

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЛАВНОГО ПОЛЯ НА КОММУТАЦИЮ МАШИНЫ СО ВСПОМОГАТЕЛЬНЫМИ ВЕНТИЛЯМИ

В. В. ИВАШИН, И. А. МИЛОРАДОВ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

В работе [1] показано, что относительная ширина зоны безыскровой работы машины с вентильно-щеточной коммутацией, определенная без учета влияния главного поля и реальных свойств щеточного контакта, не зависит от нагрузки; в осях $i_{\text{п}} = f(I_{\text{я}})$ зона имеет вид раструба: при токе нагрузки, равном нулю, $i_{\text{п}} = 0$; по мере увеличения нагрузки верхняя и нижняя границы зоны равномерно расходятся (1—1' рис. 2).

В реальных машинах в зоне коммутации всегда присутствует поле главных полюсов. И если в машинах без скоса пазов воздействием главного поля можно пренебречь, то в машинах со скосом пазов это недопустимо, так как в этом случае э.д.с., наводимая главным полем в коммутирующей секции, может вызвать заметное искажение безыскровой зоны. Это относится прежде всего к режимам малых нагрузок, когда коммутирующая э. д. с. от добавочных полюсов мала и сравнима с э. д. с. от главного поля.

Рассмотрим влияние главного поля на коммутацию, сделав предварительно ряд допущений:

1. Э. д. с. секции от добавочных полюсов постоянна в течение всего периода коммутации.
2. Условия коммутации всех секций якоря идентичны.
3. Активное сопротивление секции равно нулю.
4. Взаимоиндуктивная связь секций отсутствует.
5. Щетки не обладают коммутирующими свойствами.
6. Ток возбуждения и скорость вращения постоянны.
7. Главное поле наводит в коммутирующей секции не зависящую от нагрузки э.д.с., равную э.д.с. от главного поля в режиме идеального холостого хода.

При таких допущениях можно дать лишь приближенную количественную оценку влияния главного поля на коммутацию, но зато сделать некоторые общие выводы относительно качественного изменения зоны безыскровой работы при воздействии главного поля.

Э.д.с. секции от поля главных полюсов в функции времени $U_{\Gamma}(t)$ изображена на рис. 1 и в общем случае имеет нелинейный характер. Действие главного поля на коммутацию определяется интегралом

$$\int_0^T U_{\Gamma}(t) dt,$$

здесь T — период коммутации тока в секции. Очевидно, знак и величина этого интеграла зависят от расположения периода коммутации относительно точки прохождения э.д.с. от главного поля через нуль. Условимся считать за положительное напряжение э.д.с. направление э.д.с. в коммутирующей секции от добавочных полюсов при отсутствии дополнительного питания, т. е. если э.д.с. положительна, то она всегда приложена к вентилю в запирающем направлении [2]. Направление э.д.с. от главного поля во время коммутации может изменяться и

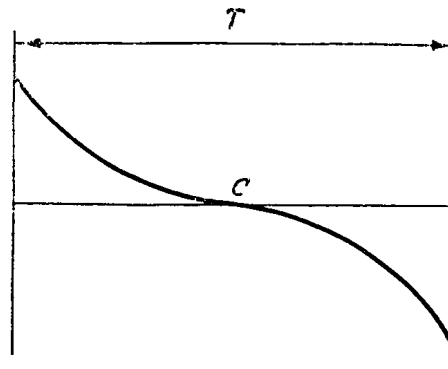


Рис. 1. Э.д.с. от главного поля в зоне коммутации.

в зависимости от знака интеграла $\int_0^T U_r(t) dt$ главное поле будет либо усиливать, либо ослаблять добавочные полюса и искажать зону безыскровой работы. Если, например, на верхней границе зоны, где период коммутации равен T_1 , интеграл $\int_0^{T_1} U_r(t) dt$ положителен, то главное поле усиливает поле добавочных полюсов и, следовательно, верхняя граница зоны несколько опускается к области отрицательных подпиток. На нижней границе зоны, где период коммутации тока в секции равен T_2 , положительный знак интеграла $\int_0^{T_2} U_r(t) dt$ также означает смещение нижней границы зоны в область отрицательных токов дополнительного питания, а отрицательный, наоборот, — в область положительных подпиток, так как в первом случае добавочные полюса в среднем усиливаются, а во втором — ослабляются.

При сделанных выше допущениях для тока в секции якоря можно записать

$$L \frac{di}{dt} = U = e + U_r(t). \quad (1)$$

Здесь i — ток секции,

e — э. д. с. в секции от добавочных полюсов,

U — суммарная э. д. с. секции

$$i = \frac{e}{L} t + \frac{1}{L} \int_0^t U_r(t) dt - i_a. \quad (2)$$

Ток в сбегавшей коллекторной пластине

$$i_k = i_a - i = 2i_a - \frac{e}{L} t - \frac{1}{L} \int_0^t U_r(t) dt. \quad (3)$$

Из уравнения (3) видно, что даже при отсутствии активного сопротивления ток изменяется нелинейно, что связано с характером распределения э. д. с. от главного поля в зоне коммутации.

Если представить э. д. с. от добавочных полюсов в виде

$$e = k_0 \cdot 2i_a + k_1 i_n, \quad (4)$$

то, решая совместно (3) и (4), можно найти ток дополнительного питания для верхней границы зоны

$$i_{n1} = 2i_a \left(\frac{L}{k_1 T_1} - \frac{k_0}{k_1} \right) - \frac{1}{k_1 T_1} \int_0^{T_1} U_r(t) dt \quad (5)$$

и для нижней границы зоны

$$i_{n2} = 2i_a \left(\frac{L}{k_1 T_2} - \frac{k_0}{k_1} \right) - \frac{1}{k_1 T_2} \int_0^{T_2} U_r(t) dt. \quad (6)$$

Токи дополнительного питания находятся из условия равенства нулю тока в пластине коллектора в момент выключения главной щетки (верхняя граница зоны) и вспомогательной щетки (нижняя граница зоны) [2]. Из уравнений (5) и (6) следует, что ток дополнительного питания состоит из двух составляющих, первая из которых определяет безыскровую зону при отсутствии в зоне коммутации главного поля

(1—1' на рис. 2). Вторая составляющая $\frac{1}{k_1 T} \int_0^T U_r(t) dt$ отражает влияние главного поля машины и показывает величину смещения границ зоны безыскровой работы.

В общем случае

$$\frac{1}{k_1 T_1} \int_0^{T_1} U_r(t) dt \neq \frac{1}{k_1 T_2} \int_0^{T_2} U_r(t) dt,$$

поэтому верхняя и нижняя границы зоны смещены на разную величину и пересекаются при некотором токе нагрузки.

Зона безыскровой работы, найденная по (5) и (6), для частного распределения э. д. с. от главного поля в зоне коммутации изображена на рис. 2 (ed — верхняя граница зоны, mf — нижняя граница зоны). Координаты точки пересечения границ зоны (а, рис. 2) определяются равенством $i_{n1} = i_{n2}$.

Уравнение (3) для тока в коллекторной пластине и выведенные из него уравнения (5) и (6) для расчета безыскровой зоны не учитывают нелинейных свойств коммутирующего контура, возникающих из-за наличия вспомогательного вентиля. Очевидно, на верхней границе зоны не возникает необходимости в учете нелинейности, так как секция в этом случае замыкается накоротко главной щеткой помимо вентиля. Поэтому верхняя граница зоны в любом случае определяется уравнением (5).

При работе машины на нижней границе зоны вентиль включается в контур секции последовательно, и характер изменения тока в коллекторной пластине существенно сказывается на работе схемы.

Рассмотрим производную тока коллектора пластины по времени в момент выключения вспомогательной щетки (t_2):

$$\left(\frac{di_K}{dt} \right)_{t=t_2} = - \frac{e_2}{L} - \frac{U_2}{L} \quad (7)$$

Здесь U_2 — э. д. с. от главного поля в момент t_2 ,

e_2 — э. д. с. от добавочных полюсов, при которой ток в пластине коллектора, определенный по уравнению (3), становится равным нулю как раз в момент выключения вспомогательной щетки. При больших нагрузках, когда e_2 велика, производная всегда отрицательна, так как $i_{n2} < e_2$; ток пластины уменьшается в течение всего периода коммута-

ции T_2 . При малых нагрузках, когда e_2 сравнима по величине с U_2 , знак производной $\left(\frac{di_k}{dt}\right)_{t=t_2}$ может измениться; величина нагрузки, при которой это происходит, зависит от величины и знака напряжения U_2 .

При условии $i_k=0$ в момент t_2 изменение знака производной означает, что ток пластины по уравнению (3) в течение периода коммутации дважды проходит через нуль: в момент $t=t_2$ и несколько раньше. Изменение знака производной тока в момент t_2 сопровождается изменением направления суммарной э. д. с. в секции с положительного на отрицательное. Уравнение (3), как указывалось выше, выведено без учета нелинейных свойств коммутирующего контура. При учете реальных свойств вентиля ток в пластине определяется уравнением (3) в течение всего периода коммутации лишь до тех пор, пока производная его не изменит знака. При малых нагрузках в момент первого прохождения тока пластины через нуль вентиль закрывается и остается в таком состоянии, пока суммарная э. д. с. секции не изменит направления. Она оказывается приложенной к вентилю в прямом направлении, вентиль открывается и выключение вспомогательной щетки сопровождается искрением, хотя по уравнению (3) $i_k=0$ как раз в момент t_2 .

Таким образом, при малых нагрузках условие $i_k=0$ в момент выключения вспомогательной щетки недостаточно для безыскровой работы машины. Необходимо, чтобы производная тока пластины по уравнению (7) была меньше или равна нулю.

В этом случае э. д. с. секции не меняет направления в течение всего периода коммутации, и вентиль остается закрытым.

Если нагрузку, при которой $\left(\frac{di_k}{dt}\right)_{t=t_2}=0$ уже при токе дополнительного питания, найденного по уравнению (6), считать критической, то при меньших нагрузках нижняя граница зоны определяется равенством:

$$\left(\frac{di_k}{dt}\right)_{t=t_2} = -\frac{e_2}{L} \frac{U_2}{L} = 0. \quad (8)$$

Отсюда

$$i'_{n2} = -2i_a \frac{k_0}{k_1} - \frac{U_2}{k_1}. \quad (9)$$

Здесь i'_{n2} — ток дополнительного питания на нижней границе безыскровой зоны при нагрузках, меньших критической. При любом распределении э. д. с. от главного поля в зоне коммутации для безыскрового выключения вспомогательной щетки при малых нагрузках требуется некоторое усиление добавочных полюсов по сравнению с данными, полученными по уравнению (6), т. е. $i'_{n2} > i_{n2}$.

Зона безыскровой работы, построенная с учетом реальных свойств вентиля, приведена на рис. 2. На этом рисунке I_k — критическая нагрузка, I_b — ток нагрузки, при котором верхняя и нижняя граница зоны пересекаются. Критическая нагрузка определяется совместным решением уравнений (6) и (8), так как в точке k $i_{n2} = i'_{n2}$.

На рис. 2 линии de и skf соответствуют предельным токам дополнительного питания, при которых без искрения работают соответственно главная и вспомогательная щетки. Область, ограниченная ломаной eb , kf является безыскровой зоной машины. В области cbd обе щетки работают с искрением. Точка пересечения границ зоны характеризуется тем, что при токе I_b ток пластины проходит через нуль в момент включения главной щетки и одновременно выполняется условие (8). При токах меньше I_b изменением тока дополнительного питания невозможно добиться безыскровой работы машины.

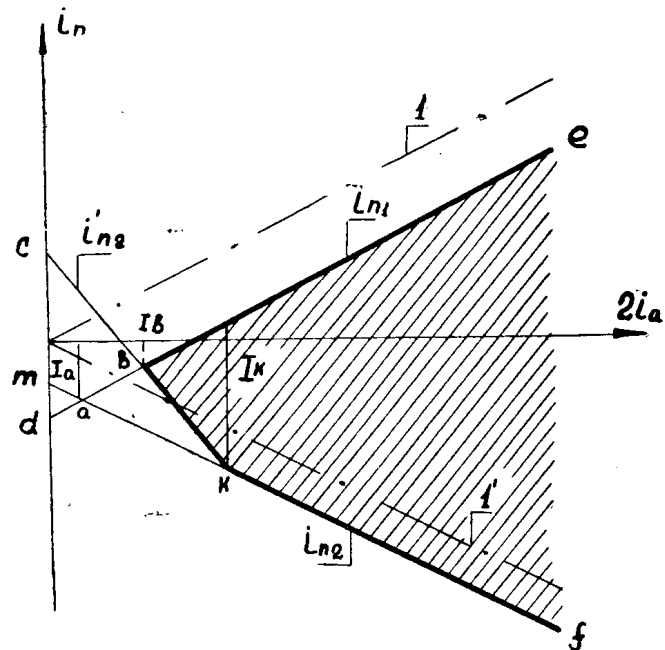


Рис. 2. Теоретическая зона безыскровой работы.

Нетрудно показать, что точка пересечения границ зоны всегда расположена справа от оси тока дополнительного питания, т. е. $I_B > 0$. Это значит, что при наличии главного поля в зоне коммутации безыскровая работа машины во всем диапазоне нагрузок от $2i_a = 0$ и более невозможна.

Выше указывалось, что с учетом главного поля токи дополнительного питания складываются из двух составляющих: тока дополнительного питания при отсутствии главного поля и тока дополнительного питания, «компенсирующего» главное поле. Очевидно, то же самое будет иметь место и в случае, если активное сопротивление секции не равно нулю и есть взаимоиндуктивная связь коммутирующих секций. Но здесь токи дополнительного питания при отсутствии главного поля должны определяться по общей методике расчета безыскровой зоны машины со вспомогательными вентилями [1]. Ток дополнительного питания, «компенсирующий» главное поле, в первом приближении можно определять по формуле, выведенной для случая отсутствия активного сопротивления:

$$\frac{1}{k_1 T} \int_0^T U_r(t) dt. \quad (10)$$

При нагрузке меньше критической и не равном нулю активном сопротивлении секции ток дополнительного питания также должен быть таким, чтобы суммарная э. д. с. секции не изменяла направление в момент выключения вспомогательной щетки, что, как было показано выше, достигается при выполнении равенства (8).

С учетом этих соображений была рассчитана зона безыскровой работы экспериментальной машины, основные данные которой приведены в [2].

При этом действительное распределение э. д. с. от главного поля в зоне коммутации аппроксимировалось прямой линией. Результаты расчета приведены на рис. 3, где $1-1'$ — зона безыскровой работы, по-

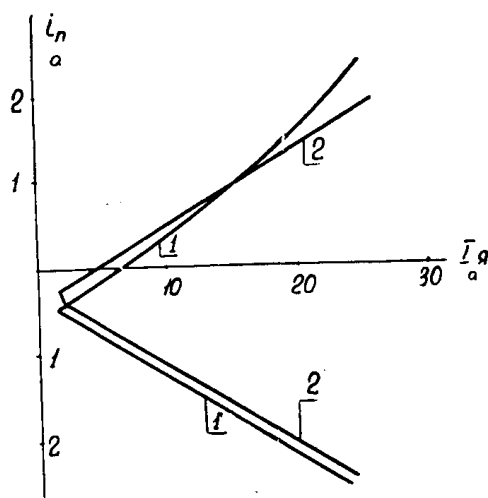


Рис. 3.

лученная экспериментально; 2—2' — расчетная зона безыскровой работы.

Как видно из этого рисунка, совпадение расчетной и экспериментальной зоны достаточно хорошее.

Выводы

1. Присутствие главного поля в зоне коммутации приводит в общем случае к смещению зоны безыскровой работы вверх или вниз от оси тока якоря.

2. Э. д. с. от главного поля делает невозможной безыскровую работу машины во всем диапазоне нагрузок: при малых нагрузках зона отсутствует.

3. Разработка, изготовление и настройка машин должны производиться так, чтобы ток якоря в точке пересечения границ зоны безыскровой работы был меньше тока реального холостого хода.

4. Предложенная методика учета главного поля достаточно полно отражает происходящие в машине процессы. Результаты расчета хорошо согласуются с опытными данными.

ЛИТЕРАТУРА

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

2. В. В. Ивашин, И. А. Милорадов, О вентильно-механической коммутации машин постоянного тока, Известия ТПИ, т. 160, 1966.