тока коммутирующего контура в щетках различной конструкции

тому плоская фигура в одной системе координат может быть преобразована в другую фигуру в другой системе координат [12].

В данном случае можно воспользоваться преобразованием [12]

$$w = k \ln Z + C,$$

в результате которого напряженность поля определяется как

$$E = \frac{\phi_2 - \phi_1}{\alpha_0 r},$$

где α_0 — угол между пластинами (180°);

r — расстояние от точки примыкания пластин в полярной системе координат.

Эта формула дает картину круговых эквипотенциальных линий, подобных траекториям, представленным на рис. 1. Согласно этой картине расчет сопротивления щетки между двумя пластинами коллектора при их симметричном положении по отношению к щетке произведем путем разделения щетки на отдельные концентричные изолированные слои (рис. 3). Сопротивление каждого слоя будет определяться площадью сечения, длиной и удельным сопротивлением

$$R = \rho \frac{l}{S}.$$

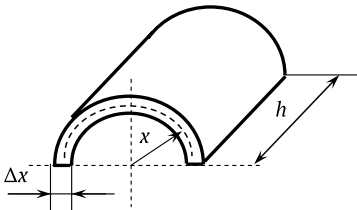


Рис. 3. Расчетная схема слоя

Сечение S определяется толщиной слоя Δx и шириной щетки h . Длина слоя l определяется как длина средней линии x слоя (половина длины окружности):

$$l = \pi x.$$

Сопротивление слоя определится как

$$R = \rho \frac{\pi x}{h \Delta x}.$$

Зная величины сопротивлений слоев, можно определить сопротивление щетки между двумя пластинами коллектора путем сложения проводимостей слоев. Проведем приближенный расчет сопротивления. Пусть щетка условно разделена на 5 слоев толщиной в 1 мм ($\Delta x = 1$ мм), радиус первого слоя $r = 1$ мм. В этом случае переменной величиной в последней формуле будет только x :

$$R = \rho \frac{\pi x}{h}.$$

Причем для первого слоя $x = 1$, для второго $x = 2$, для третьего $x = 3$ и т. д. Сумма проводимостей будет равна

$$\Sigma G = \frac{h}{\rho \pi} \left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \frac{1}{5} \right).$$

Выражение в скобках является частью гармонического ряда, сумма которого стремится к бесконечности. В данном случае (ввиду ограничения количества слоев) эта сумма равна 2,28. Следовательно, сопротивление щетки равно

$$R = \rho \frac{\pi}{h} \cdot \frac{1}{2,28} = \frac{\rho}{h} 1,38.$$

Сопротивление шихтованной щетки при тех же условиях будет оцениваться удвоенной длиной щетки и поперечным сечением ($5\Delta x$) половины щетки. Допустим, что длина щетки больше ширины в 5 раз, тогда

$$R = \rho \frac{2 \cdot 50}{h5} = \frac{\rho}{h} 20.$$

Следовательно, сопротивление шихтованной щетки больше сопротивления сплошной почти в 14 раз. Это означает, что ток замыкания коммутируемой секции в худшем случае во столько же раз меньше.

Искрение под щетками может перейти в круговой огонь. Известно, что всякая искра по своей физической природе представляет собой ток ионной проводимости в виде раскаленной плазмы. Искра возникает при размыкании любых контактов, превращаясь в дугу у мощных контакторов. Для гашения дуги используются различные способы, основанные преимущественно на растяжении и охлаждении плазмы. В одном случае это просто растяжение на удлинителях контактов потоком воздуха, в других случаях — магнитное дутье. На электровозах переменного тока используется гашение дуги сжатым воздухом.

Для искрогашения на коллекторе предлагалось использовать движение воздуха от осевого вентилятора самого двигателя. Однако слабость воздушного потока у щеток не позволила устранить искрение. Мы предлагаем направить воздушный поток непосредственно под щетку от компрессора (рис. 4) [13]. При этом плазма отдувается от поверхности

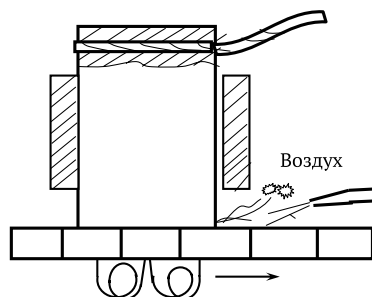


Рис. 4. Схема направления воздушного потока

коллектора, охлаждается и гасится. Кроме того, сжатый воздух сдувает угольную пыль, осевшую между коллекторными пластинами и способствующую развитию дуги. Сжатый воздух также охлаждает щетку и поверхность коллектора. ■

Литература

1. Сулейманов Р. Я., Шевцов Ю. А. Электропривод постоянного тока. А.С. № 1325622 от 22.03.87.
2. Сулейманов Р. Я. Устройство для управления тяговым приводом. А.С. № 1332508 от 22.02.87. 1987. БИ № 31.
3. Сулейманов Р. Я., Шевцов Ю. А. Устройство для регулирования скорости тягового электродвигателя. А.С. 989725. от 14.09.82. 1983. БИ № 2.
4. Сулейманов Р. Я. Противобоксовочная защита при импульсном регулировании тягового привода // Вестн. ВНИИЖТ. 1988. № 2. С. 20–23.
5. Сулейманов Р. Я., Пуговкин Е. В. Динамика управления тяговым приводом постоянного тока с электронно-импульсным регулированием в режиме стабилизации скорости // Вестн. УрГУПС. 2010. № 1. С. 40–48.
6. Сулейманов Р. Я., Пуговкин Е. В. Противобоксовочная защита при импульсном автоматическом регулировании тягового привода // Вестн. УрГУПС. 2010. № 4. С. 23–29.
7. Карасев М. Ф., Авиллов В. Д. Исследование коммутации машин постоянного тока с составными щетками // Труды ОМИИТ. 1968. Т. 88, вып. 2.
8. Карасев М. Ф., Авиллов В. Д. Особенности коммутации машин постоянного тока с составными щетками // Труды ОМИИТ. 1968. Т. 88, вып. 2.
9. Брон О. Б. Электрическая дуга в аппаратах управления, М.; Л.: Гос. энергетич. изд-во, 1954. С. 472.
10. Сулейманов Р. Я. Устройство защиты коллектора машины постоянного тока от искрения под щетками. Пат. № 2316876. 2008.02.10.
11. Толкунов В. П. Теория и практика коммутации машин постоянного тока. М.: Энергия, 1979. 224 с.
12. Говорков В. А. Электрические и магнитные поля. М.: Энергия, 1968. 132 с.
13. Каплянский А. Е. и др. Теоретические основы электротехники. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1961. 450 с.
14. Сулейманов Р. Я. Способ защиты двигателей постоянного тока от круговых огней на коллекторе. Пат. № 2270511. 20.02.06. 2006 г. Бюл. № 5.