

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК ДОЛГОВЕЧНОСТИ КОЛЛЕКТОРОВ МАШИН МАЛОЙ МОЩНОСТИ

А. Я. ЦИРУЛИК, В. С. СТУКАЧ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и аппаратов
и общей электротехники)

Характеристиками долговечности являются ресурс и гамма-процентный ресурс. Вычисление этих характеристик возможно, если известны реализации износа — зависимости параметра состояния коллектора от времени и условий работы. Нами были проведены исследования процессов износа коммутационным искрением коллекторов машин серии П 1—6 габаритов, в результате которых были определены характер и количественные характеристики процесса износа [1]. Скорость электроискровой эрозии ламелей коллектора определена выражением

$$\alpha = 0,426 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{n}{(\sum l_{\text{ш}} \cdot L)^{0,73}} \cdot \tau_{\text{и}}^{1,46}, \quad (1)$$

где

n — скорость вращения якоря, об/мин;

$\sum l_{\text{ш}}$ — общая длина щеток на один болт, см;

L — индуктивность секции обмотки якоря, гн;

$\tau_{\text{и}}$ — длительность микродугового разряда на ламели, мксек.

Это выражение справедливо для машин, имеющих простые равносекционные обмотки. При переходе от одного типоразмера к другому в диапазоне мощностей 0,4—50 квт $\sum l_{\text{ш}}$ и L изменяются так, что их произведение почти не изменяется. Поэтому можно пользоваться более простым выражением для α

$$\alpha = 2,21 \cdot 10^{-8} \cdot n \cdot \tau_{\text{и}}^{1,46}, \text{ мм/час.} \quad (2)$$

В статье [1] показано, что отказом коллектора следует считать состояние, при котором ширина следа эрозии b хотя бы на одной из ламелей, соединенных с крайними секциями, завершающими коммутацию паза, станет равной ширине ламели b_k , то есть эрозия перекроет всю ширину ламели. Скорость увеличения ширины следа определяется выражением (2), а реализация износа при линейной зависимости от времени имеет вид

$$b(t) = \alpha \cdot t, \text{ мм.} \quad (3)$$

Наработка до первого отказа

$$T = \frac{b_k}{\alpha} \quad (4)$$

Она имеет разное значение для разных ламелей одного коллектора и для коллекторов разных экземпляров машин одного типоразмера, так как имеется разброс ширины ламелей и скорости износа ламелей. Последнее обусловлено разной интенсивностью искродуговых разрядов на разных ламелях. Статистические исследования отклонений ширины ламелей коллекторов машин серии П 1—6 габарита показали, что коэффициент вариации ширины ламелей не превышает 3%, что дает вклад в дисперсию T , не превышающий 0,96%. Поэтому в дальнейшем будем считать ширину ламелей неслучайной величиной, равной среднему значению, определяемому по формуле

$$b_k = \frac{\pi \cdot D_k}{K} - \bar{\Delta}_n \quad (5)$$

Здесь средняя ширина межламельного промежутка $\bar{\Delta}_n$ должна вычисляться по формуле

$$\bar{\Delta}_n = \delta_n + 0,155, \text{ мм}, \quad (6)$$

где

δ_n — расчетная толщина межламельной изоляции, мм.

Искрение на коллекторе — стационарный случайный процесс, при котором интенсивность искрения дрейфует в некотором диапазоне уровней, оставаясь в среднем неизменной (справедливо для бездефектных машин). В отдельные интервалы времени искрение может отсутствовать, при этом нет и электроэрозионного износа. Это увеличивает ресурс коллектора. Если вероятность безыскровой работы машины при известном среднем уровне искрения равна ξ , то наработка до отказа должна быть определена по формуле

$$T = \frac{b_k}{\alpha} \cdot (1 + \xi) = \frac{b_{k\varepsilon}}{\alpha} \quad (7)$$

Здесь $b_{k\varepsilon} = b_k \cdot (1 + \xi)$ — эквивалентное значение ширины ламели, вводимое для учета влияния безыскровой коммутации в отдельные интервалы времени на ресурс коллектора.

Разброс параметров искровых разрядов на разных ламелях обусловлен большим многообразием причин, вследствие чего τ_n и α можно считать нормально распределенными. Тогда реализация износа представляет собой нормальную случайную функцию с параметрами (средним значением и дисперсией)

$$\bar{b}(t) = \bar{\alpha} \cdot t, \quad D\{b(t)\} = t^2 \cdot D\{\alpha\}. \quad (8)$$

Здесь среднее значение α определяется выражением (2) при среднем значении τ_n , дисперсия α должна вычисляться по формуле (9) (с учетом нелинейной зависимости α от τ_n)

$$D\{\alpha\} = [10,4 \cdot \bar{n}^2 \cdot \bar{\tau}_n^{0,92} \cdot D\{\tau_n\} + 1,1 \cdot \bar{n}^2 \cdot \bar{\tau}_n^{-1,08} \cdot D^2\{\tau_n\} + 4,88 \cdot \bar{\tau}_n^{2,92} \cdot D\{n\} + 10,4 \cdot \bar{\tau}_n^{0,92} \cdot D\{\alpha\} \cdot D\{n\}] \cdot 10^{-16}. \quad (9)$$

При существующем соотношении между величинами $\bar{\tau}_n$ и $D\{\tau_n\}$ второй член суммы в выражении (9) составляет 1,17% от первого,

поэтому член с $D^2\{\tau_n\}$ можно не учитывать [2]. Третий и четвертый члены суммы должны учитываться лишь в том случае, когда расчет ведется для партии машин одного типоразмера, работающих при различных скоростях по условиям эксплуатации. Если же расчет ведется для машин, работающих при номинальной скорости, то дисперсия скорости $D\{n\}$ обусловлена лишь разбросом параметров скоростной характеристики. По данным [3] коэффициент вариации номинальных скоростей не превышает 2,37%, поэтому третий и четвертый члены суммы в выражении (9) можно опустить ввиду их малости.

Средняя наработка до отказа

$$\bar{T} = \frac{\bar{b}_{kэ}}{\alpha}, \text{ часов,} \quad (10)$$

а дисперсия наработки до отказа

$$D\{T\} = \frac{\bar{b}_{kэ}^2}{\alpha^4} \cdot D\{\alpha\} + 2 \cdot \frac{\bar{b}_{kэ}}{\alpha^6} \cdot D^2\{\alpha\}, \text{ часов}^2. \quad (11)$$

Из нормальности функции реализации износа следует, что интегральная функция распределения времени безотказной работы подчиняется закону Бернштейна [4]

$$F(T) = \Phi \left[\frac{t - \bar{T}}{t \cdot \sqrt{a}} \right], \quad (12)$$

где

$$a = \frac{D\{\alpha\}}{\alpha^2}, \quad \Phi[X] \text{ — функция Лапласа. Она табулирована.}$$

После «отказа» коллектора производится проточка или шлифовка коллектора брусом, после чего коллектор может отработать еще один цикл до следующего отказа. За весь срок службы возможно сделать m проточек, причем

$$m = \frac{D_k - D_{k\text{мин}}}{2 \cdot h_{\text{пр}}} = \frac{h_{\text{изн}}}{h_{\text{пр}}}, \quad (13)$$

где

$h_{\text{пр}}$ — глубина проточки, при которой исчезают все электроэрозионные углубления на ламелях и обеспечивается хорошее качество поверхности коллектора. Для машин 1—6 габаритов можно принять $h_{\text{пр}} = 0,2 \text{ мм}$.

Полный суммарный ресурс коллектора после m проточек равен

$$T_c = \sum_{j=1}^{m+1} T_j. \quad (14)$$

$$\text{Здесь } T_j = \frac{\bar{b}_{kэj}}{\alpha} \text{ — наработка на отказ} \quad (15)$$

на j -ом цикле работы между отказами; $\bar{b}_{kэj}$ — эквивалентная ширина ламели для j -го цикла. Значения T_j и $b_{kэj}$ можно усреднить для всех циклов.

Тогда

$$\bar{b}_{k\varepsilon} = \frac{\pi \cdot (D_k + D_{k \text{ мин}})}{2K} \quad \bar{\Delta}_{\text{п}} = \bar{b}_{k\varepsilon} - \frac{\pi \cdot h_{\text{пзп}}}{K}, \quad (16)$$

$$T_c = \sum_{j=1}^{m+1} \frac{\bar{b}_{k\varepsilon}}{\alpha} = (m+1) \cdot \frac{\bar{b}_{k\varepsilon}}{\alpha}. \quad (17)$$

Среднее значение полного ресурса коллектора равно

$$\bar{T}_c = (m+1) \cdot \frac{\bar{b}_{k\varepsilon}}{\alpha}, \text{ часов,} \quad (18)$$

а дисперсия ресурса

$$D\{T_c\} = \frac{(m+1)^2 \cdot \bar{b}_{k\varepsilon}^2}{\alpha^4} \cdot D\{\alpha\} + 2 \cdot \frac{(m+1)^2 \cdot \bar{b}_{k\varepsilon}^2}{\alpha^6} \cdot D^2\{\alpha\}. \quad (19)$$

Полный гамма-процентный ресурс при заданном значении вероятности безотказной работы $\gamma\%$ может быть определен из соотношения

$$\gamma = \frac{\gamma\%}{100} = \Phi[X_\gamma], \quad (20)$$

где

$$X_\gamma = \frac{t_{c\gamma} - \bar{T}_c}{t_{c\gamma} \cdot \sqrt{\alpha}}. \quad (21)$$

По заданному значению γ из таблицы значений функции Лапласа $\Phi[X]$ находим значение аргумента X_γ , после чего вычисляем полный гамма-процентный ресурс $t_{c\gamma}$ по формуле

$$t_{c\gamma} = \frac{\bar{T}_c}{X_\gamma \cdot \sqrt{\alpha} + 1}. \quad (22)$$

Это выражение справедливо для значений $\gamma\% > 50$.

Необходимую периодичность проточек (прошлифовок) коллектора, обеспечивающую заданную вероятность безотказной работы γ , следует вычислять по формуле

$$t_{\text{прот}} = t_\gamma = \frac{\bar{T}}{X_\gamma \cdot \sqrt{\alpha} + 1}. \quad (23)$$

Здесь

$$\bar{T} = \frac{\bar{b}_{k\varepsilon}}{\alpha}. \quad (24)$$

Пример: вычислим характеристики долговечности коллекторов машин серии П второго габарита при $n_n = 1500 \text{ об/мин}$. Исходные данные: $\bar{b}_k = 2,47 \text{ мм}$, $h_{\text{пзп}} = 3 \text{ мм}$, $h_{\text{пр}} = 0,2 \text{ мм}$, $\tau_n = 4 \text{ мк сек}$, $D\{\tau_n\} = 1,78 \text{ мк сек}^2$, $\xi = 0,35$, $K = 72$.

Решение: эквивалентное значение средней ширины ламели по (7)

$$\bar{b}_{кэ} = 2,47 \cdot (1 + 0,35) = 3,33 \text{ мм.}$$

Средняя скорость продвижения следа электроискровой эрозии по ширине ламели по (2)

$$\bar{\alpha} = 2,21 \cdot 10^{-8} \cdot 1500 \cdot 4^{1,46} = 2,51 \cdot 10^{-4} \text{ мм/час.}$$

Дисперсия скорости эрозии по (9) для неизменной скорости вращения

$$D[\alpha] = 10,4 \cdot 10^{-16} \cdot 1500^2 \cdot 4^{0,92} \cdot 1,78 = 1,48 \cdot 10^{-8} \text{ мм}^2/\text{час}^2.$$

Средняя наработка коллектора до первого отказа по (10)

$$\bar{T} = \frac{3,33}{2,51 \cdot 10^{-4}} = 13300 \text{ часов.}$$

Дисперсия наработки до первого отказа по (11)

$$D\{T\} = \frac{3,33^2}{2,51^4 \cdot 10^{-16}} \cdot 1,48 \cdot 10^{-8} + 2 \cdot \frac{3,33^2}{2,51^6 \cdot 10^{-24}} \cdot 1,48^2 \cdot 10^{-16} = 0,604 \cdot 10^{-8} \text{ часов}^2.$$

Параметр a :

$$a = \frac{1,48 \cdot 10^{-8}}{2,51^2 \cdot 10^{-8}} = 0,235.$$

Количество возможных проточек коллектора по (13)

$$m = \frac{3}{0,2} = 15.$$

Усредненная для всех циклов наработки эквивалентная ширина ламели по (16)

$$\bar{b}_{кэ} = 3,3 - \frac{\pi \cdot 3}{72} = 3,2 \text{ мм.}$$

Полный средний ресурс коллектора по (18)

$$\bar{T}_c = (15 + 1) \cdot \frac{3,2}{2,51 \cdot 10^{-4}} = 204500 \text{ часов.}$$

Определим 95%-ный ресурс коллектора ($\gamma = 0,95$). По таблицам функции Лапласа для значения $\gamma = \Phi[X_\gamma] = 0,95$ найдем: $X_{0,95} = 1,65$ [4]. 95%-ный ресурс равен по (22)

$$t_{c, 0,95} = \frac{204500}{1,65 \cdot \sqrt{0,235} + 1} = 113500 \text{ часов.}$$

Средняя наработка между отказами по (24)

$$\bar{T} = \frac{3,2}{2,51 \cdot 10^{-4}} = 12750 \text{ часов.}$$

Периодичность проточек (прошлифовок) коллектора по (23)

$$t_{\text{прот}} = \frac{12750}{1,65 \cdot \sqrt{0,235+1}} = 7080 \text{ часов.}$$

Расчет показывает, что при среднем искрении в $1\frac{1}{2}$ балла ресурс коллекторов велик.

Вывод

Разработан метод расчета показателей долговечности коллекторов машин малой мощности, позволяющий вычислять ресурс коллекторов, работающих при любом уровне искрения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Э. К. Стрельбицкий, В. С. Стукач, А. Я. Цирулик. Износ коллекторов машин постоянного тока коммутационным искрением и расчет долговечности коллекторов. Известия ТПИ, т. 211, Томск, 1970.
 2. В. С. Стукач, А. Я. Цирулик, В. Н. Попов. Статистические характеристики процесса искрения на коллекторе в машинах серии П. Известия ТПИ. Настоящий сборник.
 3. И. П. Исаев. Стабильности характеристик электрических локомотивов. М., Трансжелдориздат, 1956.
 4. И. Б. Герцбар, Х. Б. Кордонский. Модели отказов. М., «Советское радио», 1966.
-