

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОММУТАЦИИ
ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ВМК В РЕЖИМЕ
РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ОСЛАБЛЕНИЕМ
ПОЛЯ ГЛАВНЫХ ПОЛЮСОВ**

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

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и
общей электротехники)

Эксперименты проводились на двигателях:

1) П32, 750—1300 об/мин, 5,1—5,72 а; 2) П40, 1200—1875 об/мин, 11,8—14,3 а. Возбуждение шунтовое с легкой стабилизацией. Напряжение питания 175—320 в. Обе машины выполнены со схемой ВМК с частичной загрузкой вентилей током щеточного бракета [1, 2].

Методика эксперимента

Поскольку цель работы состояла в определении и проверке общих закономерностей коммутации машин с ВМК в режиме глубокого регулирования скорости вращения ослаблением поля главных полюсов, то на экспериментальных машинах снимались прежде всего зависимости $i_n = f(h)$ при $U_n = \text{const}$, $i_b = \text{var}$ (i_n — ток дополнительного питания добавочных полюсов, U_n — напряжение на якоре, i_b — ток возбуждения), в которых находят отражение все факторы, воздействующие на коммутацию при изменении скорости вращения [1]. Питание на шунтовую обмотку возбуждения подавалось от независимого источника. На якоре устанавливалось минимальное из номинальных напряжений — 175 в, так как при этом напряжении можно получить наибольшие пределы изменения скорости вращения, изменяя ток возбуждения. Но и в этом случае минимальная скорость при постоянной мощности остается достаточно высокой, что вызвано особенностями регулировочных характеристик экспериментальных машин. Дальнейшее уменьшение скорости осуществлялось уменьшением напряжения питания якоря при постоянном токе возбуждения, т. е. снимались зависимости $i_n = f(n)$ при $i_b = \text{const}$, $U_n = \text{var}$. Такие зависимости позволяют оценить влияние на коммутацию только активного сопротивления секции (R_c) и щеточного контакта (среднее напряжение, вводимое щеткой в секцию — ΔU) при постоянном воздействии i_b , так как доля i_b в изменении токов подпитки не зависит от скорости вращения [1].

Характер действия i_b на токи дополнительного питания лучше всего прослеживается по зависимостям $i_n = f(i_b)$ при $n = \text{const}$, $i_b = \text{var}$, которые отражают влияние на i_n и главного поля в коммутационной зоне и степени насыщения станины [1].

Полученные таким образом данные дают возможность определить коэффициенты статической коммутационной устойчивости экспериментальных машин в функции скорости вращения и сравнить их с аналогичными зависимостями для машин с традиционной коммутацией.

Результаты эксперимента

Опытные кривые $i_n = f(n)$ обеих машин при $U_d = \text{const}$, $i_b = \text{var}$ для нескольких токов нагрузки приведены на рис. 1. Как видно, тенденция к относительному усилению добавочных полюсов с ростом скорости вращения, на которую указывалось в [1], в целом выполняется: с увеличением n i_{n1} (верхняя граница зоны) падает, а i_{n2} — (нижняя граница) несколько возрастает.

Исключение представляет i_{n1} машины П40 на малых нагрузках (кривая 4, рис. 1): i_{n1} сначала возрастает, а с дальнейшим увеличением скорости, как обычно, уменьшается. Это связано с особенностями действия величины тока возбуждения на эдс в коммутационной зоне этой машины [1]. На рис. 1 обращает на себя внимание и более резкий спад i_{n1} с

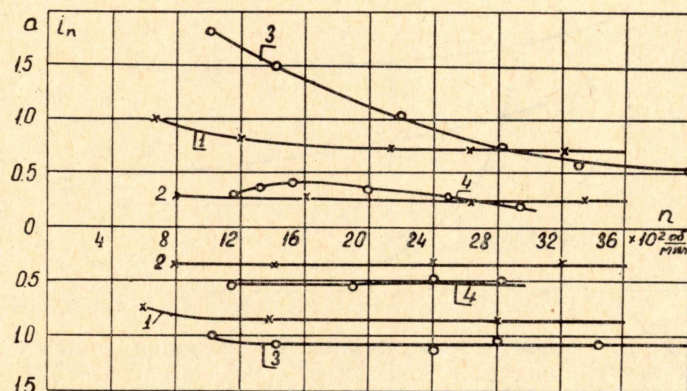


Рис. 1. Зависимость токов подпитки от скорости вращения. 1—1: П32, $2 i_a = 6 a$; 3—3: П40, $2 i_a = 13 a$; 2—2: П32, $2 i_a = 2 a$; 4—4: П40, $2 i_a = 3,9 a$.

ростом скорости для двигателя П40, по сравнению с П32. На наш взгляд, это объясняется двумя обстоятельствами: а) менее благоприятным, чем у П32, соотношением постоянной времени короткозамкнутого контура и периода коммутации, б) более высоким уровнем вибраций. Обе экспериментальные машины не рассчитаны на повышенную скорость вращения, и балансировка их якорей производилась при $n < 2000$ об/мин. Поэтому в отношении вибраций машины оставляли желать лучшего, но так как двигатель П40 имеет большую мощность на валу и большую окружную скорость коллектора, то уровень вибраций щеток у этой машины был несколько выше. Повышенные вибрации вызывают ухудшение качества перехвата тока в вентиль и, как следствие, более резкое уменьшение величины i_{n1} , чем следовало бы по чисто электромагнитным причинам.

Зависимости $i_n = f(i_b)$ при $n = \text{const}$ для нескольких токов якоря приведены в [1]. Для обеих машин характерна практически независимость i_{n2} от величины тока возбуждения. Это связано с тем, что в машинах с ВМК вся комплексная щетка и период коммутации на нижней границе зоны (T_2) располагается, как правило, симметрично относительно геометрической нейтрали (оси добавочного полюса), и поэтому среднее значение эдс от главного поля в зоне коммутации за период коммутации T_2 близко к нулю. В этом случае i_n не зависит от величины i_b [1]. Кроме того, на нижней границе зоны падение магнитного потенциала в стали проявляется в меньшей степени, поскольку поток добавочного полюса мал. Что касается верхней границы зоны (i_{n1}), то на ней величина i_b сказывается по-разному: в П32 с увеличением i_b i_{n1} увеличивается, а в П40, наоборот, уменьшается. По-видимому, в двигателе П32 влияние

насыщения стальных участков на пути потока добавочного полюса более существенно, так как эта машина имеет $2p=2$. Данные, полученные на экспериментальных машинах при переменной скорости вращения и постоянном токе возбуждения, рассмотрены в [1] и полностью подтверждают выводы теоретического анализа: влияние R_c и ΔU на токи «подпитки», особенно заметное при малых скоростях вращения, с ростом n уменьшается. Критическая скорость вращения, ниже которой безыскровая зона переходит в область недокоммутации ($i_{п2} > 0$), у экспериментальных машин лежит в диапазоне 200—500 об/мин.

На рис. 2 изображены зависимости относительной ширины безыск-

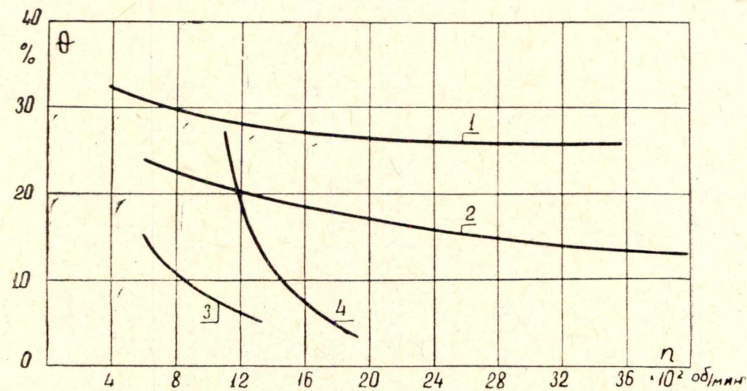


Рис. 2. Зависимость ширины безыскровой зоны от скорости вращения: 1: ПЗ2, $2 i_a = 6a$, ВМК; 2: П40, $2 i_a = 13a$, ВМК; 3: ПЗ2, $2 i_a = 6a$, ОК; 4: П40, $2 i_a = 13a$, ОК.

ровых зон Θ ($\Theta = \frac{i_{п1} + i_{п2}}{2i_a}$) экспериментальных машин от скорости вращения. При $n > 700$ об/мин для двигателя ПЗ2 и $n > 1000$ об/мин для П40 Θ определялась по рис. 1, а при меньших скоростях по функциям $i_{п1} = f(n)$, $i_{п2} = \text{const}$, $U_a = \text{Var}$ [1]

На этом же рисунке приведены кривые $\Theta = f(n)$ однотипных машин с традиционной коммутацией. Как видно, Θ машин с ВМК, хотя и падает с увеличением скорости вращения по причинам, указанным в [1], но не в такой степени, как у машин с традиционной, обычной коммутацией (ОК). У последних, судя по рис. 2, при данных токах якоря вообще можно ожидать исчезновения безыскровых зон на скорости вращения 2400—2800 об/мин. Следует отметить, что специального опыта по снятию безыскровых зон машины с традиционной коммутацией в том диапазоне скоростей, в котором испытывались экспериментальные образцы с ВМК, не проводилось. Данные для определения Θ взяты из протоколов типовых испытаний заводских машин.

Кривые рис. 2 обрабатывались с целью определения коэффициентов статической коммутационной устойчивости [3], причем k_c машин с ВМК рассчитывался с учетом разницы периодов коммутации на границах зоны (см. Приложение).

Зависимости k_c от скорости вращения приведены на рис. 3. Рисунок показывает, что преимущества вентильно-механической коммутации, как и предполагалось раньше, становятся особенно наглядными при больших нагрузках и скоростях вращения. Если у машин с традиционной коммутацией k_c резко падает с увеличением скорости вращения, то для машин с ВМК характерно примерное постоянство k_c в широком диапазоне изменения n . Расчетные значения k_c экспериментальных ма-

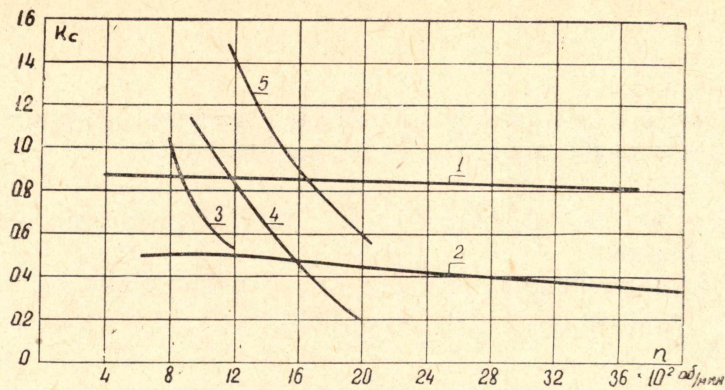


Рис. 3. Зависимость k_c от скорости вращения.
 1 — ПЗ2, $2 i_a = 6a$, ВМЖ; 2 — П40, $2 i_a = 13a$, ВМЖ;
 3 — ПЗ2, $2 i_a = 6a$, ОК; 4 — П40, $2 i_a = 13a$, ОК;
 5 — П40, $2 i_a = 8a$, ОК

шин равны: в ПЗ2 — 0,77, у П40 — 0,473. Эти значения достаточно близки к опытным данным (величина k_c двигателя ПЗ2 несколько меньше указанной в [2], так как при проведении настоящей работы размеры частей щеток были изменены).

Выводы

1. Если не рассматривать причин искрения механического характера, то основное влияние на ширину и расположение безыскровой зоны, как и ожидалось по данным теоретического анализа, оказывают R_c , ΔU и i_b . Воздействие этих факторов не приводит к пересечению границ безыскровой зоны при $n > n_{кр}$.

2. Вентильно-механическая коммутация позволяет получить в машинах рассматриваемого класса диапазон изменения скорости вращения до 1:8 и выше без искрения коллектора: минимальная скорость вращения, при которой машины еще работают без искрения, находится в диапазоне 200—500 об/мин, максимально возможная скорость определяется качеством механического контакта щеток с коллектором.

Определение θ и k_c машины с ВМК с учетом неодинакового действия реакции якоря на границах безыскровой зоны

Полагаем, что $R_c=0$, $\Delta U=0$, т. е. рассматриваются режимы, близкие к номинальным.

Полная намагничивающая сила (н. с.) добавочных полюсов на верхней границе безыскровой зоны, создающая в коммутирующей секции ЭДС e_1 , равна

$$F_1 = F_d + F_{\pi 1} - F_{ря1}. \quad (1)$$

Здесь

$F_d = I_{я} \cdot W_d$ — н. с. добавочных полюсов при отсутствии их дополнительного питания;

$F_{\pi 1} = i_{\pi 1} \cdot W_d$ — н. с. токов подпитки;

$F_{ря1}$ — н. с. добавочных полюсов, компенсирующая в среднем действие поперечной реакции якоря в зоне коммутации на верхней границе безыскровой зоны, т. е. при периоде коммутации тока в секции T_1 ;

W_d — число витков добавочного полюса;

$I_{я}$ — ток якоря.

Обозначим

$$W_{01} \cdot I_{я} = F_d - F_{ря1}. \quad (2)$$

Тогда

$$i_{\pi 1} = \frac{F_1 - I_{я} \cdot W_{01}}{W_d}. \quad (3)$$

Аналогичным путем для тока «отпитки» получаем:

$$i_{\pi 2} = \frac{I_{я} \cdot W_{02} - F_2}{W_d}, \quad (4)$$

где F_2 — н. с. добавочных полюсов на нижней границе зоны;

$$I_{я} W_{02} = F_d - F_{ря2}, \quad (5)$$

$F_{ря2}$ — н. с. добавочных полюсов, компенсирующая действие поперечной реакции якоря на нижней границе зоны.

Относительная ширина безыскровой зоны с учетом (3) и (4):

$$\theta = \frac{i_{\pi 1} + i_{\pi 2}}{I_{я}} = \frac{F_1 - F_2}{I_{я} W_d} + \frac{W_{02} - W_{01}}{W_d} \quad (6)$$

Если полагать, как это обычно делается, что связь между н. с. добавочных полюсов и коммутирующей ЭДС не зависит от режима работы, то есть

$$\frac{F_1}{e_1} = \frac{F_2}{e_2} = \frac{F_{00}}{e_{00}} = k, \quad (7)$$

то

$$\theta = \frac{W_{00}}{W_d} \cdot \frac{e_1 - e_2}{e_{00}} + \frac{W_{02} - W_{01}}{W_d}. \quad (8)$$

Здесь

$$F_{00} = W_{00} \cdot I_{я}, \quad W_{00} = \frac{W_{01} + W_{02}}{2}, \quad (9)$$

e_{00} — эдс, соответствующая н. с. F_{00} .

Введем обозначения:

$$k_d = \frac{W_{00}}{W_d} \text{ --- динамический коэффициент [3],}$$

$$k_c = \frac{e_1 - e_2}{e_{00}^*} \text{ --- коэффициент статической коммутационной устойчивости [3],} \quad (10)$$

$$k_{\Pi} = \frac{e_{00}^*}{e_{00}} \text{ --- коэффициент приведения зоны к симметричной,}$$

$$\Theta = \frac{W_{02} - W_{01}}{W_d} .$$

Тогда

$$\Theta = k_d \cdot k_c \cdot k_{\Pi} + \Delta\Theta. \quad (11)$$

Выражение (11) и использовалось для определения k_c по опытными данным (рис. 3).

В (10) e_{00}^* — эдс e_{00} , соответствующая симметричной зоне.

$$e_{00}^* = \frac{e_1 + e_2}{2} . \quad (12)$$

Для k_{Π} после преобразований получаем

$$k_{\Pi} = 1 + \frac{W_d}{W_{00}} \cdot \frac{\Delta i_{\Pi}}{I_{\text{я}}}, \quad (13)$$

где

$$\Delta i_{\Pi} = \frac{i_{\Pi 1} - i_{\Pi 2}}{2} .$$

Величины e_1 и e_2 , необходимые по (10) для расчета k_c , находятся по методике, изложенной в [4]. Чтобы определить k_c по опытными данным, используя (11), нужно знать величины W_{01} и W_{02} , которые, согласно (2) и (5), зависят от $F_{\text{ря}}$ и равны:

$$W_{01} = W_d - \frac{F_{\text{ря}1}}{I_{\text{я}}}; \quad W_{02} = W_d - \frac{F_{\text{ря}2}}{I_{\text{я}}} . \quad (14)$$

Обычно при расчете коммутации н. с. реакции якоря определяется по формуле

$$F_{\text{ря}} = A \frac{\tau}{2}, \quad (15)$$

которая дает верный результат лишь тогда, когда все секции паза начинают коммутацию одновременно, а ток в секциях изменяется на $2i_a$ мгновенно. Для более точного учета $F_{\text{ря}}$ необходимо принимать во внимание длительность коммутации тока в секциях [5]. Это тем более справедливо для машины с ВМК, у которых периоды коммутации тока в секциях на верхней (T_1) и нижней (T_2) границах зоны не одинаковы. Величину $F_{\text{ря}}$ можно просто определить, если предположить, что суммарный ток паза изменяется прямолинейно (в машинах с ВМК при $p \approx p_N$ это допущение особенно оправдано). Несложные вычисления, здесь опущенные, показывают, что в этом случае среднее за период коммутации значение н. с. реакции якоря равно:

$$F_{\text{ря}} = A \cdot \frac{\tau}{2} \left(1 - \frac{3}{4} \frac{T}{\tau} \right). \quad (16)$$

В (16) под T нужно понимать либо период коммутации тока паза, если секции паза начинают коммутацию неодновременно, либо период коммутации тока секции.

Подставив (16) в (14) при соответствующей величине T , определяем значения W_{01} и W_{02} .

Правильный учет реакции якоря в машинах с ВМК имеет большое значение. Например, для двигателя ПЗ2 ($T_2=2,21T_1$) расчет, выполненный по приведенным формулам, дает для относительной ширины симметричной безыскровой зоны величину 25,1%, тогда как при использовании (15), т. е. при допущении $T=0$, расчетная величина $\Theta=18,6\%$.

Экспериментальные данные на рис. 2 показывают, что первый результат гораздо ближе к действительности.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Иванников, В. В. Ивашин, И. А. Милорадов. Коммутация двигателей постоянного тока параллельного или смешанного возбуждения с ВМК в режиме регулирования скорости вращения. См. настоящий сборник.

2. В. В. Ивашин, И. А. Милорадов, В. Л. Громов. Некоторые результаты исследования вентильно-механической коммутации. Труды IV Всесоюзной конференции по коммутации, МПТ, Омск, 1968.

3. В. В. Ивашин, И. А. Милорадов. Коммутационная устойчивость двигателей постоянного тока и ее связь с зоной безыскровой работы. Известия ТПИ, т. 190, 1968.

4. В. В. Ивашин, И. А. Милорадов. Исследование зон безыскровой работы двигателя постоянного тока со щеточно-вентильной коммутацией. Известия ТПИ, т. 172, 1967.

5. Р. Рихтер. Электрические машины, т. 1, ОНТИ, 1935.