

АНАЛИЗ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО РАССЕЙЯНИЕ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

*Мустафакулова Гулзода Наркабиловна Доцент,
Шукуруллоев Сарвар Анварович ассистент
Ташкентского университета информационных технологий
имени Мухаммада Ал-Хорезми
mustafakulova2020@mail.ru
тел: 90-924-36-18*

Аннотация: в статье приведены выражения для расчета поля в воздушном зазоре, создаваемой обмоткой фазного ротора асинхронной машины и метод расчета дифференциального рассеяния этой обмотки по картине распределения поля в зазоре. Производится сравнение со существующими в настоящее время расчетными методами. Анализ главной и дифференциального рассеяния индуктивностей трехфазной симметричной обмотки фазного ротора асинхронной машины определяется по картине распределения магнитного поля в воздушном зазоре, создаваемой этой обмоткой. На основе выражения радиальной составляющей напряженности магнитного поля в воздушном зазоре, полученной путем решения уравнения Лапласа для скалярного магнитного потенциала, записанной в цилиндрической системе координат составлены выражения для поля в воздушном зазоре токового слоя, катушки, группы катушек и однофазной двухслойной обмотки ротора.

Ключевые слова: асинхронная машина, воздушный зазор, дифференциальное рассеяние, магнитное поле, фазный ротор, обмотка.

Введение. На практике проектирования асинхронного двигателя с фазным ротором индуктивное сопротивление дифференциального рассеяния его обмотки ротора определяется по величине коэффициента магнитной проводимости рассеяния [1,2]. Однако расчетные формулы для этих коэффициентов обычно являются полуэмпирическими и трудно учитывать ряд конструктивных и режимных факторов влияющих на них.

Методическая часть. В данной работе индуктивное сопротивление дифференциального рассеяния трехфазной симметричной обмотки фазного ротора асинхронной машины определяется по картине распределения магнитного поля в воздушном зазоре, создаваемой этой обмоткой. В [3] на основе выражения радиальной составляющей напряженности магнитного поля в воздушном зазоре, создаваемой нитью тока, расположенной на внешней поверхности ротора параллельно аксиальной оси машины, полученной путем решения уравнения Лапласа для скалярного магнитного потенциала, записанной в цилиндрической системе координат составлены выражения для поля в воздушном зазоре токового слоя, катушки, группы катушек и однофазной двухслойной обмотки ротора. В частности для последнего случая приведено выражение в следующем виде

$$H_o = 2w_{k2} \sum_{n=1}^{\infty} \left[C_n \rho^{(n-1)} - D_n \rho^{-(n+1)} - \frac{i}{2\pi n} b^n \rho^{-(n+1)} \right] \frac{\sin n \alpha_2}{\alpha_2} \sin \frac{\beta_2}{2} \frac{\sin n \left(q_2 \frac{\alpha_{z2}}{2} \right)}{\sin n \left(\frac{\alpha_{z2}}{2} \right)} \times \left\{ \cos n \varphi - \cos n \left(\varphi - \frac{\pi}{p} \right) + \cos n \left(\varphi - \frac{2\pi}{p} \right) - \dots - \cos n \left[\varphi - \frac{\pi}{p} (2p-1) \right] \right\}, \quad (1)$$

где w_{k2} – число витков в катушке обмотки ротора;

n – порядок пространственной гармонической;

C_n, D_n – постоянные для гармонической n -го порядка;

$$C_n = \frac{i}{\pi n} b^n \frac{1}{(1+m_{21}) \frac{\mu_0 + \mu_1 m_{11}}{\mu_0 - \mu_1 m_{11}} c^{2n} + (1-m_{21}) b^{2n}}, \quad D_n = \frac{1-m_{21}}{1+m_{21}} b^n \left(\frac{i}{2\pi n} - b^n C_n \right),$$

φ – полярный угол;

ρ – расстояние от исследуемой точки пространства до центра машины;

a, b – радиусы внутренней и наружной окружностей сердечника ротора;

c, d – радиусы расточки и наружной окружности сердечника статора;

μ_0 – магнитная проницаемость воздуха, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м;

μ_1, μ_2 – эквивалентные магнитные проницаемости статора и ротора;

p – число пар полюсов;

$\alpha_2, \beta_2, \alpha_{z2}$ – внутренние пространственные углы, соответствующие половине ширины открытия паза, расстоянию между сторонами катушки и зубцовому шагу ротора;

q_2 – число пазов на полюс и фазу обмотки ротора.

Произведя преобразования и вводя обозначения из (1) получим

$$H_o = 4w_{k2} q_2 p \sum_{n=1}^{\infty} K_n K_{обn} K_{рqn} \sin n \left(\varphi - \frac{2p-1}{p} \frac{\pi}{2} \right), \quad (2)$$

где
$$K_n = n \left[C_n \rho^{(n-1)} - D_n \rho^{-(n+1)} - \frac{i}{2\pi n \rho} \left(\frac{b}{\rho} \right)^n \right],$$

$$K_{сл.n} = \frac{\sin(n \alpha_2)}{n \alpha_2}, \quad K_{yn} = \sin \left(n \frac{\beta_2}{2} \right), \quad K_{pn} = \frac{\sin \left(n q_2 \frac{\alpha_{z2}}{2} \right)}{q_2 \sin \left(n \frac{\alpha_{z2}}{2} \right)},$$

$K_{обn}$ – обмоточный коэффициент ротора для гармонической n -го порядка, $K_{обn} = K_{yn} K_{сл.n} K_{pn}$,

$K_{сл.n}, K_{yn}, K_{pn}$ – коэффициенты слоя, укорочения шага и распределения катушек обмотки ротора для гармонической n -го порядка;

$K_{рqn}$ – коэффициент распределения групп катушек фазы двухслойной

обмотки ротора по его окружности для гармонической n -го порядка,
$$K_{pqn} = \frac{\cos n \pi}{\sin\left(\frac{n \pi}{p 2}\right)}.$$

Аналогично (2) формула для расчета радиальной составляющей напряженности магнитного поля в воздушном зазоре машины, создаваемой трехфазной двухслойной обмоткой ротора с целым q_2 при протекании по ней симметричного синусоидального тока с частотой f_2 будет иметь вид

$$H_T = 4pq_2 w_{k2} \sum_{n=1}^{\infty} K_n K_{обn} K_{pqn} \left[\sin n \left(\varphi - \frac{2p-1 \pi}{p} \frac{\pi}{2} \right) \sin \left(\omega_2 t + \frac{2\pi}{3} \right) + \sin n \left(\varphi - \frac{2p-1 \pi}{p} \frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{3p} \right) \sin \left(\omega_2 t - \frac{2\pi}{3} \right) + \sin n \left(\varphi - \frac{2p-1 \pi}{p} \frac{\pi}{2} - \frac{4\pi}{3p} \right) \sin \omega_2 t \right], \quad (3)$$

где ω_2 – угловая частота изменения тока в обмотке ротора, $\omega_2 = 2\pi f_2$.

Подобное (3) выражение для трехфазной однослойной обмотки ротора при протекании по ней симметричного синусоидального тока будет

$$H_T = 2w_{k2} pq_2 \sum_{n=1}^{\infty} K_n K_{обn} K_{оqn} \left[\cos n \left(\varphi - \frac{p-1}{p} \pi \right) \sin \left(\omega_2 t + \frac{2\pi}{3} \right) + \cos n \left(\varphi - \frac{p-1}{p} \pi - \frac{2\pi}{3p} \right) \sin \left(\omega_2 t - \frac{2\pi}{3} \right) + \cos n \left(\varphi - \frac{p-1}{p} \pi - \frac{4\pi}{3p} \right) \sin \omega_2 t \right], \quad (4)$$

где $K_{оqn}$ – коэффициент распределения групп катушек одной фазы однослойной обмотки ротора по его окружности для гармонической n -го порядка,

$$K_{оqn} = \frac{\cos n \pi}{\cos\left(\frac{n \pi}{p}\right)}.$$

Для трехфазной двухслойной обмотки ротора с дробным числом пазов на полюс и фазу при основании дробности равном двум выражение для радиальной составляющей напряженности магнитного поля в воздушном зазоре, создаваемой этой обмоткой при протекании по ней симметричного синусоидального тока аналогично (3) и (4) будет иметь вид

$$H_T = 2w_{k2} p \sum_{n=1}^{\infty} K_n K_{сл.n} K_{yn} K_{оqn} \left[K'_{ркn} (f_r + 1) \cos n \left(\varphi + \frac{\pi}{p} \right) + K''_{ркn} f_r \cos n \varphi \right] \times \\ \times \sin \left(\omega_2 t + \frac{2\pi}{3} \right) + \left[K'_{ркn} (f_r + 1) \cos n \left(\varphi + \frac{\pi}{p} - \frac{2\pi}{3p} \right) + K''_{ркn} f_r \cos n \left(\varphi - \frac{2\pi}{3p} \right) \right] \times \\ \times \sin \left(\omega_2 t - \frac{2\pi}{3} \right) + \left[K'_{ркn} (f_r + 1) \cos n \left(\varphi + \frac{\pi}{p} - \frac{4\pi}{3p} \right) + K''_{ркn} f_r \cos n \left(\varphi - \frac{4\pi}{3p} \right) \right] \times \\ \times \sin \omega_2 t. \quad (5)$$

$K'_{ркn}$, $K''_{ркn}$ – коэффициенты распределения большой и малой групп катушек,

$$K'_{pkn} = \frac{\sin\left[n(f_r + 1)\frac{\alpha_{z2}}{2}\right]}{(f_r + 1)\sin\left(n\frac{\alpha_{z2}}{2}\right)}, \quad K''_{pkn} = \frac{\sin\left(nf_r\frac{\alpha_{z2}}{2}\right)}{f_r\sin\left(n\frac{\alpha_{z2}}{2}\right)},$$

где f_r – целая часть дробного числа пазов на полюс и фазу обмотки ротора.

Обсуждение. Выражения (3), (4) и (5) позволяют рассчитывать в той или иной точке воздушного зазора радиальную составляющую напряженности магнитного поля, создаваемой трехфазной симметричной обмоткой ротора с учетом влияния на поле конструктивных размеров активной зоны, а также конечности величин эквивалентных магнитных проницаемостей тел статора и ротора асинхронной машины. При расчете поля в воздушном зазоре, создаваемой той или иной обмоткой ротора с учетом конечности величин μ_1 и μ_2 , подобно тому, когда рассчитывалось магнитное поле в воздушном зазоре, создаваемое обмоткой статора [4], удобно для достижения большей точности расчета рассматривать его состоящим из трех составляющих:

1. Основная гармоническая с порядком $n = p$;
2. Поле рассеяния по коронкам зубцов, представляющее собой сумму всех пространственных гармонических поля в воздушном зазоре, создаваемой обмоткой ротора с порядками, начиная от подзубцового и выше, причем $n_{пз} = Z_2/2 - p$;
3. Поясовое поле рассеяния, которое представляет собой сумму всех пространственных гармонических поля воздушного зазора до подзубцового порядка, кроме основной.

Последние две составляющие поля в воздушном зазоре в сумме образуют магнитное поле дифференциального рассеяния обмотки ротора. Такое отдельное рассмотрение поля в воздушном зазоре, создаваемой той или иной обмоткой обусловлено тем, что величины эквивалентных магнитных проницаемостей статора μ_1 и ротора μ_2 для каждой составляющей поля, рассчитанные для того или иного режима работы машины переменного тока могут существенно отличаться друг от друга из – за того, что магнитная цепь каждой из этих составляющих различная, хотя для них магнитопровод является общим. Для примера на рис.1 приведены зависимости распределения магнитных индукций основной рабочей гармонической B_p , поля рассеяния по коронкам зубцов $B_{кз}$ и поясового поля рассеяния $B_{пз}$ по окружности наружной поверхности ротора, создаваемых трехфазной двухслойной обмоткой фазного ротора асинхронного двигателя типа АК – 62/4 (14 кВт; 220/380 В; 50,5/29,3 А; 1400 об/мин; $Z_2 = 48$; $q_2 = 4$; $y_2 = 12$; $a = 0,03$ м; $b = 0,0996$ м; $c = 0,1$ м; $d = 0,1635$ м; $\delta = 0,0004$ м; $b_{пз} = 0,0037$ м) в пределах одного полюсного деления машины, рассчитанные по (3) для момента времени $t = 7/300$ с и токе ротора $i_2 = 36,5$ А. Положение исследуемой точки пространства по окружности воздушного зазора охарактеризовано полярным углом φ . Магнитная индукция B находилась по величине напряженности поля H с помощью выражения $B = \mu_0 H$. Для большей

наглядности угол φ выражен в электрических градусах. При расчете поля основной пространственной гармонической относительные значения эквивалентных магнитных проницаемостей принимались $\mu_1 = 620$, $\mu_2 = 440$, рассчитанные по [3] для номинального режима работы машины. Для поясового поля рассеяния воздушного зазора ввиду того, что его пространственный период ближе таковой для основного поля, эквивалентные магнитные проницаемости для их расчета были приняты равными соответствующим величинам для основного поля, т.е. $\mu_{\text{пн}1} = \mu_1$, $\mu_{\text{пн}2} = \mu_2$. Для расчета поля рассеяния по коронкам зубцов значения относительных эквивалентных магнитных проницаемостей, определенные по [3] для того же номинального режима работы машины равнялись $\mu_{\text{кз}1} = 890$ и $\mu_{\text{кз}2} = 820$.

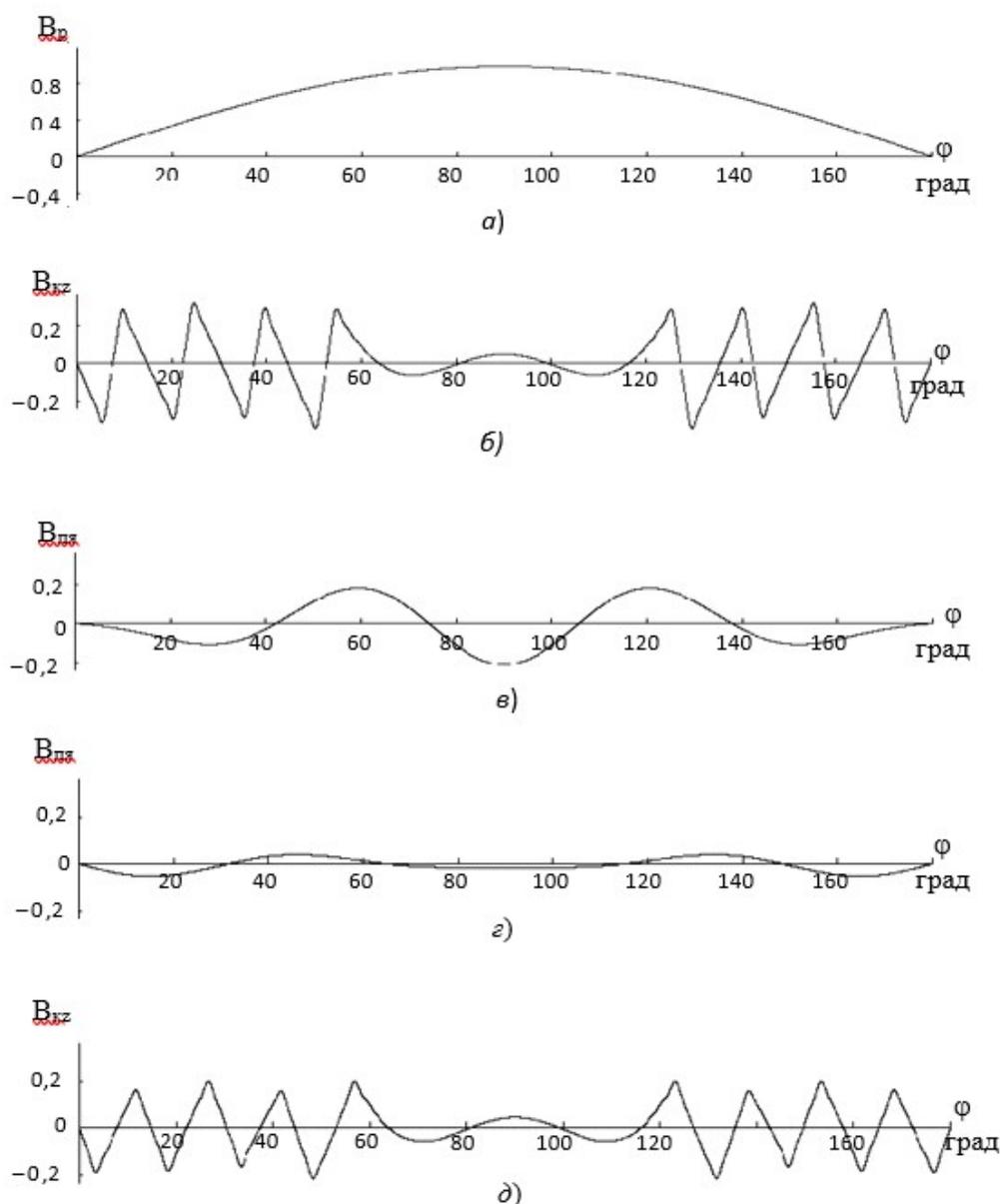


Рис. 1. Зависимости распределения магнитных индукций

Поясовая составляющая поля дифференциального рассеяния определялась как сумма пространственных гармонических поля в воздушном зазоре с порядками $n = 10$ и 14 , а поле рассеяния по коронкам зубцов представляла сумму гармонических в диапазоне n от 22 до 298 . Кривые на рис.1 а, б и в соответствуют диаметральному шагу обмотки ротора $y_2 = 12$, а зависимость $B_{кз} = f(\varphi)$, приведенный на рис.1 г величине $y_2 = 10$, т.е. укорочению шага обмотки ротора на $1/6$ часть полюсного деления машины. Такое укорочение шага обмотки ротора привело небольшому, практически пропорциональному коэффициенту укорочения шага обмотки для основной гармонической, изменению магнитных индукций B_p и $B_{кз}$. Однако, как видно из сопоставления кривых на рис. 1в и г такое укорочение шага существенно уменьшило поясовую составляющую поля дифференциального рассеяния. Среднеквадратичное значение магнитной индукции поясового поля рассеяния при $y_2 = 12$ равнялась $0,1095$ Тл, а при $y_2 = 10$ величине $0,0283$ Тл. На магнитную индукцию поля рассеяния по коронкам зубцов обмотки ротора существенное влияние оказывает ширина открытия паза ротора. На основное и поясовое поля воздушного зазора изменение ширины открытия паза ротора $b_{п2}$ оказывает незначительное влияние, т.е. практически они изменяются обратно пропорционально коэффициенту воздушного зазора машины. Кривая зависимости $B_{кз} = f(\varphi)$, представленная на рис.1 д соответствует $b_{п2} = 0,0074$ м. Из сопоставления кривых зависимостей на рис.1 б и д видно, что при прочих одинаковых условиях увеличение $b_{п2}$ в два раза приводит к уменьшению среднеквадратичного значения магнитной индукции поля рассеяния по коронкам зубцов обмотки ротора с $0,1529$ Тл при $b_{п2} = 0,0037$ м на $0,0808$ Тл при $b_{п2} = 0,0074$ м. Таким образом ширина открытая паза ротора оказывает существенное влияния на величину поля рассеяния по коронкам зубцов обмотки ротора. Все три составляющие поля воздушного зазора, создаваемые обмоткой ротора существенно изменяются от величины воздушного зазора δ .

Каждая составляющая поля в воздушном зазоре, создаваемой обмоткой ротора обуславливает соответствующее индуктивное сопротивление этой же обмотки. Реактивность поясовой составляющей дифференциального рассеяния обмотки ротора обусловлено поясовым полем рассеяния в воздушном зазоре. Эта реактивность может быть определена по картине распределения поля поясового рассеяния в воздушном зазоре энергетическим методом [4]. Ввиду малой величины воздушного зазора в асинхронных машинах поле поясового рассеяния практически не изменяется в радиальном направлении воздушного зазора машины. При расчете поясовой реактивности рассеяния обмотки ротора асинхронной машины энергетическим методом достаточно ограничиться расчетом энергии магнитного поля в воздушном зазоре приняв, что это поле распределено равномерно в радиальном направлении воздушного зазора, а приближенный учет энергии магнитного поля поясового рассеяния в ферромагнитных участках магнитопровода можно осуществить умножив энергию поясового поля рассеяния в зазоре на коэффициент насыщения магнитопровода машины.

Расчет по коронкам зубцов составляющей индуктивного сопротивления дифференциального рассеяния обмотки ротора проведем по величине суммарного потокосцепления исследуемой фазы обмотки ротора полем рассеяния по коронкам зубцов подобно тому, как это осуществлялось для обмотки статора [5,6]. Если в [5,6] суммарное потокосцепление фазы обмотки статора ее полем рассеяния по коронкам зубцов определялось по картине распределения поля рассеяния обмотки по окружности расточки статора, то определение суммарного потокосцепления эффективных проводников исследуемой фазы обмотки ротора необходимо осуществить по картине распределения поля рассеяния по коронкам зубцов обмотки ротора по окружности внешней поверхности ротора. Метод расчета по коронкам зубцов составляющей дифференциального рассеяния обмотки ротора по величине суммарного потокосцепления вытекает из тех свойств поля рассеяния по коронкам зубцов, что оно состоит из отдельных пар полюсов, магнитный поток каждой из которых сцеплен с соответствующим пазом с током в котором расположены проводники исследуемой фазы обмотки. Потокосцепление эффективных проводников стороны катушки исследуемой фазы обмотки ротора полем рассеяния по коронкам зубцов обусловлено не только полем самоиндукции рассеяния, создаваемым током стороны катушки исследуемой фазы, но и полем взаимной индукции по коронкам зубцов, создаваемым током стороны катушки другой фазы, расположенным в пазу совместно со стороной катушки исследуемой фазы обмотки ротора. Если шаг двухслойной обмотки ротора диаметральный, то взаимная индуктивность полем рассеяния по коронкам зубцов между фазами обмотки будет отсутствовать, т.к. в каждом пазу ротора находятся стороны катушек, принадлежащие только одной фазе. Однако при укорочении шага обмотки ротора в некоторых пазах располагаются стороны катушек, которые принадлежат различным фазам. В этом случае будет существовать взаимная индуктивность полем рассеяния по коронкам зубцов между фазами обмотки ротора. Величина индуктивности рассеяния по коронкам зубцов фазы обмотки ротора L_{kz} находится как частное от деления суммарного потокосцепления эффективных проводников фазы обмотки ротора полем рассеяния по коронкам зубцов ψ_{kz} на фазный ток обмотки при котором была рассчитана кривая распределения поля по окружности внешней поверхности ротора. В расчетах используется кривая поля в пределах одной повторяющейся по своей структуре части обмотки ротора и полученный результат умножается на число таких повторяющихся частей одной фазы по всей окружности ротора. В машинах с целым q_2 одна повторяющаяся часть обмотки располагается в пределах одного полюсного деления, а в машинах с дробным q_2 и четным основанием дробности занимает число полюсных делений, равное основанию дробности, а при нечетном – в два раза больше [7]. Обозначим через h_2 число повторяющихся по своей структуре частей обмотки ротора, a_2 – число параллельных ветвей, а через ψ_{kzp} – потокосцепление одной фазы обмотки ротора полем рассеяния по коронкам зубцов в пределах одной повторяющейся ее части.

Тогда индуктивность рассеяния по коронкам зубцов фазы обмотки ротора может

быть определена так
$$L_{kz2} = \sqrt{2} \frac{\Psi_{kzp} h_2}{a_2^2 i}.$$

Величина Ψ_{kzp} представляет собой сумму всех потокосцеплений эффективных проводников пазов в пределах одной повторяющейся по своей структуре части обмотки ротора, принадлежащих к исследуемой фазе.

Расчет величины Φ_{kzj} производится для каждого паза в отдельности в пределах одного зубцового шага с центром на оси рассматриваемого паза и определяется по выражению

$$\Phi_{kzj} = B_{kzj} t_{z2} l_{\delta},$$

где t_{z2} – зубцовый шаг ротора;

l_{δ} – расчетная длина воздушного зазора;

B_{kzj} – среднее значение магнитной индукции поля рассеяния по коронкам зубцов в пределах одного зубцового шага ротора.

Величина B_{kzj} находится отдельно для каждого зубцового шага как среднеарифметическая абсолютных значений магнитной индукции поля рассеяния по коронкам зубцов, распределенной по окружности наружной поверхности ротора в пределах каждого зубцового шага, т.к. в каждом зубцовом делении располагается одна волна (одна пара полюсов) несинусоидально распределенного, но практически симметрично расположенного относительно оси паза ротора поля рассеяния по коронкам зубцов. Для определения B_{kzj} кривая распределения магнитной индукции поля рассеяния по коронкам зубцов в пределах одного зубцового шага с центром, расположенным на оси паза исследуемой фазы обмотки делится на m равноотстоящих друг от друга ординат b_1, b_2, \dots, b_m и рассчитывается путем суммирования их абсолютных значений по выражению $B_{kzj} = 1/m(b_1 + b_2 + \dots + b_m)$.

Для определения ординат кривой магнитной индукции поля рассеяния по коронкам зубцов в зоне ширины открытия паза ротора должна быть использована кривая поля, рассчитанная при $\mu_{kz1} = \mu_{kz2} = \mu_0$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как видно, увеличение насыщения магнитопровода машины в основном влияет на реактивность поясовой составляющей дифференциального рассеяния обмотки ротора, а на рассеяние по коронкам зубцов влияние относительных магнитных проницаемостей в основном наблюдается при их значениях равном 200 и ниже. В режимах глубокого насыщения магнитопровода машины наблюдается интенсивное уменьшение реактивности дифференциального рассеяния обмотки ротора и его по коронкам зубцов, а также поясовой составляющих.

ЛИТЕРАТУРА

1. Копылов И.П., Клоков Б.К., Морозкин В.П., Токарев Б.Ф. Проектирование электрических машин. – М.: Высш. шк., 2002. – 757 с. ил.

2. Гольдберг О.Д., Гурин Я.С., Свириденко И.С. Проектирование электрических машин.–М.: Высш. шк., 1984.– 431 с. ил.

3. Мустафакулова Г.Н. Реактивности рассеяния по коронкам зубцов обмотки возбуждения турбогенератора. //Вестник Таш ГТУ, Ташкент. – 2005. – №3,–С.70–72.

4. Мустафакулова Г.Н. Исследование реактивности рассеяния по коронкам зубцов обмотки возбуждения ТГ//Узб. журнал. «Проблемы энерго- и ресурсосбережения».–2006.– № 3.–С.43–48.

5. Одилов Г., Махмадиев Г.М., Мустафакулова Г.Н. Исследование потокосцепления синусоидального витка полем рассеяния по коронкам зубцов якоря машины переменного тока. Межвуз. сб. науч. тр. «Актуальные вопросы в обл. техн. и фонд. наук» Вып. 4, ТашГТУ, Ташкент, 2000. 48–54 с.

6. Мустафакулова Г.Н. Оптимизация геометрии активных зон неявнополюсных синхронных машин на основе определения магнитного поля: дис.кан. техн. наук. – Т.: ТГТУ, 2008.

7. Иванов – Смоленский А.В., Электрические машины: М.: Энергия, 1980.