

ВЛИЯНИЕ НАСЫЩЕНИЯ НА ИНДУКТИВНОСТЬ ПАЗОВОГО РАССЕЯНИЯ ОБМОТКИ СТАТОРА УДАРНОГО ГЕНЕРАТОРА

В. С. БАКЛИН

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

При внезапном коротком замыкании ударного генератора поперечно-пазовые потоки рассеяния существенно насыщают зубцы статора, что приводит к уменьшению индуктивности пазового рассеяния обмотки статора. Для оценки влияния насыщения на индуктивность пазового рассеяния воспользуемся методикой расчета нелинейного магнитного поля в пазу статора ударного генератора со всеми допущениями и граничными условиями, принятыми в [7]. С целью сокращения машинного времени в данной работе используется сетка со 198 внутренними узлами.

В [7] принято, что линия ЕС в середине воздушного зазора является линией нулевого потенциала. Это позволяет выразить энергию магнитного поля в пазу статора ударного генератора в виде

$$W = \frac{1}{8} LI \delta \sum_s (p_i + p_i - 1) \cdot (q_k + q_k - 1) = \\ = \frac{1}{8} \delta l \sum_s A_{i, k} (p_i + p_i - 1) \cdot (q_k + q_k - 1), \quad (1)$$

где L — индуктивность проводника в пазу; I — ток в проводнике паза; δ — плотность тока; l — активная длина машины; $A_{i, k}$ — значение векторного потенциала в узлах сетки; p_i , q_k — размеры ячеек сетки; s — поперечное сечение проводника в пазу. Из выражения (1) найдем индуктивность проводника в пазу статора:

$$L = \frac{l \sum_s A_{i, k} (p_i + p_i - 1) \cdot (q_k + q_k - 1)}{I \cdot \sum_s (p_i + p_i - 1) \cdot (q_k + q_k - 1)} \quad (2)$$

и общий коэффициент проводимости пазового рассеяния

$$\lambda_{\text{общ}} = \frac{\sum_s A_{i, k} (p_i + p_i - 1) \cdot (q_k + q_k - 1)}{\mu_0 I \sum_s (p_i + p_i - 1) \cdot (q_k + q_k - 1)}, \quad (3)$$

где μ_0 — магнитная постоянная.

Согласно принятым в [7] граничным условиям, $\lambda_{\text{общ}}$ включает в себя коэффициент проводимости пазового рассеяния $\lambda_{\text{п}}$ и коэффициент проводимости по коронкам зубцов $\lambda_{\text{к}}$. Интересно выделить из $\lambda_{\text{общ}}$ ее составляющие.

Обычно при выводе формулы для расчета коэффициентов проводимости λ_{π} и λ_k рассматривают магнитные поля в области паза и воздушного зазора независимо друг от друга, считая, что линия, ограничивающая паз по расточке статора, является линией равного потенциала. С учетом этого допущения аналитические методы расчета коэффициента проводимости λ_k можно найти в [2], а коэффициента проводимости λ_{π} — в [5, 6].

Расчет $\lambda_{\text{общ}}$ методом конечных разностей показывает, что линия, ограничивающая паз по расточке статора, не является линией равного потенциала. Наблюдается выпучивание силовых линий пазового потока рассеяния в сторону воздушного зазора.

При выводе расчетной формулы коэффициента проводимости λ_k в [3] поле рассеяния в воздушном зазоре рассматривается совместно с полем рассеяния в пазу. Из полученной суммарной проводимости паза и коронки зубцов вычитают проводимость паза λ_{π} , определяемую потоком рассеяния входящего в стенку паза. Согласно такому разделению полей, величину коэффициента проводимости по коронкам зубцов можно найти по выражению

$$\lambda_k = \frac{A_a}{\mu_0 I}, \quad (4)$$

где A_a — значение векторного потенциала в точке a рис. 1. Коэффициент проводимости пазового рассеяния определим как

$$\lambda_{\pi} = \lambda_{\text{общ}} - \lambda_k. \quad (5)$$

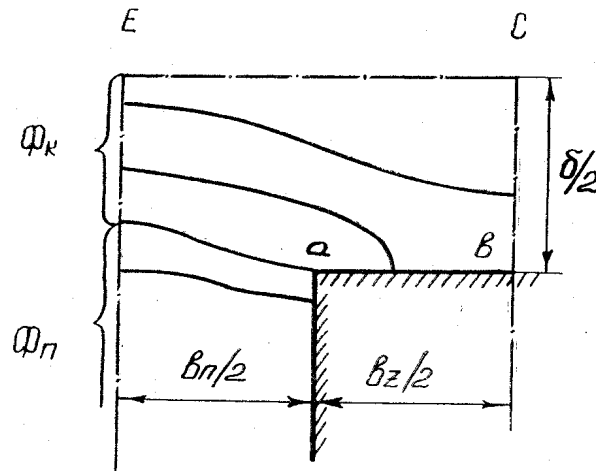


Рис. 1. Поток рассеяния по коронкам зубцов Φ_k и поток рассеяния паза Φ_{π}

Иногда влиянием магнитных силовых линий, проходящих в воздушном зазоре, минуя несколько пазов, пренебрегают и считают, что пазы не сцеплены между собой полем рассеяния по коронкам [2]. Коэффициент проводимости, соответствующий такому представлению поля рассеяния в воздушном зазоре, можно определить по выражению

$$\lambda_{k1} = \frac{A_a - A_b}{\mu_0 I}. \quad (6)$$

Результаты расчета коэффициентов проводимости λ_{π} , λ_k и λ_{k1} , в зависимости от величины тока I в проводнике паза, представлены на рис. 2 и 3. При этом размеры паза оставались неизменными и равными: шири-

на паза $b_{\pi}=5$ см, высота паза $h_{\pi}=10$ см, высота клина вместе с изоляцией $h_k=2$ см, величина воздушного зазора $\delta/2=1,5$ см. Ширина зубца менялась и принимала значения: для кривых 1 — 2,5 см, для кривых 2 — 3,5 см, для кривых 3 — 5 см, для кривых 4 — 7,5 см и для кривых 5 — 10 см. На рис. 2 (прямая 6) представлен результат расчета коэффициента проводимости пазового рассеяния по выражению [5, 6].

$$\lambda_{\pi} = \frac{h_{\pi} - h_k}{3 b_{\pi}} + \frac{h_k}{b_{\pi}}, \quad (7)$$

Если насыщение зубца отсутствует, то различие в величинах коэффициента λ_{π} , рассчитанного по выражению (5) или (7), не превышает 2%.

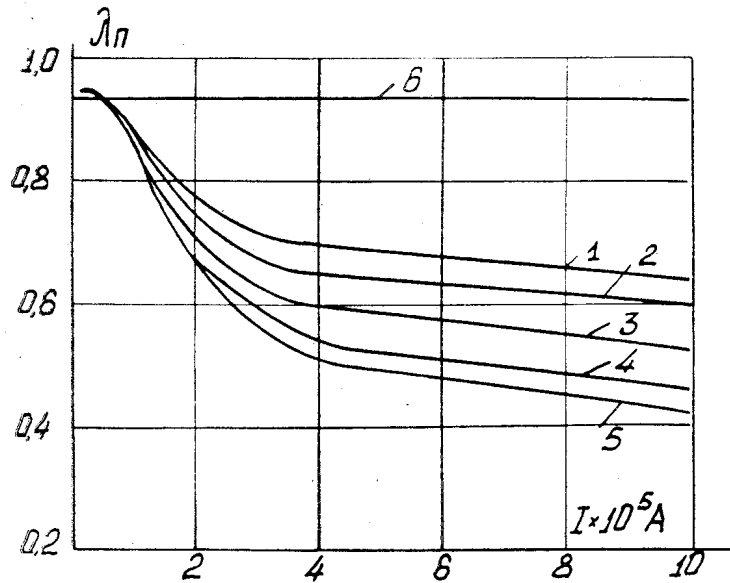


Рис. 2. Зависимость коэффициента проводимости пазового рассеяния λ_{π} от тока в пазу I

Существуют различные формулы расчета ненасыщенного значения коэффициента проводимости по коронкам зубцов. Так, например, в [1]

$$\lambda_k = \frac{5\delta}{5b_{\pi} + 4\delta}; \quad (8)$$

в [2]

$$\lambda_k = \frac{10\delta}{7\delta + 18b_{\pi}}; \quad (9)$$

в [3]

$$\lambda_k = \frac{1}{\pi} \ln \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{2\delta}{b_{\pi}}\right)^2}{2}} - \frac{2\delta}{\pi \cdot b_{\pi}} \arctg \frac{2\delta}{b_{\pi}} + \frac{\delta}{b_{\pi}}. \quad (10)$$

В табл. 1 представлены результаты расчета коэффициента проводимости по коронкам зубцов по формулам (8), (9), (10) и численным методом. При этом $b_{\pi}=b_z=5$ см. Анализ показывает, что с увеличением воздушного зазора различие между λ_k и λ_k [2] увеличивается, а различие между λ_k и λ_k [1] несколько снижается. Различие в величинах λ_k и λ_k [2] можно объяснить тем, что выражение (9) не учитывает потока рассеяния в воздушном зазоре, связывающего пазы статора, который,

Таблица 1

$\delta/2$ см	λ_k	λ_k [1]	λ_k [2]	λ_k [3]
1,5	0,175	0,25	0,15	0,026
3,0	0,35	0,405	0,27	0,186
6,0	0,582	0,612	0,454	0,385

как показано ниже, составляет значительную часть общего потока рассеяния в воздушном зазоре. Поток рассеяния в воздушном зазоре, связывающий пазы статора, можно оценить из разности коэффициентов λ_k и λ_{k1} . На рис. 3 видно, что при уменьшении ширины зубца различие в величинах λ_k и λ_{k1} возрастает. Например, при $b_z = 2,5$ см (кривые 1) оно достигает 35% и еще более увеличивается, если учитывать насыщение зубца.

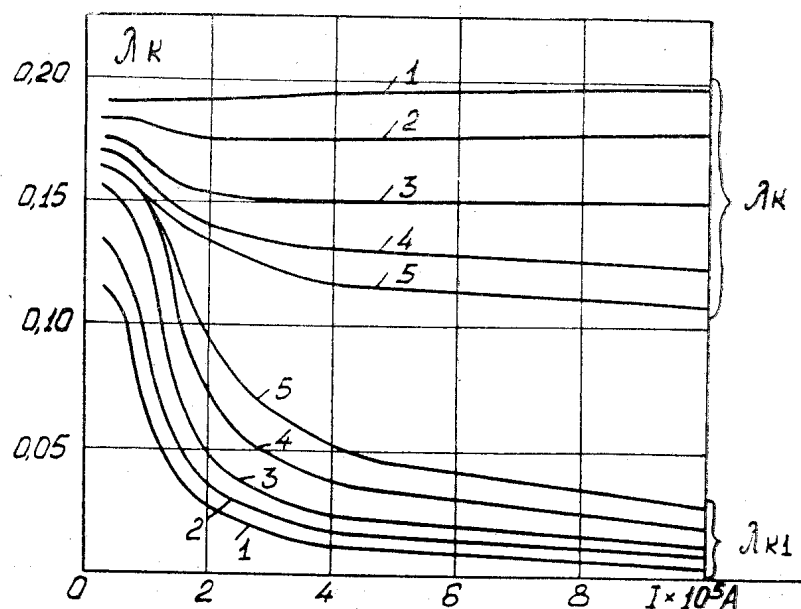


Рис. 3. Зависимость коэффициента проводимости по коронкам зубцов λ_k и коэффициента проводимости λ_{k1} от тока в пазах I

В табл. 2 приведены некоторые результаты исследования влияния величины воздушного зазора и насыщения на коэффициенты проводимости $\lambda_{общ}$, λ_k и λ_{k1} . При этом размеры паза оставались прежними, $b_z = 3,5$ см.

Таблица 2

		I_{KA}	30	75	150	300
$\delta/2 = 1,5$ см	$\lambda_{общ}$		1,13	1,104	0,963	0,858
	λ_k		0,183	0,181	0,175	0,175
	λ_{k1}		0,136	0,113	0,050	0,022
$\delta/2 = 3,0$ см	$\lambda_{общ}$		1,32	1,283	1,14	1,036
	λ_k		0,356	0,356	0,356	0,355
	λ_{k1}		0,151	0,121	0,051	0,024

Если при $\delta/2=1,5$ см различие между λ_k и λ_{k1} составляет 25%, то при $\delta/2=3$ см оно уже свыше 50%. Следовательно поток рассеяния в воздушном зазоре, связывающий пазы статора, может составлять значительную часть общего потока рассеяния в воздушном зазоре, что обуславливает погрешность расчета коэффициента проводимости по коронкам зубцов, если используется выражение (9).

Как показали расчеты, для ненасыщенного значения коэффициента проводимости по коронкам зубцов λ_k , можно использовать выражение (9) при $b_z > b_n$ и выражение (8), если $b_z < b_n$.

Влияние насыщения при расчете коэффициента проводимости по коронкам зубцов следует учитывать только при относительно широких зубцах ($b_z > b_n$). При этом полученное ненасыщенное значение λ_k по выражению (9) следует уменьшить на (10—15%).

В инженерной практике расчета коэффициента проводимости пазового рассеяния с учетом насыщения пользуются приближенными методами, которые условно можно разделить на три группы:

1. Метод, учитывающий наличие только поперечно-пазового потока рассеяния [4].

2. Метод, который, помимо поперечно-пазового потока рассеяния, учитывает наличие основного поля [5].

3. Метод, учитывающий только продольный поток пазового рассеяния, замыкающийся по зубцам на границах фазных зон [6].

Последний метод предполагает зависимость коэффициента насыщения от числа пазов на полюс и фазу «q». Допущения в [7] приняты таким образом, что не представляется возможным сопоставить результаты расчета λ_n , полученные в данной работе и по методике [6]. Наиболее близкое совпадение с полученными в данной работе λ_n дает методика [4] табл. 3. Несколько заниженное значение дает методика [5], так как она, помимо поперечно-пазового потока рассеяния, учитывает наличие основного поля.

Таблица 3

I_{KA}	50	100	125	150	200	250	300
λ_n	0,95	0,87	0,8	0,76	0,7	0,66	0,63
λ_n [4]	0,934	0,85	0,795	0,752	0,705	0,681	0,662
λ_n [5]	0,805	0,652	0,596	0,55	0,473	0,45	0,374

При расчете λ_n по методике [4] величина индукции в области головки зубца « B_k » определялась в данной работе по выражению

$$B_k = \frac{\mu_0 \cdot I + b_z \cdot B_{кр}}{t}, \quad (11)$$

где t — зубцовый шаг; $B_{кр}$ — критическая индукция. Для электротехнической стали Э41 — $B_{кр}=1,914$ Тл. Для определения относительной магнитной проницаемости μ_r в области головки зубца при $B_k \leq 2,05$ Тл использовалась реальная характеристика намагничивания электротехнической стали Э41, а при $B_k > 2,05$ Тл μ_r находили по выражению

$$\mu_r = \frac{B_k}{B_k - B_{кр}}. \quad (12)$$

Таким образом, применение метода конечных разностей для расчета индуктивности пазового рассеяния позволило не только учесть насыщение стальных участков и действительную конфигурацию границ ис-

следуемой области, но и проверить справедливость тех допущений, которые лежат в основе упрощенных аналитических методов.

В заключение автор выражает признательность доц. К. А. Хорькову за ценные советы, касающиеся содержания статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Р. Рихтер. Электрические машины. Т. П. ОНТИ, М.-Л., Госэнергоиздат, 1936.
 2. М. Сапая. Beitrag zur Berechnung des Zahnkopfstreuleitwertes und der gesamten Streureaktanz. Elektrotech. und Maschinenbau, 1970, 87, 11.
 3. Я. Б. Данилевич, В. В. Домбровский, Е. Я. Казовский. Параметры электрических машин переменного тока. М.-Л., «Наука», 1965.
 4. Л. А. Дроздова, В. И. Косачевский, Л. А. Медведева, Г. М. Хуторецкий, Ю. А. Цирлин. К вопросу об определении ненасыщенных значений сверхпереходных сопротивлений синхронных генераторов. «Электротехника», 1967, 10.
 5. И. М. Постников. Проектирование электрических машин. Киев, ГИТЛ, 1960.
 6. В. П. Шуйский. Расчет электрических машин. Л., «Энергия», 1968.
 7. В. С. Баклин. К расчету нелинейного магнитного поля в пазу статора ударного генератора методом конечных разностей. Настоящий сборник.
-