

## УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИИ НА КОММУТАЦИЮ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

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

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

Требование удовлетворительной коммутации является одним из ограничений при проектировании, поскольку коммутационная устойчивость снижается при повышении уровня использования машины. На коммутацию оказывают существенное влияние технологические отклонения электромагнитных, геометрических и механических параметров машины и свойств щеточных материалов. Обеспечение надежной коммутации в большой мере связано с разработкой научно обоснованных методов расчета допусков на технологические отклонения. Наиболее перспективным является метод, предусматривающий расчет допусков на этапе проектирования, что позволяет научно сбалансировать затраты на материалы и на обеспечение допусков и тем самым минимизировать стоимость машины. Традиционное изучение влияния отдельных факторов не позволяет учесть эффекты взаимодействия между различными факторами. Назначение допусков методом максимума—минимума является необоснованным с физической точки зрения. Технологические отклонения являются случайными, поэтому методы расчета допусков на отклонения должны быть вероятностно-статистическими. Научный подход к расчету допусков требует обращения к общей теории погрешностей, использующей математический аппарат дисперсионного анализа и позволяющей определить многомерную зависимость дисперсии выходной величины  $y$ , характеризующей коммутацию, от дисперсий входных технологических параметров  $x_i$  по формуле

$$D(y) = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{\partial y(X)}{\partial x_i} \right]^2 \cdot D(x_i), \quad (1)$$

где  $y(X) = y(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)$  — многомерная зависимость параметра  $y$  от входных параметров. Переход от дисперсий к допускам осуществляется по формулам:

$$\delta_i = 3 \cdot \sqrt{D(x_i)}, \quad \delta_y = 3 \cdot \sqrt{D(y)}, \quad (2)$$

где  $\delta$  — половина поля допуска. Параметр  $y$  должен характеризовать состояние коммутации непосредственно по степени разрушения коллектора и щеток; только в этом случае возможно выполнить расчет надежности машины. Для расчета допусков по формуле (1) необходимо знать многомерную зависимость  $y(X)$ . В данном случае она неизвестна. На-

хождение ее может быть осуществлено или экспериментально-статистически, или аналитически. Экспериментальный метод быстрее всего ведет к цели при назначении допусков для спроектированных машин. Такой метод лучше всего осуществить на основе математической теории планирования эксперимента, как показано в работах [1, 2]. Однако экспериментальный метод не дает общего решения, необходимого для расчета допусков на этапе проектирования серии любого типа машин. Поэтому нами предпринята попытка установить аналитические соотношения между номинальными параметрами машины, производственными погрешностями и параметрами случайных воздействий в эксплуатации, с одной стороны, и вероятностью появления искрения, с другой стороны, следующим образом.

Допускаем, что потокосцепление  $\psi_n$  паза изменяется линейно в течение коммутационного цикла паза, а коммутирующие свойства щетки проявляются лишь на завершающем этапе коммутации, когда плотность тока под сбегающим краем щетки становится больше критического значения  $j_{кр}$ . Изменение потокосцепления в любом пазу во времени при точной настройке дополнительных полюсов и при отсутствии технологических погрешностей описываются уравнением (линия 1, рис. 1).

$$\psi_n(t) = L_n \cdot i_a - \alpha_p \cdot t, \quad (3)$$

где

$$\alpha_p = \frac{2L_n \cdot i_a \cdot v_k}{t_k(\beta + u_n - 1)};$$

$L_n$  — полная индуктивность паза, гн;

$i_a$  — ток параллельной ветви, а;

$\beta$  — щеточное перекрытие;

$U_n$  — число секций по ширине паза;

$t_k$  — коллекторное деление, см;

$v_k$  — окружная скорость коллектора, см/сек.

Рассмотрим влияние отдельных погрешностей.

1. Задержка начала коммутации первой секции из-за неустойчивости контакта, обусловленной несовершенством геометрии коллектора вибрациями и т. п., на время  $x_1$ , смещает линию вправо (линия 2, рис. 1) и создает остаточное потокосцепление  $a_1 x_1$ , где  $a_1 = \alpha_p$ . Можно показать, что задержка коммутации в остальных секциях паза не оказывает существенного влияния на закон изменения потокосцепления.

2. Преждевременное окончание коммутации последней секции паза из-за аналогичных причин на время  $x_2$  увеличивает остаточное потокосцепление на величину  $a_2 x_2$ , где  $a_2 = \alpha_p$ .

3. Отклонение индукции  $B_d$  под дополнительным полюсом на величину  $x_3$  изменяет наклон прямой  $\psi_n(t)$  (линия 3, рис. 1) и изменяет остаточное потокосцепление на величину  $a_3 x_3$ , где

$$a_3 = \frac{l_a \cdot v_a \cdot w_n \cdot \beta}{(\beta + u_n - 1)}, \quad (4)$$

$l_a$  — длина якоря, см;

$v_a$  — окружная скорость якоря, см/сек;

$w_n$  — сумма витков секций одного слоя паза.

Остаточное потокосцепление  $\psi_0$  равно

$$\psi_0 = a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 - a_3 x_3. \quad (5)$$

Время горения дуги в этих условиях

$$t_d = \frac{\psi_0}{U_d}, \quad (6)$$

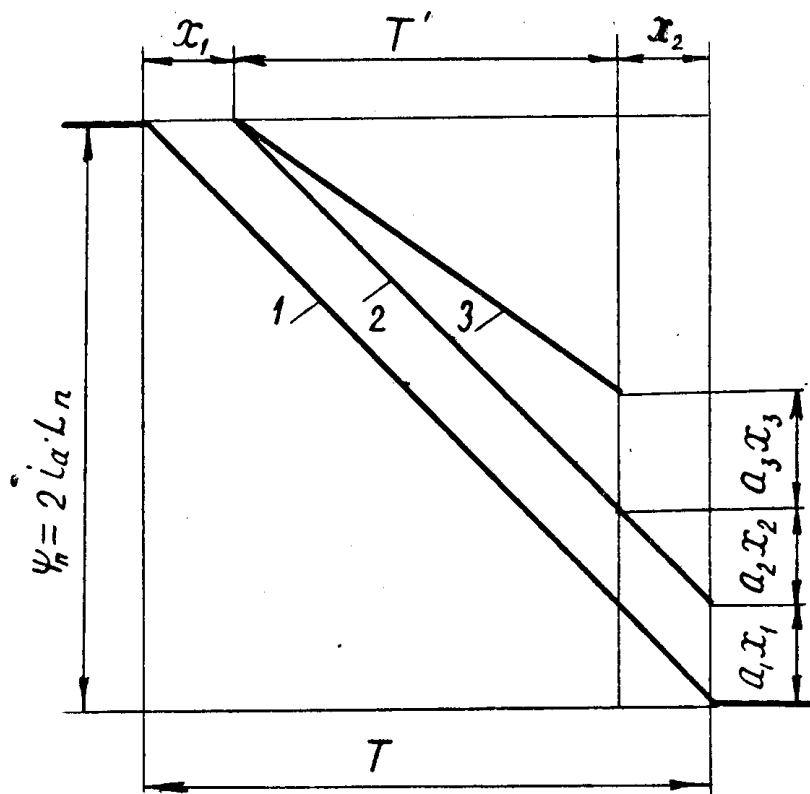


Рис. 1

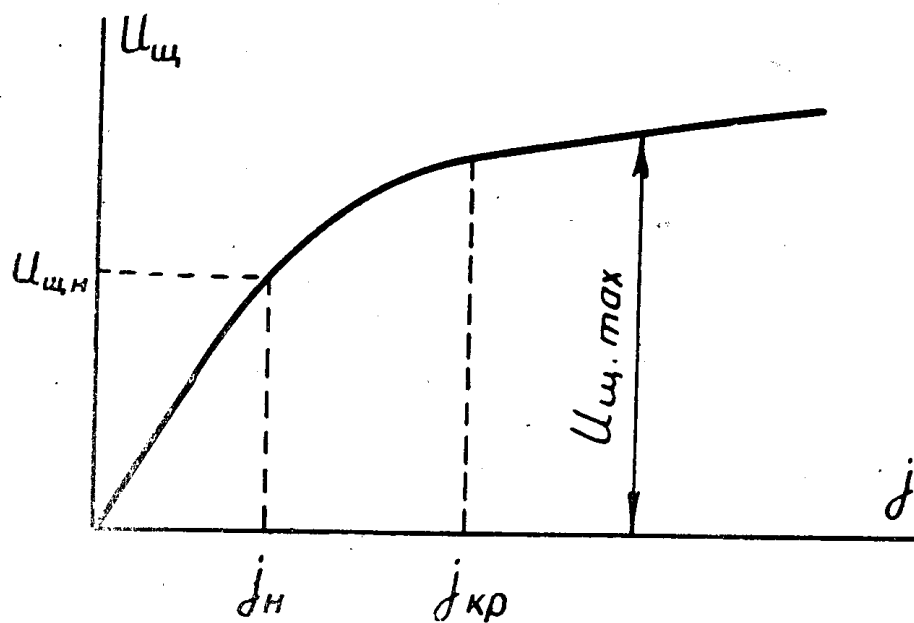


Рис. 2

где  $U_d$  — напряжение дуги в. Время горения дуги по экспериментальным данным тесно коррелировано с уровнем искрения и износом коллектора и щеток и может служить количественной мерой степени искрения и износа.

Учет комммутирующих свойств щетки на завершающем этапе производим следующим образом (рис. 2). Плотность тока  $j_n$  под набегающей частью щетки изменяется на завершающем этапе незначительно и при-

нимается постоянной. Поэтому и падение напряжения под набегающей частью щетки  $U_{\text{щн}}$ , считается постоянным. Плотность тока на сбегающем крае щетки за короткое время увеличивается до очень больших значений, поэтому напряжение на сбегающем крае  $U_{\text{щс}}$  считаем равным  $U_{\text{щmax}}$ . Таким образом, в секцию на завершающем этапе коммутации паза вводится напряжение

$$U_{\text{щ}} = U_{\text{щmax}}(j_{\text{кр}}) - U_{\text{щн}}(j_{\text{н}}), \quad (7)$$

причем  $U_{\text{щ}}$  при ускоренной и замедленной коммутации не одинаковы, так как при замедленной коммутации  $U_{\text{щmax}}(j_{\text{кр}})$  положительно, а при ускоренной — отрицательно. Время  $\tau$ , в течение которого действует  $U_{\text{щ}}$ , определяем следующим образом:

$$\tau = \frac{\psi_0 - a_2 x_2}{L_c I_{\text{щ}} \cdot v_k \cdot j_{\text{кр}} - \alpha}, \quad (8)$$

где  $L_c$  — индуктивность секции, гн;

$l_{\text{щ}}$  — длина щетки вдоль оси коллектора, см;

$$\alpha = \alpha_p + a_3 \cdot x_3.$$

За время проявления коммутирующих свойств щетка уменьшит остаточное потокосцепление на величину

$$\Delta\psi = U_{\text{щ}}(\tau - x_2), \quad (9)$$

и действительное остаточное потокосцепление будет равно

$$\psi = \psi_0 - \Delta\psi = a_1 \cdot A \cdot x_1 + (a_2 + U_{\text{щ}}) \cdot x_2 - a_3 \cdot A \cdot x_3, \quad (10)$$

где

$$A = 1 - \frac{U_{\text{щ}}}{L_c \cdot I_{\text{щ}} \cdot v_k \cdot i_{\text{кр}} - \alpha} = 1 - \frac{U_{\text{щ}} \cdot (\beta + U_{\text{п}} - 1) t_k}{[L_c I_{\text{щ}} \cdot j_{\text{кр}} (\beta + U_{\text{п}} - 1) - 2 L_{\text{п}} \cdot i_a] \cdot v_k}. \quad (11)$$

Из формул (10) и (11) ясно влияние номинальных параметров на величину остаточного потокосцепления. При подстановке в выражение (10) средних значений случайных параметров  $x_i$  получаем среднее остаточное потокосцепление  $\bar{\psi}$ . Естественно потребовать равенства  $\bar{\psi}_0 = 0$ , тогда  $x_3$ , необходимое для обеспечения равенства  $\bar{\psi}_0 = 0$ , равно

$$x_3 = \frac{a_1}{a_3} x_1 + \frac{a_2 + U_{\text{щ}}}{a_3 A} \cdot x_2. \quad (12)$$

Уравнение (12) показывает, насколько должна быть увеличена индукция под дополнительным полюсом для компенсации замедляющего влияния систематических смещений  $x_1$  и  $x_2$ , и позволяет на этапе проектирования учесть это влияние, если из статистических данных известны  $\bar{x}_1$  и  $\bar{x}_2$ . Увеличив угол наклона кривой  $\psi_{\text{п}}(t)$  до значения  $\alpha_p + a_3 x_3$ , получаем в среднем  $\bar{\psi} = 0$ . Теперь остаточное потокосцепление будет определяться случайными отклонениями всех параметров от их средних значений:

$$\psi = a'_1 \cdot A' \cdot \Delta x_1 + (a'_2 + U_{\text{щ}}) \Delta x_2 - a'_3 A' \Delta x_3, \quad (13)$$

где

$$A = 1 - \frac{U_{\text{щ}}}{L_c \cdot I_{\text{щ}} \cdot v_k \cdot i_{\text{кр}} - \alpha'_p - a'_3 \cdot \Delta x_3},$$

$$a'_3 = \frac{l_a \cdot v_a \cdot w_{\text{п}}^3 \cdot t_k}{(\beta + U_{\text{п}} - 1) t_k - (x_1 + x_2) \cdot v_k}.$$

Дисперсия остаточного потокосцепления равна:

$$D(\psi) = \sum \left( \frac{\partial \psi}{\partial y_i} \right)^2 \cdot D(y_i). \quad (14)$$

Вследствие неравенства  $U_{\text{щ}}$  при замедленной и при ускоренной коммутации дисперсии потокоцепления в этих случаях получаются неодинаковыми по величине, то есть  $D(\psi)_z \neq D(\psi)_y$ . Поэтому следует предусмотреть дополнительное смещение  $\Delta x_3 = \Delta B_d$  такой величины, чтобы вероятности появления предельных потокоцеплений  $\psi_{\text{пр}z}$  и  $\psi_{\text{пр}y}$  были одинаковыми. Это смещение можно определить из соотношения

$$F \left( - \frac{\psi_{\text{пр}z} + a_3' \cdot \Delta x_3}{\sqrt{D(\psi)_z}} \right) = F \left( - \frac{\psi_{\text{пр}y} - a_3' \cdot \Delta x_3}{\sqrt{D(\psi)_y}} \right), \quad (15)$$

где  $F(z)$  — функция Лапласа.

В уравнении (14) под  $y_i$  следует понимать все параметры уравнения (13), которые могут иметь технологические отклонения. Такими параметрами являются  $\Delta x_1$ ,  $\Delta x_2$ ,  $\Delta x_3$ ,  $t_k$ ,  $j_{\text{кр}}$ ,  $U_{\text{щ}}$ . Таким образом, номинальные электромагнитные параметры машины оказались связанными уравнением (13) со всеми технологическими погрешностями и случайными воздействиями условий эксплуатации. Уравнение (14) позволяет разложить дисперсию остаточного потокоцепления на составляющие, обусловленные различными факторами, определить степень влияния каждого фактора, рассчитать допуски на все отклонения на этапе проектирования и проанализировать зависимость величины допусков от мощности и уровня использования машины.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Э. К. Стрельбицкий, В. С. Стукач, А. Я. Цирулик. Применение метода математической статистики для исследования коммутации. Известия ТПИ, т. 160, 1966.
2. А. Я. Цирулик. Математические модели коммутации машин постоянного тока и применение их для расчета допусков и надежности коммутации. Диссертация, Томск, 1967.