

КОММУТАЦИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ВМК В ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ

В. А. ИВАННИКОВ, И. А. МИЛОРАДОВ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических
машин и общей электротехники)

До настоящего времени работа двигателей с вентильно-механической коммутацией с загрузкой вентилей частью тока щеточного бракета исследовалась только в установившихся режимах, например, при медленном изменении нагрузки и т. п. [1]. Однако в связи с особенностями машин с ВМК представляется интересным рассмотреть коммутацию этих машин в переходных режимах, в частности на пуске, при динамическом торможении и при набросах нагрузки.

Как известно, в двигателях с ВМК рассматриваемого типа безыскровая работа обеспечивается вентилями, если ток коллекторной пластины проходит через ноль между моментами выключения секции главной и вспомогательной щетками. Это условие безыскровой работы выполняется, если индуктированная добавочными полюсами в короткозамкнутой секции э.д.с. находится в пределах

$$e_2 < e_k < e_1, \quad (1)$$

где e_2 — э.д.с. секции, при которой начинается искрение вспомогательной щетки, определяющее нижнюю границу зоны безыскровой работы;

e_1 — э.д.с. секции, при которой начинается искрение главной щетки, определяющее верхнюю границу зоны.

Выбором намагничивающей силы добавочных полюсов всегда можно добиться соблюдения условия (1) в любом установившемся режиме. Но в переходных режимах условие нормальной коммутации может нарушаться. Это обусловлено теми же причинами, что и в обычных машинах постоянного тока: насыщением магнитной цепи добавочных полюсов; отставанием магнитного потока добавочных полюсов из-за демпфирующего действия вихревых токов в массивных сердечниках добавочных полюсов и станине; появлением в короткозамкнутой секции трансформаторной э.д.с. от изменения основного потока; влиянием активного сопротивления секции. Все эти факторы, за исключением влияния вихревых токов, в машинах с ВМК проявляются более резко, чем в машинах с обычной коммутацией, так как осуществление ВМК приводит к уменьшению подразделенности якорной обмотки и некоторому увеличению числа витков обмотки добавочных полюсов. Демпфирование коммутирующего потока вихревыми токами при увеличении н. с. добавочных полюсов, как известно, относительно уменьшается [2].

Весь последующий анализ проводится на примере двигателя с ВМК, выполненного на базе двигателя П32 М, при питании напряжением 220 в, $I_a = 5,3$ а, $n = 900$ об/мин. Возбуждение независимое с легкой последова-

тельной обмоткой, число секций в пазу $u_n=1$, число витков в секции $w_s=48$, результирующая индуктивность секции $L=0,0054$ гн, активное сопротивление $r=1$ ом, периоды коммутации на верхней и нижней границах зоны при $n=900$ об/мин $T_1=0,00141$ сек, $T_2=0,00324$ сек, число витков обмотки добавочного полюса $w_d=270$, зазор между якорем и добавочным полюсом $\delta=1,6$ мм.

Рассмотрим некоторые режимы, при которых коммутация машин с ВМК может быть нарушена.

Регулирование скорости вращения при постоянном токе якоря

Если пренебречь влиянием вихревых токов, насыщением магнитной цепи добавочных полюсов, трансформаторной э.д.с. и падением напряжения в щеточном контакте то э.д.с. e_1 и e_2 можно записать в виде [4]:

$$e_{1(2)} = i_a \cdot r \frac{1 + e^{-\frac{r}{L} \cdot T_{1(2)}}}{1 - e^{-\frac{r}{L} \cdot T_{1(2)}}}, \quad (2)$$

где i_a — ток параллельной ветви.

Зависимости $e_{1(2)}$ от скорости вращения ω при $i_a = \text{const}$ в относительных единицах, т. е. в долях номинального значения коммутирующей э.д.с. от добавочных полюсов, приведены на рис. 1. Кривые e_1 и e_2 отсекают на оси ординат отрезок, равный по величине произведению $i_a \cdot r$, и с увеличением скорости вращения асимптотически приближаются к прямым 1, 2, проходящим через начало координат под углами α_1 и α_2 и представляющим собой зависимости коммутирующих э.д.с. e_1 и e_2 при $r=0$. Как видно из рис. 1, э.д.с. e_1 и e_2 при $r \neq 0$ больше, чем при $r=0$, т. е. активное сопротивление замедляет коммутацию и тем в большей степени, чем меньше ω . При $\omega=0$ $e_1=e_2=i_a \cdot r$, т. е. чем больше ток якоря, тем больше степень недокоммутации.

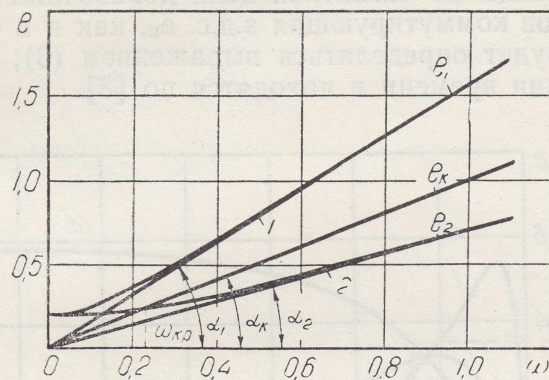


Рис. 1. Режим регулирования скорости вращения при $i = \text{const}$

Коммутирующая э.д.с., наводимая в контуре короткозамкнутой секции добавочными полюсами, при сделанных допущениях в относительных единицах равна

$$e_K = i \cdot \omega, \quad (3)$$

i — ток якоря в относительных единицах. Выражение (3) есть уравнение прямой, проходящей через начало координат под углом α_K к оси ω . В двигателях с ВМК $\alpha_1 > \alpha_K > \alpha_2$ и зависимости e_K и e_2 (рис. 1) обяза

тельно пересекаются, причем только в одной точке—при некоторой критической скорости $\omega_{кр}$ (рис. 1). При скоростях вращения, меньших критической, добавочные полюса создают слишком малую э. д. с. по сравнению с той, которая необходима для выполнения условия (1), т. е. в интервале $0—\omega_{кр}$ коммутация имеет замедленный характер, и безыскровая работа двигателя может обеспечиваться только за счет свойств щеточного контакта.

Таким образом, даже при сохранении пропорциональности между током и потоком добавочных полюсов при скоростях вращения, меньших критической, возможно нарушение безыскровой работы машины, обусловленное действием активного сопротивления секции. Имеющийся опыт настройки машин с ВМК показывает, что $\omega_{кр}$ при $i = \text{const}$, как правило, не превышает 25% от ω_n .

При пуске, торможении и набросе нагрузки ток якоря не остается постоянным и зачастую во много раз превосходит номинальное значение. Поэтому в этих режимах влияние активного сопротивления на коммутацию может оказаться более сильным.

Для оценки коммутации в режимах пуска, торможения и наброса нагрузки необходимо знать характер зависимости тока и скорости вращения от времени. Эти зависимости находились при следующих допущениях: а) поток главных полюсов в переходных режимах остается постоянным, т. е. предполагается, что изменения режимов происходят при включенной обмотке независимого возбуждения, а реакция якоря компенсируется н. с. последовательной обмотки; б) индуктивность цепи якоря не изменяется; в) зависимость момента сопротивления на валу двигателя от скорости вращения — линейная.

При этих допущениях переходные процессы описываются системой дифференциальных уравнений, подробно рассмотренных в [3]. Поэтому ниже приводятся только конечные результаты расчетов без промежуточных выкладок.

Прямой пуск электродвигателя без нагрузки на валу

Без учета насыщения магнитной цепи добавочных полюсов и влияния вихревых токов коммутирующая э. д. с. e_k , как и в случае регулирования скорости, будет определяться выражением (3), но i и ω в этом случае есть функции времени и находятся по [3].

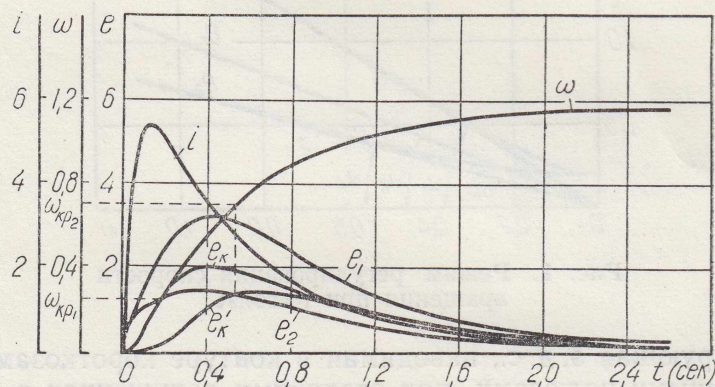


Рис. 2. Прямой пуск двигателя
а)

На рис. 2, а приведены расчетные зависимости i , ω , e_k , e_1 и e_2 в относительных единицах в функции t при прямом пуске двигателя П32. Как следует из рис. 2, а, бросок якорного тока при ненасыщен-

ной магнитной цепи добавочных полюсов и отсутствии вихревых токов практически не влияет на величину критической скорости вращения $\omega_{кр1}$ (рис. 2, а), ниже которой нарушается условие (1). Однако хорошо известно, что в некомпенсированных машинах, особенно малой и средней мощности, вследствие насыщения и увеличения рассеяния магнитной системы добавочных полюсов при больших кратностях тока линейная зависимость между коммутирующим потоком и током резко нарушается, и полезный поток добавочных полюсов с увеличением тока уменьшается. На рис. 3, а показана расчетная кривая намагничивания добавочных полюсов двигателя П32 в относительных единицах. Как видно, практически линейная зависимость потока добавочных полюсов Φ_d от тока якоря i сохраняется лишь до $i=2$. Кроме того, при резком изменении тока на величину коммутирующего потока будут сказываться вихревые токи в магнитопроводе, воздействие которых приводит к отставанию магнитного потока добавочных полюсов от тока якоря. Учет насыщения и вихревых токов производился так же, как в [3]. Зависимость коммутирующей э.д.с. при прямом пуске $e'_k(t)$ для этого случая показана на рис. 2, а. Рисунок показывает, что критическая скорость $\omega_{кр2}$ в этом случае значительно больше $\omega_{кр1}$ и составляет 0,7 ω_n .

Следует заметить, что в данной машине, как показал расчет, вихревые токи в магнитной цепи добавочных полюсов быстро затухают (коэффициент затухания вихревых токов $\lambda_{вхд}=31$ 1/сек), и хотя в начальный момент пуска поток добавочных полюсов с учетом насыщения и вихревых токов Φ'_d значительно меньше, чем поток без учета вихревых токов Φ_d (рис. 2, б), это практически не сказывается на величине коммутирующей э.д.с., так как скорость вращения в этот момент очень ма-

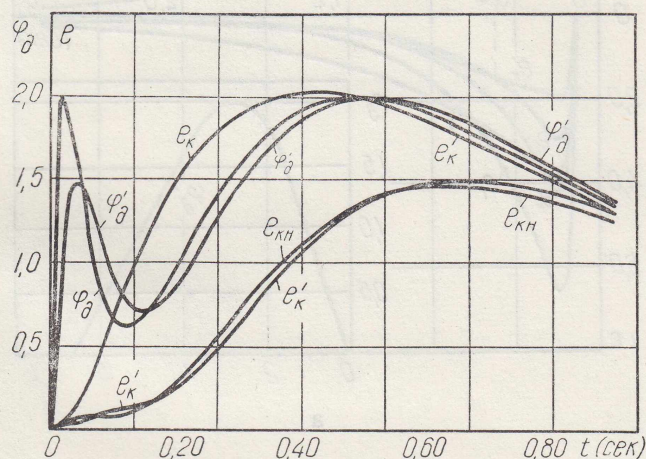


Рис. 2 б)

ла. На рис. 2, б приведены зависимости потоков добавочных полюсов Φ'_d и Φ_d , а также коммутирующих э.д.с. в функции времени: без учета насыщения и вихревых токов — e_k , с учетом только насыщения — $e_{кн}$ и с учетом насыщения и вихревых токов — e'_k .

Анализ этих зависимостей показывает, что при пуске на величину коммутирующей э.д.с., следовательно, и на величину критической скорости основное влияние оказывает насыщение магнитной цепи добавочных полюсов.

Уменьшить критическую скорость, ниже которой нарушается условие (1), т. е. e'_k становится меньше e_2 , можно снижением броска тока в начальный момент пуска. Подсчеты показывают, что, например, при одноступенчатом пуске двигателя с кратностью пускового тока на

первой ступени 2, 7 i_H критическая скорость вращения составляет уже 0,32 ω_H .

Дальнейшего уменьшения критической скорости, т. е. уменьшения диапазона скорости, при котором коммутация на пуске имеет замедленный характер, можно добиться специальными мерами, например, путем включения на период пуска последовательно с вентилем небольшой емкости, зашунтированной активным сопротивлением [4]. Следует заметить, что искрение, обусловленное недокоммутацией, из-за небольшой величины скорости вращения в рассмотренном режиме менее опасно, чем в режимах с бросками тока на скорости вращения, близкой к номинальной и выше, например, при динамическом торможении.

Динамическое торможение двигателя без нагрузки на валу

На рис. 3, а, б приведены в функции t зависимости i , ω , e_K , e'_K , e_1 , e_2 , e_{KH} , $\varphi_{дн}$ и $\varphi'_д$ при динамическом торможении двигателя ПЗ2 с брос-

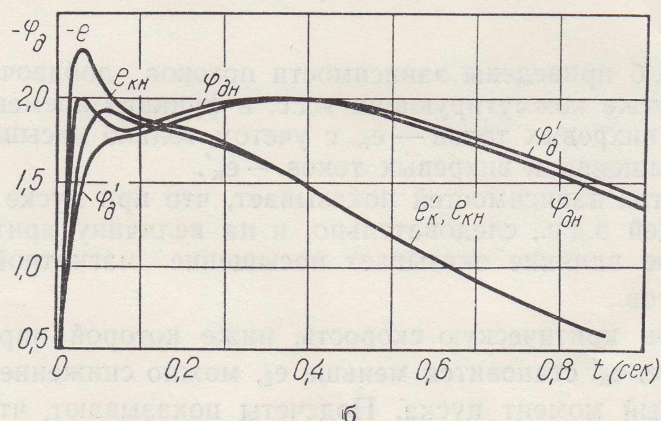
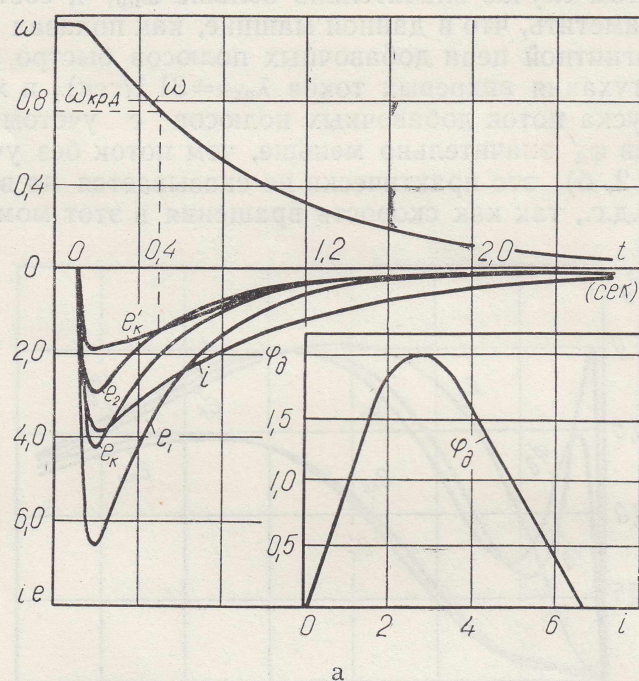


Рис. 3. Динамическое торможение двигателя.

ком динамического тока $4,2 i_n$. Анализ этих зависимостей показывает, что влияние вихревых токов на замедление коммутации при динамическом торможении относительно больше, чем в режиме прямого пуска, так как при примерно одинаковой скорости нарастания тока в обоих случаях скорость вращения в начале динамического торможения близка к номинальной.

Однако, с точки зрения опасности искрения на коллекторе основное замедление коммутации происходит из-за насыщения магнитной цепи добавочных полюсов, так как активное сопротивление, как и в случае прямого пуска, ведет к нарушению условия (1) только на скоростях вращения меньших $\omega_{кр1}$, когда величина динамического тока якоря мала и не может вызвать интенсивного искрения щеток.

В заключение необходимо отметить, что в режимах, при которых происходит относительно медленное изменение якорного тока, и его величина не приводит к значительному насыщению магнитной цепи добавочных полюсов, например, наброс нагрузки до $2i_n$, условие (1) при $\omega \geq \omega_{кр}$ не нарушается (рис. 4), и схема ВМК обеспечивает безыскровую работу машины. Это подтверждается и проведенными на заводе «Электромашина» (г. Прокопьевск) испытаниями двигателей с ВМК при перегрузках и набросе нагрузки до $2i_n$.

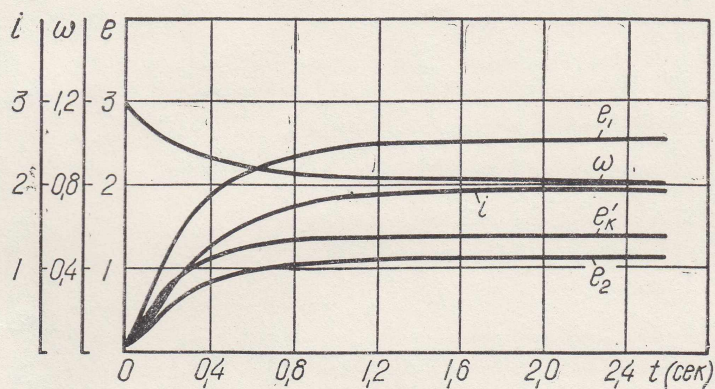


Рис. 4. Режим наброса нагрузки до $2i_n$

Выводы

1. В переходных режимах искрение на коллекторе машин с ВМК вызывается теми же основными причинами, что и в машинах с обычной коммутацией и, прежде всего, насыщением магнитной цепи добавочных полюсов при больших кратностях тока якоря.

2. Интервалы времени, на которых при переходных режимах нарушается нормальная работа вспомогательных вентилях, как правило, невелики, поэтому возникающее искрение, как показывает опыт, не приводит к разрушению контактных поверхностей и не сказывается на дальнейшей работе схемы ВМК.

ЛИТЕРАТУРА