

**КОММУТАЦИОННАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ДВИГАТЕЛЕЙ  
ПОСТОЯННОГО ТОКА И ЕЕ СВЯЗЬ С ЗОНОЙ БЕЗЫСКРОВОЙ  
РАБОТЫ**

В. В. ИВАШИН, И. А. МИЛораДОВ

(Представлена научным семинаром кафедры электрических машин  
и общей электротехники)

Понятие зоны безыскровой работы машины, впервые введенное в практику настройки машин постоянного тока В. Т. Касьяновым [1], в общем случае неоднозначно определяет состояние машины по коммутации. Применение понятия зоны безыскровой работы для оценки коммутационного состояния связано с такими трудностями, как сравнение между собой машин различного исполнения, например, машин с компенсационной обмоткой и без нее, с полным и уменьшенным числом дополнительных полюсов. Если все эти машины имеют, например, одинаковые зоны безыскровой работы, снятые по одной методике и построенные в одних и тех же координатах, то это еще не значит, что машины одинаково работают в смысле коммутации, или, что более точно, коммутационная устойчивость этих машин одинакова. При этом считается, что коммутационная устойчивость машины определяется отношением разности коммутирующих напряжений на верхней и нижней границах зоны безыскровой работы к среднему значению этих коммутирующих напряжений.

Между зонами безыскровой работы машин различного исполнения и их коммутационной устойчивостью существуют определенные соотношения, которые могут быть вычислены при проектировании машины. Настоящая статья и ставит своей целью найти эти соотношения и рассмотреть их физическую сущность.

Основываясь на понятии зоны безыскровой работы для определения ее величины в координатах  $\frac{i_p}{I_{\text{я}}}$ ,  $I_{\text{я}}$ , можно записать выражение

$$\theta = \frac{i_{\text{п1}} - (-i_{\text{п2}})}{I_{\text{я}}}, \quad (1)$$

где

$i_{\text{п1}}$  и  $i_{\text{п2}}$  — токи подпитки обмотки добавочного полюса на верхней и нижней границах зоны,

$I_{\text{я}}$  — ток якоря машины.

Учитывая, что токи подпитки прямо пропорциональны коммутирующим эдс (в случае, если полюсные системы ненасыщены), нетрудно получить выражение для зоны машины с полным числом добавочных полюсов и без компенсационной обмотки в виде [2]

$$\theta = \frac{F_{\delta}}{F_{\delta} + F_{\text{ря}}} \cdot \frac{e_1 - e_2}{e_0}. \quad (2)$$

В (2) имеем:



$e_1, e_2, e_0$  — коммутирующие эдс на верхней и нижней границах зоны и в ее середине:

$$e_0 = \frac{e_1 + e_2}{2}, \quad (3)$$

$F_{ря}$  — намагничивающая сила реакции якоря,

$F_{\delta}$  — намагничивающая сила, необходимая для создания в зазорах под добавочными полюсами магнитного поля, соответствующего эдс вращения  $e_0$ .

Для машины с компенсационной обмоткой

$$\theta_{ко} = \frac{F_{\delta}}{F_{\delta} + (F_{ря} - F_{ко})} \cdot \frac{e_1 - e_2}{e_0}. \quad (4)$$

$F_{ко}$  — намагничивающая сила компенсационной обмотки.

Для машины с уменьшенным в 2 раза числом добавочных полюсов

$$\theta_{п} = \frac{2F_{\delta} \cdot k}{2F_{\delta} \cdot k + F_{ря} + F'_{ря}} \cdot \frac{e_1 - e_2}{e_0}. \quad (5)$$

В этой формуле

$k$  — коэффициент, учитывающий увеличение намагничивающей силы добавочного полюса из-за прохождения его потока через зазор главного полюса машины;

$F'_{ря}$  — намагничивающая сила добавочного полюса, создающая поле в зазоре, равное полю в зоне коммутации без добавочного полюса.

Сравнение формул (2), (4), (5) зон безыскровой работы машин различного исполнения показывает, что они отличаются только первым коэффициентом, формулы (2), (4), (5), следовательно, можно записать в виде

$$\theta = k_d \cdot k_{ст}, \quad (6)$$

$$\theta_{ко} = k_{дко} \cdot k_{ст}, \quad (7)$$

$$\theta_{п} = k_{дп} \cdot k_{ст}. \quad (8)$$

Коэффициент  $k_{ст}$  выражает статическую коммутационную устойчивость машины, которая не зависит от конструктивного выполнения системы возбуждения.

Коэффициенты  $k_d, k_{дко}, k_{дп}$  зависят от конструктивного выполнения и влияют на работу машины только при резко переменных режимах ее работы и при насыщениях каких-либо участков магнитных цепей машины. Эти коэффициенты можно назвать динамическими, поскольку их влияние проявляется главным образом при переходных режимах.

При снятии безыскровой зоны машины в статическом режиме ее работы коэффициенты  $k_d, k_{дко}, k_{дп}$  являются масштабными. Коэффициент  $k_{ст}$  однозначно определяет статическую коммутационную устойчивость и может быть найден экспериментально по значению реальной зоны безыскровой работы и динамическому коэффициенту  $k_d$ , рассчитанному по значениям намагничивающих сил из электромагнитного расчета машины.

Для возможности сравнения зон машин различного исполнения их экспериментально снятые зоны можно приводить к одному масштабу, то есть пересчитывать зону на масштаб какой-либо машины, выбранной за базисную или сравнительную.

В качестве сравнительной машины можно выбрать машину любого конструктивного исполнения, но целесообразнее всего, по-видимому,



выбрать машину без компенсационной обмотки и с полным числом добавочных полюсов. Такая машина нашла наиболее широкое применение. Приведенная зона безыскровой работы для машины с компенсаторной обмоткой

$$\Theta_{\text{пко}} = \Theta_{\text{ко}} \cdot \frac{K_{\text{д}}}{K_{\text{дко}}} \quad (9)$$

Для машины с уменьшенным в 2 раза числом полюсов

$$\Theta_{\text{пп}} = \Theta_{\text{п}} \cdot \frac{K_{\text{д}}}{K_{\text{дп}}} \quad (10)$$

Рассмотрим особенности работы одинаковых машин с различными коэффициентами  $k_{\text{д}}$ , то есть машин, выполненных, например, с различными зазорами в магнитопроводе добавочного полюса. Большому значению  $k_{\text{д}}$  соответствует большое значение эквивалентного воздушного зазора. При резких увеличениях или уменьшениях тока якоря на намагничивающую силу обмотки добавочного полюса накладывается намагничивающая сила вихревых токов, индуктирующихся в магнитопроводе на путях потока добавочного полюса. Намагничивающая сила вихревых токов зависит только от скорости изменения магнитного потока (при одинаковом материале магнитопровода) и, следовательно, будет вносить тем меньшие возмущения в магнитное поле под добавочным полюсом, чем больше значение динамического коэффициента машины.

Из практики электромашиностроения известно, что в машинах, работающих в переходных режимах, например в тяговых машинах, между добавочным полюсом и станиной для улучшения коммутации целесообразно делать второй воздушный зазор. Намагничивающая сила  $F_{\text{в}}$  при этом соответственно увеличивается. Коэффициент  $k_{\text{д}}$  с увеличением  $F_{\text{в}}$  также возрастает, что соответствует повышенной динамической устойчивости машин с увеличенными зазорами на пути потока добавочного полюса.

У машин с компенсационной обмоткой, а также у машин с уменьшенным числом добавочных полюсов значения  $k_{\text{д}}$  больше, чем у машин без компенсационной обмотки и с полным числом добавочных полюсов, что говорит об их повышенной динамической коммутационной устойчивости.

При длительных перегрузках по току, когда вихревыми токами можно пренебречь, машины с повышенными  $k_{\text{д}}$  также должны работать лучше, поскольку насыщение магнитопровода на пути потока добавочного полюса влияет на индукцию под добавочным полюсом тем меньше, чем больше этот коэффициент.

Статическая коммутационная устойчивость определяется соотношением

$$K_{\text{ст}} = \frac{e_1 - e_2}{e_0} \quad (11)$$

Величина  $e_1 - e_2$  зависит от многих причин, в том числе от типа обмотки машины, числа зубцов якоря, коммутирующих свойств щеток, которые, в свою очередь, зависят от предельно допустимых напряжений на переходном сопротивлении щеточного контакта под набегающим и сбегающим краем щетки. Коммутирующая эдс  $e_0$  зависит от типа и мощности машины, тока якоря, типа обмотки, формы пазов железа якоря и других факторов.

Представляет определенный интерес проанализировать характер изменения коммутационной устойчивости машин с различными систе-



мами возбуждения, а также их зоны безыскровой работы в зависимости от тока якоря.

В общем случае для машин как с параллельным, так и с последовательным возбуждением эдс  $e_0$  выражается уравнением

$$e_0 = k_1 \omega I_{\text{я}}, \quad (12)$$

где  $\omega$  — угловая скорость машины, const;

$k_1$  — коэффициент пропорциональности,

Величина  $e_1 - e_2$  для каждой обмотки может быть выражена через коммутирующие способности щеток  $\psi_{\text{щ}}$ , индуктивности секций и взаимоиндуктивности между одновременно коммутирующими секциями

$$e_1 - e_2 = 2\Delta e = f(\psi_{\text{щ}}, L, M). \quad (13)$$

Известно, что коммутирующие способности щеток с увеличением тока якоря машины несколько увеличиваются. Зависят они также и от скорости вращения машины. Вначале определим изменение зоны работ машин, считая, что коммутирующие способности щеток постоянны и им соответствует величина  $e_1 - e_2$ , равная  $2\Delta e_0$ , а затем, качественно учитывая возрастание коммутирующих свойств щеток с ростом нагрузки, проведем корректировку полученной кривой  $k_{\text{ст}}$ .

Для двигателя с параллельным возбуждением

$$\omega = \frac{u - I_{\text{я}} \cdot R_a}{k_2 \Phi} = \alpha_1 - \alpha_2 I_{\text{я}} \quad (14)$$

и для  $k_{\text{ст}}$  получаем

$$k_{\text{ст}} = \frac{2\Delta e_0}{\alpha_1 I_{\text{я}} - \alpha_2 I_{\text{я}}^2}. \quad (15)$$

Предположим, что  $R_a = 0$ . Тогда  $\alpha_2 = 0$  и

$$k_{\text{ст}} = \frac{2\Delta e_0}{\alpha_1 I_{\text{я}}}, \quad (16)$$

то есть в двигателе с абсолютно жесткой характеристикой и при постоянных коммутирующих способностях щеток статическая коммутационная устойчивость в зависимости от тока нагрузки изменяется по гиперболе (рис. 1, кривая 1). Учет активного сопротивления  $R_a$  в цепи якоря и его увеличение переводит работу двигателя на естественную и реостатные характеристики. Статическая коммутационная устойчивость машины при этом возрастает (кривые 2 на рис. 1) и может быть определена по (15). При учете возрастания коммутирующей способности щеток с увеличением тока нагрузки кривая коммутационной устойчивости проходит несколько выше, ее ординаты увеличиваются пропорционально увеличению коммутирующих свойств щеток. На рис. 1 коммутационной устойчивости при  $R = R_1$  с учетом  $2\Delta e = f(I_{\text{я}})$  соответствует кривая 3. Зона безыскровой работы, рассчитанная по ординатам кривой 3 и динамическому коэффициенту 0,3, показана кривыми 4. Реальные зоны безыскровой работы машин с параллельным возбуждением имеют очертания примерно такие же, как и зона, ограниченная кривыми 4 [3]. Для более точного построения зоны безыскровой работы или статической устойчивости машины необходимо знать зависимость увеличения коммутирующей способности щеток от тока нагрузки и скорости.

В двигателе последовательного возбуждения магнитный поток возбуждения линейно (если не учитывать насыщение) зависит от тока якоря, поэтому выражение (14) для угловой скорости принимает вид

$$\omega = \frac{\beta_1}{I_{\text{я}}} - \beta_2, \quad (17)$$



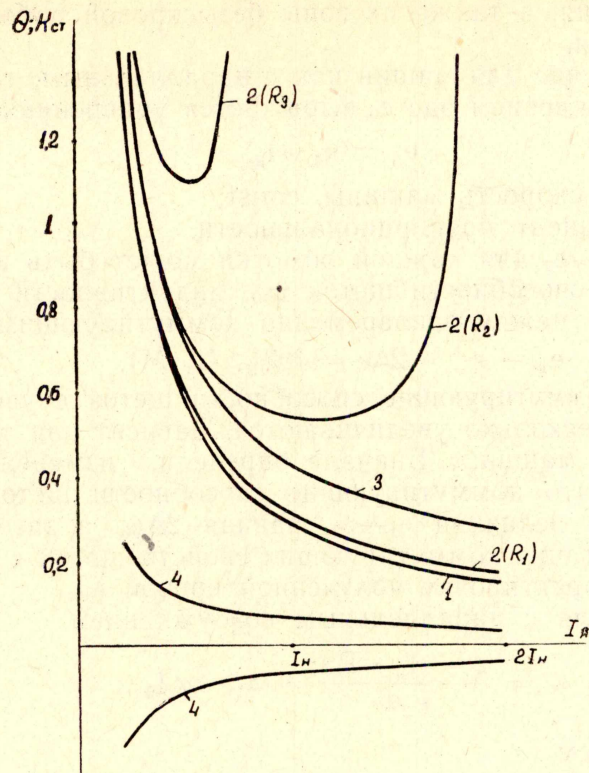


Рис. 1. Зона безыскровой работы двигателя с параллельным возбуждением и его статическая устойчивость при различных сопротивлениях цепи якоря.

- 1 —  $R_a=0$ ,  
 2 —  $R_a>0, R_3>R_2>R_1$ ,  
 3 —  $R_a=R_1, 2\Delta e \neq \text{const}$ ,  
 4 — зона безыскровой работы для  $\kappa_d=0.3, R_a=R_1$

а коммутационная устойчивость

$$K_{\text{ст}} = \frac{2\Delta e_0}{\beta_1 - \beta_2 I_a} \quad (18)$$

Исследование этого выражения показывает, что при  $R_a=0, \Delta e_0=\text{const}$  с увеличением тока якоря коммутационная устойчивость остается постоянной (рис. 2, кривая 1). С учетом  $R_a$  и возрастания коммутирующих способностей щеток она увеличивается и принимает вид раструба (рис. 2, кривые 2 и 3).

В реальных машинах при  $I_a \gg I_{\text{ян}}$  начинают насыщаться отдельные участки магнитопровода на пути потока возбуждения главных полюсов, угловая скорость машины с увеличением тока якоря уменьшается в меньшей степени, чем по (17), коммутационная устойчивость машины постепенно становится меньше. Характер ее изменения приближается к характеру изменения коммутационной устойчивости машины с параллельным возбуждением (кривая 3 при  $I_a > 2I_{\text{ян}}$ ). Следует заметить, что при больших токах якоря скорость машины последовательного возбуждения мала, что приводит к существенному влиянию на коммутационную устойчивость активного сопротивления секций. Зона безыскровой работы за счет влияния активных сопротивлений коммутирующих секций должна подниматься вверх.

При малых токах скорость машины увеличивается и ее коммутационная устойчивость может уменьшаться фактически до нуля из-за влияния на коммутацию факторов механического характера.



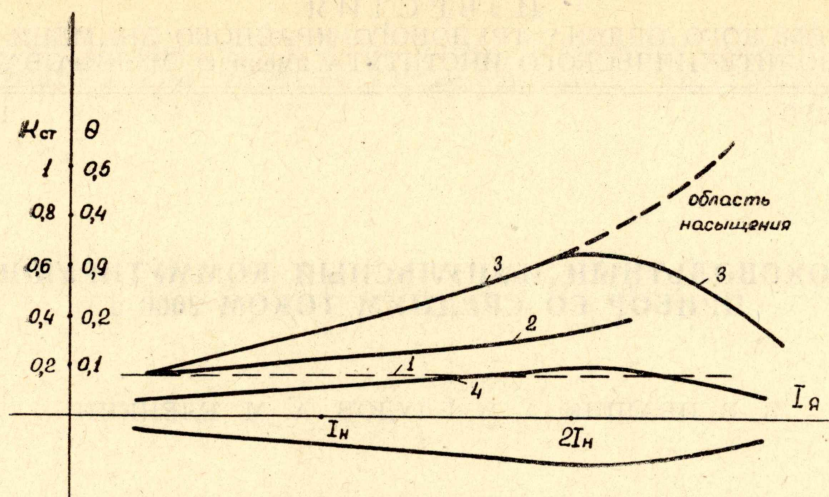


Рис. 2. Зона безыскровой работы двигателя с последовательным возбуждением и ее статическая устойчивость.

- 1 —  $R_a = 0$ ,  
 2 —  $R_a \neq 0$ ,  $2\Delta e = \text{const}$ ,  
 3 —  $R_a \neq 0$ ,  $2\Delta e \neq \text{const}$ ,  
 4 — Зона безыскровой работы для  $k_d = 0,3$ ,  $R_a \neq 0$

Влияние активного сопротивления секций и факторов механической природы в рассматриваемом случае не учитывается.

### Выводы

1. Безыскровая зона машины неоднозначно определяет ее работу в смысле коммутации и по ее величине нельзя сравнивать коммутационную устойчивость машин с различной конструкцией систем возбуждения.

2. Статическая коммутационная устойчивость машины может быть оценена по отношению разности коммутирующих напряжений на верхней и нижней границах зоны безыскровой работы к их среднему значению.

3. Характер изменения зон безыскровой работы двигателей последовательного и параллельного возбуждения хорошо объясняется при введении понятия статической коммутационной устойчивости.

### ЛИТЕРАТУРА

1. В. Т. Касьянов. Регулирование добавочных полюсов машин постоянного тока. «Электричество», 1934, № 20, 1935, № 1.
2. В. В. Ивашин, И. А. Милорадов. Исследования зон безыскровой работы двигателя постоянного тока со щеточно-вентильной коммутацией. Известия ТПИ, т. 172, 1967.
3. М. Ф. Карасев, В. П. Суворов и др. Особенности настройки коммутации тяговых машин. Научные труды ОМИИТа, вып. 54, 1965.