

МАГНИТНЫЕ ПРОВОДИМОСТИ ДВУХПОЛЮСНОЙ РЕАКТИВНОЙ МАШИНЫ С АНИЗОТРОПНОЙ МАГНИТНОЙ ПРОВОДИМОСТЬЮ РОТОРА

Ф.А. Гельвер^{1, 2}, В.Ф. Самосейко^{1, 2}

¹ Филиал «Центральный научно-исследовательский институт судовой электротехники и технологии» ФГУП «Крыловский государственный научный центр», г. Санкт-Петербурга, Россия

² Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова, г. Санкт-Петербурга, Россия

На основе предложенной схемы замещения магнитной цепи реактивной электрической машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора получены аналитические зависимости, позволяющие определить продольную и поперечную магнитные проводимости двухполюсной реактивной машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора с учетом крепежной выемки и межполюсного немагнитного промежутка. Представлены результаты сравнения двух вариантов изготовления ротора реактивной машины с использованием продольной шихтовки ротора (ALA) и поперечной шихтовки ротора (TLA) по коэффициенту поперечной магнитной проводимости. Представленное математическое описание может быть использовано для построения методики проектирования реактивной электрической машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора с продольной шихтовкой пакета полюса ротора (ALA). Из полученных результатов следует, что крепежная выемка и межполюсный воздушный промежуток существенно уменьшают поперечную магнитную проводимость машины, а следовательно, улучшают ее эффективность.

Ключевые слова: анизотропная магнитная проводимость, продольная шихтовка полюса ротора, магнитный потенциал, магнитное напряжение, коэффициент поперечной магнитной проводимости.

Введение

В настоящее время реактивным электрическим машинам с анизотропной магнитной проводимостью ротора уделяется большое внимание, о чем свидетельствует множество статей в иностранных [1–27] и отечественных [28–33] журналах, сборниках и монографиях. Данный класс электрических машин отличает высокий показатель энергетической эффективности [1] и лучшие эксплуатационные характеристики [1, 3–5, 7, 10, 15, 19, 22, 23, 28–33] по сравнению с другими типами электрических машин, включая самую распространенную электрическую машину – асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором. Сравнению этих двух классов электрических машин по энергетическим и эксплуатационным характеристикам также посвящено много статей [3, 18, 19, 28–30, 32–35]. Следует отметить, что существуют две технологии изготовления ротора такой электрической машины: с использованием продольной шихтовки пакетов полюса ротора (ALA – Axially Laminated Anisotropic) и поперечной шихтовки пакета ротора со специальными вырезами (TLA – Transversally Laminated Anisotropic). Считается что реактивная машина с поперечной шихтовкой пакета полюса ротора (TLA)

более технологична в изготовлении [5, 22, 23, 33]. В частности, фирма ABB уже несколько лет промышленно выпускает реактивные электрические машины с поперечной шихтовкой пакета ротора (TLA) [34, 35]. На данный момент времени практически все исследования [1–27] посвящены именно реактивной машине с анизотропной магнитной проводимостью ротора с поперечной шихтовкой пакета ротора (TLA). Ряд статей посвящен оптимизации конструкции и геометрических размеров ротора реактивной машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора с поперечной шихтовкой пакета ротора (TLA) [5, 8–17, 20, 23–27]. В представленных статьях приводятся в основном результаты численного режестрирования физического моделирования магнитных полей с использованием специализированных программ, основанных на методах конечных элементов, таких как ELCUT, ANSYS Maxwell, Femlab. Несмотря на множество статей и работ, выполненных в последнее время [36–38], посвященных описанию магнитных полей различных типов электрических машин, проведенный анализ показал, что аналитическое описание магнитных проводимостей реактивной машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора с продольной шихтовкой пакета ротора (ALA)

– амплитуда гармоники порядка $u = 2 \cdot i - 1$, $v = 2 \cdot j - 1$ продольного магнитного напряжения в воздушном зазоре.

После интегрирования выражения (3), амплитуда гармоники порядка u , v продольного магнитного напряжения запишется в виде:

$$F_{\delta d(u,v)} = \frac{2}{y-x} \cdot \left(\frac{\sin(x \cdot k_v) - \sin(x)}{x} - \frac{\sin(y \cdot k_v) - \sin(y)}{y} \right), \quad (4)$$

где $x = (v-u) \cdot \pi/2$; $y = (v+u) \cdot \pi/2$; $k_v = 2 \cdot \alpha_1/\pi$ – доля, занимаемая крепежной выемкой на угловом полюсном делении.

Взаимная относительная продольная магнитная проводимость катушек A и B , в соответствии с формулой

$$\lambda^*(\alpha_A, \alpha_B) = \lambda^*(\alpha_B, \alpha_A) = \frac{\pi}{4} \cdot \int_{\alpha_B}^{\alpha_B + \pi} F_{\delta}(\beta, \alpha_A) \cdot d\beta, \quad (5)$$

определится выражением:

$$\lambda^*_{dd}(\alpha_A, \alpha_B) = \lambda^*(\alpha_B, \alpha_A) = \frac{\pi}{4} \cdot \int_{\alpha_B}^{\alpha_B + \pi} F_{\delta d}(\beta, \alpha_A) \cdot d\beta = \sum_{u=1}^{\infty} \sum_{v=1}^{\infty} \Lambda^*_{dd(u,v)} \cdot \cos((2 \cdot u - 1) \cdot \alpha_A) \cdot \cos((2 \cdot v - 1) \cdot \alpha_B), \quad (6)$$

где

$$\Lambda^*_{dd(u,v)} = \pi^2 \cdot \left(\frac{\sin(x \cdot k_v) - \sin(x)}{x \cdot (x^2 - y^2)} - \frac{\sin(y \cdot k_v) - \sin(y)}{y \cdot (x^2 - y^2)} \right) \quad (7)$$

– относительная продольная магнитная проводимость.

Так как при $x = 0$ в выражении (7) имеет место неопределенность, то взаимную относительную продольную магнитную проводимость катушек A и B удобнее вычислять по формуле

$$\lambda^*_{dd}(\alpha_A, \alpha_B) = \sum_{i=1}^{\infty} \left(\Lambda^*_{dd(v,v)} \cdot \cos(v \cdot \alpha_A) \cdot \cos(v \cdot \alpha_B) + 2 \cdot \sum_{j=1}^{v-1} \Lambda^*_{dd(u,v)} \cdot \cos(u \cdot \alpha_A) \cdot \cos(v \cdot \alpha_B) \right),$$

где

$$\Lambda^*_{dd(v,v)} = \frac{1}{v^2} \cdot \left(1 - k_v + \frac{\sin(v \cdot \pi \cdot k_v / 2)}{v \cdot \pi} \right) \quad (8)$$

– амплитуда гармоники порядка v относительной продольной магнитной проводимости.

При круглом основании цилиндрического ротора ($k_v = 0$) продольное магнитное напряжение в воздушном зазоре (2) может быть представлено простым рядом Фурье

$$F_{\delta d}(\beta, \alpha_A) = \sum_{j=1}^{\infty} F_{\delta d(v)} \cdot \cos(v \cdot \alpha_A) \cdot \sin(v \cdot \beta), \quad (9)$$

где

$$F_{\delta d(v)} = \frac{2}{\pi \cdot v} \quad (10)$$

– амплитуда гармоники продольного магнитного напряжения в воздушном зазоре порядка v . График функции продольного магнитного напряжения в воздушном зазоре приведен на рис. 2, б.

Взаимная относительная продольная магнитная проводимость катушек A и B у машины с круглым основанием цилиндрического ротора может быть также представлена простым рядом Фурье.

$$\lambda^*_{dd}(\alpha_A, \alpha_B) = \sum_{j=1}^{\infty} \Lambda^*_{dd(v)} \cdot \cos(v \cdot \alpha_A) \cdot \cos(v \cdot \alpha_B), \quad (11)$$

где

$$\Lambda^*_{dd(v)} = \Lambda^*_{dd(v,v)} = \frac{1}{v^2} \quad (12)$$

– амплитуда гармоники порядка v относительной продольной магнитной проводимости.

Амплитуда гармоники порядка u , $v = 1$ продольной магнитной проводимости совпадает с базовой магнитной проводимостью $\Lambda_{dd(1,1)}$ и называется основной продольной магнитной проводимостью

$$\Lambda_{dd} = \Lambda_{dd(1,1)} = \Lambda_{\delta} = \frac{4 \cdot \mu_0 \cdot l \cdot \tau}{\pi^2 \cdot \delta^*}, \quad (13)$$

где $\delta^* = \delta/R$ – относительный расчетный воздушный зазор между статором и ротором; $\tau = \pi/p$ – угловое полюсное деление; p – число пар полюсов; l – длина магнитопровода.

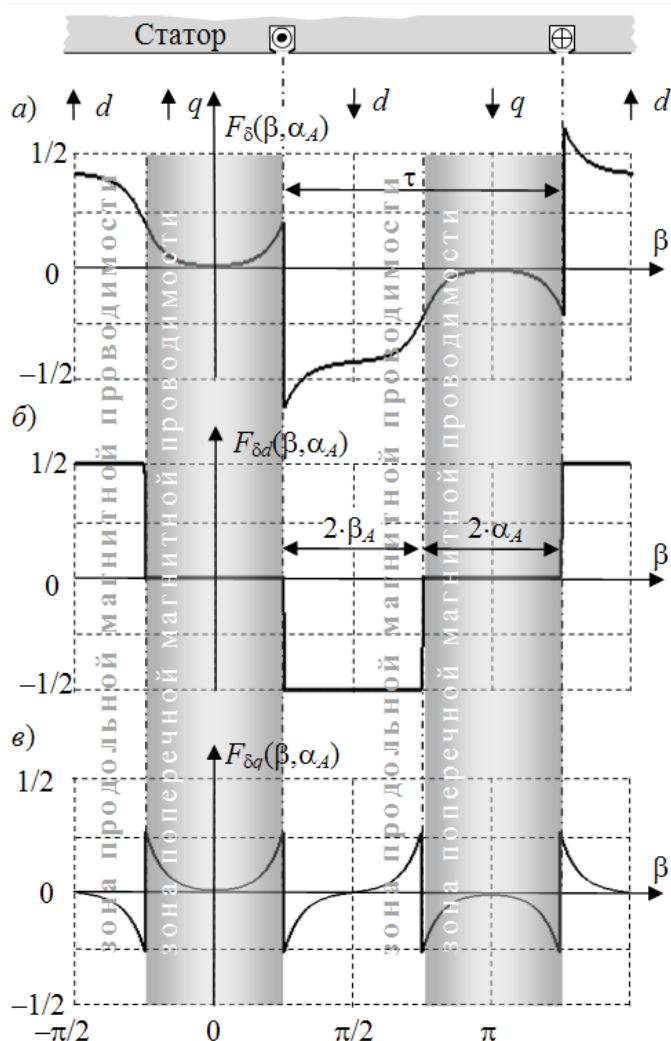


Рис. 2. Графики функций магнитного напряжения в воздушном зазоре при круглом основании цилиндра ротора: а – суммарного; б – продольного; в – поперечного

Основная удельная продольная магнитная проводимость с круглым основанием цилиндрического ротора

$$\Lambda_{dd}^0 = \frac{\Lambda_{dd}}{\mu_0 \cdot l} = \frac{4}{p \cdot \pi \cdot \delta^*} \quad (14)$$

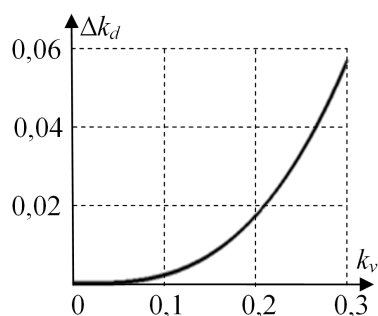


Рис. 3. Зависимость коэффициента вариации продольной магнитной проводимости от ее доли на угловом полюсном делении

Для оценки влияния крепежной выемки на продольную магнитную проводимость катушки введем понятие *коэффициента вариации продольной магнитной проводимости*, обусловленной крепежной выемкой

$$\Delta k_d = 1 - \Lambda_{dd}^* = k_v \cdot \frac{\sin(k_v \cdot \pi)}{\pi}, \quad (15)$$

где $k_v = 2 \cdot \alpha_1 / \pi$ – доля, занимаемая крепежной выемкой на угловом полюсном делении τ ; α_1 – половина геометрического углового размера крепежной выемки. Коэффициент вариации продольной магнитной проводимости показывает, насколько крепежная выемка уменьшает продольную магнитную проводимость

$$\Lambda_{dd} = \Lambda_6 \cdot (1 - \Delta k_d),$$

где Λ_6 – базовая магнитная проводимость (13). Зависимость коэффициента вариации продольной магнитной проводимости от ее доли на угловом полюсном делении приведена на рис. 3.

Поперечная магнитная проводимость двухполюсной машины

Поперечное магнитное напряжение в воздушном зазоре можно записать в виде составной функции:

$$F_{\delta q}(\beta, \alpha_A) = F_{\delta}(\beta, \alpha_A) - F_{\delta d}(\beta, \alpha_A) = \begin{cases} 0 & \text{при } \beta \in [0, \alpha_1]; \\ 1/2 - U_{Rq}(\beta) & \text{при } \beta \in [\alpha_1, \alpha_A]; \\ -U_{Rd}(\beta) & \text{при } \beta \in [\alpha_A, \pi/2], \end{cases} \quad (16)$$

где

$$\begin{aligned} U_{Rd}(\beta) &= C_{1d} \cdot \cosh(c \cdot \beta) + C_{2d} \cdot \sinh(c \cdot \beta); \\ U_{Rq}(\beta) &= \frac{1}{2} - C_{1q} \cdot \cosh(c \cdot \beta) - C_{2q} \cdot \sinh(c \cdot \beta), \end{aligned} \quad (17)$$

где $U_{Rd}(\beta)$ и $U_{Rq}(\beta)$ – функции магнитного потенциала ротора в зоне продольной и поперечной проводимости.

С учетом соотношений (17) поперечное магнитное напряжение в воздушном зазоре

$$F_{\delta q}(\beta, \alpha_A) = \begin{cases} 0 & \text{при } \beta \in [0, \alpha_1]; \\ C_{1q} \cdot \cosh(c \cdot \beta) + C_{2q} \cdot \sinh(c \cdot \beta) & \text{при } \beta \in [\alpha_1, \alpha_A]; \\ -C_{1d} \cdot \cosh(c \cdot \beta) - C_{2d} \cdot \sinh(c \cdot \beta) & \text{при } \beta \in [\alpha_A, \pi/2], \end{cases} \quad (18)$$

где c – коэффициент затухания магнитного потенциала многополюсной машины, характеризующий скорость уменьшения функций поперечного потока и магнитного потенциала ротора в зоне поперечной магнитной проводимости по мере удаления от паза с проводниками катушки, определяемый как $c = 1/\sqrt{\mu_q^* \cdot \delta^*}$; μ_q^* – относительная поперечная магнитная проницаемость полюса ротора; δ^* – относительная величина расчетного воздушного зазора. График функции поперечного магнитного напряжения в воздушном зазоре при $\alpha_1 = 0$ приведен на рис. 2, в.

Поперечное магнитное напряжение в воздушном зазоре (18) может быть представлено двойным рядом Фурье

$$F_{\delta q}(\beta, \alpha_A) = \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} F_{\delta q(u,v)} \cdot \sin(v \cdot \alpha_A) \cdot \cos(u \cdot \beta), \quad (19)$$

где

$$F_{\delta q(u,v)} = \frac{16}{\pi^2} \cdot \int_0^{\pi/2} \int_{\alpha_A}^{\pi/2} F_{\delta q}(\beta, \alpha_A) \cdot \cos(u \cdot \beta) \cdot d\beta \cdot \sin(v \cdot \beta) \cdot d\beta \quad (20)$$

– амплитуда гармоники порядка u, v поперечного магнитного напряжения в воздушном зазоре.

Амплитуда гармоники порядка $u = v = 1$ поперечного магнитного напряжения в воздушном зазоре запишется в следующем виде:

$$\begin{aligned} F_{\delta q(1,1)} &= \frac{2}{\pi} \cdot \left(\frac{1 - k_v}{c^2 + 1} + \frac{\sin(k_v \cdot \pi)}{\pi} \cdot \frac{c^2 - 1}{(c^2 + 1)^2} - \frac{4 \cdot c}{\pi \cdot (c^2 + 1)^2} \times \right. \\ &\times \left. \left(\frac{\sigma_U}{\sigma_U \cdot S + C} \cdot \left(C - 2 \cdot \sin\left(\frac{k_v \cdot \pi}{2}\right) \right) + \frac{\sigma_U \cdot C + S}{\sigma_U \cdot S + C} \cdot \sin^2\left(\frac{k_v \cdot \pi}{2}\right) \right) \right), \end{aligned} \quad (21)$$

k_v – доля, занимаемая крепежной выемкой на угловом полюсном делении; $\sigma_U = 2 \cdot \sqrt{\mu_q^* / \delta^*} / \lambda_U^0$ – коэффициент магнитного сопротивления между полюсами ротора;

$$S = \sinh\left(\frac{c \cdot \pi \cdot (1 - k_v)}{2}\right); \quad C = \cosh\left(\frac{c \cdot \pi \cdot (1 - k_v)}{2}\right). \quad (22)$$

Взаимная относительная поперечная магнитная проводимость катушек A и B, в соответствии с формулой (5), определяется выражением

$$\lambda_{qq}^*(\alpha_A, \alpha_B) = \frac{\pi}{4} \cdot \int_{\alpha_B}^{\alpha_B + \pi} F_{\delta q}(\beta, \alpha_A) \cdot d\beta = \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \Lambda_{qq(u,v)}^* \cdot \sin((u \cdot \alpha_A) \cdot \sin((v \cdot \alpha_B)), \quad (23)$$

где $F_{\delta q}(\beta, \alpha_A)$ – поперечное магнитное напряжение в воздушном зазоре (18).

Амплитуды гармоники порядков u, v относительной поперечной магнитной проводимости катушек при $u \neq v$ могут быть вычислены по приближенным формулам:

$$\Lambda_{qq(v,v)}^* \approx \frac{1-k_v}{v^2+c^2} + \frac{\sin(2 \cdot v \cdot \alpha_1) \cdot (v^2-c^2)}{v \cdot \pi \cdot (v^2+c^2)^2} - \frac{4 \cdot c}{\pi \cdot (v^2+c^2)^2} \left(\sin^2(v \cdot \alpha_1) + \frac{\sigma_U}{1+\sigma_U} \right); \quad (24)$$

$$\Lambda_{qq(u,v)}^* \approx \frac{-2}{\pi} \cdot \left(\frac{2 \cdot \sin(2 \cdot v \cdot \alpha_1) \cdot \sin(2 \cdot u \cdot \alpha_1)}{(u^2+c^2) \cdot (v^2+c^2)} + \frac{(u \cdot v - c^2) \cdot \sin((u+v) \cdot \alpha_1)}{(u+v) \cdot (u^2+c^2) \cdot (v^2+c^2)} + \frac{(u \cdot v + c^2) \cdot \sin((u-v) \cdot \alpha_1)}{(u-v) \cdot (u^2+c^2) \cdot (v^2+c^2)} \right). \quad (25)$$

Приближение получено путем предельного перехода при $\exp(\pi \cdot c) \rightarrow \infty$. Погрешность формулы при $c > 1,3$ и $u, v > 3$ не превышает 5 %.

Взаимную относительную поперечную магнитную проводимость катушек A и B удобнее вычислять по формуле

$$\lambda_{qq}^*(\alpha_A, \alpha_B) = \sum_{j=1}^{\infty} \left(\Lambda_{qq(v,v)}^* \cdot \sin(v \cdot \alpha_A) \cdot \sin(v \cdot \alpha_B) + 2 \cdot \sum_{i=1}^{v-1} \Lambda_{qq(u,v)}^* \cdot \sin(u \cdot \alpha_A) \cdot \sin(v \cdot \alpha_B) \right).$$

Основная относительная поперечная магнитная проводимость (амплитуда гармоники порядка $u, v = 1$)

$$\Lambda_{qq}^* = \Lambda_{qq(1,1)}^* = \frac{\pi}{2} \cdot F_{\delta q(1,1)}, \quad (26)$$

где $F_{\delta q(1,1)}$ – амплитуда гармоники порядка $u = v = 1$ поперечного магнитного напряжения в воздушном зазоре.

При круглом основании цилиндрического ротора ($k_v = 0$; $\sigma_U = 0$) поперечное магнитное напряжение в воздушном зазоре может быть представлено простым рядом Фурье

$$F_{\delta q}(\beta, \alpha_A) = \sum_{j=1}^{\infty} F_{\delta q(v)} \cdot \sin(v \cdot \alpha_A) \cdot \cos(v \cdot \beta), \quad (27)$$

где

$$F_{\delta q(v)} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{v}{v^2+c^2} \quad (28)$$

– амплитуда гармоники поперечного магнитного напряжения в воздушном зазоре. График функции поперечного магнитного напряжения в воздушном зазоре приведен на рис. 2, в.

Взаимная относительная поперечная магнитная проводимость катушек A и B у машины с круглым основанием цилиндрического ротора может быть представлена простым рядом Фурье

$$\lambda_{qq}^*(\alpha_A, \alpha_B) = \sum_{k=1}^{\infty} \Lambda_{qq(v)}^* \cdot \sin(v \cdot \alpha_A) \cdot \sin(v \cdot \alpha_B), \quad (29)$$

где

$$\Lambda_{qq(v)}^* = \Lambda_{qq(v,v)}^* = \frac{1}{v^2+c^2} \quad (30)$$

– амплитуда гармоники порядка v поперечной относительной магнитной проводимости. Амплитуда гармоники порядка v поперечной магнитной проводимости

$$\Lambda_{qq(v)} = \Lambda_{\delta} \cdot \Lambda_{qq(v)}^* = \frac{\Lambda_{\delta}}{v^2+c^2}.$$

Коэффициент поперечной магнитной проводимости с учетом крепежной выемки и межполюсного немагнитного промежутка является важным показателем характеризующим эффективность работы реактивной электрической машины. Он определится выражением

$$k_q = k_q(k_v, \sigma_U) = \frac{\Lambda_{qq}}{\Lambda_{dd}} = \frac{F_{\delta q(1,1)}}{F_{\delta d(1,1)}}. \quad (31)$$

Для оценки влияния крепежной выемки и межполюсного немагнитного промежутка на основную поперечную магнитную проводимость катушки введем понятие коэффициента вариации поперечной магнитной проводимости, обусловленной крепежной выемкой и межполюсным немагнитным промежутком

$$\Delta k_q = 1 - (1+c^2) \cdot \Lambda_{qq}^* = 1 - \frac{k_q(k_v, \sigma_U)}{k_q(0,0)}. \quad (32)$$

Поперечная магнитная проводимость основной гармоники с учетом крепежной выемки и межполюсного немагнитного промежутка между полюсами ротора

$$\Lambda_{qq} = \Lambda_{\delta} \cdot \frac{1 - \Delta k_q}{1 + c^2}. \quad (33)$$

Положим, что межполюсный немагнитный промежуток отсутствует ($\sigma_U = 0$). Тогда коэффициент вариации поперечной магнитной проводимости, обусловленной влиянием крепежной выемки, определится выражением

$$\Delta k_{qV} = 1 - \frac{k_q(k_v, 0)}{k_q(0, 0)} = k_v - \frac{\sin(k_v \cdot \pi)}{\pi} \cdot \frac{c^2 - 1}{c^2 + 1} + \frac{4 \cdot c}{\pi \cdot (c^2 + 1)} \cdot \sin^2\left(\frac{k_v \cdot \pi}{2}\right) \cdot \tanh\left(\frac{c \cdot \pi \cdot (1 - k_v)}{2}\right), \quad (34)$$

где $k_v = 2 \cdot \alpha_1 / \pi$ – доля, занимаемая крепежной выемкой на угловом полюсном делении; c – коэффициент затухания. Зависимость коэффициента вариации поперечной магнитной проводимости, обусловленной крепежной выемкой, от ее доли на угловом полюсном делении приведена на рис. 4, а.

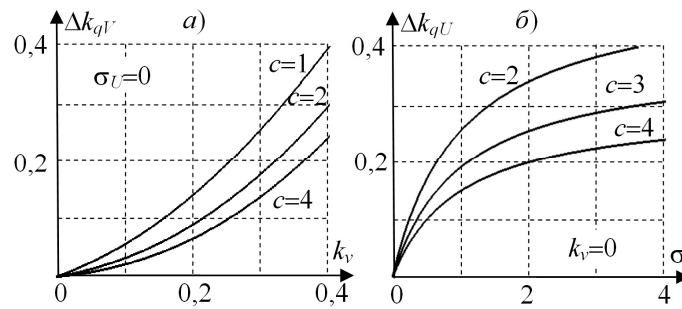


Рис. 4. Зависимости коэффициента вариации поперечной магнитной проводимости двухполюсной машины: а – обусловленной крепежной выемкой, от её доли на угловом полюсном делении; б – обусловленной межполюсным воздушным промежутком, от коэффициента магнитного сопротивления между полюсами ротора

Из приведенных графиков рис. 4 следует, что крепежная выемка и межполюсный немагнитный промежуток уменьшают поперечную магнитную проводимость катушки и коэффициент поперечной магнитной проводимости.

Положим, что крепежная выемка отсутствует ($k_v = 0$). Тогда коэффициент вариации поперечной магнитной проводимости, обусловленный влиянием межполюсного немагнитного промежутка:

$$\Delta k_{qU} = 1 - \frac{k_q(0, \sigma_U)}{k_q(0, 0)} = \frac{4 \cdot c \cdot \sigma_U}{\pi \cdot (1 + c^2) \cdot (1 + \sigma_U \cdot \tanh(c \cdot \pi / 2))}. \quad (35)$$

Зависимость коэффициента вариации поперечной магнитной проводимости, обусловленной межполюсным воздушным промежутком, от коэффициента магнитного сопротивления между полюсами ротора представлена на рис. 4, б.

Используя полученные выражения, можно определить величину коэффициента поперечной магнитной проводимости для реактивной электрической машины с продольной шихтовкой ротора (ALA) и сравнить полученное значение с значением коэффициента поперечной магнитной проводимости для реактивной электрической машины с поперечной шихтовкой ротора (TLA). Такое сравнение позволяет оценить энергетическую эффективность различных технологий изготовления ротора таких электрических машин. Результаты сравнения приведены в таблице.

Результаты сравнения реактивной электрической машины с продольной шихтовкой ротора (ALA) и с поперечной шихтовкой ротора (TLA)

| Тип реактивной электрической машины | k_q |
|--|-------------|
| <p>С продольной шихтовкой ротора (ALA)</p> | 0,03...0,05 |
| <p>С поперечной шихтовкой ротора (TLA)</p> | 0,08...0,14 |

Заключение

Полученные аналитические зависимости являются новыми, нигде ранее не встречавшимися в научной литературе, и позволяют определить магнитные проводимости двухполюсной реактивной электрической машины с продольной шихтовкой ротора (ALA). Из представленных зависимостей и графиков следует, что крепежная выемка и межполюсный воздушный промежуток существенно уменьшают поперечную магнитную проводимость машины, а следовательно, улучшают ее эффективность. Показано, что по энергетическим характеристикам реактивная машина с анизотропной магнитной проводимостью ротора с продольной шихтовкой пакетов полюса ротора (ALA) выигрывает у реактивной машины с поперечной шихтовкой пакета ротора (TLA). Полное математическое описание и результаты исследования, приведенные в данной статье, использованы при написании методики проектирования синхронной электрической машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора [31]. Предложенное математическое описание магнитных проводимостей может быть полезно при проектировании и оптимизации конструкции реактивной электрической машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора. Представленные результаты будут полезны широкому кругу специалистов, а также проектантам электроприводов на основе реактивных электрических машин с анизотропной магнитной проводимостью ротора с продольной шихтовкой пакетов полюса ротора (ALA).

Литература/References

1. Tammi A., Termini P., Kansakangas T. Magnet-Free Motor Technology for Field Speed Applications Reaching “IE5” Efficiency Level. Emends 15, Helsinki 15–17 September 2015. Available at: http://www.eemods15.info/midcom-serveattachmentguid-1e55dfbb33f02fc5dfb11e5ac6fc777b4bb692d692d/motors6_ari_tammi.pdf (accessed 20.01.2018).
2. Bianchi N., Bolognani S., Bon D., Dai Pre M. Rotor Flux-Barrier Design for Torque Ripple Reduction in Synchronous Reluctance and PM-Assisted Synchronous Reluctance Motors. *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, 2009, vol. 45, no. 3, pp. 921–928. DOI: 10.1109/TIA.2009.2018960
3. Boglietti A., Cavagnino A., Pastorelli M., Vagati A. Experimental Comparison of Induction and synchronous reluctance motors performance. *Conference Record of the 2005 Industry Applications Conference, Fortieth IAS Annual Meeting*, 2005, vol. 1, pp. 474–479. DOI: 10.1109/IAS.2005.1518350
4. Bomela X.B., Kamper M.J. Effect of Stator Chording and Rotor Skewing on Performance of Reluctance Synchronous Machine. *IEEE trans. on Ind. Appl.*, 2002, no. 1, pp. 91–100. DOI: 10.1109/28.980362
5. Oprea C., Dziechciarz A., Martis C. Comparative Analysis of Different Synchronous Reluctance Motor Topologies. *International Conference on Environment and Electrical Engineering*, 2015. DOI: 10.1109/EEEIC.2015.7165463
6. Fratta A., Troglia G.P., Vagati A., Villata F. Torque Ripple Evaluation of High-Performance Synchronous Reluctance Machines. *IEEE Trans. Ind. Appl. Mag.*, 1995, vol. 1, no. 4, pp. 14–22. DOI: 10.1109/2943.392459
7. Haataja J.A. *Comparative Performance Study of Four Pole Induction Motors and Synchronous Reluctance Motor in Variable Speed Drives*. Lappeenranta University of Technology, 2003. 138 p.
8. Ho Lee J., Lee K., Hyun Cho Y., Won Yun T. Characteristics Analysis and Optimum Design of Anisotropy Rotor Synchronous Reluctance Motor Using Coupled Finite Element Method and Response Surface Methodology. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2009, vol. 45, pp. 4696–4699. DOI: 10.1109/TMAG.2009.2024877
9. Ho Lee J. Optimum Design Criteria for Maximum Torque Density and Minimum Torque Ripple of SynRM According to the Rated Wattage Using Response Surface Methodology. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2009, vol. 45, pp. 1578–1581. DOI: 10.1109/TMAG.2009.2012747
10. Hofmann H., Sanders S.R. High-Speed Synchronous Reluctance Machine with Minimized Rotor Loss. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2000, vol. 36, no. 2, pp. 531–539. DOI: 10.1109/28.833771
11. Hortman M.B. Implementation and Evaluation of a Full-Order Observer for a Synchronous Reluctance Motor. *Thesis, School of Electrical and Computer Engineering Georgia Institute of Technology*, 2004. 63 p.
12. Hossein A., Abolfazl V. Rotor Geometry Parameter Optimization of Synchronous Reluctance Motor Using Taguchi Method. *Przeegląd Elektrotechniczny*, 2013, pp. 197–201.
13. Hudak P., Hrabovcova V., Rafajdus P. Geometrical Dimension Influence of Multi-Barrier Rotor on Reluctance Synchronous Motor Performances. *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion SPEEDAM*, 2006, pp. 346–351. DOI: 10.1109/SPEEDAM.2006.1649796
14. Kolehmainen J. Synchronous Reluctance Motor with Form Blocked Rotor. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2010, pp. 450–456. DOI: 10.1109/TEC.2009.2038579
15. Haataja J. *A Comparative Performance Study of Four-Pole Induction Motors and Synchronous Reluctance Motors in Variable Speed Drives*. Lappeenranta, 2003.
16. Kamper M.J., Van der Merwe F.S., Williamson S. Direct Finite Element Design Optimization of the Cageless Reluctance Synchronous Machine. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1996, vol. 11, no. 3, pp. 547–555. DOI: 10.1109/60.537006

17. Kim K.-C., Ahn J.S., Won S.H., Hong J.-P., Lee J. A Study on the Optimal Design of SynRM for the High Torque and Power Factor. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2007, vol. 43, no. 6, pp. 2543–2545. DOI: 10.1109/TMAG.2007.893302
18. Lipo T.A. Synchronous Reluctance Machine, a Viable Alternative for AC Drives. *E.M.P.S.*, 1991, vol. 19, pp. 659–671.
19. Lipo T.A., Vagati A., Malesani L., Fukao T. Synchronous Reluctance Motors and Drives. A New Alternative. *IEEE IAS Annual Meeting, Tutorial Course, Electric Machines Committee*, 1992, pp. 29–33. DOI: 10.1109/IAS.1992.244463
20. Moghaddam R.R. Synchronous Reluctance Machine (SynRM) Design. *Thesis in Power Electrical Engineering, Royal Institute of Technology*, 2007. 103 p.
21. Moghaddam R.R., Magnussen F., Sadarangani Ch. Theoretical and Experimental Reevaluation of Synchronous Reluctance Machine. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, vol. 57, no. 1, pp. 6–13. DOI: 10.1109/TIE.2009.2025286
22. Moghaddam R.R. Synchronous Reluctance Machine (SynRM) Design. *KTH Electrical Engineering, Stockholm*, 2007.
23. Saxena R., Banerji G. K., Srivastava A., Rawat H. S. Performance Analysis of Axially Laminated Anisotropic Synchronous Reluctance Motor. *7th WSEAS International Conference on Electric Power Systems, High Voltages, Electric Machine, Venice*, 2007.
24. Staton D.A., Wood S.E., Miller T. J. E. Maximizing the Saliency Ratio of the Synchronous Reluctance Motor. *IEE Proceeding*, 1993, pp. 49–59. DOI: 10.1049/ip-b.1993.0031
25. Matsuo T., Lipo T.A. Rotor Design Optimization of Synchronous Reluctance Machine. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1994, pp. 359–365.
26. Tahi S., Ibtouen R., Bounekhla M. Design Optimization of Two Synchronous Reluctance Machine Structures with Maximized Torque and Power Factor. *Progress in Electromagnetics Research B*, 2011, vol. 35, pp. 369–387.
27. Luo Y.-J., Hwang G.-J., Liu K.-T. Design of Synchronous Reluctance Motor. *Electrical Electronics Insulation Conference, and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference, Rosemont, IL*, 1995. DOI: 10.1109/EEIC.1995.482390
28. Гельвер Ф.А. Реактивная электрическая машина с анизотропной магнитной проводимостью ротора. Конференция молодых ученых и специалистов. СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2014. С. 25–34. [Gel'ver F.A. [Reactive Electric Machine with Anisotropic Magnetic Conductivity of the Rotor]. *Konferentsiya molodykh uchenykh i spetsialistov* [Conference of Young Scientists and Specialists]. St. Petersburg, FGUP Krylovskiy gosudarstvennyy nauchnyy tsentr Publ., 2014, pp. 25–34. (in Russ.)]
29. Гельвер Ф.А., Белоусова Н.В., Самосейко В.Ф. Реактивный электромеханический преобразователь с анизотропной магнитной проводимостью ротора. Труды VIII международной (XIX всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. Саранск: Издательство Мордовского университета, 2014. С. 394–398. [Gel'ver F.A., Belousova N.V., Samoseyko V.F. [Reactive Electromechanical Converter with Anisotropic Magnetic Conductivity of the Rotor]. *Trudy VIII mezhdunarodnoy (XIX vserossiyskoy) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP* [Proceedings of the Institute of International (XIX All-Russian) Conference on Automated Electric Drive AED], 2014, Saransk, Mordovian University Publ., 2014, pp. 394–398. (in Russ.)]
30. Дмитриевский В.А., Прахт В.А., Казакбаев В.М. и др. Экспериментальное сравнение асинхронного и синхронного реактивного электродвигателей. XVI науч.-техн. конф. «Электроприводы переменного тока» – ЭППТ. 2015. Екатеринбург. С. 19–22. [Dmitriyevskiy V.A., Prakht V.A., Kazakbayev V.M. et al. [Experimental Comparison of Asynchronous and Synchronous Jet Motors]. *XVI Nauch.-tekhn. konf. "Elektroprivody peremennogo toka" EPPT* [XVI Scientific and Technical Conference "Electric Drives of an Alternating Current"], 2015, Ekaterinburg, pp. 19–22. (in Russ.)]
31. Самосейко В.Ф., Гельвер Ф.А., Хомяк В.А., Хайров Д.А. Синхронные машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора. Методика проектирования. Алгоритмы управления. СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2016. 174 с. [Samoseyko V.F., Gel'ver F.A., Khomyak V.A., Khayrov D.A. *Sinkhronnyye mashiny s anizotropnoy magnitnoy provodimost'yu rotora. Metodika proyektirovaniya. Algoritmy upravleniya* [Synchronous Machines with Anisotropic Magnetic Conductivity of the Rotor. Design Methodology. Algorithms of Management. Monograph]. Saint Petersburg, FGUP "Krylovskiy gosudarstvennyy nauchnyy tsentr" Publ., 2016. 174 p.]
32. Самосейко В.Ф., Гельвер Ф.А. Сравнение различных типов реактивных электрических машин по энергетическим показателям. Труды Крыловского государственного научного центра. 2015. Вып. 89 (373). С. 201–208. [Samoseyko V.F., Gel'ver F.A. [Comparison of Different Types of Reactive Electric Machines by Energy Performance]. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra* [Proceedings of the Krylov State Research Center], 2015, vol. 89 (373), pp. 201–208. (in Russ.)]

33. Захаров А.В. Перспективы технического применения синхронных электродвигателей с анизотропной магнитной проводимостью ротора. Тезисы докладов Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии (XVIII Бернадосовские чтения)». Иваново, 2015. С. 124–127. [Zakharov A.V. [Prospects of the Technical Application of Synchronous Electric Motors with Anisotropic Magnetic Conductivity of the Rotor]. *Tezisy докладov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Sostoyaniye i perspektivy razvitiya elektrotekhnologii (XVIII Bernadosovskiye chteniya)"* [Abstracts of the International Scientific and Technical Conference "State and Prospects for the Development of Electrotechnology (XVIII Bernados Readings)"], Ivanovo, 2015, pp. 124–127. (in Russ.)]

34. Low Voltage IE4 Synchronous Reluctance Motor and Drive Package for Pump and Fan Applications, Catalog ABB, 2013. Available at: https://library.e.abb.com/public/21ee11b9fddfa677c1257bd500219300/Catalog_IE4_SynR_M_EN_06-2013_9AKK105828_lowres.pdf (accessed 20.01.2018).

35. Low Voltage IE4 Synchronous Reluctance Motor and Drive Package for Pump and Fan Applications, Katalog ABB, June, 2013. Available at: <http://www.abb.com/motors&generators> (accessed 20.01.2018).

36. Суворкова Е.Е., Дементьев Ю.Н., Бурулько Л.К. Расчет магнитных полей и индуктивных параметров синхронных реактивных двигателей. Фундаментальные исследования. 2016. № 6. С. 112–116. [Suvorkova E.E., Dement'yev Yu.N., Burul'ko L.K. [Calculation of Magnetic Fields and Inductive Parameters of Synchronous jet Engines]. *Fundamental'nyye issledovaniya* [Fundamental Research], 2016, no. 6, pp. 112–116. (in Russ.)]

37. Милых В.И., Данько В.Г., Полякова Н.В. Методология поверочного электромагнитного расчета сверх-переходного криотурбогенератора на основе решения полевых задач. Электротехника и электромеханика. 2002. № 2. С. 47–52. [Milykh V.I., Dan'ko V.G., Polyakova N.V. [Methodology of Verification Electromagnetic Calculation of Super-Transient Cryoturbogenerator Based on Solving Field Problems]. *Elektrotekhnika i elektromekhanika* [Electrical Engineering and Electromechanics], 2002, no. 2, pp. 47–52.]

38. Пашковский А.В. Численно-аналитические методы стандартных элементов для моделирования стационарных физических полей в линейных кусочно-однородных и нелинейных средах: дис. ... д-ра техн. наук. Новочеркасск, 2014. [Pashkovskiy A.V. *Chislennno-analiticheskie metody standartnykh elementov dlya modelirovaniya statsionarnykh fizicheskikh poley v lineynykh kusochno-odnorodnykh i nelineynykh sredakh: dis. d-ra tekhn. nauk* [Numerical-Analytical Methods of Standard Elements for Modeling Stationary Physical Fields in Linear Piecewise-homogeneous and Nonlinear Media. Doct. diss.]. Novocherkassk, 2014.]

Гельвер Фёдор Андреевич, канд. техн. наук, начальник лаборатории, Филиал «Центральный научно-исследовательский институт судовой электротехники и технологии» ФГУП «Крыловский государственный научный центр»; доцент кафедры «Электропривод и электрооборудование береговых установок», Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова, г. Санкт-Петербург; gelver@bk.ru.

Самосейко Вениамин Францевич, д-р техн. наук, ведущий инженер, Филиал «Центральный научно-исследовательский институт судовой электротехники и технологии» ФГУП «Крыловский государственный научный центр»; профессор кафедры «Электропривод и электрооборудование береговых установок», Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова, г. Санкт-Петербург; samoseyko@mail.ru.

Поступила в редакцию 24 января 2018 г.

MAGNETIC CONDUCTIVITY OF A TWO-POLE REACTIVE MACHINE WITH ANISOTROPIC MAGNETIC CONDUCTIVITY OF A ROTOR

F.A. Gelver^{1, 2}, gelver@bk.ru,

V.F. Samoseyko^{1, 2}, samoseyko@mail.ru

¹ Branch "Central Scientific Research Institute Maritime Electrical Engineering and Technology" of FSUE "Krylov State Research Centre", St. Petersburg, Russian Federation,

² Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russian Federation

The paper suggests a circuit for replacing the magnetic circuit of a reactive electric machine with an anisotropic magnetic conductivity of a rotor, which serves as a basis for the obtained analytical dependences that allow determining the longitudinal and transverse magnetic conductivities of a two-pole reactive machine with anisotropic magnetic conductivity of the rotor with account for the fixing recess and the non-magnetic inter-pole gap. It also presents the results of comparison of two types of a reactive machine rotor production using longitudinal rotor lashing (ALA) and transverse rotor blending (TLA) by the coefficient of transverse magnetic conductivity. The presented mathematical description can be used to construct a technique to design a reactive electric machine with an anisotropic magnetic rotor conductivity with longitudinal batch packing of rotor pole packs (ALA). The outcomes of the study prove that the mounting notch and the inter-pole air gap significantly reduce the transverse magnetic conductivity of the machine and, therefore, improve its efficiency.

Keywords: anisotropic magnetic conductivity, longitudinal batching of the rotor pole, magnetic potential, magnetic stress, coefficient of transverse magnetic conductivity.

Received 24 January 2018

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Гельвер, Ф.А. Магнитные проводимости двухполюсной реактивной машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора / Ф.А. Гельвер, В.Ф. Самосейко // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2018. – Т. 18, № 2. – С. 71–81. DOI: 10.14529/power180209

FOR CITATION

Gelver F.A., Samoseyko V.F. Magnetic Conductivity of a Two-Pole Reactive Machine with Anisotropic Magnetic Conductivity of a Rotor. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2018, vol. 18, no. 2, pp. 71–81. (in Russ.) DOI: 10.14529/power180209