

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗОН БЕЗЫСКРОВОЙ РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА СО ЩЕТОЧНО-ВЕНТИЛЬНОЙ КОММУТАЦИЕЙ

В. В. ИВАШИН, И. А. МИЛОРАДОВ

(Представлена научным семинаром кафедр электрические машины  
и общей электротехники)

Расчет коммутации машины постоянного тока со вспомогательными вентилями, принцип работы которой изложен в [1], заключается в определении оптимальных с точки зрения коммутации размеров щеток, их взаимного расположения и в определении зоны безыскровой работы, характеризующей коммутационную надежность машины.

Для определения области безыскровой работы необходимо найти предельно коммутирующие э.д.с., при которых машина с выбранной геометрией коллекторно-щеточного узла работает без искрения. В обычных машинах подобная задача чрезвычайно сложна из-за свойства щеточного контакта.

В машине со вспомогательными вентилями зона безыскровой работы определяется прежде всего расположением и шириной щеток. В работе [1] показано, что если пренебречь коммутирующими свойствами щеток, то искрение на верхней границе безыскровой зоны (под главной щеткой) начнется, как только период коммутации тока в секции, определяемый величиной коммутирующей э.д.с., станет меньше времени замыкания секции главной щетки.

Искрение вспомогательной щетки определяет нижнюю границу зоны и начинается, когда период коммутации тока в секции станет больше времени замыкания ее главной и вспомогательной щетками.

Таким образом, для расчета безыскровой зоны нужно найти коммутирующие э.д.с., при которых ток секции, изменяясь, становится равным току параллельной ветви как раз в момент выключения главной щетки (верхняя граница зоны) и вспомогательной щетки (нижняя граница зоны). Эта задача может быть относительно просто решена методами расчета линейных электрических цепей.

Примем предварительно ряд допущений:

- а) Коммутирующая э.д.с. постоянна в течение периода коммутации.
- б) Магнитная система не насыщена.
- в) Сопротивление петушков равно нулю.
- г) Поле главных полюсов в зоне коммутации отсутствует.
- д) Щетки не обладают коммутирующими свойствами.
- е) Число секций в пазу равно двум: в верхнем слое паза расположена сторона секции, замыкаемой накоротко щеткой одной полярности, а в нижнем слое — сторона секции, замыкаемая щеткой противоположной полярности.

Три последних допущения связаны с конструктивными и принципиальными особенностями машины со щеточно-вентильной коммутаци-

ей [1]. Так как здесь нас интересует главным образом безыскровая зона в режимах, близких к номинальному, то допущения г) и д) совершенно оправданы: в машинах со вспомогательными вентилями в номинальном режиме коммутирующая э.д.с. составляет величину порядка (15—20) и второстепенно факторы не оказывают заметного влияния на точность расчета.

Нетрудно показать, что в общем виде относительная ширина безыскровой зоны может быть записана следующим образом:

$$\Theta = \frac{F_0}{F_{до}} \cdot \frac{e_1 - e_2}{e_0} \quad (1)$$

Здесь  $e_1$ ;  $e_2$ ;  $e_3$  — коммутирующие э.д.с. соответственно на верхней и нижней границах зоны и при отсутствии дополнительного питания добавочных полюсов;

$F_0 = ke_0$  — ампервитки воздушного зазора под добавочным полюсом, идущие на создание коммутирующей э.д.с.  $e_0$ , т. е. расчетные ампервитки воздушного зазора;

$F_{до}$  — полные ампервитки добавочного полюса при отсутствии дополнительного питания.

Если зона расположена симметрично относительно оси тока якоря, то

$$\Theta^* = 2 \frac{F_0^*}{F_{до}^*} \cdot \frac{e_1 - e_2}{e_1 + e_2} \quad (2)$$

Определение ширины безыскровой зоны начнем с простейшего случая, когда учитывается только индуктивность рассеяния секций якоря. Такая последовательность позволяет простым путем установить некоторые общие закономерности.

1. Безыскровая зона при отсутствии индивидуальных связей и активных сопротивлений. Для коммутирующих э.д.с. можно записать:

$$e_1 = L \frac{2i_a}{T_1}; \quad e_2 = L \frac{2i_a}{T_2}; \quad e_0 = L \frac{2i_a}{T_0} \quad (3)$$

Здесь

$T_1$ ;  $T_2$ ;  $T_0$  — периоды коммутации тока в секции соответственно на верхней и нижней границах зоны и при отсутствии дополнительного питания;

$i_a$  — ток параллельной ветви;

$T_1$  и  $T_2$  — в машине с идеальной геометрией равны периодам замыкания секции главной щеткой ( $T_1$ ) и главной и вспомогательной щетками ( $T_2$ ).

Подставляя (3) в (1), получаем

$$\Theta = \frac{F_0}{F_{до}} \cdot T_0 \cdot \frac{T_2 - T_1}{T_1 \cdot T_2} \quad (4)$$

Таким образом, при прочих равных условиях ширина безыскровой зоны определяется шириной и расположением щеток и не зависит от нагрузки, поскольку отношение  $\frac{F_0 \cdot T_0}{F_{до}}$  с изменением нагрузки не меняется.

Но ширина и расположение зоны относительно оси тока якоря зависят от выбора расчетных ампервитков воздушного зазора. Если при неизменном токе якоря изменять ампервитки добавочного полюса, то произведение  $F_0 T_0 = e_0 T_0$  не меняется; поэтому с уменьшением ампервитков добавочного полюса ширина безыскровой зоны возрастает, и наоборот. Расположение зоны относительно оси тока якоря при этом также изменяется.

2. Безыскровая зона с учетом взаимоиндукции, но без учета активных сопротивлений. Уравнения электрического равновесия для индуктивно связанных короткозамкнутых контуров имеют вид:

$$L \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} = e, \quad (5)$$

$$L \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} = e. \quad (6)$$

Из уравнений следует, что в период существования индуктивной связи скорости изменения токов в индуктивно связанных секциях одинаковы, а так как в те интервалы времени, когда взаимоиндукция отсутствует, скорость изменения тока в обеих секциях возрастает на одну и ту же величину, то периоды коммутации тока в обеих секциях одинаковы, хотя время замыкания секций щетками может быть разным.

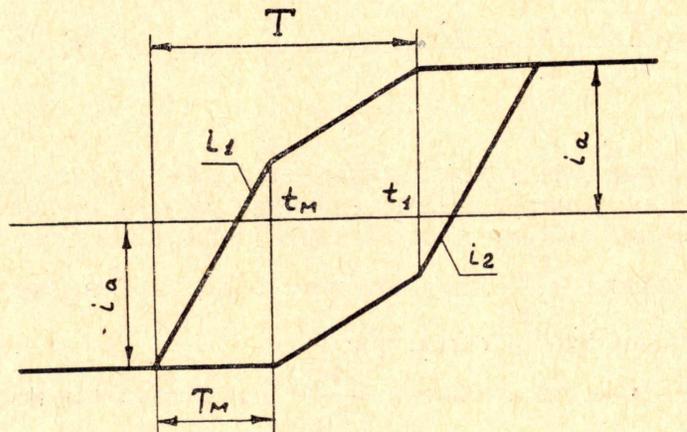


Рис. 1.

Если период коммутации тока  $i_1$  в секции, замыкаемой щетками раньше, равен  $T$ , а промежуток времени от начала коммутации данной секции до начала коммутации индуктивно связанной с ней секции равен  $T_m$  (рис. 1), то в интервале существования индуктивной связи ток секции изменяется по закону

$$i_1 = \frac{e}{L+M} t + I_1(\theta). \quad (7)$$

$I_1(\theta)$  — значение тока в момент начала действия индуктивной связи ( $t_m$ ):

$$I_1(0) = \frac{e}{L} T_m - i_a. \quad (8)$$

Решая совместно уравнения (7) и (8) и принимая во внимание, что при  $t=T_1$   $i_1=i_a$ , получаем

$$e = \frac{L(L+M) \cdot 2i_a}{LT + MT_m}. \quad (9)$$

На верхней границе зоны  $T=T_1$ , а на нижней  $T=T_2$ , поэтому для симметричной зоны получаем:

$$\theta^* = 2 \frac{F_{\text{до}}^*}{F_{\text{о}}^*} \cdot \frac{L(T_2 - T_1)}{L(T_2 + T_1) + 2MT_m}. \quad (10)$$

Относительная ширина зоны по-прежнему не зависит от нагрузки, но зависит уже не только от времени замыкания секций щетками, но и

от интервала  $T_M$ . Анализ показывает, что при прочих равных условиях зависимость  $\Theta=f(T_M)$  имеет вид, представленный на рис. 2.

В реальных машинах вследствие неизбежных технологических отклонений при изготовлении коллектора периоды замыкания щетками различных секций на верхней и нижней границах зоны ( $T_1$ ;  $T_2$ ) не одинаковы. Кроме того, у различных пар индуктивно связанных секций различны и интервалы времени между началами коммутаций.

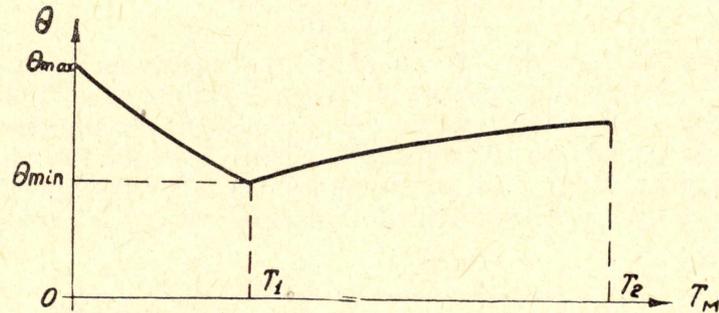


Рис. 2.

В этом случае для каждой пары секций будут свои значения коммутирующих э.д.с., при которых обеспечивается безыскровое выключение только этих секций. И для каждой пары индуктивно связанных секций будет свое значение  $\frac{F_0}{F_{до}}$ , при котором область безыскровой работы этих секций расположена симметрично.

В действительности отношение  $\frac{F_0}{F_{до}}$  одинаково для всех секций машины, а знать необходимо область безыскровой работы машины в целом.

В этом случае в формулу (1) для расчета зоны нужно подставлять минимальную для данной машины коммутирующую э.д.с. на верхней границе зоны ( $e_{1min}$ ), полученную с учетом реальных допусков на изготовление коллектора, и максимальную э.д.с. на нижней границе зоны ( $e_{2max}$ ). Э.д.с. при отсутствии дополнительного питания определяется по расчетным ампервиткам воздушного зазора. Полученная, таким образом, безыскровая зона машины будет представлять собой область, общую областям безыскрового выключения отдельных секций машины.

Очевидно, минимальная э.д.с. на верхней границе зоны имеет место для секции, у которой, например,  $T_1=T_{1max}$  и одновременно  $T_M=T_{Mmax}$ . Максимальная э.д.с. на нижней границе получается для секции, у которой  $T_2=T_{2min}$  и  $T_M=T_{Mmin}$ .

При различных вариантах конструктивного оформления схемы вентильной коммутации [1] технологические допуски сказываются на зоне безыскровой работы по-разному. В случае одноколлекторного варианта периоды замыкания секций щетками ( $T_1$ ;  $T_2$ ) одинаковы для всех секций и непостоянство условий коммутации различных пар индуктивно связанных секций объясняется только тем, что  $T_M=var$ .

Для двухколлекторного варианта также можно считать, что периоды замыкания различных секций главными щетками одинаковы. Но кроме непостоянства интервала времени между началами коммутации индуктивно связанных секций, здесь необходимо считаться с возможным неблагоприятным наложением допусков на главном и вспомогательном коллекторах, что может вызвать неравенство периодов замыкания секций главной и вспомогательной щетками ( $T_2$ ). С этой точки зрения предпочтительнее одноколлекторное исполнение.

При любом исполнении расчета безыскровой зоны вновь проектируемой машины целесообразно проводить в два этапа: а) определить максимально возможную для данной машины безыскровую зону, которая получается, если коллектор изготовлен с нулевыми допусками; б) определить минимально возможную зону при наиболее неблагоприятном распределении допусков.

В изготовленной машине ширина безыскровой зоны будет занимать какое-то промежуточное значение.

3. Безыскровая зона с учетом активных сопротивлений. Выражения для коммутирующих э.д.с. на верхней и нижней границах зоны представляют собой сложные функции вида

$$e = i_a \cdot r \cdot f(r, L, M, T_1, T_2, T_M) \quad (11)$$

и здесь не приводятся.

Отметим, что при  $r \neq 0$  периоды коммутации тока в индуктивно связанных секциях, если секции начинают коммутировать одновременно, не одинаковы: период коммутации тока в секции, начинающей коммутацию позже, меньше. Это связано с действием на коммутацию падения напряжения на активном сопротивлении [2].

Поэтому предельная коммутирующая э.д.с. на верхней границе безыскровой зоны должна определяться по безыскровому выключению секции, которая замыкается щетками накоротко позже, чем индуктивно связанная с ней секция. И наоборот, на нижней границе зоны коммутирующая э.д.с. определяется секцией, начинающей коммутацию раньше.

Как показали расчеты, влияние активного сопротивления на зону безыскровой работы при номинальной скорости вращения незначительно, поэтому в большинстве случаев им можно пренебречь и тогда расчет существенно упростится.

По предложенной методике была рассчитана относительная ширина безыскровой зоны для экспериментальной машины. В номинальном режиме расчет дал величину 18%, тогда как действительная ширина зоны равна 20%. При этом размеры щеток и обмоточные данные были несколько иными, чем в первых экспериментах [1].

### Выводы

1. При сделанных допущениях относительная ширина зоны безыскровой работы не зависит от нагрузки.
2. Ширина и расположение безыскровой зоны зависят от выбора расчетных ампервитков воздушного зазора.
3. Расчет безыскровой зоны необходимо вести с учетом технологических допусков на изготовление коллектора.
4. Зона безыскровой работы двигателя со вспомогательными вентилями в режимах, близких к номинальному, может быть рассчитана с достаточной точностью по предложенной методике.

### ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. И в а ш и н, И. А. М и л о р а д о в. О вентильно-механической коммутации машин постоянного тока, Известия ТПИ, т. 160, 1966.
2. О. Г. В е г н е р. Теория и практика коммутации машин постоянного тока, Госэнергоиздат, 1961.