

## ИЗНОС КОЛЛЕКТОРОВ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА КОММУТАЦИОННЫМ ИСКРЕНИЕМ И РАСЧЕТ ДОЛГОВЕЧНОСТИ КОЛЛЕКТОРОВ

Э. К. СТРЕЛЬБИЦКИЙ, В. С. СТУКАЧ, А. Я. ЦИРУЛИК

(Представлена научным семинаром кафедры электрических машин и аппаратов)

Одним из узлов, ограничивающих срок службы машины постоянного тока, является коллекторно-щеточный узел. Для машин массовых серий общепромышленного применения, имеющих длительный срок службы, долговечность коллекторно-щеточного узла определяется долговечностью коллектора. Износ щеток до минимального размера не является отказом, так как в течение срока службы замена щеток осуществляется многократно и является профилактическим мероприятием.

Срок службы коллектора ограничен вследствие фрикционного и электроэрозионного износа поверхности. Расчет срока службы коллектора возможен лишь после определения скорости электроэрозионного износа в функции степени искрения. В настоящей статье излагаются результаты исследования износа коллекторов искрением и предлагается методика вычисления наработки до отказа коллектора.

Прежде всего должен быть сформулирован критерий отказа коллекторно-щеточного узла. Согласно ГОСТ 183—66 отказом называется событие, заключающееся в нарушении работоспособности изделия. В данном случае критерий отказа сформулировать трудно, так как машина остается работоспособной при существенном повреждении рабочей поверхности коллектора. Нами проведены испытания машин П22М при весьма интенсивном искрении (три балла и выше). Машина проработала более 1600 часов, рабочая поверхность коллектора сплошь подвержена эрозии на глубину до 28—32 микрон, политура отсутствует, тем не менее машины остаются работоспособными. Очевидно, во многих случаях требования, предъявляемые к допустимому уровню искрения, являются необоснованно завышенными. Это связано с отсутствием методов расчета срока службы коллектора при разных уровнях искрения. Определение связи износа с искрением и создание методики расчета срока службы коллектора позволило бы определять экономически оптимальные требования к допустимому уровню искрения и срока службы машины.

Для получения сведений, позволяющих сформулировать критерий отказа коллектора вследствие электроискрового износа, нами проведены испытания десяти машин П22М при повышенном уровне искрения. Машины имеют равnoseкционную обмотку, как все машины массовых серий мощностью до 100 *квт*. В пазу расположены 4 секции по ширине паза. Последовательность износа такова. Сначала электроискровой эрозии подвергается каждая четвертая ламель коллектора, размыкающая в коммутационном процессе последнюю секцию паза. На этих ламелях появляются следы эрозии глубиной 4—8 микрон, форма которых соответствует форме рабочей поверхности щетки. Ширина следа эрозии увеличивается во времени в направлении ширины ламели. Остальные ламели не подвергаются эрозии, поверх-

ность коллектора, несмотря на интенсивное искрение, остается гладкой, политура нормальная. Износ щеток невелик и соответствует нормальной скорости износа при слабом искрении. Такое состояние коллектора не приводит к качественному изменению коммутационного процесса и должно быть признано допустимым.

Новая стадия износа наступает после «прогорания» по всей ширине четвертых ламелей, то есть ламелей, связанных с последней секцией паза. С этого момента начинается эрозия предпоследних на паз ламелей. Они «прогорают» на всю ширину очень быстро, после чего начинается эрозия следующих по порядку ламелей, пока на поверхности коллектора по окружности не образуются следы эрозии, форма и размеры которых точно соответствуют таковым для контактной поверхности щеток. Этот процесс развивается очень быстро, так как после «прогорания» последних на паз ламелей происходит качественное ухудшение коммутации: две последние секции коммутируют как одна секция с удвоенным числом витков.

Дальнейший износ увеличивает лишь глубину следов эрозии, не изменяя их площади. Рабочие дорожки коллектора подвержены эрозии неравномерно по окружности, а с разрывами. Число углублений равно числу пазов. Профиль коллектора приобретает пилообразную форму с глубиной провалов до 28—32 микрон, поверхность шероховатая, без политуры. Скорость износа щеток при этом возрастает в несколько раз. Хотя отказа машины не происходит, интенсивный износ коллектора и щеток приводит к резкому сокращению срока службы машины. Поэтому для машин, рассчитанных на длительный срок службы, такое состояние коллектора следует считать неработоспособным, а за критерий отказа следует принять момент, когда прогорают ламели, связанные с последними секциями паза (или хотя бы одна из таких ламелей). Нарботка на отказ будет определяться временем работы машины до момента отказа, понимаемого как момент прогорания «последних» ламелей по всей ширине. Если известна скорость продвижения следов эрозии во времени по ширине ламели в зависимости от уровня искрения, то можно рассчитать наработку до отказа, срок службы машины при данном уровне искрения с учетом профилактических проточек коллектора после «отказа» и другие характеристики надежности.

Введем обозначения:

- $b_k$  — ширина ламели в миллиметрах;
- $\beta$  — отклонение ширины ламели, мм;
- $b$  — ширина следа эрозии на ламели, мм;
- $\alpha$  — скорость расширения следа эрозии, мм/час;
- $\tau_g$  — длительность горения коммутационной дуги при размыкании контакта между щеткой и ламелью, микросекунды (мксек);
- $u_g$  — напряжение горения дуги, в;
- $L_p$  — индуктивность разрыва последней секции паза, гн.

Для определения скорости искрового износа коллектора во времени в зависимости от уровня искрения проведены испытания машин П22М при повышенном искрении. Уровень искрения оценивался по параметрам напряжения дуг искрения, которое измерялось и осциллографировалось посредством дополнительной щетки (метод М. Ф. Карасева). Исследованиями Л. Л. Лавриновича установлено (и наши исследования это подтверждают), что напряжение дуги при разрыве контакта ламель — щетка в течение времени горения дуги остается практически неизменным, а ток в дуге спадает до нуля по линейному закону. Поэтому количество электричества  $Q$ , перенесенного за время  $\tau_g$ , и энергия  $A$ , выделившаяся в дуге (а следовательно, и износ ламелей), однозначно связаны с  $\tau_g$ , для конкретного типоразмера машин, когда  $L_p = \text{const}$ .

$$Q = \frac{U_g}{2L_p} \cdot \tau_g^2, \quad A = \frac{U_g^2}{2L_p} \cdot \tau_g^2.$$

При постоянных  $U_g$  и  $L_p$  искрение однозначно может быть оценено длительностью горения дуг искрения. При проведении эксперимента измерялись  $\tau_g$  на каждой ламели коллекторов всех машин и измерялись соответствующие им размеры следов эрозии через определенные промежутки времени. Полученные многочисленные реализации износа при различных значениях  $\tau_g$  показывают, что скорость износа практически постоянна для каждого значения  $\tau_g$ . На рис. 1 показана построенная по результатам эксперимента зависимость ширины следа эрозии от  $\tau_g^2$ , из которой определяем среднюю скорость износа во времени  $\bar{\alpha}$  и дисперсию скорости износа  $D(\alpha)$  как функции  $\tau_g$ :

$$\bar{\alpha} = 7,27 \cdot 10^{-6} \cdot \tau_g^2, \quad (1)$$

$$D(\alpha) = 2,62 \cdot 10^{-12} \cdot \tau_g^4 + 52,8 \cdot 10^{-12} \cdot D(\tau^2) \quad (2)$$

В выражении [2] первый член характеризует разброс скорости износа, вызванный неоднородностью состава и структуры меди отдельных коллекторных ламелей и ошибками измерений. Второй член объясняет разброс скорости износа коллекторов различных машин одного типоразмера, вы-

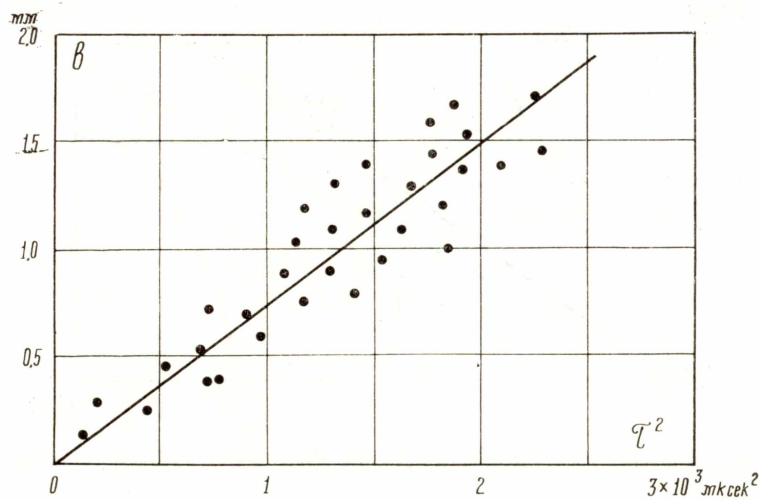


Рис. 1. Зависимость ширины следа эрозии на ламелях от квадрата длительности дуг искрения для момента времени 103 часа от начала испытаний.

званный дисперсией  $D(\tau^2)$  длительностей дуг. Эта дисперсия обусловлена технологическим разбросом параметров секций, коллекторно-щеточного узла и магнитной цепи машин одной серии.

Так как скорость износа пропорциональна числу искровых разрядов в единицу времени (скорости вращения якоря), обратно пропорциональна суммарной длине сбегавшего края щеток  $l_{щ}$  из одного brackets вдоль оси коллектора, а запас энергии в дуге при одинаковой  $\tau_g$  обратно пропорционален индуктивности разрыва, то скорость износа в общем случае должна определяться формулой

$$\alpha = 7,27 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{l_{щ1} L_{p1}}{n_1} \cdot \frac{n}{l_{щ} L_p} \cdot \tau_g^2, \quad (3)$$

где  $n_1$ ,  $l_{щ1}$ ,  $L_{p1}$  — параметры исследуемых машин, а  $n$ ,  $l_{щ}$  и  $L_p$  — параметры машины, для которой требуется произвести расчет. Размерность этих параметров соответственно — об/мин, см, гн. Подставив значения параметров исследуемых машин, получим:

$$\alpha = 8,73 \cdot 10^{-13} \cdot \frac{n}{l_{щ} \cdot L_p} \cdot \tau_g^2, \quad (4)$$

$$D(\alpha) = 76,6 \cdot 10^{-26} \cdot \frac{n^2}{l_{щ}^2 \cdot L_p^2} \cdot [0,0497 + v^2(\tau_g^2) + v^2(n) + v^2(l_{щ}) + v^2(L_p)] \cdot \tau_g^4, \quad (5)$$

где  $v(z)$  — коэффициенты вариации параметра  $z$ . На рассеивание скорости износа  $\alpha$  оказывает влияние разброс большого количества параметров машины, разброс которых, в свою очередь, обусловлен случайным влиянием множества технологических факторов. Поэтому распределение  $\alpha$  можно считать нормальным.

Величины  $b_K$  и  $\beta$  независимы и случайны. Среднее значение  $\bar{b}_K$  определяется выражением:

$$\bar{b}_K = \frac{\pi \cdot D_K}{K} - \bar{\Delta}_H, \quad (6)$$

где  $\bar{D}$  — номинальный диаметр коллектора, мм;

$K$  — число коллекторных ламелей;

$\bar{\Delta}_H$  — средняя ширина межламельного промежутка, мм.

Случайные отклонения  $\beta$  ширины ламелей  $b_K$  объясняются технологическими факторами: разбросом диаметров коллекторов и ширины межламельного промежутка, неточностью изготовления и функционирования делительных устройств, поворачивающих коллектор при пророраживании.

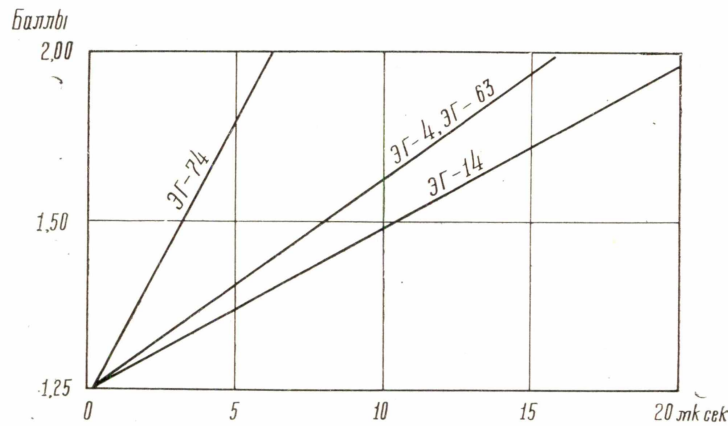


Рис.2. Связь уровня искрения в баллах ГОСТ 183—66 от длительности горения дуг искрения.

Поскольку отклонения равновероятны в обе стороны, то среднее отклонение  $\bar{\beta}$  можно считать равным нулю. Как показывают статистические исследования, распределение отклонений  $\beta$  с достаточной точностью можно считать нормальным. Тогда износ  $b(t)$  имеет также нормальное распределение с параметрами:

$$\bar{b}(t) = \bar{\alpha} \cdot t + \bar{\beta} = \bar{\alpha} \cdot t, \quad (7)$$

$$D\{b(t)\} = t^2 \cdot D(\alpha) + D(\beta) \quad (8)$$

Если  $b(T) = b_K$ , наступает отказ, а  $T$  — наработка на отказ, час. Среднее время наработки на отказ равно

$$\bar{T} = \frac{\bar{b}_K}{\alpha}. \quad (9)$$

Из нормальности  $b(t)$  следует, что распределение времени  $T$  описывается дисперсионным распределением Бернштейна [1]. Согласно этому закону вероятность безотказной работы равна

$$P\{T > t\} = 1 - \Phi \left[ \frac{t - C}{\sqrt{A \cdot t^2 + B}} \right], \quad (10)$$

где  $\Phi[z]$  — интегральная функция Лапласа,

$$A = \frac{D(\alpha)}{\alpha^2}, \quad B = \frac{D(\beta)}{\alpha^2}, \quad C = \frac{\bar{b}_K - \bar{\beta}}{\alpha}. \quad (11)$$

Формулы [4, 5, 6, 10, 11] позволяют для любого момента времени вычислить  $P\{t\}$  и построить кривую вероятности безотказной работы коллектора ма-

шины постоянного тока при известном уровне искрения и известной связи  $\tau_d$  с уровнем искрения. В настоящее время проводятся исследования по определению этой связи. Для машин П22М эта связь показана на рис. 2. На рис. 3 приведены зависимости  $P\{T > t\}$  для машин П22М при разных значениях  $\tau$ , рассчитанные по выведенным формулам. Как видно из рис. 2, при искрении в диапазоне 1,25—1,5 балла по ГОСТ 183—66 максимально возможная длительность дуги не превосходит 3 мксек. При этом искрении машина может работать более 30 тысяч часов с вероятностью безотказной работы коллектора более 0,95 (рис. 3). Это говорит о возможности увеличения гаранти-

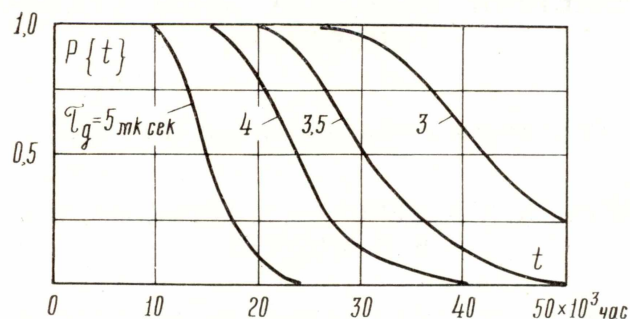


Рис. 3. Зависимость вероятности безотказной работы коллектора от времени и уровня искрения, определяемого длительностью дуг.

рованного срока службы этих машин (по крайней мере, в отношении коллекторно-щеточного узла) в несколько раз. Сейчас этот срок установлен в 12,5 тысячи часов. Общий срок службы коллектора с учетом возможных проточек или шлифовок коллектора после «отказа» может достигать 100 тысяч часов.

### Выводы

1. Отказом коллектора машин постоянного тока с равносекционной обмоткой якоря, рассчитанных на длительный срок эксплуатации, следует считать момент, когда ширина следа электроискровой эрозии на ламелях станет равной ширине ламели (момент «прогорания» ламели по всей ширине).

2. Разработан метод расчета наработки коллектора на отказ и вероятности безотказной работы.

### ЛИТЕРАТУРА

1. И. Б. Герцбах, Х. Б. Кордонский. Модели отказов, «Советское радио», М., 1966.