

# Реактивный момент обесточенного вентильного двигателя с постоянными магнитами

АФАНАСЬЕВ А.А.

Рассматривается и анализируется математическая модель формирования момента «залипания» магнитоэлектрического вентильного двигателя. Указываются меры борьбы с этим явлением. Приводятся опытные данные.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** вентильный двигатель, постоянные магниты, реактивный момент, математическая модель, опытные данные

В обесточенном вентильном двигателе (ВД) с зубчатым якорем ротор с постоянными магнитами фиксируется («залипает») при определенных дискретных положениях относительно зубцов якоря. При попытке сдвинуть его он развивает момент сопротивления, возрастающий до некоторого максимума, после преодоления которого занимает новое ближайшее устойчивое положение.

Рассмотрим математическое описание этого явления на основе аналитического метода удельной магнитной проводимости.

**Математическая модель явления.** Современные высокоэнергетические постоянные магниты из редкоземельных элементов имеют близкую к воздуху магнитную проницаемость. Например, для Ne-Fe-B магнитов с  $B_r = 1,1$  Тл и  $H_{CB} = 850$  кА/м имеем относительную магнитную проницаемость

$$\mu_M = \frac{B_r}{\mu_0 H_{CB}} = \frac{1,1}{4\pi \times 10^{-7} \times 0,85 \times 10^6} = 1,0298.$$

Поэтому при расчете магнитной проводимости воздушного зазора можем принять его значение равным сумме реального воздушного зазора  $d$  и высоты магнита  $h_M$  (рис. 1)

$$d_{\Sigma} = d + h_M. \quad (1)$$

Магнитную проводимость  $L$  воздушного зазора с односторонней зубчатостью будем определять не для наружной поверхности яра ротора, как это делается в классическом методе удельной магнитной проводимости [1], а для поверхности, проходящей через стороны магнитов, обращенные к воздушному зазору. Из метода натяжений известно [2], что электромагнитный момент электрической машины пропорционален интегралу  $\oint B_n H_t da$ , где  $B_n$ ,  $H_t$  — нормальная и тангенциальная составляющие индукции и напряженности магнитного

*A mathematical model describing the occurrence of a sticking torque in a magnetolectric converter-fed motor is considered and analyzed. Measures to control this phenomenon are indicated, and experimental data are presented.*

**Key words:** converter-fed motor, permanent magnets, reluctance torque, mathematical model, experimental data

поля в точках какой-либо окружности реального воздушного зазора. Если эту окружность расположить на наружной поверхности яра ротора, приняв его магнитную проницаемость бесконечно большой, то указанный интеграл, как и электромагнитный момент, будет равен нулю.

Технология расчета магнитного поля зубчатого воздушного зазора и его магнитной проводимости с помощью конформного отображения достаточно подробно рассмотрена в [3]. Например, в результате конформного отображения зубчатой области с открытыми пазами в плоскости  $z$  на верхнюю половину комплексной плоскости  $t$  получим:

$$L(\tilde{x}, \tilde{h}) = \left[ J_m j \sqrt{\frac{\tilde{t}}{\tilde{t} + 1}} \right], \quad (2)$$

где

$$\tilde{t} = \tilde{x} + j\tilde{h} \quad (3)$$

— образ следа поверхности, проходящей через наружные стороны магнитов.

Линию (3) в верхней половине комплексной плоскости  $t$  можно найти из решения дифференциального уравнения Кристоффеля—Шварца, выражающего рассматриваемое конформное отображение

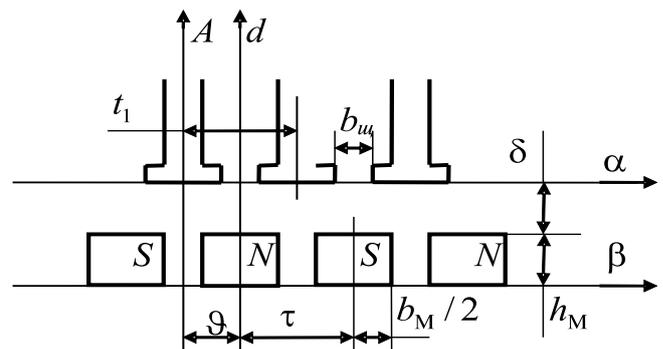


Рис. 1. Зубчатый воздушный зазор

$$\frac{dz}{dt} = l(t). \tag{4}$$

При записи

$$l(t) = R(\cos j + j \sin j) \tag{5}$$

уравнение (4) при условии  $dy = 0$  будет эквивалентно двум уравнениям:

$$\frac{d\tilde{x}}{d\tilde{h}} = -\frac{1}{\operatorname{tg} j}; \quad \frac{d\tilde{x}}{d\tilde{h}} = -\frac{R}{\sin j}. \tag{6}$$

Их решения

$$\tilde{x} = \tilde{x}(\tilde{h}), \quad \tilde{x} = \tilde{x}(\tilde{h}) \tag{7}$$

с начальными условиями

$$\tilde{h} = 0; \quad \tilde{x} = a; \quad \tilde{x} = 0 \tag{8}$$

определяют искомую виртуальную линию (3) и ее связь с физической линией плоскости  $z$ :

$$x = \tilde{x}; \quad y = h_M. \tag{9}$$

Значение  $\tilde{x} = a$  в (8) задает начало линии (7), находящееся на вещественной оси  $x$  плоскости  $t$ .

Вторая зависимость из (7) позволяет магнитную проводимость зубчатого воздушного зазора (2) представить в функции координаты  $x = \tilde{x}$

$$L = L(x). \tag{10}$$

Эта зависимость, имеющая период, равный зубцовому шагу якоря  $t_1$ , может быть разложена в тригонометрический ряд Фурье. При расположении начала отсчета оси  $x$  на оси зубца функция (10) будет четной и имеет вид

$$L(x) = L_0 + \sum_{k=1}^{\infty} L_k \cos x \frac{2p}{t_1} k. \tag{11}$$

Если координату  $x$  измерять в радианах, то ряд (11) запишется так:

$$L(a) = L_0 + \sum_{k=1}^{\infty} L_k \cos a z_1 k, \tag{12}$$

где  $z_1$  – число зубцов сердечника якоря.

Координатная ось  $b$  (см. рис. 1) будет связана с осью  $a$  выражением

$$b = a - J, \tag{13}$$

где  $J$  – угловой сдвиг осей  $A$  якоря и  $d$  ротора, измеряемый в геометрических (механических) радианах.

МДС постоянных магнитов ротора может быть представлена косинусоидальным рядом Фурье (ось  $d$  проходит через середину магнита):

$$F(b) = \sum_{n=1}^{\infty} F_{mn} \cos pbn, \quad n = 2s + 1, \quad s = 0, 1, 2, \dots, \tag{14}$$

где

$$F_{mn} = \frac{4 H_{cB} h_M}{p n} \cos \frac{t - b_M}{2t} pn; \tag{15}$$

$h_M, b_M$  – высота и ширина магнита, образующего полюс;  $p$  – число пар полюсов.

Магнитная индукция на линии воздушного зазора, совпадающей со следом цилиндрической поверхности, касающейся наружных сторон магнитов, будет равна

$$B(a) = \mu_0 L(a) F(b). \tag{16}$$

Учитывая, что удельная энергия магнитного поля в воздушном зазоре определяется формулой

$$W_{уд} = \frac{1}{2} B(a) H(a) = \frac{1}{2 \mu_0} B^2(a),$$

можем записать выражение для энергии магнитного поля, сосредоточенной в объеме воздушного зазора с учетом формулы (13):

$$W = \frac{ld}{2 \mu_0} \int_0^{2p} B^2(a) \frac{pt}{p} da = \frac{ldpt}{2p \mu_0} \int_0^{2p} B^2(a) da = \frac{\mu_0 ldpt}{2p} \int_0^{2p} \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} L_k F_{mn} \cos a z_1 k \cos p(a - J) n da. \tag{17}$$

Для анализа интеграла (17) выберем в сумме (12) два слагаемых:

$$L(a) = L_0 + L_k \cos a z_1 k, \tag{18}$$

а в сумме (14) одно:

$$F(b) = F_{mn} \cos pbn, \tag{19}$$

в которых целые числа  $k$  и  $n$  произвольны ( $n$  берется из набора  $n = 2s + 1$ , где  $s = 0, 1, 2, \dots$ ).

После подстановки (18), (19) в выражение для энергии (17) будем иметь под знаком интеграла три слагаемых:

$$A = \int_0^{2p} L_0^2 \cos^2 p(a - J) n da; \tag{20}$$

$$B = \int_0^{2p} 2 L_0 L_k \cos^2 p(a - J) n \cos a z_1 k da; \tag{21}$$

$$C = \int_0^{2p} L_k^2 \cos^2 a z_1 k \cos^2 p(a - J) n da. \tag{22}$$

Несложно убедиться, что первый интеграл (20) равен  $pL_0^2$ , два последующих равны нулю, если

$$2pn^1 z_1 k; 2pn^1 2z_1 k. \quad (23)$$

Если же первое выражение (23) считать равенством, то интегралы (21), (22) будут равны:

$$B = pL_0 L_k \cos 2pnJ; C = \frac{p}{2} L_k^2. \quad (24)$$

Следовательно, при равенстве

$$2pn = z_1 k \quad (25)$$

для энергии магнитного поля в воздушном зазоре (17) с учетом (18), (19) будет справедливо выражение:

$$W = \frac{m_0/dpt}{2} F_{mr}^2 \frac{e}{e} L_0^2 + L_0 L_k \cos 2pnJ + \frac{1}{2} L_k^2 \frac{\ddot{\theta}}{\varnothing} \quad (26)$$

Отсюда следует формула для реактивного момента (момента «залипания») при  $2pn = z_1 k$

$$M = \frac{\partial w}{\partial J} = - M_m \sin 2pnJ, \quad (27)$$

где

$$M_m = M_m^{(1)} = \frac{32}{p^2 n} m_0/dp^2 t L_0 L_k H_{cB}^2 h_M^2 \cos^2 \frac{t-b_M}{2t} pn. \quad (28)$$

При выполнении равенства

$$2pn = 2z_1 k \quad (29)$$

для интегралов (20)–(22) будем иметь:

$$A = pL_0^2; B = 0; C = \frac{p}{2} L_k^2 \frac{e}{e} + \frac{1}{2} \cos 2pnJ \frac{\ddot{\theta}}{\varnothing} \quad (30)$$

тогда энергия определится выражением:

$$W = \frac{m_0/dpt}{2} F_{mr}^2 \frac{e}{e} L_0^2 + \frac{1}{2} L_k^2 \frac{e}{e} + \frac{1}{2} \cos 2pnJ \frac{\ddot{\theta}}{\varnothing} \quad (31)$$

Для реактивного момента будет справедлива предыдущая формула (27), но с другим значением амплитуды:

$$M_m = M_m^{(2)} = \frac{8}{p^2 n} m_0/dp^2 t L_k^2 H_{cB}^2 h_M^2 \cos^2 \frac{t-b_M}{2t} pn. \quad (32)$$

Комментируя результаты взаимодействия  $n$ -й гармоники поля возбуждения и  $k$ -й гармоники магнитной проводимости воздушного зазора, отметим:

1. При заданных полюсности  $p$  магнитоэлектрической машины и числа пазов  $z_1$  якоря равенства (25) и (29) являются условиями появления гармо-

нических составляющих энергии магнитного поля в воздушном зазоре и, следовательно, реактивного момента при вращении ротора с частотой

$$w_p = dJ/dt. \quad (33)$$

2. Частота гармонического изменения реактивного момента в  $2pn$  раз больше частоты вращения ротора  $w_p$ .

3. При прочих равных условиях справедлива оценка значения амплитуды реактивного момента согласно формулам (28), (32):

$$M_m^{(1)} = \frac{32}{n_{\min 1}} GL_0 L_k \cos^2 \frac{t-b_M}{2t} pn_{\min 1}; \quad (34)$$

$$M_m^{(2)} = \frac{8}{n_{\min 2}} GL_0 L_k \cos^2 \frac{t-b_M}{2t} pn_{\min 2}, \quad (35)$$

где  $G = \frac{m_0}{p^2} dp^2 t (H_{cB} h_M)^2$ ;  $n_{\min(2)}$  – минимальный порядок гармоник возбуждения, определяемый из равенств соответственно (25) и (29).

4. Число устойчивых фиксаций  $n$  за один оборот ротора при наличии момента «залипания» составит<sup>1</sup>

$$n = 2pn_{\min}, \quad (36)$$

где  $n_{\min} = \min(n_{m1}, n_{m2})$ .

В формировании результирующего реактивного момента участвуют все гармоники, удовлетворяющие равенствам (25) и (29), но основной вклад вносит гармоника с минимальным номером  $n_{\min}$ .

В [4] приводятся данные двух магнитоэлектрических ВД. Первый имеет  $2p = 16$ ,  $z_1 = 24$ , второй  $2p = 22$ ,  $z_1 = 24$ . Для первого ВД согласно (25) получим  $n = n_{\min 1} = 3$ ,  $k = 2$ , а по равенству (29) –  $n = n_{\min 2} = 9$ ,  $k = 3$ . Следовательно, число устойчивых фиксаций будет  $n = 2pn_{\min} = 16 \cdot 3 = 48$ . Этот результат подтверждается опытом [4]. Для второго ВД

<sup>1</sup>Возможен геометрический способ определения числа фиксаций ротора за один его оборот. Обозначим угловые сдвиги зубцов якоря и полюсов ротора  $a = \frac{360^\circ}{z_1}$ ;  $b = \frac{360^\circ}{2p}$ .

Будем полагать положение ротора, при котором ось одного из зубцов якоря совпадает с осью полюса, первой фиксацией, тогда следующая фиксация у второго зубца якоря будет при повороте ротора на угол

$$g = b - a = 360^\circ \left( \frac{1}{2p} - \frac{1}{z_1} \right). \quad (37)$$

Число таких дискретных сдвигов на угол  $g$ , обеспечивающих один оборот ротора, и будет числом фиксаций ротора  $n = \frac{360^\circ}{g} = \frac{1}{1/2p - 1/z_1}$ .

из (25) следует<sup>2</sup>  $n_{\min 1} = 12$ ,  $k = 11$  а из (29) –  $n_{\min 2} = 24$ ,  $k = 12$ , тогда  $n = 2pn_{\min} = 22 \cdot 2 = 264$ .

У этого двигателя «залипания» ротора будут вызывать только четные гармоники поля возбуждения, которые отсутствуют при симметричном намагничивании полюсных зон ротора. Поэтому теоретически у такого двигателя не должно быть «залипания» ротора. Опытные исследования показывают [4], что реактивный момент у него на порядок меньше, чем у первого ВД.

**Скос пазов.** Одним из главных способов борьбы с «залипанием» ротора является скос пазов якоря или полюсов ротора.

По характеру реализации скос пазов носит дискретный характер, связанный с малым сдвигом каждой пластины сердечника якоря. Если таких пластин в сердечнике  $N$ , то сумма из  $N$  микросдвигов, каждый значением  $Da$ , обеспечит скос пазов на

$$a_{\Pi} = DaN. \quad (37)$$

Каждая  $i$ -я ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) элементарная машина с активной длиной, равной толщине листа, будет развивать реактивный момент в соответствии с (27):

$$DM_i = \frac{M_m}{N} \sin 2pr [J + (i - 1)Da]. \quad (38)$$

Условием подавления (отсутствия) результирующего реактивного момента будет равенство

$$\sum_{i=1}^N DM_i = 0, \quad (39)$$

которое выполняется, если элементарные моменты  $DM_i$ , рассматриваемые как векторы, образуют полную симметричную звезду, т.е.

$$DaN2pn = 2pt \quad (t = 1, 2, \dots)$$

или

$$a_{\Pi} = \frac{2pt}{2pn} = \frac{2pt}{z_1 k} = \frac{1}{k} a_z, \quad (40)$$

где  $a_z = 2p / z_1$  – скос пазов на одно зубцовое деление.

У рассмотренного выше первого двигателя  $k = 2$ , поэтому у него скос пазов должен быть кратен половине зубцового деления якоря. Скос пазов нередко выполняют на 1; 1,5 и 2 зубцовых деления. Это можно объяснить тем, что с ростом экстре-

мально нежелательных скосов на 0,75; 1,25 и 1,75 зубцовых делений соответствующие максимумы реактивных моментов снижаются.

В результате большой скос пазов, хотя и приводит к некоторому снижению использования активных материалов, гарантирует меньший уровень «залипания» ротора при неизбежных отклонениях фактического скоса от теоретически желательного.

Максимумы реактивного момента появляются при скосах

$$a_{\Pi} = (0,75 + 0,5s)a_z, \quad s = 0, 1, 2, \dots; \quad (41)$$

это равенство можно записать в виде

$$a_{\Pi} = (0,5 + 0,5s)a_z + 0,25a_z. \quad (42)$$

Очевидно, элементарные скосы  $Da$  части пластин, соответствующие первому слагаемому равенства (42), формируют полную звезду взаимно уравновешенных элементарных моментов  $DM_i$ .

Остальные элементарные моменты, связанные со вторым слагаемым в (42), будут неуравновешенны и сформируют амплитудное значение  ${}^s M_m$  реактивного момента. Если первое слагаемое обозначить через  $x$ , а второе через  $y$ , то несложно увидеть, что

$$x = \frac{(1+s)2}{3+2s} a_{\Pi}; \quad y = \frac{1}{3+2s} a_{\Pi} = \frac{DaN}{3+2s}.$$

Следовательно, имеем  $\frac{N}{3+2s}$  неуравновешенных

векторов, изображающих элементарные моменты с фазовыми сдвигами  $Da = a_{\Pi} / N$ . Отсюда легко вычислить амплитуду реактивного момента, соответствующего параметру  $s = 0, 1, 2, \dots$ :

$${}^s M_m = \frac{M_m}{s+2s} {}^s k_p, \quad (43)$$

где  $M_m$  – амплитуда реактивного момента при отсутствии скоса пазов, равная арифметической сумме амплитуд всех  $N$  элементарных реактивных моментов;  $M_m / (3+2s)$  – арифметическая сумма амплитуд  $N / (3+2s)$  неуравновешенных элементарных реактивных моментов;  ${}^s M_m$  – геометрическая сумма указанных амплитуд;

$${}^s k_p = \frac{\sin p / (3+2s)}{p / (3+2s)} \quad (44)$$

– коэффициент распределения (аналогичный соответствующему множителю обмоточного коэффициента).

Из (43), (44) следует:

<sup>2</sup> Четный порядок гармоник возбуждения  $n_{\min 1}$  и  $n_{\min 2}$  у этого ВД появится при несимметричном намагничивании полюсных зон (при отсутствии симметрии III рода  $\frac{\partial^2 x}{\partial \theta^2} + \frac{T \ddot{\theta}}{2\theta} = f(x)$  [5]).

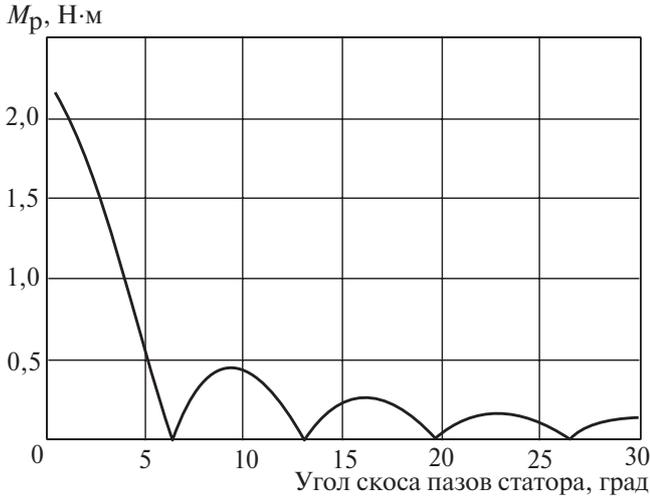


Рис. 2. Реактивный момент в функции угла скоса пазов статора

$$\lim_{s \rightarrow \infty} {}^s k_p = 1; \lim_{s \rightarrow \infty} {}^s M_m = 0.$$

На рис. 2 показана зависимость амплитуды реактивного момента  $M_m$  от угла скоса пазов статора для вентильного двигателя 5ДВМ165, имеющего  $M_H = 13 \text{ Нж}$ ;  $2p = 6$ ;  $z_1 = 27$ ; зубцовое деление статора  $a_z = \frac{360}{z_1} = \frac{360}{27} = 13,333^\circ$ . Зависимость получена численным методом [6]. Видим, что действительно максимумы реактивного момента, соответствующие углам скоса (41), монотонно снижаются.

**Составной ротор.** Реактивный момент обесточенного ВД при отсутствии скоса пазов имеет зависимость от углового положения ротора, близкую к синусоидальной.

На рис. 3 эта зависимость получена численным методом [7] для вентильного двигателя 5ДВМ115 с номинальным моментом  $7 \text{ Нж}$ . Поэтому реактивный момент можно свести к минимуму, если ротор выполнить составным, состоящим в осевом направлении из двух равных частей, которые повернуты относительно друг друга на угол, близкий к  $a_z / 4$ . В этом случае кривые реактивных моментов  $M = M(J)$ , соответствующие составным частям ротора, будут находиться в противофазе.

**Приложение.** В случае несимметричного размещения или несимметричного намагничивания магнитов МДС ротора будет содержать полный спектр гармоник

$$F(b) = \sum_{n=1}^{\infty} F_{mn} \cos pbn + \sum_{n=1}^{\infty} F_{\bar{m}n} \sin pbn. \quad (45)$$

После подстановки (18), (45) в выражение для энергии (17) будем иметь под знаком интеграла наряду со слагаемыми (20)–(22) еще три дополнительных слагаемых:

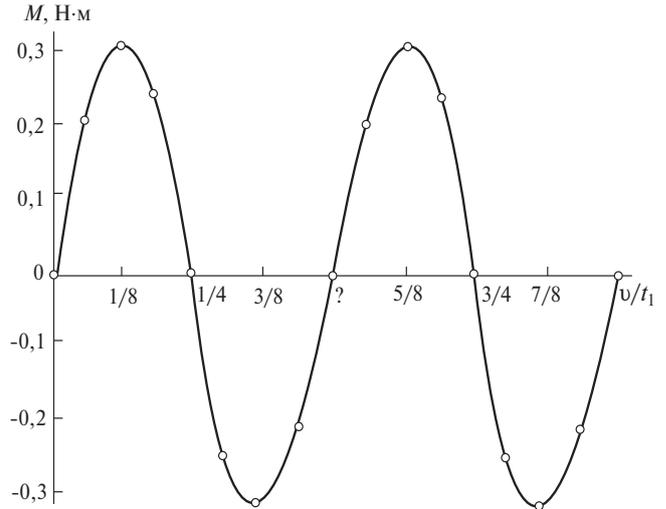


Рис. 3. Кривая реактивного момента вентильного двигателя 5ДВМ115

$$A_{\Phi} = \int_0^{2p} L_0^2 \sin^2 p(a - J) n da; \quad (46)$$

$$B_{\Phi} = \int_0^{2p} 2L_0 L_k \sin^2 p(a - J) n \cos a z_1 k da; \quad (47)$$

$$C_{\Phi} = \int_0^{2p} L_k^2 \cos^2 a z_1 k \sin^2 p(a - J) n da. \quad (48)$$

Для интеграла  $A_{\Phi}$  (как и для  $A$  в (20)) всегда справедливо  $A_{\Phi} = pL_0^2$ . При условиях (23) имеем  $B_{\Phi} = C_{\Phi} = 0$ . Для условия (25) получим:

$$B_{\Phi} = -pL_0 L_k \cos 2pnJ; \quad C_{\Phi} = \frac{p}{2} L_k^2. \quad (49)$$

С учетом (29)

$$B_{\Phi} = 0; \quad C_{\Phi} = \frac{p}{2} L_k^2 \left( 1 - \frac{1}{2} \cos 2pnJ \right). \quad (50)$$

Магнитная энергия будет определяться двумя выражениями:

$$W = \frac{m_0}{2} \frac{dpt}{\dot{e}} (F_{mn})^2 \frac{2\pi}{e} L_0^2 + L_0 L_k \cos 2pnJ + \frac{1}{2} L_k^2 \frac{\ddot{u}}{\dot{u}} + (F_{\bar{m}n})^2 \frac{2\pi}{e} L_0^2 - L_0 L_k \cos 2pnJ + \frac{1}{2} L_k^2 \frac{\ddot{u}}{\dot{u}} \quad (51)$$

$$W = \frac{m_0}{2} \frac{dpt}{\dot{e}} (F_{mn})^2 \frac{2\pi}{e} L_0^2 + \frac{1}{2} L_k^2 \frac{2\pi}{e} \left( 1 - \frac{1}{2} \cos 2pnJ \right) \frac{\ddot{u}}{\dot{u}} + (F_{\bar{m}n})^2 \frac{2\pi}{e} L_0^2 + \frac{1}{2} L_k^2 \frac{2\pi}{e} \left( 1 - \frac{1}{2} \cos 2pnJ \right) \frac{\ddot{u}}{\dot{u}}. \quad (52)$$

Первое выражение получено для равенства (25), второе – для (29). Этим выражениям для энергии

магнитного поля в воздушном зазоре будут соответствовать формулы для реактивного момента:

$$M = m_0/dp^2 t n L_0 L_k [(F_{\text{нн}}^2) + (F_{\text{нн}}^2)] \sin 2pnJ; \quad (53)$$

$$M = \frac{m_0/dp^2 t}{4} n L_k^2 [(F_{\text{нн}}^2) + (F_{\text{нн}}^2)] \sin 2pnJ. \quad (54)$$

**Выводы.** 1. Выявлены два ряда взаимосвязанных гармоник возбуждения  $pn$  и магнитной проводимости  $z_1 k$ , попарно формирующие гармонику реактивного момента, изменяющегося с угловой частотой  $2pn\omega_p$ .

2. Для ослабления момента «залипания» ротора нужно выбирать такое соотношение числа пар полюсов  $p$  и числа пазов  $z_1 k$ , чтобы равенство  $2pn = z_1 k$  выполнялось при возможно большем значении  $n$ .

3. Для устранения реактивного момента, вызванного гармоникой магнитной проводимости  $z_1 k$ , необходим скос пазов на угол, кратный значению  $2p/z_1 k$ .

4. Уменьшение реактивного момента достигается при выполнении ротора составным.

5. Число устойчивых фиксаций  $n$  за один оборот ротора при наличии момента «залипания» составит

$$n = 2pn_{\min} = \frac{1}{\left| \frac{1}{2p} - \frac{1}{z_1 k} \right|}.$$

\* \* \*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Вольдек А.И., Солдатенкова Н.А.** К расчету магнитного поля в воздушном зазоре электрических машин с помощью метода гармонических проводимостей. — Труды ЛПИ. Электромашиностроение — Л.: Энергия, 1969, № 301.
2. **Иванов-Смоленский А.В.** Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах. — М.: Высшая школа, 1989.
3. **Аракелян А.К., Афанасьев А.А.** Вентильные электрические машины и регулируемый электропривод. Кн. 1. Вентильные электрические машины. — М.: Энергоатомиздат, 1997.
4. **Лузин М.И.** Магнитоэлектрический вентильный двигатель с улучшенными массогабаритными показателями и малым значением момента «залипания» ротора. — Электричество, 2010, № 6.
5. **Бронштейн И.Н., Семендяев К.А.** Справочник по математике. — М.: ГИТТЛ, 1957.
6. **Афанасьев А.А., Ефимов В.В., Нестерин В.А.** Влияние технологических особенностей пакета статорного сердечника магнитоэлектрического вентильного двигателя на его реактивный момент. — Электричество, 2009, № 9.
7. **Афанасьев А.А., Воробьев А.Н.** Расчёт магнитного поля магнитоэлектрического вентильного двигателя методом сопряжения конформных отображений. — Электричество, 1994, № 1.

[25.11.10]

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

### ЧИТАТЕЛЯМ, ПОДПИСЧИКАМ, РЕКЛАМОДАТЕЛЯМ ЖУРНАЛА «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО»

Подписка в России и странах СНГ принимается в отделениях связи.

Для желающих представить в журнал статью сообщаем, что правила подготовки рукописей публикуются в №№ 6 и 12 каждого года.

Реклама в черно-белом изображении может быть размещена на страницах журнала и на его обложке, а также в виде вкладки.

Возможно размещение рекламы в цветном изображении (стоимость по договоренности).

При повторении той же рекламы в следующем номере — скидка 10%. При публикации той же рекламы в третьем и последующих номерах — скидка 20%. Стоимость оплаты рекламных статей — по договоренности. Последний срок представления рекламного материала — за 1,5 месяца до выхода номера из печати (обычно номер выходит в середине каждого месяца).

Адрес для переписки: 101000 Москва, Главпочтамт, а/я 648  
тел./факс: (7-495)362-7485