

Электрическая машина с реактивным магнитным редуктором

АФАНАСЬЕВ А.А., ЕФИМОВ В.В.

Наличие обмотки на статоре электрической машины, получающей питание от статического преобразователя частоты, позволяет иметь совмещённый электромеханический преобразователь, работающий двигателем или генератором, и магнитный редуктор (МР) с непрерывно регулируемым коэффициентом редукции. Показано, что основные функциональные свойства МР могут быть достигнуты при использовании безобмоточного зубчатого внутреннего ротора. Такое исполнение ротора существенно упрощает конструкцию и стоимость МР. Разработана численная математическая модель магнитного редуктора, с помощью которой найдены распределение магнитной индукции в воздушных зазорах, а также зависимость электромагнитного момента от угла нагрузки. Показано, что электромагнитный момент изменяется синусоидально в функции двойного угла нагрузки, как и в классических синхронных реактивных машинах.

К л ю ч е в ы е с л о в а: электрическая машина, статический преобразователь частоты, магнитный редуктор, математическая модель, магнитная индукция, электромагнитный момент

Магнитный редуктор может выполняться в виде электрической машины с несколькими концентрическими роторами. Применение трехфазной обмотки на статоре, питаемой от статического преобразователя частоты, позволяет создать трансмиссионное бесступенчатое устройство с регулируемым коэффициентом редукции [1]. В известных магнитных редукторах [2, 3] внутренний ротор содержит высокоэнергетические постоянные магниты, что сильно удорожает конструкцию и усложняет технологию её изготовления.

В статье рассматривается совмещённая электрическая машина и редуктор (СЭМР) без постоянных магнитов, даётся аналитическое описание функциональных свойств этого гибридного устройства.

Составные части СЭМР представлены статором 3 с многополюсной трехфазной обмоткой (рис. 1), наружным ротором 2 в виде ферромагнитной «беличьей» клеткой с числом призматических стержней, близким к числу пар полюсов обмотки статора, и внутренним безобмоточным ротором 1 с числом зубцов, равным половине числа пар полюсов магнитного поля в воздушном зазоре между роторами.

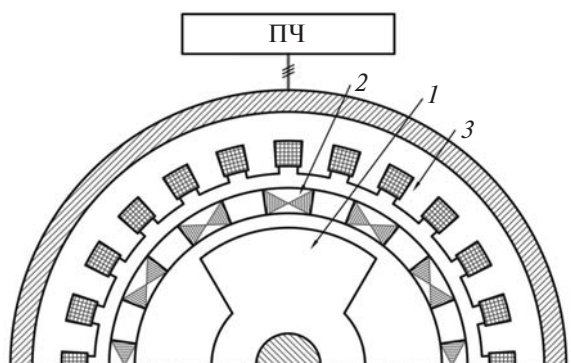


Рис. 1. Поперечный разрез редуктора

Магнитное поле статора с числом пар полюсов p с одной стороны магнитной клетки, имеющей z ферромагнитных стержней, на выходе с другой стороны клетки будет иметь основную гармонику с небольшим числом пар полюсов, равным разности $(z - p)$. Это малополюсное магнитное поле взаимодействует с зубцами внутреннего ротора, число которых равно $(z - p)/2$.

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

Формирование электромагнитных моментов СЭМР имеет некоторую аналогию с классической электрической синхронной индукторной машиной, следовательно, эти моменты обладают некоторыми ограничительными максимумами.

СЭМР может найти применение в таких отраслях, как станкостроение, робототехника, транспорт, оборонная техника, ветроэнергетика и др. Например, диапазон регулирования электропривода главного движения металлорежущих станков состоит из поддиапазонов, задаваемых механической коробкой передач, а электрическое регулирование осуществляется в пределах соответствующего поддиапазона. Применение СЭМР позволит исключить ступенчатое механическое регулирование.

В электроприводах вращения с малой скоростью локационных радиоантенн применяют планетарные механические редукторы, имеющие ограниченный срок службы. Использование СЭМР суще-

ственно повысит ресурс и облегчит условия эксплуатации таких станций.

В гибридных автомобилях СЭМР обеспечит не только бесступенчатую электромеханическую трансмиссию, но может также быть электромотором и стартером.

В ветроэнергетике установка СЭМР в качестве мультипликатора между валами ветроколеса и электрогенератора позволит выдержать постоянно не только частоты вращения, но и некоторого уровня выходной мощности генератора при переменной скорости ветра. В этом случае избыточная мощность ветра будет использоваться на зарядку аккумуляторных батарей, а при слабом ветре батареи будут разряжаться.

Физические основы работы редуктора. На рис. 1 показана упрощенная конструктивная схема устройства. Редуктор имеет два коаксиально расположенных ротора. Первый (наружный) ротор 2 жёстко связан с входным валом. Он имеет угловую скорость вращения W_1 и представляет собой шихтованную ферромагнитную беличью клетку с числом призматических стальных зубцов z_1 , через которые проходит магнитное поле, создаваемое обмоткой статора, имеющей число пар полюсов p_1 . Второй (внутренний) ротор 1 с числом зубцов z_2 вращается с угловой скоростью W_2 .

Полагая в первом приближении магнитную систему устройства линейной, будем находить методом удельной магнитной проводимости магнитные индукции в воздушных зазорах, создаваемые обмоткой статора. 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 ярем сердечников и зубцов беличьей клетки пренебрегаем.

Удельная магнитная проводимость воздушных зазоров с ферромагнитными беличьими клетками. Для увеличения глубины модуляции магнитного поля ферромагнитными беличьими клетками высоту их шихтованных призм прямоугольного сечения выбирают больше половины ширины пазов. В этом случае силовые линии поля, попадая из воздушного зазора в паз, не выходят из него, проникая в стенки паза. Поэтому расчёт магнитного поля в немагнитных зазорах мультипликатора будет мало отличаться от аналогичного расчёта классических электрических машин.

Минимальная магнитная проводимость первого немагнитного зазора напротив середины паза беличьей клетки

$$l_{1\min} = \frac{1}{\sqrt{\frac{2pb}{e} \frac{\pi}{2} \frac{\ddot{\theta}^2}{\theta} + d_1^2}},$$

где b_{π} – ширина раскрытия паза беличьей клетки.

Ей соответствует максимальное удельное магнитное сопротивление зазора

$$r_{1\max} = \frac{1}{l_{1\min}} = \sqrt{\frac{2pb}{e} \frac{\pi}{2} \frac{\ddot{\theta}^2}{\theta} + d_1^2}.$$

За минимальное сопротивление зазора примем

$$r_{1\min} = d_1.$$

Полное магнитное сопротивление первого зазора

$$r_{\Phi} = r_{\Phi} + r_{\mathcal{M}} \cos z_1 j_1, \tag{1}$$

где $r_{\Phi} = d_1 k_{D1}$ – постоянная составляющая полного сопротивления; коэффициент немагнитного зазора (коэффициент Картера)

$$k_{D1} = \frac{t_1}{t_1 - g_1 d_1}; \tag{2}$$

амплитуда переменного сопротивления первого зазора

$$g_1 = \frac{4j_1}{p_1} \frac{b_{\pi}}{2d_1} \arctg \frac{b_{\pi}}{2d_1} - \ln \sqrt{1 + \frac{e}{e} \frac{b_{\pi}}{2d_1} \frac{\dot{u}^2}{\dot{u}} \frac{\ddot{u}}{u}}; \tag{3}$$

$$r_{\mathcal{M}} = \frac{r_{1\max} - r_{1\min}}{2} = \frac{\sqrt{\frac{2pb}{e} \frac{\pi}{2} \frac{\ddot{\theta}^2}{\theta} + d_1^2} - d_1}{2}; \tag{4}$$

j_1 – угловая координата точки наблюдения на ферромагнитной беличьей клетке (рис. 2).

По формулам, аналогичным (1)–(4), можно определить магнитное сопротивление воздушного зазора r_{Φ} между ферромагнитной беличьей клеткой и внутренним ротором с числом зубцов z_2 :

$$r_{\Phi} = r_{\Phi} + r_{\mathcal{M}} \cos z_2 j_2, \tag{5}$$

где j_2 – угловая координата точки наблюдения на окружности внутреннего ротора (рис. 2).

Удельная магнитная проводимость обоих зазоров

$$L = \frac{m_0}{r_{\Phi} + r_{\Phi}} = \frac{m_0}{r_{\Phi} + r_{\Phi} + r_{\mathcal{M}} \cos z_1 j_1 - r_{\mathcal{M}} \cos z_2 j_2} = L_0 - L_{\mathcal{M}} \cos z_1 j_1 + L_{\mathcal{M}} \cos z_2 j_2. \tag{6}$$

Поскольку $r_{\mathcal{M}} + r_{\mathcal{M}} < r_{\Phi} + r_{\Phi}$ то

$$L_0 = \frac{m_0}{r_{\Phi} + r_{\Phi}} = \frac{m_0}{2 \frac{a}{d_j} k_{Dj}}; \quad L_{\mathcal{M}} = \frac{m_0 r_{\mathcal{M}}}{(r_{\Phi} + r_{\Phi})^2};$$

$$L_{\mathcal{G}m} = \frac{m_0 r_{\mathcal{G}m}}{(r_{\mathcal{G}c} + r_{\mathcal{G}m})^2}.$$

Магнитная индукция в воздушных зазорах. Магнитная индукция во втором воздушном зазоре d_2 , вызванная $2p_1$ -полюсной обмоткой статора,

$$B_{d2} = F_1 L, \tag{7}$$

где первая гармоника МДС вращающегося магнитного поля трехфазной обмотки статора

$$F_1 = F_{1m} \sin(\omega t + p_1 j_c); \tag{8}$$

амплитуда этой гармоники

$$F_{1m} = \frac{3\sqrt{2} I_w k_w}{p p_1}; \tag{9}$$

ω – угловая частота тока статора; j_c – угловая координата точки наблюдения на статоре (рис. 2).

После подстановки в (7) выражений (8) и (6) получим

$$B_{d2} = F_{1m} (L_0 - L_{\mathcal{G}m} \cos z_1 j_1 + L_{\mathcal{G}m} \cos z_2 j_2) \cdot \sin(\omega t + p_1 j_c). \tag{10}$$

Зависимость показывает, что во втором воздушном зазоре присутствуют пять видов гармоник магнитной индукции. Например, первые три, обусловленные магнитной проводимостью первого зазора, имеют вид:

$$\begin{aligned} B_{\mathcal{G}2} &= -\frac{1}{2} F_{1m} L_{\mathcal{G}m} \sin(\omega t + p_1 j_c - z_1 j_1); \\ B_{\mathcal{G}2} &= -\frac{1}{2} F_{1m} L_{\mathcal{G}m} \sin(\omega t + p_1 j_c + z_1 j_1); \\ B_{\mathcal{G}2} &= F_{1m} L_0 \sin(\omega t + p_1 j_c). \end{aligned} \tag{11}$$

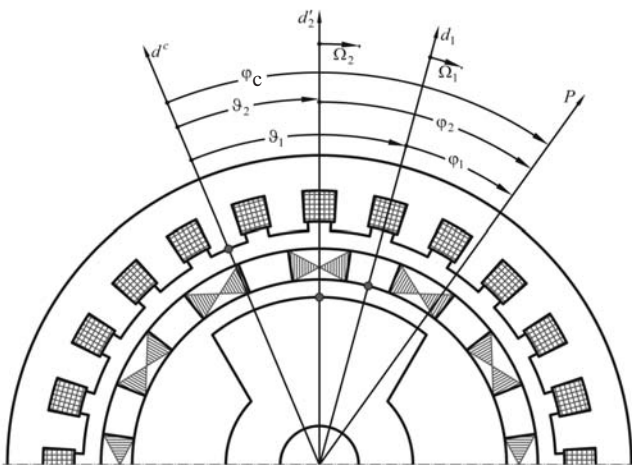


Рис. 2. К расчету магнитной проводимости и магнитной индукции воздушных зазоров: J_1, J_2 – угловые координаты продольных осей соответственно наружного d_1 и внутреннего d_2 роторов относительно продольной оси статора d^c ; j_1, j_2 – угловые координаты точки наблюдения на поверхности наружного и внутреннего роторов; ω_1, ω_2 – угловые скорости вращения наружного и внутреннего роторов

Покажем, что только гармоника, представленная первой формулой (11), является рабочей. Из рис. 2 следует равенство связи угловых координат точки наблюдения P :

$$j_1 = j_c - J_1 = j_c - J_{10} - \omega_1 t, \tag{12}$$

где J_1 – угловая координата продольной оси d_1 беличьей клетки относительно неподвижной магнитной оси фазы A статора; J_{10} – начальное значение этой координаты при $t=0$; ω_1 – угловая скорость вращения беличьей клетки (наружного ротора).

Подставим (12) в первое выражение (11) и зафиксируем в последнем аргумент синусоидальной функции, т.е. свяжем точку наблюдения с волной индукции $B_{\mathcal{G}2}$:

$$(z_1 - p_1) j_c - z_1 \omega_1 t - \omega t = \text{const}. \tag{13}$$

После дифференцирования этого выражения по времени получим скорость перемещения рабочей волны индукции $B_{\mathcal{G}2}$ во втором воздушном зазоре относительно неподвижного статора:

$$\frac{dj_c}{dt} = \omega_2 = \frac{z_1}{z_1 - p_1} \omega_1 + \frac{\omega}{z_1 - p_1}. \tag{14}$$

Анализируя полученную зависимость, отметим следующее:

волна магнитной индукции $B_{\mathcal{G}2}$ имеет число пар полюсов $(z_1 - p_1)$, которое при близости значений z_1 и p_1 будет сравнительно небольшим;

число зубцов z_2 внутреннего ротора должно удовлетворять равенству $z_2 = 2(z_1 - p_1)$. В этом случае внутренний ротор будет синхронно вращаться с полем $B_{\mathcal{G}2}$ со скоростью ω_2 ;

частота вращения выходного вала ω_2 прямо пропорциональна частоте вращения входного вала ω_1 и угловой частоте напряжения статора.

Электромагнитные моменты. Определим электромагнитный момент внутреннего ротора по формуле метода натяжений [4]:

$$M_2 = \frac{l D_2 z_2 t_2}{2} \int_0^{\delta} B_n H_t dx, \tag{15}$$

где l, D_2, z_2, t_2 – активная длина, максимальный наружный диаметр, число зубцов и зубцовое деление этого ротора; B_n, H_t – нормальная и тангенциальная составляющие магнитной индукции и напряженности магнитного поля во втором воздушном зазоре.

Выражение магнитной индукции $B_{\mathcal{G}2}$ на поверхности внутреннего ротора запишем в виде

$$B_n = B_{\mathcal{G}2} = B_{\mathcal{G}2m} \cos \left(\frac{\varphi_c}{\delta} x + q_2 \frac{\omega}{\delta} t \right) \tag{16}$$

где q_2 – угол нагрузки ротора – сдвиг максимума индукции относительно продольной оси внутрен-

него ротора; амплитудное значение индукции согласно первой формуле (11):

$$B_{\phi 2m} = \frac{1}{2} F_{1m} L_{\phi m} \quad (17)$$

При $q_2 > 0$ формула (16) показывает, что продольная ось зубцов ротора опережает максимум индукции магнитного поля. В этом случае направление внешнего момента, приложенного к внутреннему ротору, совпадает с направлением его вращения. Следовательно, внутренний ротор будет генерировать энергию в обмотку статора и далее в питающую сеть.

При отрицательном значении угла нагрузки q_2 , как видно из (16), максимум индукции опережает продольную ось зубцов ротора. В этом случае внешний момент внутреннего ротора действует встречно направлению вращения, и ротор будет забирать энергию из питающей сети, работая двигателем.

Магнитное напряжение в воздушном зазоре внутреннего ротора от волны индукции (16)

$$u_{\phi d} = \frac{B_{\phi 2m}}{m_0} \cos \frac{x}{t_2} p + q_2 \frac{r_{\phi}}{r_{\phi 1}} r_{\phi 1} \cos \frac{x}{t_2} 2p \dot{u}$$

тогда для тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля в зазоре справедливо

$$H_t = - \frac{du_{\phi d}}{dx} = \frac{p}{t_2} \frac{B_{\phi 2m}}{m_0} r_{\phi} \sin \frac{x}{t_2} p + q_2 \frac{r_{\phi}}{r_{\phi 1}} r_{\phi 1} \cos \frac{x}{t_2} 2p \dot{u} - r_{\phi} \frac{e}{t_2} \sin \frac{x}{t_2} p + q_2 \frac{e}{t_2} \cos \frac{x}{t_2} p + q_2 \frac{e}{t_2} \sin \frac{x}{t_2} 2p \dot{u} \quad (18)$$

После подстановки формул для магнитной индукции (16) и магнитной напряженности (18) в (15) для электромагнитного момента и взятия интеграла в нем получим:

$$M_2 = \frac{p}{8m_0} z_2 l D_2 (B_{\phi 2m})^2 r_{\phi 1} \sin 2q_2 \quad (19)$$

Теперь определим электромагнитный момент M_1 , действующий на наружный ротор в виде ферромагнитной беличьей клетки. Предварительно следует заметить, что переменная интегрирования x в (15) для электромагнитного момента может фиксироваться по любой кривой (в частности окружности) в воздушных зазорах, если эта кривая не охватывает токовые области [4]. Для простоты анализа полагаем, что катушки статора обтекаются постоянным током ($w=0$) и роторы неподвижны.

С внешней поверхностью наружного ротора будет связана волна магнитной индукции в первом воздушном зазоре, вызванная током обмотки статора

$$B_n = B_{\phi} = B_{\phi m} \cos \frac{x}{t} p, \quad (20)$$

где t – полюсное деление обмотки статора.

Магнитное напряжение в воздушном зазоре от этой волны нормальной составляющей магнитной индукции (20) составит

$$u_{\phi} = \frac{B_{\phi m}}{m_0} \cos \frac{x}{t} p \frac{e}{t} r_{\phi} r_{\phi 1} \cos \frac{x}{t_1} 2p + q \frac{e}{t_1} \dot{u} \quad (21)$$

где t_1 – зубцовый шаг ферромагнитной беличьей клетки; q – угол сдвига (в геометрических радианах) середины паза ферромагнитного стержня относительно максимума рассматриваемой волны.

Тогда для тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля в зазоре справедливо

$$H_t = - \frac{du_{\phi}}{dx} = \frac{B_{\phi m}}{m_0} \frac{p}{t} r_{\phi} \sin \frac{x}{t} p \frac{e}{t} + r_{\phi} \frac{e}{t} \sin \frac{x}{t} p \frac{e}{t} \cos \frac{x}{t_1} 2p + 2q \frac{e}{t_1} \dot{u} + \frac{2p}{t_1} \cos \frac{x}{t} p \frac{e}{t} \sin \frac{x}{t_1} 2p + 2q \frac{e}{t_1} \dot{u} \quad (22)$$

Выражения (20) и (22) подставим в формулу для электромагнитного момента наружного ротора:

$$M_1 = \frac{p_1 l D_1}{2} \int_0^{2\pi} B_n H_t dx,$$

где p_1 – число пар полюсов обмотки статора; D_1 – диаметр расточки наружного ротора.

В результате получим

$$M_1 = \frac{1}{4m_0} p_1 l D_1 (B_{\phi m})^2 r_{\phi} (A \sin 2q + B \cos 2q), \quad (23)$$

где $A = \frac{1}{2} \frac{e}{t} \frac{e}{t} \frac{\sin 2p(2 + 2/d)}{2(1+d)} - \frac{\sin 2p(2 - 2/d)}{2(-1+d)} \dot{u}$

$$+ \frac{\sin 2p(2 + 2/d)}{2(1+d)} + \frac{\sin 2p(2 - 2/d)}{2(-1+d)} \dot{u};$$

$$B = \frac{1}{2} \frac{e}{t} \frac{e}{t} \frac{\cos 2p(2 + 2/d)}{2(1+d)} - \frac{\cos 2p(2 - 2/d)}{2(-1+d)} + \frac{d}{d^2 - 1} \dot{u}$$

$$- \frac{\cos 2p(2 + 2/d)}{2(1+d)} + \frac{\cos 2p(2 - 2/d)}{2(-1+d)}$$

$$- \frac{1}{d^2 - 1} + 1 - \frac{e p \dot{u}}{e d \phi};$$

$$d = 2p_1 / z_1.$$

Два слагаемых в скобках (23) можно представить в виде

$$A \sin 2q + B \cos 2q = C \sin 2q_1, \quad (24)$$

где $2q_1 = 2q + g$ – угол нагрузки наружного ротора (в геометрических радианах); $g = \arctg B / A$; $C = \sqrt{A^2 + B^2}$.

Электромагнитные моменты двух валов редуктора будут достигать предельных (ограничительных) максимумов при углах нагрузки $q_1 = q_2 = \rho / 4$ рад. Значения максимумов определяются геометрией активных зон и значением тока обмотки статора.

Ниже приводятся результаты численного моделирования (методом сопряжения конформных отображений [6]) рассматриваемого магнитного редуктора реактивного типа, имеющего следующие данные: $p_1 = 16$; $z_1 = 19$; $z_2 = 6$. Расчётная область редуктора была разбита на элементарные участки с линейными магнитными свойствами сред. Характер изменения магнитной индукции в двух воздушных зазорах редуктора показан на рис. 3. Видно, что в наружном зазоре поле имеет 32 полюса, во внутреннем – 6.

На рис. 4 показаны практически синусоидальные кривые электромагнитных моментов валов при заторможенном внутреннем роторе и повороте модулятора (наружного ротора) на 90° . Отметим, что на рис. 4 поворот модулятора на одно его зубцовое деление t_1 ($360 / z_1 = 360 / 19 = 18,95^\circ$) соответствует двум периодам изменения электромагнитных моментов M_1 и M_2 .

Изменение электромагнитных моментов валов в режиме стационарного вращения с максимальными нагрузками представлено на рис. 5. Видно, что роторы, вращаясь, практически не имеют колебательных пульсаций.

Ток и мощность обмотки статора. Потокосцепление обмотки статора от рабочего магнитного потока в первом воздушном зазоре с учётом (9), (20)

$$\&Y_{m1} = \frac{2}{\rho} \&ft_1 B_{dm1} w_1 k_{w1} = \frac{6m_0}{\rho^2 \sqrt{2}} \frac{\&ft_1 (w_1 k_{w1})^2}{p_1} L \&\phi_m I.$$

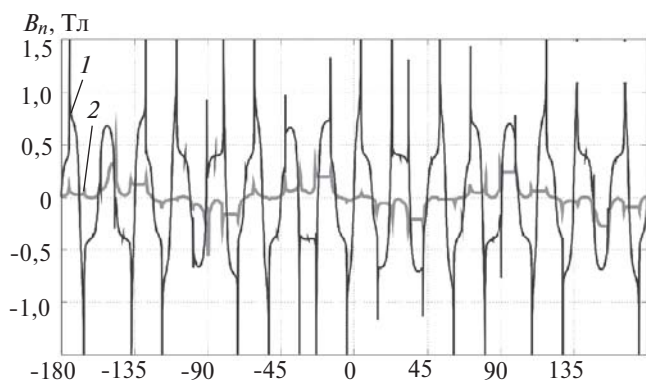


Рис. 3. Распределение нормальной составляющей магнитной индукции модулятора по краям воздушного зазора со стороны внутреннего ротора (кривая 2) и со стороны статора (кривая 1) для расчетного начального положения в стационарном режиме (ротор повернут на $14,5^\circ$ от начального положения)

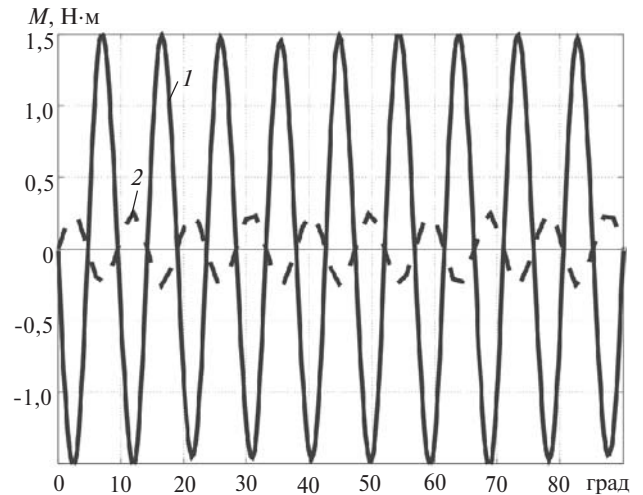


Рис. 4. Электромагнитные моменты при заторможенном роторе: 1 – модулятора; 2 – внутреннего ротора

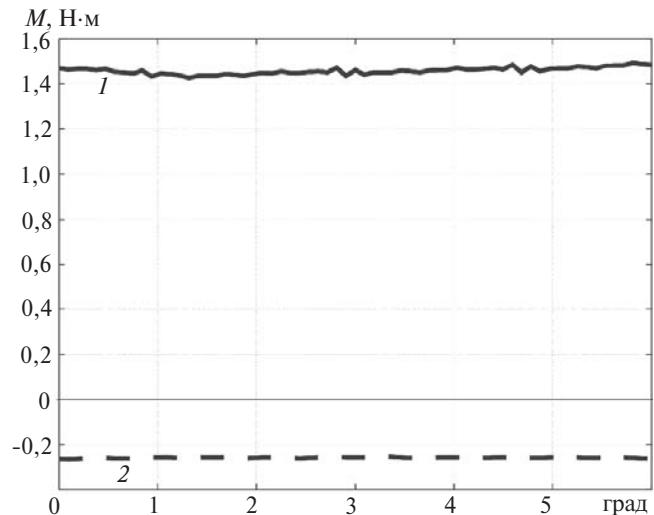


Рис. 5. Кривые электромагнитных моментов в стационарном режиме (ротор повернут на $14,5^\circ$ от начального положения): 1 – модулятора; 2 – ротора

ЭДС первичной обмотки, наведенной этим рабочим магнитным потоком,

$$\&E = \frac{w}{\sqrt{2}} \&Y_{m1} = \frac{6m_0}{\rho} \frac{\&ft_1 (wk_{w1})^2}{p_1} L \&\phi_m I = X_a I,$$

где $X_a = \frac{6m_0}{\rho} \frac{\&ft_1 (wk_{w1})^2}{p_1} L \&\phi_m$ – индуктивное сопротивление взаимоиндукции.

Равновесие напряжения обмотки статора будет выражаться равенством

$$\&U - IZ = \&E,$$

где $Z = R + jX_s$; R , X_s – активное и индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора.

Электромагнитная мощность обмотки статора [5]

$$P_3 = 3EI \cos \gamma, \tag{24}$$

где $y = j - q_1$; $j \in (U, I)$.

Баланс мощностей СЭМР. Рассматриваемое электромеханическое совмещенное устройство обладает функциями регулируемого магнитного редуктора и регулируемой электрической машины, работающей двигателем или генератором. Имеет три канала управления: два механических (входной и выходной валы) и электрический (обмотка статора, питаемая через регулируемый статический ПЧ от сети переменного или постоянного тока). При работе магнитного редуктора в режиме мультипликатора наружный ротор является входным, а внутренний – выходным. В режиме, когда СЭМР работает только как редуктор, мощности входного и выходного валов одинаковы:

$$M_1 W_1 = M_2 W_2, \quad (25)$$

где M_1, M_2 – моменты на входном и выходном валах.

В этом режиме ПЧ обеспечивает питание катушек обмотки статора (они расположены на каждом зубце статора) постоянным током ($w=0$).

Рассмотрим вариант работы СЭМР, при котором внешний момент и частота вращения входного вала фиксированы ($M_1 W_1 = \text{const}$). Если ПЧ будет потреблять активную мощность из питающей сети, то

$$M_1 W_1 < M_2 W_2. \quad (26)$$

В этом случае СЭМР, выполняя функции редуктора в соответствии равенством (14), будет работать и двигателем, передавая полученную из сети активную мощность $P_3 = 3EI \cos y = M_3 w / p_1$ выходному валу:

$$M_2 W_2 = M_1 W_1 + P_3 = M_1 W_1 + M_3 w / p_1, \quad (27)$$

где M_3 – электромагнитный момент СЭМР.

Elektrichestvo (Electricity), 2015, No. 8, pp. 27–33.

A Hybrid of Electrical Machine and Reluctance-Type Magnetic Reducton Gear

A.A. AFANAS'YEV and V.V. EFIMOV

With an electrical machine stator fitted with a winding fed from a static frequency converter, it becomes possible to use this system as a combined electromechanical converter operating as a motor or a generator, and a magnetic reduction gear (MRG) with a continuously adjustable reduction ratio. It is shown that the main functional properties of an MRG can be achieved in using a windingless toothed inner rotor. With such solution for the rotor, a simpler and less costly design of the MRG is obtained. A numerical mathematical model of a magnetic reduction gear is developed, using which the distribution of magnetic induction in the air gaps, as well as the dependence of electromagnetic torque on the load angle are found. It is shown that the electromagnetic torque varies in proportion to the sine of double load angle as in classic synchronous reluctance machines.

Таким образом, регулируя с помощью ПЧ значение электромагнитной мощности P_3 , можно менять мощность выходного вала при постоянстве его частоты вращения, задаваемой равенством (14).

Если выполняется неравенство, противоположное (26), то часть мощности входного вала будет отдаваться в питающую сеть, и СЭМР будет работать, выполняя функции редуктора, ещё и в генераторном режиме.

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. **Дергачёв П.А., Кирюхин В.П., Кулаев Ю.В., Курбатов П.А., Молоканов О.Н.** Анализ двухступенчатого магнитного мультипликатора. — Электротехника, 2012, № 5, с. 39–46.
3. **Афанасьев А.А.** Расчёт мультипликатора. — Электричество, 2013, № 9, с. 42–48.
4. **Иванов-Смоленский А.В.** Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах. — М.: Высшая школа, 1989, 312 с.
5. **Кононенко Е.В.** Синхронные реактивные машины. — М.: Энергия, 1970, 208 с.
6. **Афанасьев А.А.** Метод сопряжения конформных отображений в задачах электромеханики. — Чебоксары: Изд-во Чувашского университета, 2011, 390 с.

[28.04.15]

Авторы: 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 (ЧГУ).

Ефимов Вячеслав Валерьевич окончил факультет радиозлектроники и информатики ЧГУ в 2000 г. Кандидатскую диссертацию «Численное и экспериментальное исследование электромеханических компонентов автоэлектронных систем» защитил в ЧГУ

Key words: *electrical machine, static frequency converter, magnetic reduction gear, mathematical model, magnetic induction, electromagnetic torque*

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. **Dergachev P.A., Kiryukhin V.P., Kulayev Yu.V., Kurbatov P.A., Molokanov O.N.** *Elektrotehnika – in Russ. (Power Engineering)*, 2012, No. 5, pp. 39–46.
3. **Afnas'yev A.A.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2013, No. 9, pp. 42–48.

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

5. **Kononenko E.V.** *Sinkhronnye reaktivnye mashiny* (Synchronous reactive machines). Moscow, Publ. «Energiya», 1970, 208 p.

6. **Afnas'yev A.A.** *Method sopryazheniya konformnykh otobrazhenii v zadachakh elektromekhaniki* (The method of conjugation of conformal mappings in problems electromechanics). Cheboksary, Publ. of the Chuvash. University, 2011, 390 p.

Authors: Afnas'yev Aleksandr Aleksandrovich (Cheboksary, Russia) – *Dr. Sci (Eng.), Professor, Chuvash. State University.*

Efimov Vyacheslav Valer'yevich (Cheboksary, Russia) – *Cand. Sci., (Eng.), Electrician, LLC «Gazprom transgaz Nizhnii Novgorod»* (Cheboksary).

в 2011 г. Электромеханик службы связи филиала ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород», Россия, Чебоксары.