

Функциональные режимы совмещенного исполнения электрической машины и магнитного редуктора с короткозамкнутым ротором

АФАНАСЬЕВ А.А.

Наличие обмотки на статоре, получающей питание от статического преобразователя частоты, позволяет создать магнитный редуктор (МР) с непрерывно регулируемым коэффициентом редукции. В этом режиме обмотка статора потребляет только намагничивающий ток, содержащий небольшую активную составляющую для компенсации потерь: магнитных в сердечниках и электрических в проводниках обмоток. Показано, что основные функциональные свойства МР могут быть достигнуты при использовании внутреннего ротора с короткозамкнутой обмоткой. Такое исполнение ротора существенно упрощает конструкцию и стоимость МР. Режимы работы рассматриваемого электромеханического совмещенного устройства (СУ) могут анализироваться при его представлении в виде двух элементарных электрических машин, имеющих два различных воздушных зазора и классические статор и ротор; одна машина работает двигателем, другая — генератором. Намагничивающий ток обмотки статора также содержит две составляющие, соответствующие двум воздушным зазорам. Получены выражения для электромагнитных моментов этих машин в функции скольжения ротора с короткозамкнутой обмоткой. Найдены максимальные (предельные опрокидывающие) моменты, соответствующие критическим скольжениям двигательного и генераторного режимов. Преобразователь частоты позволяет регулировать активную электрическую мощность статора СУ и, следовательно, воздействовать на значения механической мощности на валах СУ.

Ключевые слова: электрическая машина, магнитный редуктор, совмещенное исполнение, статический преобразователь частоты, коэффициент редукции, электромагнитные моменты

Магнитный редуктор может выполняться в виде электрической машины с несколькими концентрическими роторами. Применение трехфазной обмотки на статоре позволяет создать трансмиссионное бесступенчатое устройство с регулируемым коэффициентом редукции [1, 2]. Его составные части в рассматриваемом случае представлены статором с многополюсной зубчатой трехфазной обмоткой (рис. 1), наружным ротором с призматическими шихтованными ферромагнитными стержнями (число которых близко числу пар полюсов обмотки статора) и внутренним ротором с короткозамкнутой обмоткой.

Магнитное поле статора с числом пар полюсов p_1 на одной из сторон наружного ротора, имеющего z_1 ферромагнитных стержней, изолированных друг от друга гальванически и магнитно, на выходе

с другой стороны ротора будет иметь основную гармонику с небольшим числом пар полюсов, равным разности $(z_1 - p_1)$. Это малополюсное магнитное поле взаимодействует с короткозамкнутой обмоткой внутреннего ротора.

Трехфазная обмотка статора в общем случае может быть подключена к сети переменного тока через статический преобразователь регулируемой частоты. В результате магнитное поле статора может перемещаться в пространстве с угловой скоростью $W = \pm \frac{W}{p}$ (знак минус реализуется преобразователем при смене следования фаз).

Покажем, что рассматриваемое устройство может работать не только как редуктор, но и обладать специфическими функциями двигателя и генератора. Эти универсальные свойства совмещенного ис-

Key words: bridge electric circuit, impulse power supply, two-port, extension circuit, adjustable resistors, functional capacities, application example

REFERENCES

1. Peredel'skii G.I. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika – in Russ. (News of Higher Education Institutions – Electrical Mechanics)*, 2014, No. 2, pp. 16–22.
2. Peredel'skii G.I. *Izmeritel'naya tekhnika – in Russ. (Measuring technology)*, 1999, No. 6, pp. 50–54.

3. Zakharov I.S., Ivanov V.I., Peredel'skii G.I. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2009, No. 9, pp. 26–31.
4. Peredel'skii G.I. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1989, No. 2, pp. 73–75.

полнения электрической машины и магнитного редуктора могут быть реализованы в различных транспортных системах, электроприводе станков, роботов, ветроэнергетике.

Внутренний (скоростной) ротор с постоянными магнитами может быть выполнен в виде зубчатой безобмоточной конструкции [3]. Такое исполнение ротора с обычной короткозамкнутой беличьей клеткой позволяет сравнительно просто анализировать возможные режимы совмещённой конструкции.

Редукторный режим. Физические основы работы редуктора. На рис. 1. показана упрощенная конструктивная схема устройства; редуктор имеет два коаксиально расположенных ротора.

Наружный ротор 2 жёстко связан с тихоходным валом, он имеет угловую скорость вращения ω_1 и представляет собой ферромагнитную беличью клетку с числом шихтованных призматических стержней z_1 , которые магнитно и гальванически изолированы друг от друга. Клетка пропускает магнитное поле, создаваемое обмоткой статора.

Внутренний ротор 1 с короткозамкнутой обмоткой вращается с угловой скоростью ω_2 ($1-s$), где s – скольжение этого ротора.

Полагая в первом приближении магнитную систему устройства линейной, будем находить методом удельной магнитной проводимости магнитные индукции в воздушных зазорах, создаваемые обмотками статора и внутреннего ротора.

Магнитная система содержит два воздушных зазора, их размеры обозначим d_j , $j=1,2$ (численное значение индекса j растет при смещении от статора к внутреннему ротору). Магнитным насыщением в стали ярм сердечников и зубцах беличьих клеток пренебрегаем.

Удельная магнитная проводимость воздушных зазоров с ферромагнитными стержнями. Для увеличения глубины модуляции магнитного поля ферромагнитной беличьей клеткой высоту её шихтован-

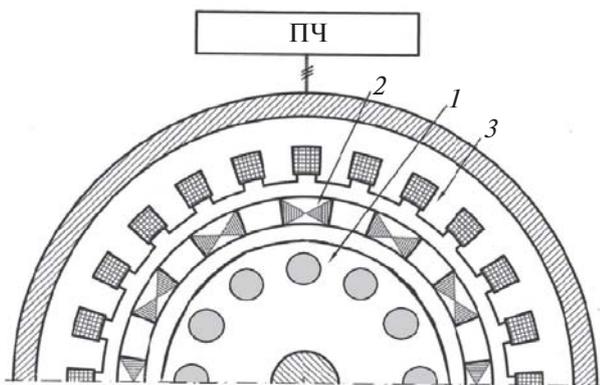


Рис. 1. Поперечный разрез магнитного редуктора: 1 – короткозамкнутый внутренний (быстроходный) ротор; 2 – наружный (тихоходный) ротор с ферромагнитными стержнями; 3 – статор с трёхфазной обмоткой

ных призм прямоугольного сечения выбирают больше половины ширины сквозных щелей между призмами. В этом случае силовые линии поля, попадая из воздушного зазора в щель, выходят из неё, проникая в стенки щели. Поэтому расчёт магнитного поля в немагнитных зазорах мультипликатора будет мало отличаться от аналогичного расчёта классических электрических машин.

Минимальная удельная магнитная проводимость первого немагнитного зазора напротив середины щели (паза) ферромагнитной беличьей клетки равна [4, 7]:

$$l_{1\min} = \frac{1}{\sqrt{\frac{2\mu_0 b_{\text{п}} \dot{\omega}^2}{c^2} + d_1^2}},$$

где $b_{\text{п}}$ – ширина раскрытия паза этой беличьей клетки.

Ей соответствует максимальное магнитное сопротивление зазора

$$r_{1\max} = \frac{1}{l_{1\min}} = \sqrt{\frac{2\mu_0 b_{\text{п}} \dot{\omega}^2}{c^2} + d_1^2}.$$

За минимальное сопротивление зазора примем $r_{1\min} = d_1$.

Полное магнитное сопротивление первого зазора будет равно

$$r_{\Sigma} = r_{\Sigma} + r_{\Sigma} \cos z_1 j_1, \quad (1)$$

где $r_{\Sigma} = d_1 k_{D1}$ – постоянная составляющая полного сопротивления.

Коэффициент немагнитного зазора (коэффициент Картера)

$$k_{D1} = \frac{t_1}{t_1 - g_1 d_1}, \quad (2)$$

где

$$g_1 = \frac{4}{\pi} \frac{b_{\text{п}}}{2d_1} \arctg \frac{b_{\text{п}}}{2d_1} - \ln \sqrt{1 + \frac{2\mu_0 b_{\text{п}} \dot{\omega}^2}{c^2} \frac{d_1}{b_{\text{п}}}}. \quad (3)$$

Амплитуда переменного сопротивления первого зазора

$$r_{\Sigma} = \frac{r_{1\max} - r_{1\min}}{2} = \frac{\sqrt{\frac{2\mu_0 b_{\text{п}} \dot{\omega}^2}{c^2} + d_1^2} - d_1}{2}. \quad (4)$$

На поперечном разрезе редуктора (рис. 2) показаны угловые координаты точек наблюдения.

Магнитное сопротивление второго воздушного зазора r_{Σ} между ферромагнитной беличьей клеткой и внутренним ротором с короткозамкнутой обмоткой будем считать постоянным:

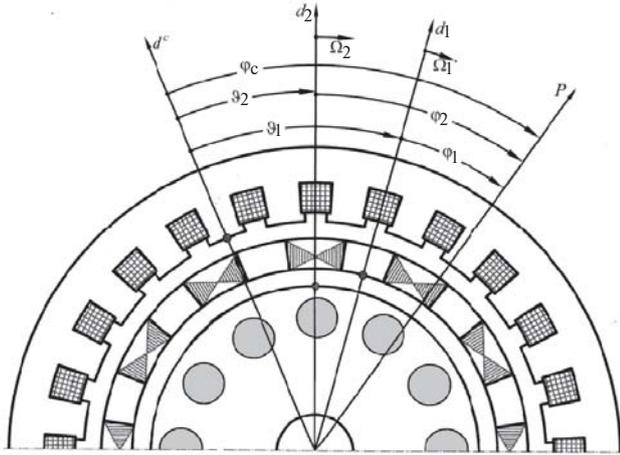


Рис. 2. Угловые координаты точек наблюдения: j_c – на статоре; j_1 – на наружном роторе; j_2 – на внутреннем роторе

$$r_{\phi} = r_{\phi} k_{D2} d_2. \tag{5}$$

Для удельной магнитной проводимости этого зазора справедливо

$$L_{\phi} = \frac{m_0}{k_{D2} d_2}.$$

Удельная магнитная проводимость обоих зазоров

$$L = \frac{m_0}{r_{\phi} r_{\phi}} = \frac{m_0}{r_{\phi} r_{\phi} r_{\phi} \cos z_1 j_1} = L_0 - L_{1m} \cos z_1 j_1. \tag{6}$$

Поскольку $r_{\phi} < r_{\phi} + r_{\phi}$ то

$$L_0 = \frac{m_0}{r_{\phi} r_{\phi}} = \frac{m_0}{2 \sum_{j=1}^{\infty} d_j k_{Dj}}; L_{1m} = \frac{m_0 r_{\phi}}{(r_{\phi} + r_{\phi})^2}. \tag{7}$$

Магнитная индукция во втором воздушном зазоре d_2 , вызванная $2p_1$ -полюсной обмоткой статора:

$$B_{d2} = F_1 L, \tag{8}$$

где первая гармоника МДС вращающегося магнитного поля трехфазной обмотки статора

$$F_1 = F_{1m} \sin(\omega t + p_1 j_c); \tag{9}$$

амплитуда этой гармоники

$$F_{1m} = \frac{3\sqrt{2} I_1 w k_w}{p p_1}; \tag{10}$$

w – угловая частота тока статора.

После подстановки в формулу (8) для магнитной индукции выражений (9) и (6) получим

$$B_{d2} = F_{1m} (L_0 - L_{1m} \cos z_1 j_1) \sin(\omega t + p_1 j_c). \tag{11}$$

Эта зависимость показывает, что во втором воздушном зазоре присутствуют три вида гармоник магнитной индукции:

$$B_{d2} = -\frac{1}{2} F_{1m} L_{1m} \sin(\omega t + p_1 j_c - z_1 j_1); \tag{12}$$

$$B_{d2} = -\frac{1}{2} F_{1m} L_{1m} \sin(\omega t + p_1 j_c + z_1 j_1); \tag{13}$$

$$B_{d2} = F_{1m} L_0 \sin(\omega t + p_1 j_c). \tag{14}$$

Покажем, что только первая гармоника, представленная формулой (12), является рабочей. Из рис. 2 следует формула связи угловых координат точки наблюдения P :

$$j_1 = j_c - J_1 = j_c - J_{10} - W_1 t, \tag{15}$$

где J_1 – угловая координата d_1 первой беличьей клетки относительно неподвижной магнитной оси фазы A статора; J_{10} – начальное значение этой координаты при $t=0$; W_1 – угловая скорость вращения первой беличьей клетки (наружного ротора).

Подставим (15) в выражение (12) и зафиксируем в последнем аргумент синусоидальной функции, т.е. свяжем точку наблюдения с волной индукции (12):

$$(z_1 - p_1) j_c - z_1 W_1 t - \omega t = \text{const}. \tag{16}$$

После дифференцирования этого выражения по времени получим скорость перемещения рабочей волны индукции (12) во втором воздушном зазоре относительно неподвижного статора:

$$\frac{dj_c}{dt} = W_2 = \frac{z_1}{z_1 - p_1} W_1 + \frac{\omega}{z_1 - p_1}. \tag{17}$$

Анализируя полученную зависимость, отметим следующее:

волна магнитной индукции B_{d2} имеет число пар полюсов ($p_2 = z_1 - p_1$), которое при близости значений z_1 и p_1 будет сравнительно небольшим;

внутренний ротор при B_{d2} будет вращаться с частотой $W_2(1-s)$;

частота вращения внутреннего ротора $W_2(1-s)$ пропорциональна частоте вращения наружного ротора W_1 и угловой частоте напряжения статора.

Электромагнитные моменты роторов. Определим электромагнитный момент внутреннего ротора по формуле метода натяжений [5]:

$$M = \frac{p_2 l D}{2} \int_{-t_2}^{t_2} B_n H_1 dx, \tag{18}$$

где $p_2 = z_1 - p_2$ – число пар полюсов внутреннего ротора; l, D, t_2 – активная длина, наружный диаметр и полюсное деление этого ротора; $B_n = B_{d2}^S$,

H_t – нормальная и тангенциальная составляющие магнитной индукции и напряженности магнитного поля во втором воздушном зазоре.

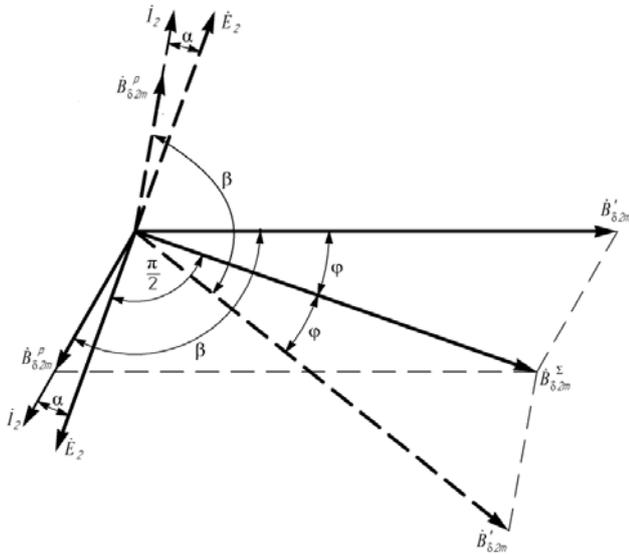


Рис. 3. Векторная диаграмма к определению электромагнитных моментов роторов: $B_{\delta 2m}^S, B_{\delta 2m}^P, B_{\delta 2m}^{\Sigma}$ – комплексные амплитуды магнитных индукций во втором воздушном зазоре, созданные, соответственно, обмоткой статора, обмоткой ротора и обеими этими обмотками; E_2, I_2 – действующие значения ЭДС и тока короткозамкнутой обмотки внутреннего ротора; сплошными и штриховыми линиями показаны векторы, соответственно, для двигательного и генераторного режимов внут-

Нормальную составляющую магнитной индукции на поверхности внутреннего ротора запишем в виде (рис. 3):

$$B_n = B_{d2}^S = B_{\delta 2m}^S \cos \frac{x}{t_2} p + B_{\delta 2m}^P \cos \frac{x}{t_2} p - \frac{\ddot{\phi}}{\omega} = B_{\delta 2m}^S \cos \frac{x}{t_2} p - j \frac{\dot{\phi}}{\omega} \quad (19)$$

где угловой сдвиг гармоник индукции $B_{\delta 2}^S$ и $B_{\delta 2}^P$

$$j = \arctg \frac{B_{\delta 2m}^P \sin b}{B_{\delta 2m}^S + B_{\delta 2m}^P \cos b};$$

b – угловой сдвиг гармоник индукции $B_{\delta 2}^S$ и $B_{\delta 2}^P$; амплитудное значение индукции, создаваемой обмоткой статора [см. (12)]:

$$B_{\delta 2m}^S = \frac{1}{2} F_{1m} L_{1m}; \quad (20)$$

амплитудное значение индукции, создаваемой короткозамкнутой обмоткой внутреннего ротора:

$$B_{\delta 2m}^P = \frac{\eta_0}{k_{D2} d_2} F_{2m}, \quad (21)$$

где амплитуда МДС короткозамкнутой обмотки

$$F_{2m} = \frac{z_2 k_c}{\sqrt{2} p p_2} I_2; \quad (22)$$

z_2, I_2 – число и ток её стержней; k_c – коэффициент скоса стержней короткозамкнутой обмотки ротора; $a = \arctg \frac{sx_2}{r_2}$; r_2, x_2 – активное и индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора;

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{r_2^2 + (sx_2)^2}} = \frac{1}{\sqrt{2} p} \frac{B_{d2m}^S l t_2 p_2 s W_2}{\sqrt{r_2^2 + (sx_2)^2}}; \quad (23)$$

амплитуда результирующей магнитной индукции во втором воздушном зазоре

$$B_{d2m}^S = \sqrt{(B_{\delta 2m}^S)^2 + (B_{\delta 2m}^P)^2 + 2 B_{\delta 2m}^S B_{\delta 2m}^P \cos b}. \quad (24)$$

После подстановки (22) и (23) в равенство (21) получим

$$B_{d2m}^P = \frac{\eta_0 k_c}{2 p^2 k_{D2} d_2} \frac{z_2 B_{d2m}^S l t_2 s W_2}{\sqrt{r_2^2 + (sx_2)^2}}. \quad (25)$$

Магнитное напряжение в воздушном зазоре ротора от волны индукции с амплитудой B_{d2m}^P

$$u_{\phi d} = \frac{k_{D2} d_2 B_{d2m}^P}{\eta_0} \cos \frac{x}{t_2} p - \frac{\ddot{\phi}}{\omega} \quad (26)$$

Тогда для тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля в зазоре с учётом (25) справедливо

$$H_t = \frac{du_{\phi d}}{dx} = \frac{z_2 k_c B_{d2m}^S l s W_2}{2 p \sqrt{r_2^2 + (sx_2)^2}} \sin \frac{x}{t_2} p - \frac{\dot{\phi}}{\omega} \quad (27)$$

После подстановки (19) и (27) в выражение (18) для электромагнитного момента и взятия интеграла в нем получим

$$M_2 = \frac{z_2 p_2 t_2 l^2 D k_c (B_{d2m}^S)^2 s W_2}{4 p \sqrt{r_2^2 + (sx_2)^2}} \cos a = \frac{z_2 p_2 t_2 l^2 D r_2 k_c (B_{d2m}^S)^2 s W_2}{4 p (r_2^2 + (sx_2)^2)}. \quad (28)$$

Будем для определённости полагать, что к валу рассматриваемого внутреннего (скоростного) ротора подводится механическая энергия извне. В этом случае электромагнитный момент ротора будет действовать встречно внешнему моменту, что приведет к увеличению скорости ротора больше синхронной скорости магнитного поля в этом зазоре. В результате скольжение ротора будет отрицатель-

ным, и он будет отдавать свою энергию через обмотку статора в источник питания, работая в генераторном режиме. Векторные величины этого режима показаны на диаграмме рис. 3 штриховыми линиями; скольжение s будет отрицательным.

Для комплексных амплитуд магнитных индукций в рассматриваемом втором воздушном зазоре в соответствии с (19) справедливо равенство

$$\& B_{d2m}^c + \& B_{d2m}^p = \& B_{d2m}^S. \quad (29)$$

Выражая магнитные индукции через МДС и удельные магнитные проводимости в соответствии с (10), (12), (20), (21), (22), можно равенство (29) представить в виде

$$\begin{aligned} \frac{3}{\rho\sqrt{2}} \frac{wk_w}{p_1} L_{1m} I_1 + \frac{\mu_0}{\rho\sqrt{2}} \frac{z_2 k_c}{k_{D2} d_2 p_2} I_2 = \\ = \frac{3}{\rho\sqrt{2}} \frac{wk_w}{p_1} L_{1m} I_{02}, \end{aligned} \quad (30)$$

где I_{02} – намагничивающий ток обмотки статора для второго воздушного зазора.

Равенство (30) можно записать в традиционном виде:

$$I_1 + k_{i2} I_2 = I_{02}, \quad (31)$$

где $k_{i2} = \frac{\mu_0}{3} \frac{p_1 z_2 k_c}{k_{D2} d_2 p_2 L_{1m} wk_w}$ – коэффициент приведения тока ротора к обмотке статора для второго воздушного зазора.

Отметим, что в соответствии с (12) для создания рабочей индукции B_{d2}^c в этом зазоре используется только половина значения МДС обмотки статора.

С учётом (30) выражение электромагнитного момента (28) будет иметь вид

$$M_2 = \frac{9z_2 p_2 t_2 l^2 D r_2 k_c (wk_w L_{1m} I_{02})^2 s W_2}{8\rho^3 p_1^2 r_2^2 + (sx_2)^2}. \quad (32)$$

Полагая в первом приближении намагничивающий ток не зависящим от скольжения (при скольжении s , меньшем критического), найдем максимум электромагнитного момента (32). Из выражения $\frac{\partial M}{\partial s} = 0$ следует

$$s_k = \pm r_2 / x_2, \quad (33)$$

тогда для максимального момента будем иметь

$$M_{2\max} = \pm \frac{9z_2 p_2 t_2 l^2 D k_c (wk_w L_{1m} I_{02})^2 s W_2}{16\rho^3 p_1^2 x_2}. \quad (34)$$

Знаки в (33) и (34) относятся к двигательному (плюс) и генераторному (минус) режимам внутреннего ротора.

С помощью аналогичных процедур можем рассчитать электромагнитный момент M_1 внешнего (тихоходного) вала. В рассматриваемом случае механическая мощность этого вала будет передаваться вращаемому рабочему механизму. Следовательно, тихоходный ротор будет иметь двигательный режим, получая электромагнитную мощность от обмотки статора.

Для наружного воздушного зазора d_1 выражения нормальной и тангенциальной составляющих магнитного поля имеют вид:

$$\begin{aligned} B_n = B_{d1}^S = B_{d1m}^S \cos \frac{x}{t_1} p - j \frac{\ddot{\phi}}{\omega} \\ H_t = \frac{du_{fd}}{dx} = - \frac{\partial \& B_{d1}^c}{\partial x} \frac{d_1}{\mu_0} B_{d1m}^c \cos \frac{x}{t_1} p \frac{\ddot{\phi}}{\omega} \\ = \frac{\rho k_{D1} d_1}{\mu_0 t_1} \sin \frac{x}{t_1} p. \end{aligned}$$

После подстановки их в формулу (18) получим

$$\begin{aligned} M_1 = \frac{\rho}{2\mu_0} k_{D1} d_1 p_1 l D B_{d1m}^S B_{d1m}^c \sin j = \\ = \frac{\rho}{2\mu_0} k_{D1} d_1 p_1 l D B_{d1m}^S B_{d1m}^p \cos a. \end{aligned} \quad (35)$$

В первом воздушном зазоре рабочие гармоники магнитной индукции имеют число пар полюсов p_1 :

$$\& B_{d1m}^c + \& B_{d1m}^p = \& B_{d1m}^S. \quad (36)$$

Слагаемые этого равенства выразим через МДС и удельные магнитные проводимости:

$$\begin{aligned} \frac{6}{\rho\sqrt{2}} \frac{wk_w}{p_1} \frac{\mu_0}{k_{D1} d_1} I_1 + \frac{z_2 k_c L_{1m}}{2\sqrt{2} \rho p_2} I_2 = \\ = \frac{6}{\rho\sqrt{2}} \frac{wk_w}{p_1} \frac{\mu_0}{k_{D1} d_1} I_{01}, \end{aligned} \quad (37)$$

где I_{01} – намагничивающий ток обмотки статора для первого воздушного зазора.

Из (37) следует

$$I_1 + k_{i1} I_2 = I_{01}, \quad (38)$$

где $k_{i1} = \frac{k_c k_{D1} z_2 p_1 d_1 L_{1m}}{12 \mu_0 p_2 w_1 k_w}$ – коэффициент приведения тока ротора к обмотке статора для первого воздушного зазора.

Из совместного рассмотрения равенств (38), (31) для намагничивающих токов I_{01} и I_{02} получаем традиционную формулу для первичных и вторичных токов электрической машины с короткозамкнутым ротором:

$$I_1 + k_i I_2 = I_0, \quad (39)$$

где $k_i = (k_{i1} + k_{i2})/2$; $I_0 = (I_{01} + I_{02})/2$.

Используя (23), (37), можно придать выражению (35) для электромагнитного момента наружного ротора вид

$$M_1 = \frac{9m_0 z_2 t_2 r_2 k_c l^2 D_1 L_{1m} (wk_w I_{01})^2 s W_2}{4\rho^3 k_{D1} d_1 p_1 r_2^2 + (sx_2)^2}. \quad (40)$$

Электромагнитные мощности обмотки статора.

Потокоцепление обмотки статора от результирующего рабочего магнитного потока в первом воздушном зазоре

$$Y_{m1} = \frac{2}{\rho} f t_1 B_{dm1} w_1 k_{w1} = \frac{12m_0 f t_1 (wk_w)^2}{\rho^2 \sqrt{2} k_{D1} d_1 p_1} I_{01}. \quad (41)$$

ЭДС первичной обмотки, наведенной результирующим магнитным потоком:

$$E_1 = -j \frac{w}{\sqrt{2}} Y_{m1} = -j \frac{12m_0 f t_1 (wk_w)^2}{\rho^2 k_{D1} d_1 p_1} I_{01}. \quad (42)$$

«Равновесие» напряжения обмотки статора выражается равенством

$$U_1 - I_1 z_1 = -E_1, \quad (43)$$

где $z_1 = r_1 + jx_1$; r_1 , x_1 – активное и индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора.

В редукторе электромагнитные мощности роторов одинаковы:

$$P_{эм1} = M_1 W_1 = P_{эм2} = M_2 W_2 (1-s), \quad (44)$$

и передаются от одного ротора к другому. В рассматриваемом для примера случае – от внутреннего (скоростного) ротора наружному (тихоходному); первый работает в генераторном режиме, второй – в двигательном.

Активный ток от источника питания для создания электромагнитных мощностей не потребляется, так как активные токи генераторного и двигательного режимов в обмотке статора, складываясь, взаимно компенсируются. Эти мощности подводятся извне к одному из валов, в данном случае к тихоходному валу.

Для создания условий передачи электромагнитной мощности от одного ротора к другому обмотка статора потребляет реактивный (намагничиваю-

щий) ток от преобразователя частоты для создания магнитного потока в воздушных зазорах редуктора.

В (43) для первичной цепи $I_1 = I_0$. Намагничивающий ток I_0 будет иметь сравнительно небольшую активную составляющую, связанную с компенсацией потерь – магнитных в сердечниках и электрических в обмотках статора и ротора.

Для удобства рассмотрения физических явлений в редукторе можно предположить, что имеем две элементарные электрические машины: первой соответствует наружный воздушный зазор, второй – внутренний. В зависимости от направления передачи мощности (от одного вала другому) одна из машин работает в двигательном режиме, другая в генераторном. Ток ротора участвует в создании магнитных потоков в обоих воздушных зазорах. В короткозамкнутой обмотке ротора в этом случае протекают также два одинаковых по значению тока I_2 , но не совпадающих по фазе (рис. 3). Один из токов является генераторным (показан на рис. 3 штриховой линией), другой – двигательным [6]. При сложении токов наблюдается совпадение по фазе векторов индукции: результирующего B_{d2m} и вызванного током статора B_{d2m} . В этих условиях результирующая электромагнитная мощность обмотки статора равна нулю.

При равенстве токов ротора в двигательных и генераторных режимах будут одинаковыми по модулю и скольжения s в (40) и (32) для электромагнитных моментов M_1 и M_2 .

Условие (44) равенства мощностей роторов должно соблюдаться для всех установившихся режимов работы редуктора. Например, предположим, что при отсутствии внешних моментов внутренний ротор неподвижен ($W_2 = 0$), тогда в соответствии с (17) наружный ротор будет вращаться с частотой $W_1 = -w/z_1$. Если же приложим к внутреннему ротору постоянный момент $M_1 = \text{const}$, то оба ротора начнут ускоренно вращаться, поскольку наружный ротор не нагружен внешним статическим моментом.

В (17), связывающем частоты вращения W_1 , W_2 и выходную частоту w источника питания, только две переменные являются независимыми. Например, можем считать независимыми (заданными) w и W_1 , тогда значение W_2 определится из (17).

Рассматриваемый режим функционально подобен режиму обычного механического редуктора.

Двигательный и генераторный режимы. При выходной частоте источника питания совмещенного устройства (СУ) $w^1 = 0$ в обмотке статора будет наво-

даться ЭДС. Через статический преобразователь частоты (ПЧ) в обмотку статора вводится ток в противо- или в фазе с её ЭДС. В первом случае в СУ будет поступать активная мощность, во втором – отбираться от него.

Режимы работы роторов СУ зависят от совпадающих или встречных направлений их электромагнитных моментов и частот вращения, определяющих двигательный или генераторный режимы (полагаем $|s| \ll |s_k|$).

Допустим, вначале СУ работает в режиме магнитного редуктора, потребляя от ПЧ реактивную мощность, передавая механическую мощность P_1 на вал наружного (тихоходного) ротора и отдавая механическую мощность P_2 с вала внутреннего (скоростного) ротора. Имеем режим мультипликации, который может использоваться в ветростан-

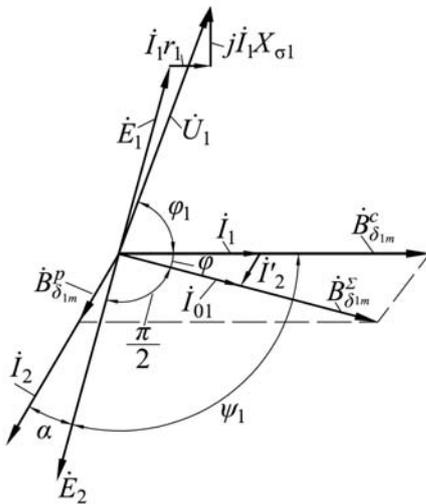


Рис. 4. Векторная диаграмма цепи статора СУ при отборе активной мощности от ПЧ

ции. Очевидно, тихоходный ротор находится в генераторном режиме, а скоростной – в двигательном.

Подача от ПЧ в обмотку статора активной электрической мощности P_3 при условии $P_1 = \text{const}$ приведёт к увеличению механической мощности P_2 скоростного (внутреннего) вала на значение P_3 . В этом случае возрастают скольжение $s = s_2$ ($|s_2| > |s_1|$) короткозамкнутого ротора и, следовательно, угол α отставания вектора увеличенного тока I_2 (в двигательном режиме на рис. 3) от вектора ЭДС ротора E_2 .

Условие $P_1 = \text{const}$ обеспечивает сохранение параметров генераторного режима первой элементарной машины, при котором вектор ЭДС короткозамкнутого ротора опережает на $\rho/2$ вектор ре-

зультирующей магнитной индукции B_{dlm}^S в первом воздушном зазоре, а вектор тока статора I_1 отстаёт от вектора напряжения U_1 на угол $\beta_1 > \rho/2$. Этот генераторный ток статора создает во втором воздушном зазоре вращающийся магнитный поток, скорость которого по направлению совпадает со скоростью короткозамкнутого ротора, а по значению меньше последней. В результате скольжение ротора в этом поле будет отрицательным.

Если мощность P_3 будет передаваться от СУ его источнику питания (ПЧ) при условии $P_2 = \text{const}$, то механическая мощность P_2 уменьшится на значение P_3 .

На векторной диаграмме рис. 4 показаны векторы результирующих токов статора и ротора, обеспечивающие отбор активной мощности в обмотку статора от ПЧ¹.

Рассмотренные перетоки мощности позволяют повысить эффективность работы ветростанции: при слабом ветре потребитель получит дополнительную мощность от резервного источника, при сильном ветре избыточная мощность будет передана резервному источнику.

Выводы. 1. Совмещённое электромеханическое устройство (СУ) с двумя роторами можно рассматривать как совокупность двух элементарных электрических машин с традиционным исполнением статоров и роторов, но имеющих два различных воздушных зазора.

2. Магнитный редуктор обладает предельными (опрокидывающими) моментами, соответствующими критическим скольжениям (положительным и отрицательным) ротора с короткозамкнутой обмоткой.

3. Намагничивающий ток обмотки статора содержит две составляющие, соответствующие двум воздушным зазорам совмещенного устройства (СУ).

4. Преобразователь частоты позволяет регулировать значение и знак активной электрической мощности статора СУ и, следовательно, воздействовать на значение механической мощности на валах СУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Jiabin Wang, Kais Atallah, Carvley S.D.** A Magnetic Continuously Variable Transmission Device. – IEEE Transactions on magnetics, 2011, vol. 47, No. 10, pp. 2815–2818.

2. **Jian Linni, Chau K.T., Yu Gong** a.o. Comparison of Coaxial Magnetic Gears With Different Topologies. – IEEE Transactions on magnetics, 2009, vol. 45, No. 10, pp. 4526–4529.

¹ Для удобства рассмотрения основных явлений пренебрегаем магнитными потерями в стали сердечников статора и ротора, т.е. полагаем, что векторы намагничивающих токов и результирующих магнитных индукций совпадают по фазе.

3. **Афанасьев А.А., Ефимов В.В., Чихняев В.А.** Одноступенчатый магнитный редуктор с трёхфазной обмоткой статора и индукторным внутренним ротором. — Вестник Чувашского университета, 2014, № 2, с. 5–10.

4. **Иванов-Смоленский А.В., Абрамкин Ю.В.** Применение конформного преобразования в электромагнитных расчётах электрических машин. Аналитические методы. — М.: Изд-во МЭИ, 1980, 85 с.

5. **Иванов-Смоленский А.В.** Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах. — М.: Высшая школа, 1989, 312 с.

6. **Сергеев П.С.** Электрические машины. — М; Л.: Госэнергоиздат, 1962, 280 с.

7. **Шуйский В.П.** Расчёт электрических машин/Перев. с немц. — М.: Энергия, 1968, 732 с.

[23.03.15]

Elektrichestvo (Electricity), 2015, No. 12, pp. 51–58.

Functional Modes of a Design Combining an Electrical Machine and a Squirrel-Cage Magnetic Speed Reducer

AFANAS'YEV Aleksandr Aleksandrovich (*Chuvash State University, Cheboksary, Russia*) — *Professor, Dr. Sci. (Eng.)*

An electrical machine with a stator winding fed from a static frequency converter can operate as a magnetic speed reducer (MSR) with a continuously adjustable reduction ratio. When the machine operates in this mode, the stator winding consumes only magnetizing current, which contains a small active component for compensating magnetic losses in the cores and electric losses in the winding conductors. It is shown that the main functional properties of an MSR can be achieved in using an inner rotor with a squirrel-cage winding. With such a rotor, the MSR design becomes essentially simpler and less costly. The operating modes of the considered combined electromechanical device can be analyzed by representing it as two elementary electrical machines having two different air gaps and classic stator and rotor, one of which operates as a motor and the other as a generator. The stator winding magnetizing current also contains two components corresponding to the two air gaps. Expressions for the electromagnetic torques of these machines as a function of squirrel-cage rotor slipping are obtained. The maximal (limiting stalling) torques corresponding to critical slipping values in the motor and generator modes are found. The frequency converter makes it possible to adjust the active electric power of the combined device stator and, hence opens the possibility to control the mechanical power values on the device shafts.

Key words: *electrical machine, magnetic speed reducer, combined makeup, static frequency converter, reduction ratio, electromagnetic torques*

REFERENCES

1. **Jiabin Wang, Kais Atallah, Carvley S.D.** A Magnetic Continuously Variable Transmission Device. — IEEE Transactions on magnetics, 2011, vol. 47, No. 10, pp. 2815–2818.

2. **Jian Linni, Chau K.T., Yu Gong** a.o. Comparison of Coaxial Magnetic Gears With Different Topologies. — IEEE Transactions on magnetics, 2009, vol. 45, No. 10, pp. 4526–4529.

3. **Afanas'yev A.A., Yefimov V.V., Chikhnyayev V.A.** *Vestnik Chuvashskogo Universiteta — in Russ. (Bulletin of the Chuvash University)*, 2014, No. 2, pp. 5–10.

4. **Ivanov-Smolenskii A.V., Abramkin Yu.V.** *Primeneniye konformnogo preobrazovaniya v elektromagnitnykh raschetakh*

elektricheskikh mashin. Analiticheskiye metody (Application of conformal transformations in electromagnetic calculations of the electric machines. Analytical methods). Moscow, Publ. of the Moscow Power Engineering Institute, 1980, 85 p.

5. **Ivanov-Smolenskii A.V.** *Elektromagnitnye sily i preobrazovaniye energii v elektricheskikh mashinakh* (Electromagnetic power and transformation of energy in electrical machines). Moscow, Publ. «Vysshaya shkola», 1989, 312 p.

6. **Sergeyev P.S.** *Elektricheskiye mashiny* (Electrical machines). Moscow; Leningrad, Publ. Gosenergoizdat, 1962, 280 p.

7. **Shuiskii V.P.** *Raschet elektricheskikh mashin/Per. s nemets.* (Calculation of electrical machines/Transl. from German). Moscow, Publ. «Energy», 1968, 732 p.

Автор: Афанасьев Александр Александрович окончил электромеханический факультет Московского энергетического института (МЭИ) в 1962 г. Докторскую диссертацию «Совместная работа синхронной машины со статическим преобразователем частоты (теория и приложения)» защитил в МЭИ в 1991 г. Профессор кафедры автоматики и управления в технических системах Чувашского государственного университета.