

КОММУТАЦИОННАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ МАШИН С ВЕНТИЛЬНО-МЕХАНИЧЕСКОЙ КОММУТАЦИЕЙ

О. А. БРАТКОВСКИЙ, В. В. ИВАШИН, И. А. МИЛОРАДОВ, М. А. СУТОРМИН

(Представлена научным семинаром кафедры электрических машин)

Понятие коммутационной устойчивости

В настоящее время оценка работы коллекторных электрических машин в коммутационном отношении ведется в основном по методу безыскровых зон [1], нашедшему широкое применение для экспериментальной настройки дополнительных полюсов. Этот метод позволяет наглядно сравнивать коммутационное состояние машин одного и того же типа. Вместе с тем он не применим, например, для машин, имеющих неодинаковые зазоры под дополнительным полюсом [2]. Количественно ширина безыскровой зоны этих машин неоднозначно определяет устойчивость их безыскровой работы в различных режимах. Поэтому в литературе наряду с понятием безыскровой зоны часто встречаются такие понятия, как «коммутационная способность», «коммутационная прочность», «коммутационная устойчивость» и другие в большинстве случаев не имеющие четкого определения.

В настоящей статье под коммутационной устойчивостью (КУ) коллекторной электрической машины понимается ее устойчивость к возникновению искрения щеток в различных режимах. Как правило, наиболее интенсивно и опасно искрение сбегającego края щеток. Поэтому понятие КУ связывается с безыскровой работой именно сбегającego края.

В общем случае, когда безыскровая зона несимметрична относительно оси абсцисс, КУ машины в каком-либо режиме определяется следующими коэффициентами:

$$K_{1,2} = \frac{\Delta e_{1,2}}{e_0}, \quad (1)$$

где

e_0 — э. д. с., наводимая коммутирующим потоком под дополнительными полюсами в секциях якоря;

$\Delta e_{1,2}$ — абсолютные значения максимально допустимых приращений э. д. с. e_0 , при которых еще не возникает искрения щеток;

$K_{1,2}$ — коэффициенты коммутационной устойчивости.

В выражении (1) индексы 1 относятся к положительным приращениям э. д. с. e_0 , а индексы 2 — к отрицательным.

Коэффициенты K_1 и K_2 — функции тока якоря, скорости вращения, коммутирующих свойств щеток, типа обмотки якоря и других параметров машины. Критерием устойчивой безыскровой работы является неравенство $K_{1,2} > 0$. Равенство $K_{1,2} = 0$ означает работу на грани появления искрения. В общем случае коэффициенты K_1 и K_2 в каком-либо ре-

жиме могут быть не равны. Тогда КУ машины в данном режиме определяет меньший из них (работа машины не в центре безыскровой зоны). Для работы в центре зоны нужно выполнить условие $K_1 = K_2$.

Режимы работы машины условно разделяются на два вида: статические и динамические. К статическим режимам относится работа машины хотя и при различных, но постоянных во времени токе якоря и токе обмотки возбуждения главных полюсов. К динамическим — работа машины с резкими изменениями или пульсациями токов якоря и обмотки возбуждения, которые могут привести к появлению кратковременных или периодических «небалансных» э. д. с. в коммутируемых секциях и к изменению во времени коэффициентов КУ.

Введение Δe в коммутируемые секции машины при экспериментальном определении КУ осуществляется методом подпитки обмотки дополнительного полюса. Представляет интерес связь между коэффициентами КУ и токами подпитки.

Для случая подпитки всей обмотки дополнительного полюса при ненасыщенной магнитной цепи можно записать

$$\frac{i_{п1,2}}{I_я} = \frac{F_{к0}}{F_{д0}} \cdot \frac{e_{1,2} - e_0}{e_0} = \frac{W_к}{W_д} \cdot \frac{\Delta e_{1,2}}{e_0} = \frac{W_к}{W_д} \cdot K_{1,2}. \quad (2)$$

Здесь $i_{п}$ — абсолютное значение тока подпитки обмотки дополнительного полюса;

$I_я$ — ток якоря;

$F_{д0}$ — н. с. обмотки дополнительного полюса при отсутствии подпитки;

$F_{к0}$ — часть н. с. дополнительного полюса, которая идет на создание коммутирующего потока;

$W_д$ — число витков обмотки дополнительного полюса;

$W_к = W_д - \frac{F_{рЯ}}{I_я}$ — часть витков обмотки дополнительного полюса-

которая создает н. с. $F_{к0}$;

$F_{рЯ}$ — н. с. поперечной реакции якоря;

$e_1; e_2$ — э. д. с. в коммутируемых секциях, при которых машина работает соответственно на верхней и нижней границах безыскровой зоны.

Отметим, что если производить подпитку не всех витков $W_д$ обмотки дополнительного полюса («полная» подпитка), а их части $W_к$ («частичная подпитка»), то аналогично (2) можно получить

$$\frac{I_{п1,2}}{I_я} = \frac{e_{1,2} - e_0}{e_0} = \frac{\Delta e_{1,2}}{e_0} = K_{1,2}, \quad (3)$$

где $I_{п}$ — абсолютное значение тока «частичной» подпитки. Таким образом, коэффициенты КУ представляют собой отношение абсолютных значений токов «частичной» подпитки к току якоря.

Связь коэффициентов КУ с шириной безыскровой зоны ϑ , снятой в осях $i_{п1,2}$, $I_я$, выражается соотношением

$$\vartheta = i_{п1} + i_{п2} = I_я \frac{W_к}{W_д} (K_1 + K_2). \quad (4)$$

Из (4) видна разница понятий ширины безыскровой зоны и коммутационной устойчивости.

Если на графике выше оси абсцисс расположить зависимость K_1 от какого-либо параметра, а ниже оси абсцисс — K_2 , то ширина области между кривыми K_1 и K_2 будет пропорциональна ширине безыскровой зоны в осях $i_{п}/I_я$, $I_я$ (коэффициент пропорциональности $W_к/W_д$).

В этом случае величина коэффициентов КУ наглядно увязывается с характером безыскровой зоны. Указанный графический способ используется в настоящей статье.

КУ машины с ВМК и влияние на нее различных факторов

Основные допущения

1. Коммутационная устойчивость оценивается по безыскровой работе только сбегающего края щеток.
2. Индуктивность, активное сопротивление секций якоря и коммутирующая э. д. с. — величины постоянные.

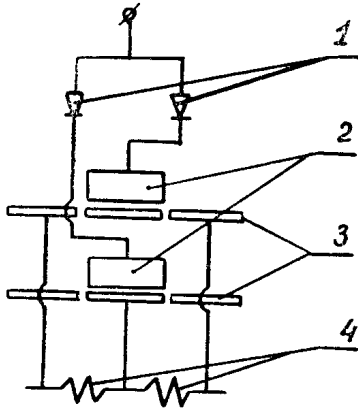


Рис. 1. Схема вентильно-механической коммутации: 1 — вентили, 2 — щетки, 3 — коллекторные пластины, 4 — секции якоря

3. Коммутация тока в секциях паза происходит одновременно. Это допущение предполагает диаметральный шаг обмотки и число секций в пазу, равное двум, что, как правило, имеет место в машинах с ВМК.

4. Рассматриваются машины со схемой ВМК рис. 1, с дополнительными полюсами и независимым возбуждением главных полюсов.

С учетом принятых обозначений можно записать следующие выражения для коэффициентов КУ машины со схемой ВМК:

$$K_1 = \frac{\Delta e_1}{e_0} = \frac{e_1 - e_0}{e_0} = \frac{e_1}{e_0} - 1, \quad (5)$$

$$K_2 = \frac{\Delta e_2}{e_0} = \frac{e_0 - e_2}{e_0} = 1 - \frac{e_2}{e_0}. \quad (6)$$

Из принципа работы схемы ВМК рис. 1 известно [3], что искрение сбегающего края щеток в ней отсутствует даже при очень больших приращениях Δe_1 . То есть $e_1 \gg e_0$ и K_1 теоретически равен бесконечности. (Практически величина K_1 все же ограничивается, но не искрением сбегающего края, а допустимым значением обратного напряжения на вентиле, а также увеличением плотности тока набегающего края щеток). Таким образом, КУ машины с ВМК определяется одним коэффициентом K_2 .

Для наиболее простого случая, когда в коммутируемом контуре учитываются только э. д. с. самоиндукции и коммутирующая э. д. с. от дополнительных полюсов и при ненасыщенной магнитной цепи, можно записать

$$e_2 = (L_s + M) \frac{2i_a}{T_2} = \frac{(L_s + M) \pi D_k}{60 ab_{щ}} I_a n = m_1 I_a n, \quad (7)$$

$$e_0 = 2B_k l_a v_a W_s = \frac{2W_s W_k \mu_0 l_a \pi D_a}{60 \delta_d} I_a n = m_2 I_a n, \quad (8)$$

$$K_2 = 1 - \frac{e_2}{e_0} = 1 - \frac{(L_s + M) \delta_d D_k}{2W_s W_k ab_{щ} \mu_0 l_a D_a} = 1 - \frac{m_1}{m_2}. \quad (9)$$

Здесь L_s , M — индуктивность и взаимная индуктивность секций паза;
 i_a — ток параллельной ветви машины;
 n — угловая скорость вращения якоря;
 a — число параллельных ветвей обмотки якоря;

- T_2 — период замыкания секций щетками;
 B_k — индукция в воздушном зазоре под добавочным полюсом;
 δ_d — воздушный зазор под добавочным полюсом;
 l_a, D_a, v_a — длина, диаметр и окружная скорость якоря;
 W_s — число витков в секции якоря;
 D_k — диаметр коллектора;
 $b_{щ}$ — ширина щетки;
 μ_0 — магнитная проницаемость воздуха;
 m_1, m_2 — постоянные для данной машины коэффициенты.

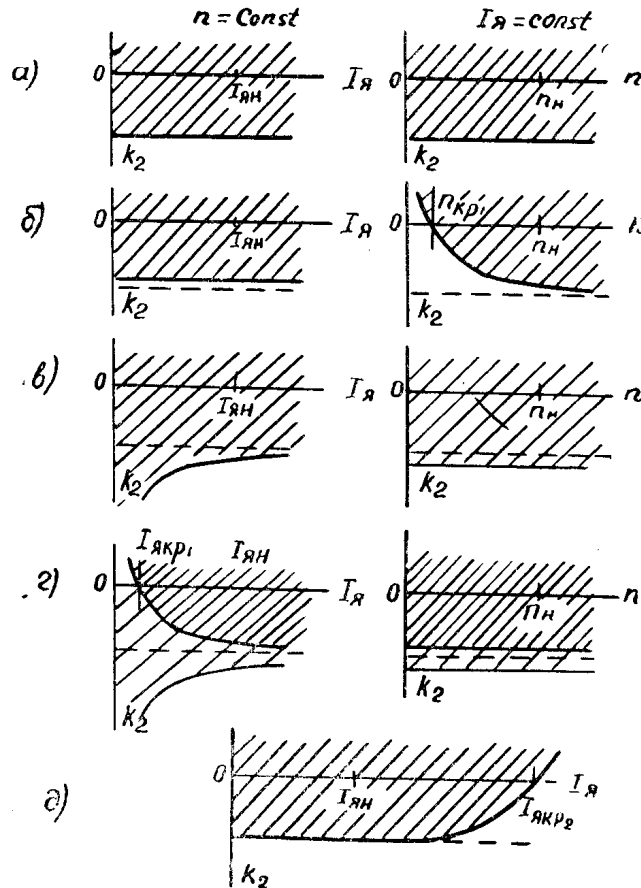


Рис. 2. Зависимость коэффициента коммутацион-
ной устойчивости K от I_a и n с учетом различных
факторов

Из (9) видно, что коммутационная устойчивость машины с ВМК в рассматриваемом случае не зависит от тока якоря и скорости вращения (рис. 2, а). У машин с обычной коммутацией, как известно, КУ резко уменьшается при их увеличении. Выбором коэффициентов m_1 и m_2 , например, за счет изменения δ_d или W_s , в машине с ВМК всегда можно получить необходимую величину $K_2 > 0$, т. е. обеспечить безыскровую работу сбегающего края щеток. Из (9) видно также, что K_2 в данном случае всегда меньше единицы, так как э. д. с. e_2 всегда больше нуля, а э. д. с. e_0 не может быть равна бесконечности.

К основным факторам, влияющим на КУ, относятся:

- активное сопротивление коммутируемых секций;
- способность щеток разрываться без искрения некоторый остаточный ток секции (коммутирующие свойства щеток);

в) э. д. с. в секции от главного поля, проникающего в зону коммутации;

г) степень насыщения магнитопровода на пути потока дополнительных полюсов;

д) кратковременные или периодические э. д. с. в коммутируемых секциях, возникающие в динамических режимах. Они могут быть вызваны отставанием во времени коммутирующего потока от тока якоря из-за действия вихревых токов в стали магнитопровода, а также изменением во времени потока главных полюсов;

е) механические факторы, определяющие качество контакта щеток с коллектором.

Следует отметить, что в машинах с ВМК в режимах, близких к номинальному, можно пренебречь влиянием активного сопротивления секций, главного поля в зоне коммутации и коммутирующими свойствами щеток. Поэтому в первом приближении (при ненасыщенной магнитной цепи, в статических режимах и режимах, близких к номинальному, и хорошем контакте щеток с коллектором) КУ машин со схемой ВМК (рис. 1) можно определять по формуле (9).

Коротко остановимся на влиянии различных факторов на КУ машин с ВМК. Анализ был проведен для каждого фактора в отдельности.

Все факторы можно разделить на снижающие КУ (активное сопротивление секций, насыщение магнитопровода, механические факторы, динамические режимы), повышающие ее (коммутирующие свойства щеток) и факторы, которые могут либо снижать, либо повышать ее (главное поле в зоне коммутации).

Активное сопротивление секций приводит к незначительному понижению КУ (рис. 2, б) при изменении I_a в широком диапазоне и при n , близкой к номинальной. В то же время оно сильно сказывается при малых n , где появляется критическая скорость $n_{кр1}$, ниже которой $K_2 < 0$ (без учета коммутирующих свойств щеток). Анализ показывает, что величина $n_{кр1}$ обычно не более 17,5% от n_n , то есть диапазон $0 - n_{кр1}$ является пусковым.

Влияние коммутирующих свойств щеток противоположно влиянию активного сопротивления (рис. 2, в). В результате появляется возможность значительно уменьшить или полностью исключить критическую скорость $n_{кр1}$.

Поле главных полюсов, проникающее в зону коммутации, может в среднем либо усиливать, либо ослаблять коммутирующее поле. При этом КУ увеличивается или уменьшается, как показано на рис. 2, г. Из рис. 2, г видно, что главное поле может привести к появлению критического тока $I_{якр1}$ обычно много меньше номинального. При токе меньше $I_{якр1}$ безыскровая работа должна обеспечиваться за счет коммутирующих свойств щеток.

Насыщение магнитопровода действует при больших токах якоря и приводит к появлению критического тока $I_{якр2}$ (рис. 2, д), выше которого безыскровая работа невозможна. Обычно $I_{якр2} \gg (3-5)I_{ян}$. Механические факторы влияют на КУ через изменение периода замыкания секций щетками. Мероприятия по борьбе с механическими факторами в машинах с ВМК должны быть направлены на обеспечение гарантированной величины периода замыкания секций щетками. Хорошие результаты в этом отношении дают разрезные щетки и улучшение рельефа коллектора.

В динамических режимах КУ снижается за счет действия «небалансных» э. д. с. в коммутируемых секциях от действия вихревых токов в стали магнитопровода и изменения во времени потока главных полюсов. «Небалансные» э. д. с. могут быть снижены расслоением магнито-

провода и мероприятиями, уменьшающими пульсации и резкие изменения тока возбуждения главных полюсов.

Экспериментальная проверка КУ

Экспериментальная проверка КУ проводилась на двух одинаковых машинах постоянного тока с обычной коммутацией и с ВМК. На рис. 3 показаны зависимости коэффициентов КУ K_1 и K_2 от тока I_a и скорости n обычной машины, имеющей утяжеленную коммутацию. Коэффициенты K_1 и K_2 определялись из формулы (2) по снятым экспериментально безыскровым зонам в статических режимах.

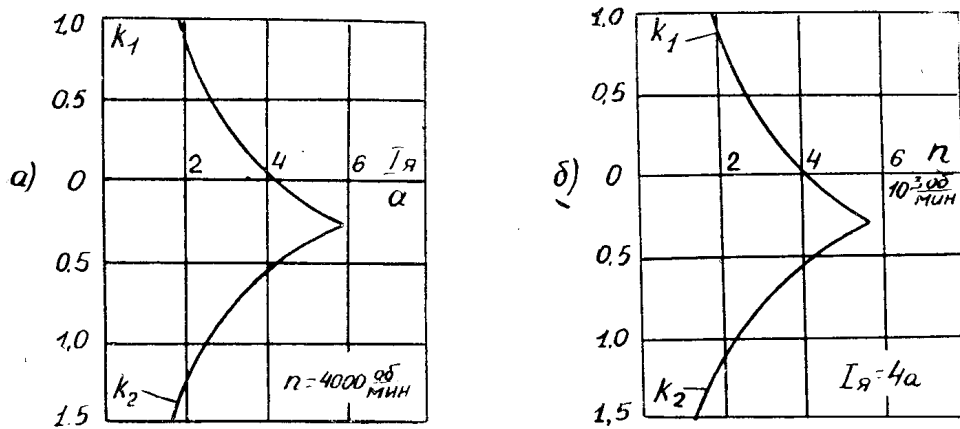


Рис. 3. Зависимость K_1 и K_2 от I_a и n машины с обычной системой коммутации.

На рис. 4 приведены зависимости K_2 от I_a и n для такой же машины, но выполненной со схемой ВМК. Методика определения K_2 та же, что и в машине с обычной коммутацией. При этом безыскровая зона в машине с ВМК определялась двумя способами: по появлению искрения и по исчезновению импульсов обратного напряжения на вентилях.

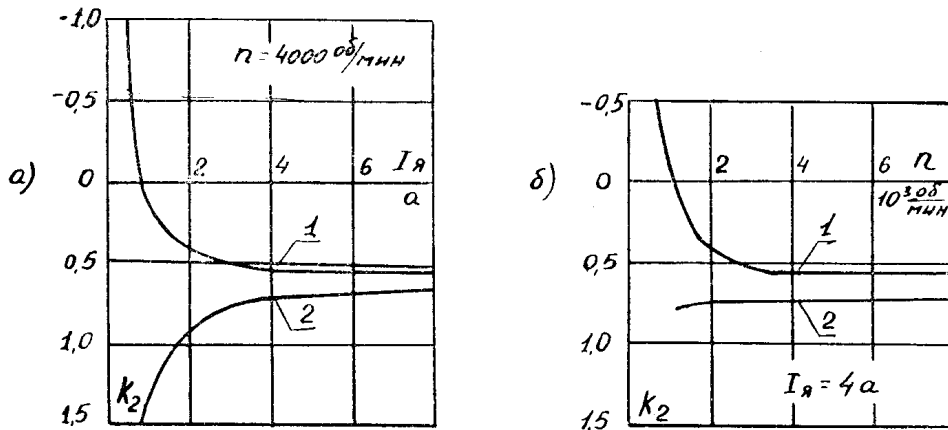


Рис. 4. Зависимость K_2 от I_a и n машины с ВМК

Последний способ приближенно показывает границу зоны без учета коммутирующих свойств щеток. Соответственно на рис. 4 кривые 1 показывают зависимость K_2 от I_a и n без учета коммутирующих свойств щеток, а кривые 2 — с их учетом.

Из рис. 3 и 4 видно, что главное различие КУ машин с обычной коммутацией и ВМК состоит в резком уменьшении КУ с увеличением тока якоря и скорости вращения при обычной коммутации и ее независимости от них — при ВМК. В целом результаты экспериментального определения КУ машины с ВМК хорошо согласуются с теоретическими представлениями о работе схемы ВМК рис. 1.

В ы в о д ы

1. Определение коммутационной устойчивости через коэффициенты K_1 и K_2 в зависимости от тока якоря и скорости вращения позволяет объективно оценивать и сравнивать коммутационную устойчивость машин с несимметричной безыскровой зоной в статических и динамических режимах.

2. Основное достоинство машин с ВМК по сравнению с машинами обычного исполнения заключается в независимости коммутационной устойчивости от тока якоря и скорости вращения при их изменении в широких пределах. Ограничения накладываются в основном насыщением магнитопровода (при очень больших токах якоря) и неустойчивостью контакта щеток с коллектором (обычно при скорости значительно выше номинальной). К недостаткам машин с ВМК относится меньшая, чем у обычных машин, коммутационная устойчивость при малых токах якоря и скоростях вращения.

3. К основным факторам, влияющим на коммутационную устойчивость относятся: активное сопротивление секций якоря, коммутирующие свойства щеток, насыщение, механические факторы, динамические режимы и проникновение главного поля в зону коммутации.

Среди факторов, уменьшающих коммутационную устойчивость, нет таких, влияние которых принципиально нельзя уменьшить известными способами и которые поставили бы под сомнение работоспособность схемы ВМК.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Т. Касьянов. Регулировка дополнительных полюсов машин постоянного тока. «Электричество», 1934, № 20, 1935, № 1.

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

3. О. А. Братковский, В. В. Ивашин, И. А. Милорадов. Экспериментальная проверка машины постоянного тока с вентильно-механической коммутацией. «Известия ТПИ», т. 212, 1969.