

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ СКОСА ПАЗОВ ПРИ РАСЧЕТЕ КОММУТАЦИИ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Э. Г. ЧЕБОТКОВ, А. И. СКОРОСПЕШКИН

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

В машинах постоянного тока для устранения магнитных пульсаций обычно выполняется скос пазов. Так как в зоне коммутации индукция не постоянна по ширине зоны и изменяется по сложной закономерности, следует ожидать, что форма э. д. с. вращения коммутируемой секции от внешних полей из-за скоса пазов будет отлична от формы распределения индукции в воздушном зазоре. Поэтому целью настоящей работы является учет скоса пазов при расчете э. д. с. вращения коммутируемой секции.

Э.д.с. проводника с учетом скоса пазов можно представить в виде суммы э.д.с., наведенных в элементарных проводниках

$$E_{\text{пр}} = \Delta e_1 + \Delta e_2 + \dots + \Delta e_n = v \cdot \Delta l_1 \cdot B_{\delta_1} + v \cdot \Delta l_2 B_{\delta_2} + \dots + v \Delta l_n \cdot B_{\delta n}, \quad (1)$$

где

$\Delta e_1, \Delta e_2, \dots, \Delta e_n$ — э.д.с., наведенные в элементарных проводниках;

$\Delta l_1 = \Delta l_1^1 \cos \varphi, \dots$ — эффективные длины элементарных проводников;

$\Delta l'$ — длина элементарного проводника;

$$\varphi = \arctg \frac{b_c}{l_a};$$

b_c — величина скоса,

l_a — длина якоря,

v — скорость вращения якоря.

$B_{\delta_1}, B_{\delta_2}, \dots, B_{\delta n}$ — значения индукций, соответствующие расположению рассматриваемого элементарного проводника.

Поскольку в (1) изменение переменных B_δ и Δl происходит во взаимно-перпендикулярных направлениях, то представление этого выражения в виде интегральной суммы сложно. В то же время э.д.с. проводника, исходя из (1), можно представить в виде

$$E_{\text{пр}} = v \cdot l_a \cdot B_{\text{ср}}, \quad (2)$$

где $B_{\text{ср}}$ — величина средней индукции для проводника. Среднее значение индукции для проводника с учетом скоса пазов определится как

$$B_{\text{ср}} = \frac{\int_{m_n}^{m_n + b_c} B_\delta \cdot dS}{b_c}, \quad (3)$$

где $B_\delta = f(S)$ — распределение индукции вдоль окружности якоря;

m_n — величина, определяющая положение проводника относительно оси отсчета.

Итак, для э.д.с. проводника с учетом скоса паза имеем выражение

$$E_{\text{пр}} = v \cdot l_a \cdot \frac{\int_{m_n}^{m_n + b_c} B_\delta \cdot dS}{b_c} \quad (4)$$

Следовательно, при полном числе добавочных полюсов, э.д.с. вращения коммутируемой секции равна

$$E_c = 2 \cdot E_{\text{пр}} \cdot \omega_c = 2\omega_c \cdot v \cdot l_a \cdot \frac{\int_{m_n}^{m_n + b_c} B_\delta \cdot dS}{b_c}, \quad (5)$$

где ω_c — число витков секции.

Поскольку э.д.с. секции прямопропорциональна средней индукции проводника, для анализа влияния скоса пазов ограничимся определением индукции $B_{\text{ср}}$.

Индукция в воздушном зазоре зоны коммутации машин постоянного тока является результатом воздействия нескольких составляющих, наиболее важными из которых являются поля добавочных и главных полюсов поперечной реакции якоря. Так как магнитная цепь в зоне коммутации ненасыщена и, следовательно, применим принцип наложения, рассмотрим влияние скоса на э.д.с. вращения от каждого поля в отдельности. Расчет распределения средней индукции в воздушном зазоре коммутационной зоны проводим для машины постоянного тока П51.

Средняя индукция проводника в зоне коммутации от поля добавочного полюса

В [2] приведен метод расчета поля добавочных полюсов, на основе которого получено распределение индукции в воздушном зазоре машины П51 — кривая 1 рис. 1 для тока добавочного полюса $I_w = 10a$.

Для получения средней индукции воспользуемся графическим интегрированием — методом трапеций. Последний при выборе двух количеств интервалов $n = 2n_1 = 12$ обеспечивает достаточно высокую точность расчета.

В результате проведенного интегрирования и расчета по выражению (3) получено распределение средней индукции поля добавочного полюса в нейтральной зоне машины и представлено на рис. 1 в виде кривой 2. На том же рисунке показана ширина добавочного полюса b_w и ширина коммутационной зоны b_k .

Из сравнения распределения индукции в воздушном зазоре с распределением средней индукции следует, что скос пазов несколько уменьшает индукцию под добавочным полюсом и увеличивает ее за пределами полюса.

Как видно из рис. 1, отличие индукций в некоторых точках коммутационной зоны достигает 10÷15%, что соответственно имеет значение при расчете коммутации. Кроме того, кривая распределения средней индукции заметно отличается по форме от кривой индукции воздушного зазора машины — кривая 2 (рис. 1) носит более выраженный синусоидальный характер, чем кривая 1.

Из проведенного анализа ясно, что учет скоса пазов при расчете э.д.с. коммутируемой секции от поля добавочных полюсов необходим.

Расчет поля реакции якоря в зоне коммутации и учет влияния скоса пазов

Поле реакции якоря оказывает значительное влияние на коммутацию, поскольку намагничивающая сила его обычно составляет 0,75÷0,9 намагничивающей силы добавочного полюса. Поэтому при расчете коммутации важно иметь распределение индукции от намагничивающей силы F_{aq} в зоне коммутации.

Расчет индукции в воздушном зазоре от поперечной реакции якоря осложняется тем, что намагничивающая сила F_{aq} изменяется по окружности якоря. Вследствие того, что токи коммутируемых секций меньше тока параллельной ветви, рост н.с. реакции якоря F_{aq} в зоне коммутации замедляется. С учетом этого при несколько ускоренной коммутации н.с. поперечной реакции якоря под центром добавочного полюса согласно [4] равна:

$$F_{aq} = \left(1 - \frac{2}{3} \frac{b_k}{\tau} \right) \frac{A \cdot \tau}{2} . \quad (6)$$

В конце и начале коммутационной зоны н.с. реакции якоря определяется в виде

$$F'_{aq} = A \cdot \frac{\tau - b_k}{2} . \quad (7)$$

Разность между намагничивающими силами F_{aq} и F'_{aq} невелика и составляет для машин серии П 1÷6 габаритов 5÷10 % н.с. F_{aq} .

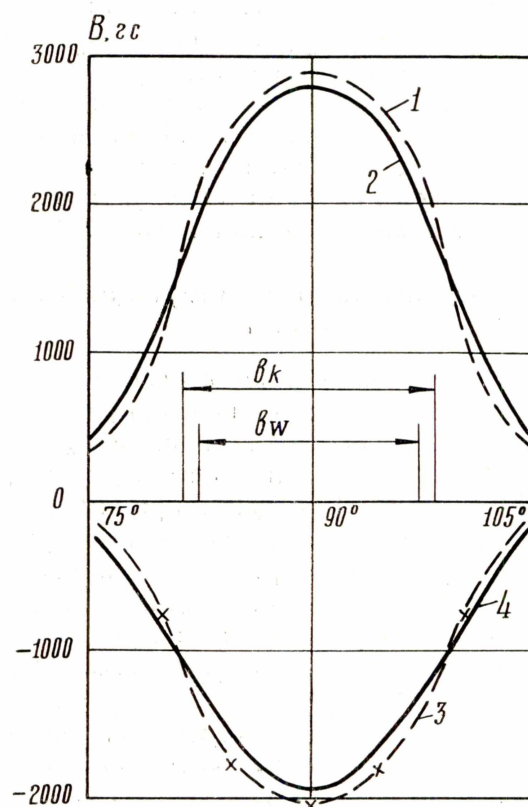


Рис. 1.

Поле реакции якоря в зоне коммутации можно рассчитать, используя методику расчета поля добавочных полюсов [2], при предположении, что указанное выше изменение магнитного потенциала по окружности якоря не приводит к заметному изменению параметров силовых трубок. Для проверки правомочности данного предположения была проведена серия экспериментов по моделированию поля реакции якоря на токопроводящей бумаге. Как показали результаты экспериментов, в пределах изменения геометрии и разности намагничивающих сил F_{aq} и F'_{aq} машин серии П/1÷6 габаритов изменения параметров силовых трубок относительно выражений для них в [2] не происходит.

Таким образом, расчет поля в зоне коммутации от поперечной реакции якоря можно проводить по методике [2].

Исходя из этого, был проведен расчет поля реакции якоря в зоне коммутации машины П51 при $I_a = 10a$. Результаты расчета представлены в виде кривой 3 рис. 1.

Для проверки достоверности расчета был проведен эксперимент по определению индукции поля реакции якоря в воздушном зазоре машины. Распределение индукции снималось с помощью датчика э.д.с. Холла, закрепленного на зубце якоря машины П51, при токе якоря $I_a = 10a$, $i_b = 0$, $I_w = 0$. Экспериментальные данные представлены на рис. 1 в виде точек. Из сравнения расчетных и экспериментальных данных следует, что расхождение расчета и эксперимента не превышает 5%. Этим еще раз подтверждается возможность определения индукции в воздушном зазоре коммутационной зоны от н. с. поперечной реакции якоря с помощью методики [2].

Как и выше, оцениваем влияние скоса пазов на э.д.с. секции по распределению средней индукции по окружности якоря. Определение средней

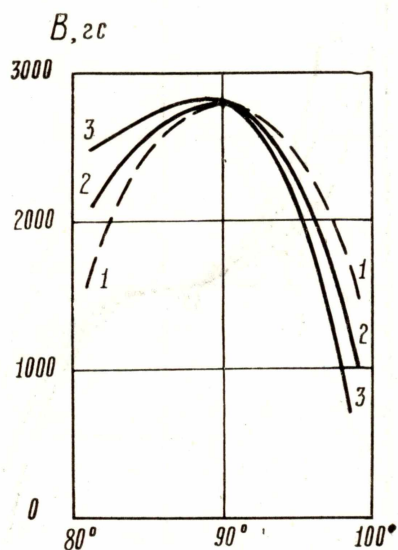


Рис.2.

индукции проводим, используя выражение (3) и графическое интегрирование.

В результате проведенных расчетов имеем распределение средней индукции поля реакции якоря, представленное кривой 4 (рис. 1).

Из анализа кривых 3 и 4 рис. 1 следует, что скос пазов несколько уменьшает индукцию в зоне коммутации и увеличивает ее за пределами зоны. Уменьшение индукции в некоторых точках зоны коммутации достигает 10÷15%. Следовательно, скос пазов может оказывать заметное влияние на э.д.с. коммутируемой секции от поля поперечной реакции якоря.

Из полученных результатов следует, что скос пазов оказывает аналогичное влияние на э.д.с. секции как от поля добавочных полюсов, так и от поля поперечной реакции якоря.

Распределение средней индукции от поля рассеяния главных полюсов в зоне коммутации

В [1], [3] приведены методы расчета поля рассеяния главных полюсов в зоне коммутации. Там же получено распределение поля главных полюсов в нейтральной зоне машины П51 при насыщенной и ненасыщенной магнитной системах. На рис. 2 представлено распределение индукции в воздушном зазоре нейтральной зоны машины П51 поля главных полюсов кривой 1 при $i_b = 0,6a$.

Определение значений средней индукции проводим, используя выражение (3) и расчетные кривые распределения индукции в воздушном зазоре, полученные в [1,3] для токов возбуждения машины 0,6; 1,0; 1,4 а. Ток возбуждения $i_b = 0,6$ а соответствует ненасыщенному наконечнику, при $i_b = 1$ а; 1,4 а некоторые участки полюсного наконечника насыщаются [3].

Результаты расчета представлены в виде кривых 2, 3, 4 рис. 2 соответственно для токов возбуждения 0,6; 1; 1,4 а.

Сравнивая распределение поля в воздушном зазоре (кривая 1) с распределением средней индукции (кривая 2), соответствующих току возбуждения $i_b = 0,6$ а, можно сделать следующие выводы.

Кривая средней индукции 2 соответствует большим значениям индукции, чем кривая 1. Величина расхождения этих кривых растет к краю добавочного полюса и несколько уменьшается за пределами его.

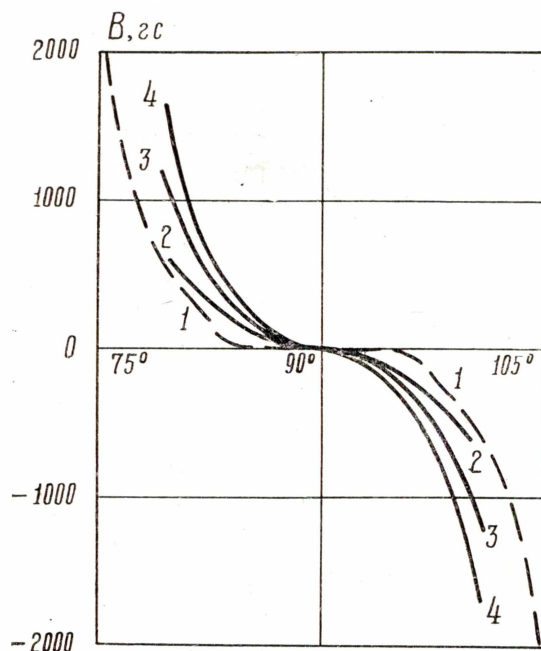


Рис. 3.

Увеличение средней индукции относительно индукции воздушного зазора под добавочным полюсом довольно значительно: в данном случае на некоторых участках оно достигает 150÷400 Гс, что оказывает существенное влияние на коммутацию.

Большое значение имеет и увеличение средней индукции в конце коммутационной зоны относительно индукции воздушного зазора. Так, если мы имели для токов возбуждения 1 и 1,4 а индукции в конце коммутационной зоны 500÷600 Гс [3], то для тех же токов возбуждения из-за скоса пазов средняя индукция составляет уже 700÷900 Гс.

Следовательно, при расчете э.д.с. коммутируемой секции от поля рассеяния главных полюсов учет скоса пазов необходим, так как последний оказывает существенное влияние как на величину, так и на форму э.д.с.

Так как при расчете коммутации поле рассеяния главных полюсов учитывается редко, то для иллюстрации его влияния на коммутирующую э.д.с. рассмотрим среднюю индукцию от совместного действия поля главных и добавочных полюсов.

Как было сказано выше, для поперечной цепи машины постоянного тока применим принцип положения. Поэтому совместную среднюю индукцию поля главных и добавочных полюсов определяем как алгебраическую сумму составляющих. Полученная таким образом средняя индукция машины П51 в зоне коммутации при $I_w = 10$ а и токах возбуждения 0,6 и 1,4 а приведена на рис. 3 в виде кривых.

Кривая 1 представляет распределение средней индукции от поля добавочного полюса при $I_{\text{в}} = 10 \text{ а}$.

Кривая 2 — совместная средняя индукция поля главных и добавочных полюсов при токе возбуждения $i_{\text{в}} = 0,6\text{а}$, то есть при ненасыщенном башмаке главного полюса.

Кривая 3 — совместная средняя индукция поля главных и добавочных полюсов при $i_{\text{в}} = 1,4 \text{ а}$, соответствующая насыщению полюсного башмака.

Из сравнения этих кривых видно, что поле рассеяния главных полюсов оказывает значительное влияние на распределение средней индукции в коммутационной зоне. Так, например, даже при ненасыщенной магнитной цепи по продольной оси и ненасыщенном башмаке главного полюса — $i_{\text{в}} = 0,6 \text{ а}$ имеем увеличение совместной средней индукции относительно индукции от добавочного полюса на набегающем крае коммутационной зоны на 28% и уменьшение индукции на сбегающем крае на ту же величину. При токе возбуждения $i_{\text{в}} = 1,4 \text{ а}$ это изменение индукции на сбегающем и набегающем крае коммутационной зоны достигает уже 50%.

В целом по работе можно сделать следующие выводы:

1. Разработан метод учета скоса пазов при расчете э.д.с. вращения секции в зоне коммутации от внешних полей.

2. Скос пазов оказывает значительное влияние на распределение средней индукции в зоне коммутации, изменяя ее по величине и форме. Наибольшее влияние скос пазов оказывает на распределение средней индукции от поля главных полюсов, так как за пределами добавочного полюса поле рассеяния главных полюсов резко возрастает.

3. Скосом пазов влияние поля главных полюсов на результирующее усиливается. При имевших место в данном случае токах возбуждения средняя индукция на краях зоны коммутации составляет уже 30÷50% средней индукции дополнительного полюса.

4. Показана возможность расчета поля реакции якоря в зоне коммутации с использованием методики [2]. Результаты проведенного расчета и эксперимента показали достаточно хорошую сходимость — расхождение не выше 5%.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. И. Скороспешкин, Э. Г. Чеботков. Расчет поля главных полюсов в зоне коммутации машин постоянного тока серии П. «Известия ТПИ», т. 190, 1968.
2. Э. Г. Чеботков, А. И. Скороспешкин. Расчет поля добавочных полюсов прямоугольной формы машин постоянного тока. «Известия ТПИ», т. 212 (в печати).
3. Э. Г. Чеботков, А. И. Скороспешкин. Расчет поля главных полюсов в зоне коммутации с учетом насыщения магнитопровода. «Известия ТПИ», т. 212 (в печати).
4. И. Н. Рабинович, И. Г. Шубов. Проектирование электрических машин постоянного тока. «Энергия», 1967.