

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МАШИНЫ
ПОСТОЯННОГО ТОКА С ВЕНТИЛЬНО-МЕХАНИЧЕСКОЙ
КОММУТАЦИЕЙ**

О. А. Братковский, В. В. Ивашин, И. А. Милорадов

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин
и общей электротехники)

В последнее время уделяется значительное внимание применению полупроводниковых приборов для улучшения коммутации в электрических машинах. Одним из примеров такого их применения являются схемы вентильно-механической коммутации (ВМК), значительно повышающие коммутационную устойчивость машин постоянного тока. Известно достаточно большое количество схем ВМК (см. библиографию [1]), однако число работ по их экспериментальному исследованию весьма ограничено. Это препятствует практическому применению ВМК, несмотря на ее положительные качества.

В настоящей статье приводятся результаты экспериментальной проверки одной из схем ВМК — с включением вентилей в коммутируемые секции на весь период их замыкания подразделенной щеткой, и с загрузкой вентилей полным током щеточного бракета [1] на машине постоянного тока малой мощности.

Экспериментальная установка

Экспериментальная установка состоит из двух одинаковых электрических машин постоянного тока на общей подставке, соединенных друг с другом эластичной муфтой. Одна из этих машин (M_1) выполнена с обычной схемой коммутации, а другая (M_2) со схемой ВМК (рис. 1). Двухмашинное исполнение увеличивает возможности установки, так как каждая машина может быть испытана в двигательном и генераторном режимах, при этом одна из них служит нагрузкой или двигателем для другой, и имеется возможность на одной установке качественно сравнить ВМК с обычной коммутацией. Основные данные машин при работе их в режиме двигателя:

напряжения питания якоря двигателя — до 110 в,
напряжение питания обмоток возбуждения — 27 в,
ток якоря — до 10 а,
ток возбуждения — до 2,5 а,
скорость вращения — до 8000 об/мин,
число полюсов — 2,
диаметр якоря — 6 см,
длина якоря — 7,5 см.

Конструкция статора обеих машин одинакова. Роторы машин M_1 и M_2 выполнены из одинаковых деталей: валов, пакетов якорного железа и коллекторов. Обмотки якорей выполнены одним и тем же проводом, с одинаковым общим числом проводников. Шаг у обеих обмоток диаметральный, скос пазов якоря и полюсных наконечников отсутствует. Одинаковы также числа пазов якорей (по 16) и размеры щеток ($8 \times 12,5 \times 16$ мм).

Отличие M_1 и M_2 состоит в следующем. Машина M_1 имеет один коллектор с числом коллекторных пластин 32, две щетки (ЭГ-71), перекрывающие по две коллекторные пластины, число витков в секции обмотки якоря 8 и в обмотке дополнительного полюса 90.

Машина M_2 имеет сдвоенный коллектор, выполненный для простоты из двух коллекторов от машины M_1 , расположенных по обе стороны от пакета якоря. Число коллекторных пластин на одном коллекторе 16 (каждая состоит из двух смежных пластин, соединенных электрически). Число щеток (МГС-7И) 4, число витков в секции 16 и в обмотке дополнительного полюса 130.

Для создания режимов положительной и отрицательной подпитки при снятии безыскровых зон на дополнительных полюсах обеих машин кроме основной намотана вторая (подпиточная) обмотка, питаемая независимо.

Принципиальная схема щеточно-коллекторного узла машины M_2 и способ подключения обмотки к коллекторным пластинам показаны на рис. 1.

Принцип работы схемы ВМК

В схеме ВМК (рис. 1) каждая щетка подразделяется на две части, ширина которых равна коллекторному делению. В этом случае коммутируемые секции ($S_1—S_{16}$) замыкаются не телом щетки (как при обычной коммутации), а цепочками (1; 2 и 3; 4) из последовательно соединенных частей щеток и диодов.

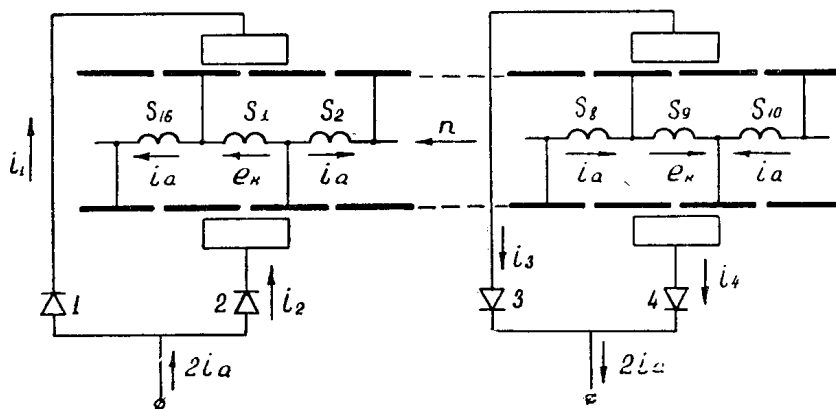


Рис. 1. Принципиальная схема ВМК экспериментальной машины

При вращении ротора диоды 1; 2; 3 и 4 включаются поочередно в контуры коммутируемых секций на весь период их замыкания подразделенной щеткой. Изменение тока в коммутируемых секциях происходит в основном под действием эдс e_K от дополнительных полюсов. Одновременно изменяются токи в щетках и диодах 1; 2 и 3; 4.

Для безыскровой работы сбегающего края щеток в номинальном

режиме эдс e_k должна быть такой величины, чтобы ток в коммутируемых секциях достигал значения тока соответствующей параллельной ветви (i_a) в момент времени, предшествующий размыканию коммутируемой секции щеткой. В этот же момент обесточиваются и соответствующие щетки и диоды. Росту тока в коммутируемых секциях (под действием эдс e_k сверх значения i_a с этого момента и до размыкания секции препятствуют диоды, к которым прикладывается обратное напряжение, приблизительно равное e_k . Таким образом, щетки размыкают секции уже обесточенными, и искрение исключается. Очевидно, что при дальнейшем увеличении эдс e_k безыскровая работа сбегающего края щеток не будет нарушена.

При уменьшении эдс e_k до величины, недостаточной для достижения током коммутируемой секции значения i_a к моменту размыкания секции, щетки будут разрывать остаточный ток и появится искрение. Особенность данной схемы ВМК состоит также в том, что при дальнейшем уменьшении и даже изменении знака эдс e_k остаточный ток, разрываемый щетками, не превышает $2i_a$ (из-за наличия диодов).

Очевидно, безыскровая зона машины со схемой ВМК (рис. 1) ограничена только одной нижней границей.

Результаты экспериментальной проверки

Безыскровые зоны экспериментальных машин снимались по методу В. Т. Касьянова и строились в осях:

$$I_n = f(I_{\text{я}}) \text{ при } n = \text{const},$$

$$I_n = f(n) \text{ при } I_{\text{я}} = \text{const}.$$

Ток подпитки определялся по формуле

$$I_n = i_n \frac{W_n}{W_d}.$$

Здесь $I_{\text{я}}$ — ток якоря,

n — скорость вращения,

I_n — ток подпитки,

i_n — ток в подпиточной обмотке,

W_n — число витков в подпиточной обмотке,

W_d — число витков в обмотке дополнительного полюса.

Для исключения возможного влияния изменения главного поля на форму безыскровых зон последние для обеих машин снимались при неизменном токе возбуждения ($I_{\text{я}}$). При работе машин M_1 и M_2 в двигательном и генераторном режимах полярность щеток не изменялась. Эксперименты показали, что при такой методике безыскровые зоны машин, снятые в режиме двигателя и генератора, практически совпадают.

Границы зоны машины M_1 определялись по появлению искрения (до $1\frac{1}{4}$ балла). Нижняя граница зоны машины M_2 определялась двумя способами:

а) по появлению искрения $1\frac{1}{4}$ балла,

б) по исчезновению импульсов обратного напряжения на диодах.

Второй способ определяет границу зоны при отсутствии коммутационных свойств у щеток и условиях, что обратный ток диодов равен нулю, а бесконечно малый остаточный ток вызывает искрение.

На рис. 2 показана безыскровая зона для сбегающего края щеток обеих экспериментальных машин при $n = 4000$ об/мин. Как видно из рисунка, характер безыскровых зон при обычной коммутации и при ВМК принципиально различен. Если у машины M_1 безыскровая зона отсутствует при $I_{\text{я}}$ больше $6 a$, то у M_2 ширина зоны (точнее, ее часть при

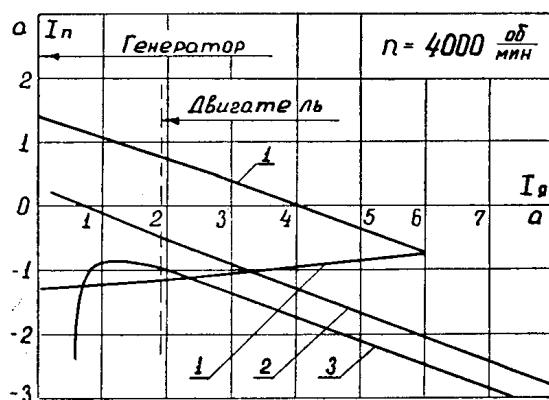


Рис. 2. Границы безыскровых зон экспериментальных машин при переменном токе якоря (I_a) и постоянной скорости вращения (n): 1 — при обычной коммутации, 2 — при ВМК без учета коммутирующих свойств щеток, 3 — при ВМК с учетом коммутирующих свойств щеток

отрицательной подпитке) увеличивается примерно пропорционально току якоря.

При токе якоря больше $1 a$ площадь, ограниченная кривыми 2 и 3 (рис. 2), показывает влияние коммутирующих свойств щеток, расширяющих безыскровую зону. При токе якоря меньше $1 a$ граница зоны машины M_2 (кривая 3, рис. 2) резко идет вниз и искрение не появляется при любых токах I_a . В машине же M_1 имеются две четкие границы (кривая 1, рис. 2). Объясняется это тем, что остаточный ток, разрываемый щетками, у машины M_2 не превышает $I_a = 2 i_a$, а при I_a меньше $1 a$ электромагнитная энергия коммутируемой секции, очевидно, недостаточна для образования видимого искрения.

Из рис. 2 видно также, что граница безыскровой зоны M_2 без учета коммутирующих свойств щеток (кривая 2, рис. 2) при уменьшении тока якоря не приходит в нуль. Наиболее вероятной причиной этого может быть влияние главного поля на коммутационную зону, особенно сильное при малых токах якоря.

Следует отметить, что отладка коммутации машины M_1 (подбор наилучшей марки щеток, формы коммутирующего поля и т. д.) не проводилась. Ее проведение, возможно, несколько расширит зону. Однако характер зоны останется прежним, так как при обычной коммутации добиться идеального случая — параллельности границ зоны принципиально очень трудно и в большинстве случаев невозможно.

На рис. 3 показаны безыскровые зоны обеих машин при токе якоря, равном $6 a$, и переменной скорости вращения от 500 до 7000 об/мин. Видно, что у машины M_1 безыскровая зона отсутствует при скорости вращения больше 4000 об/мин., а у M_2 — практически не зависит от нее.

Особенностью границы зоны машины M_2 (кривая 2, рис. 3), снятой без учета коммутирующих свойств щеток, является наличие критической скорости $n_{кр}$. При $n < n_{кр}$ безыскровая работа обеспечивается за счет коммутирующих свойств щеток.

В схеме ВМК (рис. 1) не предусматривались меры исключения искрения набегающего края щеток. Наблюдение за ним показало, что у обеих машин оно одинаково (не более $1\frac{1}{4}$ балла) и имеет место при токе якоря больше $6 a$.

Анализ показал, что по кривым токов и напряжений диодов можно составить достаточно полное представление о коммутации в машине.

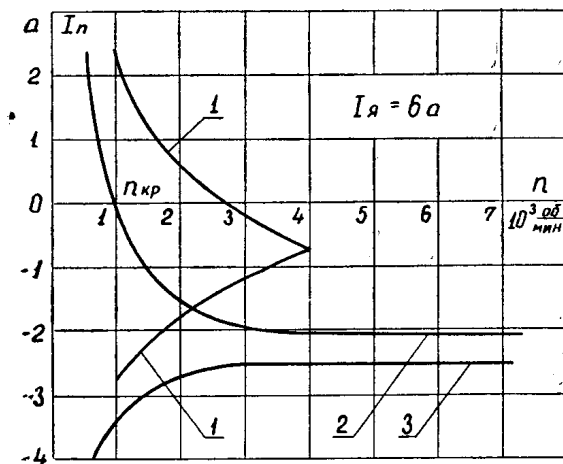


Рис. 3. Границы безыскровых зон экспериментальных машин при постоянном токе якоря (I_a) и переменной скорости вращения (n): 1—при обычной коммутации, 2—при ВМК без учета коммутирующих свойств щеток, 3—при ВМК с учетом коммутирующих свойств щеток

Так, например, по токам диодов можно судить об изменении токов во всех коммутируемых секциях машины, по обратному напряжению на диодах — о величине коммутирующей эдс в секции, по форме этих кривых — о моментах замыкания и размыкания секций щеткой и, таким образом, о работе щеточного контакта и т. п.

В целом характер кривых токов и напряжений диодов, которые наблюдались с помощью электронного осциллографа, полностью подтвердил ожидаемый принцип работы схемы ВМК. Отметим лишь одну характерную особенность формы токов коммутируемых секций, лежащих в одних и тех же пазах. Из-за неточности расположения коллекторных пластин и из-за самой природы щеточного контакта коммутация в них происходит неодновременно.

Изменение тока в секции, вступившей в коммутацию раньше, резко замедляется при вступлении в коммутацию второй секции. Ток второй секции, наоборот, изменяется более ускоренно. Происходит быстрое их уравнение, и коммутация тока в секциях паза заканчивается почти одновременно. Уравнение токов в коммутируемых секциях паза можно объяснить только разностью падений напряжения на их активных сопротивлениях и в щеточных контактах и одновременным действием взаимной индукции.

В схеме ВМК (рис. 1) это явление неопасно, а иногда и полезно, так как оно «исправляет» неодновременность коммутации секций паза, обусловленную неустойчивостью контакта набегающего края щетки.

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Экспериментальная проверка схемы ВМК полностью подтвердила ее ожидаемый принцип работы и высокую коммутационную устойчивость при значительных перегрузках и широком изменении скорости вращения.

2. Коммутирующие свойства щеток в схеме ВМК заметно увеличивают зону безыскровой работы, особенно при $n < n_{кр}$.

3. Схема ВМК по сравнению с обычной коммутацией менее чувствительна к нарушениям щеточного контакта, заключающимся в уменьшении действительного периода замыкания секции, так как при ВМК время собственно коммутации тока в секции может быть значительно меньше периода ее замыкания щетками.

4. Конструктивные особенности схемы ВМК открывают возможность достаточно простого исследования коммутационного процесса всех секций якоря и эффективного воздействия на него.

ЛИТЕРАТУРА

1. О. А. Братковский, В. В. Ивашин, И. А. Милорадов. Схемы вентильно-механической коммутации машин постоянного тока (см. настоящий сборник).
