

## КОММУТАЦИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ИЛИ СМЕШАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ С ВМК В РЕЖИМЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ

В. А. Иванников, В. В. Ивашин, И. А. Милорадов

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин  
и общей электротехники)

Предварительные исследования показали, что относительная ширина зоны безыскровой работы у машин с вентильно-механической коммутацией (ВМК) при регулировании скорости вращения якоря изменяется в значительно меньшей степени, чем у машин с традиционной коммутацией [1]. Кроме того, безыскровая зона машин с ВМК менее склонна к смещению относительно оси тока якоря, что имеет решающее значение при регулировании скорости. В связи с ожидаемой перспективностью применения схем ВМК в двигателях с широким диапазоном регулирования представляется интересным рассмотреть основные причины, определяющие коммутацию машин с ВМК в этом режиме.

Таковыми причинами, от которых зависит ширина и расположение безыскровой зоны, являются:

а) величина тока возбуждения главных полюсов, воздействующая на безыскровую зону через эдс от главного поля в зоне коммутации и изменение степени насыщения магнитопровода на пути потока добавочных полюсов (прежде всего того участка станины, на котором потоки главных и добавочных полюсов суммируются);

б) вихревые токи в железе и в теле проводников от изменения пазового потока рассеяния при коммутации тока паза, вызывающие изменение активных и индуктивных параметров коммутирующих секций.

Известно, что хотя по мере увеличения скорости вращения вихревые токи и способствуют относительному ускорению коммутации, но влияние их невелико [2], особенно в машинах с малым сечением проводников и шихтованными магнитопроводами. Поэтому в дальнейшем предполагается постоянство параметров секций;

в) активное сопротивление коммутирующих секций;

г) падение напряжения в щеточных контактах;

д) механические факторы, от которых зависит качество контакта щеток с коллектором. Схемы ВМК предназначены для борьбы с искрением только электромагнитной природы. Поэтому здесь предполагается, что при изменении скорости вращения нарушения механического контакта не происходит.

Все указанные причины действуют и в машинах с традиционной коммутацией, но в машинах с ВМК, как будет видно из дальнейшего, есть своя специфика. Проанализируем отдельно влияние каждого из факторов, предполагая, что во всех случаях при изменении скорости вращения ток якоря остается постоянным.

Величина тока возбуждения главных полюсов.

При регулировании скорости вращения эдс наводимая в коммутирующей секции полем главных полюсов машины, изменяется за счет изменения скорости вращения и за счет изменения тока возбуждения главных полюсов ( $i_B$ ), если регулирование осуществляется при постоянной мощности.

Как следует из [3], ток дополнительного питания ( $i_n$ ) при проникновении главного поля в зону коммутации можно записать в виде:

$$i_n = k(U - e_0 \pm U_r), \quad (1)$$

где  $U$  — напряжение в коммутирующей секции, при котором начинается искрение на коллекторе;  $U$  равно эдс наводимой в секции полем добавочных полюсов, если другие напряжения в контуре секции пренебрежимо малы,  $U_r$  — постоянное во времени напряжение, эквивалентное по степени влияния на ток секции действительной эдс от главного поля в коммутационной зоне [3],  $i_0$  — эдс от добавочных полюсов при  $i_n = 0$ ,

$k \equiv \frac{1}{n}$  — коэффициент пропорциональности.

Согласно (1), если ток возбуждения главных полюсов остается постоянным, а регулирование скорости осуществляется изменением подводимого к якору напряжения, то при условии, что падения напряжения в щеточных контактах и на активных сопротивлениях пренебрежимо малы,  $i_n$  не изменяется (как для верхней, так и для нижней границы зоны), так как в этом случае  $U$ ,  $e_0$ ,  $U_r$  одновременно увеличиваются или уменьшаются прямо пропорционально скорости вращения якоря [3, 4], а  $k$  — обратно пропорционально. Следовательно, при таком способе регулирования возможные изменения в очертаниях безыскровой зоны не связаны с величиной эдс от главного поля, а вызываются другими причинами: активным сопротивлением секций и свойствами щеточного контакта.

Если же изменить ток возбуждения главных полюсов при  $n = \text{const}$ , то величина  $i_n$ , как нетрудно видеть из (1), не остается постоянной. При этом величина и знак изменения  $i_n$  зависят прежде всего от расположения периодов коммутации секции на границах зоны относительно геометрической нейтрали, то есть от положения щеточной траверзы. В наиболее вероятном для машин с ВМК случае [3] следует ожидать увеличения  $i_{n1}$  и примерного постоянства  $i_{n2}$  при уменьшении  $i_B$  ( $i_{n1}$ ,  $i_{n2}$  — токи дополнительного питания, соответствующие границам безыскровой зоны). В реальных машинах картина усложняется из-за того, что при изменении  $i_B$  может меняться степень насыщения магнитопровода на пути потока добавочного полюса, а также, если в машине применена стабилизирующая последовательная обмотка, из-за нелинейного изменения  $U_r$  при регулировании тока возбуждения шунтовой обмотки.

Изменение степени насыщения участков станины, на которых потоки главных и добавочных полюсов действуют согласно, проявляется в машинах с ВМК, так же как и в машинах с традиционной коммутацией, в том, что по мере уменьшения  $i_B$  при регулировании скорости вращения добавочные полюса становятся относительно сильнее и безыскровая зона опускается в сторону отрицательных токов дополнительного питания. Понятно, что этот фактор действует лишь в том случае, если индукция в станине достаточно велика и падением магнитного потенциала в стали нельзя пренебречь.

Таким образом, изменение  $i_B$  может привести к прямо противоположным результатам: если, например, уменьшение  $U_r$  с изменением  $i_B$  ведет к росту  $i_{n1}$ , то за счет уменьшения степени насыщения станины ток  $i_{n1}$  должен стать меньше. Результат зависит от того, какой фактор окажется преобладающим.

Для примера на рис. 1 приведены зависимости  $i_n = f\left(\frac{i_B}{i_{B0}}\right)$  при  $n = \text{const}$  для двигателей ПЗ2 и П40 [5], снятые экспериментально.

Активное сопротивление коммутирующих секций. Если бы активные сопротивления коммутирующих секций, как и падения напряжения в щеточных контактах, были равны нулю, то зависимости предельных напряжений секции, соответствующих границам безыскровой зоны, от скорости вращения имели бы вид прямых 3 и 4 на рис. 2. Можно показать, что при  $R_c \neq 0$  зависимости напряжений секции на границах зоны от скорости вращения изобразятся кривыми 1 (верхняя граница) и 2 (нижняя граница), которые асимптотически приближаются к прямым 3 и 4 (соответственно). Это значит, что, начиная с некоторой скорости вращения, величина предельного напряжения не зависит от  $R_c$ . Как правило, это имеет место при  $n \geq n_N$ , т. е. при исследовании номинальных по скорости вращения режимов можно исходить из допущения  $R_c = 0$  [3, 4].

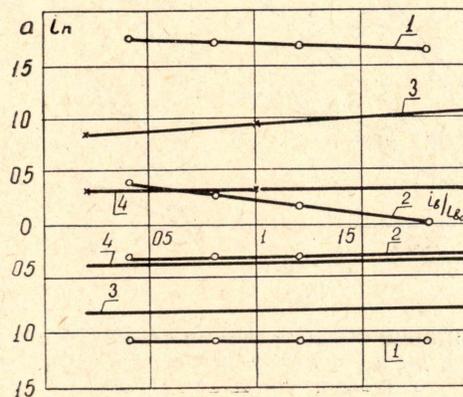


Рис. 1. Зависимость токов подпитки от тока возбуждения главных полюсов.

П40;  $n = 1200$  об/мин,  $i_{B0} = 0,5$  а,  
 1—1:  $2 i_a = 13a$ , 2—2:  $2 i_a = 11,9$  а,  
 ПЗ2:  $n = 750$  об/мин,  $i_{B0} = 0,1$  а,  
 3—3:  $2 i_a = 6$  а, 4—4:  $i_a = 2a$ .

Прямая 5 на рис. 2, а представляет зависимость эдс  $e_0$ , создаваемой в секции добавочными полюсами при отсутствии дополнительного питания, от скорости вращения якоря. Рисунок показывает, что при скоростях вращения, меньших некоторой критической  $n_{кр1}$ , зона безыскровой работы расположена выше оси гока якоря, так как при  $n < n_{кр1}$  эдс, создаваемая добавочными полюсами, меньше напряжения, необходимого для безыскровой работы машины даже на нижней границе зоны. По мере увеличения  $n$  зона опускается в область токов «отпитки», а начиная со скорости  $n \approx n_N$ , когда сопротивлением секции можно пренебречь, величина  $i_n$  уже не зависит от скорости вращения. Следовательно, если «сила» добавочных полюсов выбрана так, что при скорости, близкой к номинальной, зона симметрична, то она остается симметричной и при  $n > n_N$ , т. е. активное сопротивление не может привести к исчезновению зоны при регулировании скорости вращения. Оно лишь ведет к ее смещению в область недокоммутации при малых скоростях вращения.

Более полный анализ позволяет установить, что неравенство нулю активного сопротивления секций несколько уменьшает величину коэф-

коэффициента статической коммутационной устойчивости машин с ВМК и в тем большей степени, чем меньше коммутирующая эдс, т. е.  $n$ . Но это уменьшение полностью или частично компенсируется воздействием на коммутацию щеточного контакта.

Падение напряжения в щеточных контактах: положим, что  $R_c = 0$ , тогда, как указывалось выше, напряжения, при которых машина начнет искрить на границах зоны, будут линейными функциями скорости вращения (рис. 2, б). Особенностью рассматриваемой схемы ВМК является то, что среднее напряжение  $\Delta U$ , вводимое щеткой в контур короткозамкнутой секции, всегда действует встречно с коммутирующей эдс [4]. Поэтому для того, чтобы результирующее, суммарное

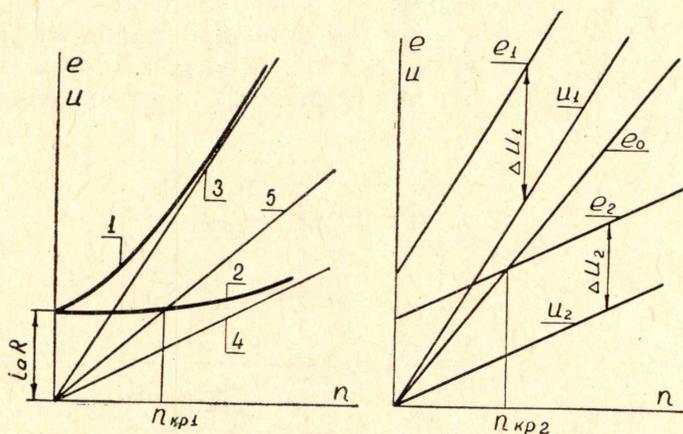


Рис. 2. Влияние сопротивления секции и падений напряжения в щеточных контактах на безыскровую зону: а)  $R_c \neq 0$ ,  $\Delta u = 0$ , б)  $R_c = 0$ ,  $\Delta u \neq 0$

напряжение секции было равно  $U$ , т. е. напряжению, при котором начинается искрение, коммутирующая эдс, создаваемая в секции добавочными полюсами, должна быть равна

$$e = U + \Delta U. \quad (2)$$

Если допустить, что при  $2i_a = \text{const}$ ,  $\Delta U = \text{const}$  независимо от скорости вращения, то при изменении скорости эдс соответствующие границам зоны должны изменяться так, как показано на рис. 2, б ( $e_1$ ,  $e_2$ ). Принято, что замедление коммутации на верхней границе безыскровой зоны больше, чем на нижней, т. е.  $\Delta U_1 > \Delta U_2$ , что и имеет место в действительности.

Видно, что, как и в случае  $R_c \neq 0$ ,  $\Delta U = 0$ , всегда существует скорость вращения  $n_{кр2}$ , ниже которой безыскровая зона располагается выше оси тока якоря, так как при  $n < n_{кр2}$ ,  $e_0 < e_2$ . Рисунок показывает, что при увеличении скорости вращения выше  $n_{кр2}$  прямые  $e_0$  и  $e_1$  (или  $e_2$ ) не пересекаются. Это означает, что хотя по мере увеличения  $n$  зона и опускается в область перекоммутации (добавочные полюса становятся относительно сильнее под действием  $\Delta U$ ), но всегда  $i_{n1} > 0$  и  $i_{n2} < 0$ . Из рис. 2, б следует также, что под влиянием  $\Delta U$  ширина безыскровой зоны и  $k_c$  увеличиваются, то есть в этом отношении действие  $\Delta U$  противоположно действию активного сопротивления. При этом по мере роста  $n$  влияние щеточного контакта относительно уменьшается, так как с увеличением скорости пропорционально увеличивается коммутирующая эдс, тогда как величина  $\Delta U$  при  $2i_a = \text{const}$  не меняется. Как будет меняться  $k_c$  при одновременном действии  $R_c$  и  $\Delta U$ , зависит от конкретных параметров. Совместное действие  $R_c$  и  $\Delta U$  всегда ведет к смещению зоны в сторону относительного усиления добавочных полюсов с ростом  $n$ , а также, как

нетрудно установить, сопоставляя рис. 2, а и 2, б, к некоторому увеличению критической скорости вращения, ниже которой  $i_{n2} > 0$ .

На рис. 3 приведены полученные экспериментально на машинах П32 и П40 зависимости  $i_n = f(n)$  при  $i_b = \text{const}$ , которые как раз и характеризуют воздействие на  $i_n$ ,  $R_c$  и  $\Delta U$ , так как в этом случае благодаря постоянству тока возбуждения сохраняются постоянными воздействие поля главных полюсов и степень насыщения станины.

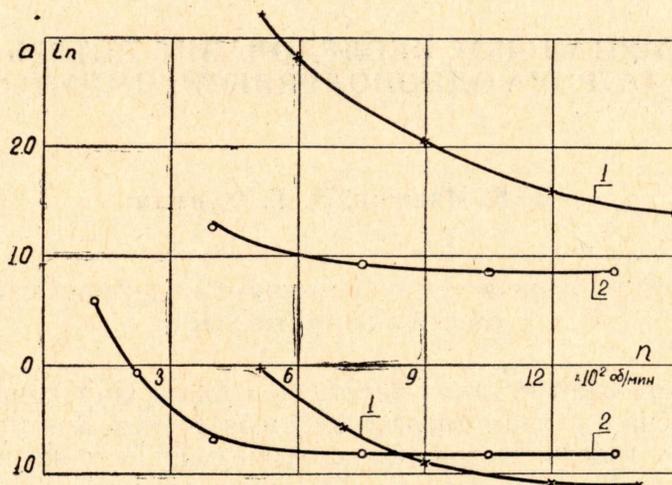


Рис. 3. Зависимость токов подпитки от скорости вращения при  $i_b = \text{const}$ , 1—1: П40, 2  $i_a = 13$  а,  $i_b = 0,45$  а, 2—2: П32, 2  $i_a = 6$  а,  $i_b = 0,18$  а

### Выводы

Безыскровая зона машины с ВМК с правильно выбранной намагничивающей силой добавочных полюсов при скорости вращения больше критической никогда не смещается полностью в область пере- или недокоммутации. Рассмотренные выше факторы, искажающие безыскровую зону, в машинах с ВМК, в отличие от машин с традиционной коммутацией, не могут привести к исчезновению безыскровой зоны, к пересечению ее границ с увеличением скорости вращения якоря.

### ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Ива шин, И. А. Милора до в, В. Л. Гро м о к. Некоторые результаты исследования вентильно-механической коммутации. Тезисы докладов IV Всесоюзной конференции по коммутации МПТ, Омск, 1968.
2. М. Ф. Ка ра с е в и др. Дальнейшее развитие теории оптимальной коммутации. Труды ОМИИТа, т. 78, 1967.
3. В. В. Ива шин, И. А. Милора до в. Исследование влияния главного поля на коммутацию машин со вспомогательными вентилями. Известия ТПИ, т. 172, 1967.
4. В. В. Ива шин, И. А. Милора до в. О вентильно-механической коммутации машин постоянного тока. Известия ТПИ, т. 160, 1966.
5. И. А. Вол ко мир ский, В. А. Ива н н и ко в, В. В. Ива шин, И. А. Милора до в. Экспериментальные исследования коммутации двигателей постоянного тока с ВМК в режиме регулирования скорости вращения (см. настоящий сборник).