

# Формирование магнитного слоя ротора магнитоэлектрического вентильного двигателя с минимальным реактивным моментом

АФАНАСЬЕВ А.А.

*Рассматривается формирование слоя постоянных магнитов на ярме ротора, обеспечивающее минимизацию момента «залипания» магнитоэлектрического вентильного двигателя. Приводятся данные численного расчёта.*

**Ключевые слова:** вентильный двигатель, постоянные магниты, магнитный слой ротора, реактивный момент

Современные вентильные двигатели с постоянными высокоэнергетическими магнитами (ВДПМ) имеют повышенный уровень реактивного момента (момента «залипания»). Основным средством борьбы с этим явлением является скос пазов статора на одно и более зубцовых делений [1]. В ВДПМ со скосом пазов ведущих зарубежных электромашиностроительных компаний момент «залипания» почти отсутствует [2]. Однако скос пазов усложняет укладку обмотки статора и исключает автоматизацию этой технологической операции.

Выбор большого числа полюсов, близкого к числу зубцов статора, также позволяет практически устранить нежелательное явление «залипания» ротора [3, 4]. Но такие ВДПМ являются тихоходными, так как при больших скоростях у них недопустимо возрастают потери в стали статора и в полупроводниковых ключах преобразователя частоты.

Поиск альтернативных способов борьбы с моментом «залипания» является актуальной задачей.

**ВДПМ с искусственной несимметрией магнитного слоя ротора.** Реактивный момент в ВДПМ, имеющем  $p$  пар полюсов на роторе и  $z_1$  пазов на статоре, возникает в результате взаимодействия гармоники МДС ротора порядка  $2pn$  ( $n=1,2,3,\dots$ ) с гармоникой того же порядка магнитной проводимости зубчатого воздушного зазора  $z_1k$  ( $k=1,2,3,\dots$ ) [1]:

$$2pn = z_1k. \quad (1)$$

При расположении начала отсчета оси  $a$ , «привязанной» к статору, на оси зубца функция магнитной проводимости воздушного зазора будет четной:

$$L(a) = L_0 + \sum_{k=1}^{\infty} L_k \cos az_1k, \quad (2)$$

где  $z_1$  – число зубцов сердечника статора;  $L_0$ ,  $L_k$  – постоянная составляющая и амплитуды гармоник магнитной проводимости воздушного зазора.

*An approach is considered to shaping the layer of permanent magnets on the rotor yoke with which the minimal reluctance torque of a switched magnetoelectric motor is obtained. Data obtained from a numerical calculation are given.*

**Key words:** switched motor, permanent magnets, rotor's magnetic layer, reluctance torque

МДС ротора с несимметричным магнитным слоем будет содержать гармоники как косинусного (начало роторной оси координат  $b$  находится на середине полюсной зоны), так и синусного ряда

$$F(b) = F_0 + \sum_{n=1}^a F_{cn} \cos pnb + F_{sn} \sin pnb \quad (3)$$

$$(n=0,1,2,\dots),$$

где  $F_0$ ,  $F_{cn}$ ,  $F_{sn}$  – постоянная составляющая и амплитуды гармоник МДС ротора косинусного и синусного рядов.

Синтез оптимального (с точки зрения уровня момента «залипания») магнитного слоя ротора можно осуществлять в направлениях изменения геометрии и уровня намагничивания. Для реализации дозированных действий в этих направлениях целесообразно формировать магнитный слой в «одноэтажном» виде из прямоугольных брусков сравнительно небольших размеров. Например, у ВДПМ фирмы «Сименс» используются неодим-железоборыевые бруски размером 2,5 (высота) × 5,0 × 25 мм<sup>3</sup>.

**Магнитный слой с полюсными зонами разной ширины и локальными участками для устранения униполярного поля.** Магнитный слой может выполняться из двух или более пар цилиндрических полос, одинаковые магнитные периоды которых имеют полюсными зоны (северной и южной полярности) разной ширины (рис. 1, а и б). В этом случае при равном уровне намагничивания полюсных зон возникнет униполярная составляющая магнитного поля, которая также будет вызывать реактивный момент. Для её устранения в расширенных полюсных зонах каждой полосы формируются локальные участки с таким пониженным уровнем намагничивания, чтобы магнитные потоки разной полярности были одинаковыми. Наличие таких полюсных участков, как показано ниже, позволит свести к минимуму реактивный момент.

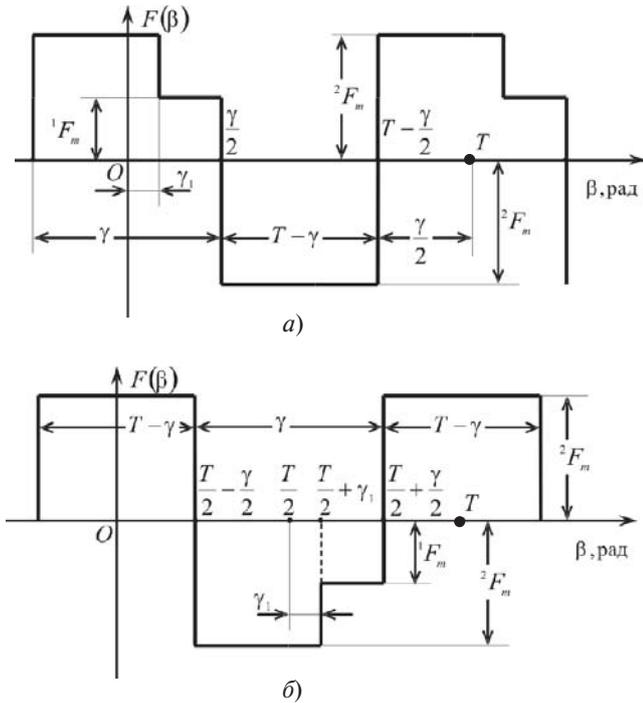


Рис. 1. Несимметричные МДС двух соседних элементарных полюсов (а и б) магнитного слоя ротора (ось абсцисс на рис. а и б – общая)

Обозначим:  $T = 2\pi / p$  – пространственный период магнитного поля, измеряемый в геометрических (механических) радианах;  $g = dT$ ,  $T - g$  – ширина полюсной зоны разных полярностей;  $1F_m$  – максимум МДС локального участка расширенной полюсной зоны, обеспечивающего отсутствие униполярного поля;  $2F_m$  – максимумы МДС обеих полюсных зон с шириной соответственно  $g$  и  $T - g$ , тогда амплитудные коэффициенты рядов (3) для магнитной полосы с кривой МДС на рис. 1,а будут равны:

$$\begin{aligned}
 A F_{m0} &= \frac{1}{T} \int_0^T F_b db = \\
 &= \frac{1}{T} \int_0^g 1F_m \frac{g}{2} - g_1 \frac{\ddot{\varphi}}{\varphi} + 2F_m \frac{g}{2} - g_1 - T \frac{\ddot{\varphi}}{\varphi} \quad (4)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A F_{m\cos} &= \frac{2}{T} \int_0^T F_b \cos pn b db = \\
 &= \frac{1}{\pi n} \int_0^g 1F_m \frac{g}{2} \sin \frac{g}{2} pn - \sin g_1 pn \frac{\dot{\varphi}}{\varphi} + \\
 &+ 2F_m \frac{g}{2} 3 \sin \frac{g}{2} pn + \sin g_1 pn \frac{\ddot{\varphi}}{\varphi} \quad (5)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A F_{m\sin} &= \frac{2}{T} \int_0^T F_b \sin pn b db = \\
 &= - \frac{1}{\pi n} \int_0^g 1F_m - 2F_m \frac{g}{2} \cos \frac{g}{2} pn - \cos g_1 pn \frac{\ddot{\varphi}}{\varphi} \quad (6)
 \end{aligned}$$

Аналогично для другой цилиндрической полосы (рис. 1,б):

$$\begin{aligned}
 B F_{m0} &= \frac{1}{T} \int_0^T F_b db = \\
 &= \frac{1}{T} \int_0^{T-g} 1F_m \frac{g}{2} - g_1 \frac{\ddot{\varphi}}{\varphi} + 2F_m \frac{g}{2} - g_1 - T \frac{\ddot{\varphi}}{\varphi} \quad (7)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 B F_{m\cos} &= \frac{2}{T} \int_0^T F_b \cos pn b db = \\
 &= \frac{1}{\pi n} \int_0^{T-g} 1F_m \frac{g}{2} \sin \frac{g}{2} pn + \sin g_1 pn \frac{\dot{\varphi}}{\varphi} + \\
 &+ 2F_m \frac{g}{2} 3 \sin \frac{g}{2} pn - \sin g_1 pn \frac{\ddot{\varphi}}{\varphi} \quad (8)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 B F_{m\sin} &= \frac{2}{T} \int_0^T F_b \sin pn b db = \\
 &= \frac{1}{\pi n} \int_0^{T-g} (1F_m - 2F_m \frac{g}{2} \cos \frac{g}{2} pn - \cos g_1 pn) \frac{\ddot{\varphi}}{\varphi} \quad (9)
 \end{aligned}$$

Для устранения униполярных составляющих МДС ротора  $A F_{m0}$  и  $B F_{m0}$  необходимо выдержать равенство

$$\frac{1F_m}{2F_m} = \frac{T - \frac{3g}{2} - g_1}{\frac{g}{2} - g_1} = \frac{1 - \frac{3d}{2} - d_1}{\frac{d}{2} - d_1} \quad (10)$$

где  $d = g/T$ ;  $d_1 = g_1/T$ .

Обратим внимание, что амплитудные коэффициенты  $A F_{m\cos}$  и  $B F_{m\cos}$ ,  $A F_{m\sin}$  и  $B F_{m\sin}$  в (5), (6), (8), (9) отличаются только знаками.

Разница в размерах полюсных зон северной и южной полярностей может быть сравнительно небольшой. Например, магнитный период может содержать 11 прямоугольных магнитных брусков, тогда на широкую полюсную зону может приходиться 6 брусков, а на узкую 5. В этом случае  $d = \frac{6}{11}$  и,

выбрав  $d_1 = \frac{2}{11}$ , получим из (10):

$$\frac{1F_m}{2F_m} = \frac{1 - \frac{3d}{2} - d_1}{\frac{d}{2} - d_1} = \frac{1 - \frac{3 \cdot 6}{2 \cdot 11} - \frac{2}{11}}{\frac{3}{11} - \frac{2}{11}} = 0.$$

Следовательно, локальный участок широкой зоны, служащий для устранения униполярного поля, состоит из одного немагнитного бруска.

Координатная ось  $b$ , жестко «привязанная» к ротору, будет связана с осью  $a$  выражением

$$b = a - J, \quad (11)$$

где  $J$  – угловой сдвиг осей фазы  $a$  статора и  $d$  ротора, рад.

При равенстве (1) и несимметричной форме МДС ротора вида (3) реактивный момент, как показано в [1], определяется из выражения

$$M = m_0 / dp^2 \tan L_0 L_k (jF_{mn} - F_{mn})^2 \sin 2pJ. \quad (12)$$

Обозначим

$$A \&F_{mn} = -A F_{mn} + j^A F_{mn} = A F_{mn} e^{j(a+p/2)};$$

$$B \&F_{mn} = -B F_{mn} + j^B F_{mn} = -A F_{mn} e^{j(a+p/2)};$$

$$a = \arctg \frac{-A F_{mn}}{A F_{mn}},$$

где  $A \&F_{mn}$ ,  $B \&F_{mn}$  – комплексные амплитуды МДС полюсов  $A$  и  $B$  магнитного слоя ротора.

Очевидно, комплексный множитель в (12) для реактивного момента будет одинаковым для обеих полюсов  $A$  и  $B$ :

$$(A \&F_{mn})^2 = (B \&F_{mn})^2 = - (A F_{mn})^2 e^{j2a}, \quad (13)$$

т.е. реактивные моменты обеих полюсов складываются

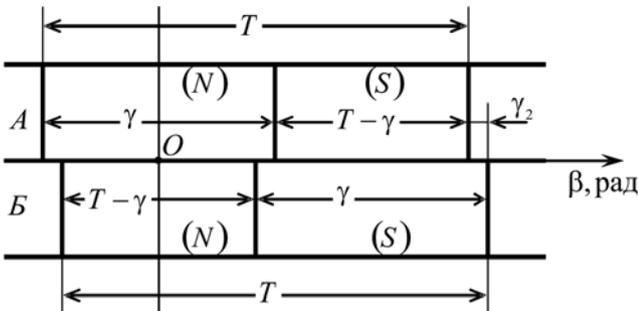


Рис. 2. Исходное положение на координатной оси  $\beta$  в двух цилиндрических полюсах магнитного слоя ротора с полюсными зонами разной ширины

ся арифметически.

Как отмечалось выше, координаты обеих полюсов зафиксированы на общей оси ротора  $\beta$ . Поскольку одноимённые магнитные зоны полюсов имеют разную ширину, то их магнитные периоды, состоящие только из двух соседних полюсных зон (одноимённые зоны полюсов имеют общую границу), оказываются сдвинутыми на угол (рис. 2)

$$g_2 = g - \frac{T}{2}. \quad (14)$$

В долях периода этот сдвиг составит

$$d_2 = \frac{g_2}{T} = d - \frac{1}{2}. \quad (15)$$

Для противофазного действия реактивных моментов рассматриваемых полюсов, как видно из (12), нужно сдвинуть полюсы от исходного положения на угол

$$a_n = \frac{p}{2pn}. \quad (16)$$

В долях периода это перемещение будет равно

$$d_n = \frac{a_n}{T} = \frac{1}{4n}. \quad (17)$$

С точки зрения технологии и лучшего использования обмотки желательнее магнитные периоды соседних полюсов совместить друг с другом (начальные и конечные края названных выше периодов полюсов должны совпадать). В этом случае имеем  $d_n = d_2$ , откуда с учётом (15) и (17) получим для относительной ширины увеличенной полюсной зоны

$$d = gT = \frac{1}{2} + \frac{1}{4n}. \quad (18)$$

Таким образом, для минимизации реактивного момента необходимо выполнение двух условий: расположение магнитных периодов рассматриваемых цилиндрических полюсов напротив друг друга; соответствие ширины большей полюсной зоны каждой полюсы условию (18). При невозможности выполнения второго условия взаимный сдвиг цилиндрических полюсов от исходного положения (рис. 1) на геометрический угол (16) также обеспечит минимум реактивного момента.

**Примеры формирования магнитного слоя ротора.**

1. Рассмотрим ВДПМ, имеющий  $z_1 = 36$ ,  $2p = 6$ . Силовое взаимодействие зубчатого статора с МДС ротора, как следует из равенства (1), будет вызываться гармоникой МДС  $n = 6$ . Для минимизации реактивного момента нужно расширенную полюсную зону выполнить с относительным размером (18)

$$d = \frac{1}{2} + \frac{1}{4n} = \frac{1}{2} + \frac{1}{4 \cdot 6} = \frac{13}{24}$$

и совместить магнитные периоды ротора. Будем полагать, что магнитный период состоит из 24 брусков магнитного материала. Тогда расширенный полюс будет содержать 13, а второй (усечённый) – 11 брусков. К локальному (размагничивающему) участку расширенного полюса отнесём один брусок (в долях периода он составит  $\frac{1}{24}$ ). Согласно рис. 1

$$d_1 = \frac{d}{2} - \frac{1}{24} = \frac{13}{48} - \frac{1}{24} = \frac{11}{48},$$

тогда для МДС этого участка  $^1 F_m$  получим из (10)

$$\frac{{}^1F_m}{{}^2F_m} = \frac{1 - \frac{3d}{2} \cdot d_1}{\frac{d}{2} \cdot d_1} = \frac{1 - \frac{3}{2} \cdot \frac{13}{24} - \frac{11}{48}}{\frac{13}{48} - \frac{11}{48}} = -1,$$

т.е. магнитный брусок локального участка должен быть намагничен так же, как бруски соседнего полюса.

Графики МДС соседних полюсов ротора этого ВДПМ с совмещёнными магнитными периодами показаны на рис. 3. Видим, что у первой полосы (рис. 3,а) локальный импульс МДС (затемнён) делает тангенциальные размеры полюсных зон одинаковыми, равными половине периода. Вторая по-

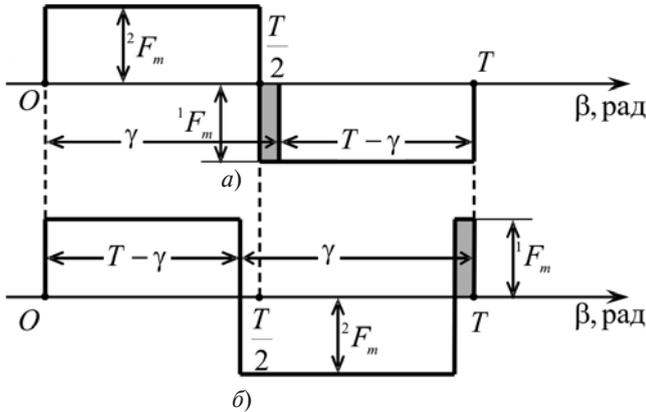


Рис. 3. Распределение МДС магнитного слоя ротора из двух цилиндрических полюсов с совмещёнными магнитными периодами при  ${}^1F_m = - {}^2F_m$

лоса (рис. 3,б) имеет полюсные зоны разных размеров. Локальный импульс МДС положительного знака (затемнён) расширенной зоны устраняет униполярное поле этой полосы.

2. Возможно использование для этого ВДПМ и 11 магнитных брусков на периоде, что рассмотрено выше. В этом случае, как было отмечено, магнитный брусок локального участка должен быть полностью размагничен. Однако условие (18) совмещения магнитных периодов выполняется приближённо: вместо требуемого  $d = 13/24$  будем иметь  $d = 6/11$ , но погрешность приближения невелика (меньше одного процента):

$$\frac{13/24 - 6/11}{13/24} \cdot 100 = 0,6993\%.$$

Этот вариант также может быть реализован.

3. Рассмотрим ВДПМ типа 5ДВМ 165, выпускаемые ЗАО «ЧЭАЗ» (г. Чебоксары) для работы в станках высокой точности с числовым программным управлением, применяемые в робототехнике, автоматических технологических линиях и т.п. Они имеют  $z_1 = 27$ ,  $2p = 6$  и скос пазов статора на одно зубцовое деление [5]. Из равенства  $z_1 k = 2pn$  следует,

что основной вклад в формирование реактивного момента оказывает гармоника МДС ротора  $n = 9$ .

Для минимизации реактивного момента нужно расширенную полюсную зону выполнить с относительным размером (18)

$$d = \frac{1}{2} + \frac{1}{4n} = \frac{1}{2} + \frac{1}{4 \cdot 9} = \frac{19}{36}$$

и совместить магнитные периоды ротора. Если предположить, что магнитный период состоит из 36 брусков магнитного материала, то первый (расширенный) полюс будет содержать 19, а второй (усечённый) – 17 брусков. Формирование локального (размагничивающего) участка многовариантно; возможны, например, следующие варианты:

а) к этому участку расширенного полюса отнесём один брусок (в долях периода он составит величину  $\frac{1}{36}$ ). Согласно рис. 1

$$d_1 = \frac{d}{2} - \frac{1}{36} = \frac{19}{72} - \frac{1}{36} = \frac{17}{72},$$

тогда для МДС локального участка  ${}^1F_m$  получим из (10)

$$\frac{{}^1F_m}{{}^2F_m} = \frac{1 - \frac{3d}{2} \cdot d_1}{\frac{d}{2} \cdot d_1} = \frac{1 - \frac{3}{2} \cdot \frac{19}{36} - \frac{17}{72}}{\frac{19}{72} - \frac{17}{72}} = -1;$$

графики изменения МДС обоих слоёв для этого варианта показаны на рис. 3;

б) локальный участок состоит из двух брусков (в долях периода имеем величину  $\frac{2}{36}$ ), тогда (рис. 4):

$$d_1 = \frac{d}{2} - \frac{2}{36} = \frac{19}{72} - \frac{2}{36} = \frac{15}{72},$$

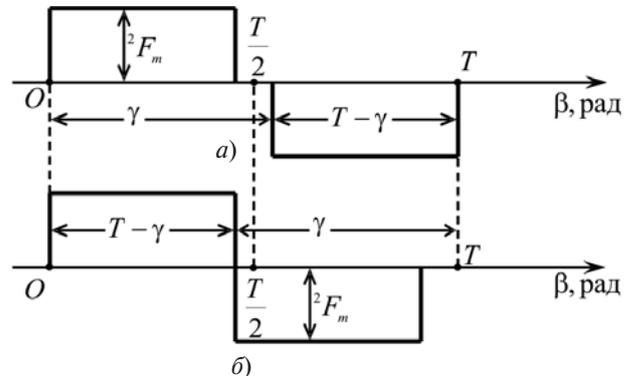


Рис. 4. Распределение МДС магнитного слоя ротора из двух цилиндрических полюсов с совмещёнными магнитными периодами при отсутствии намагничивания локального участка ( ${}^1F_m = 0$ )

$$\frac{{}^1 F_m}{{}^2 F_m} = \frac{1 - \frac{3d}{2} d_1}{\frac{d}{2} d_1} = \frac{1 - \frac{3}{2} \frac{19}{36} - \frac{15}{72}}{\frac{19}{72} - \frac{15}{72}} = 0,$$

т.е. два бруска локального участка будут немагнитны (могут просто отсутствовать).

**Влияние несимметрии полюсных зон на амплитудные коэффициенты гармоник МДС.** Результирующие амплитуды гармоник МДС соседних цилиндрических слоёв, как видно из (13), одинаковы. Проанализируем гармонический состав МДС одного слоя, полагая локальный участок в нём немагнитным ( ${}^1 F_m = 0$ ). В этом случае результирующий амплитудный коэффициент ряда (3), как показано в приложении, будет равен

$$F_{mn} = \sqrt{(F_{mn}^{\text{с}})^2 + (F_{mn}^{\text{н}})^2} = \frac{4}{\rho n} {}^2 F_m \sqrt{\sin^6 \rho d n + \cos^2 \rho d n \sin^4 \rho d n}. \quad (19)$$

При симметричных полюсных зонах ( $d = 1/2$ ) имеем из (19)

$$F_{mn} = \frac{4}{\rho n} {}^2 F_m. \quad (20)$$

Для неодинаковых полюсных зон из (19) следует

$$F_{mn} = \frac{4}{\rho n} k(d, n) {}^2 F_m, \quad (21)$$

где  $k(d, n) = \sqrt{\sin^6 \rho d n + \cos^2 \rho d n \sin^4 \rho d n}$ .

Значения коэффициента  $k(d, n)$  для некоторых видов рассмотренных выше полюсных зон приведены ниже:

| d         | 6/11   |        | 13/24  |      | 19/36  |      |
|-----------|--------|--------|--------|------|--------|------|
| n         | 1      | 6      | 1      | 6    | 1      | 9    |
| $k(d, n)$ | 0,9797 | 0,5712 | 0,9830 | 0,50 | 0,9924 | 0,50 |

Видим, что амплитудные коэффициенты гармоник МДС ротора  $F_{mn}$ , вызывающих реактивный момент, при несимметричных полюсных зонах существенно меньше, чем при одинаковых размерах зон. Поскольку реактивный момент, как видно из (12), пропорционален квадрату амплитуд этих гармоник, то у ВДПМ с неравными полюсными зонами следует ожидать снижения реактивного момента более чем втрое.

Следует также отметить, что разница в размерах полюсных зон невелика (не превосходит 10 %). Поэтому снижение основной гармоники МДС ротора ( $n = 1$ ), вызванное искусственной асимметрией

полюсных зон, будет, как показано выше, мало заметным (не более 2%).

**Численный расчёт реактивного момента ВДПМ с неравными полюсными зонами.** Определим методом натяжений [6] реактивный момент виртуально модифицированного ВДПМ типа 5ДВМ 165 (рассмотренного выше), ротор которого содержит две полосы магнитов, имеющих кривые МДС по рис. 3. Согласно варианту 3,а для этого ВДПМ локальный участок расширенной полюсной зоны составляет  $\frac{T}{36} = \frac{360}{36p} = \frac{360}{36 \times 3} = 3,3$ °. Его размер равняется четверти зубцового шага статора  $a_z = 360 / z_1 = 369 / 27 = 13,3$ °. МДС этого участка равна по модулю МДС расширенной зоны, но противоположна ей по знаку:  ${}^1 F_m = - {}^2 F_m$ . В итоге МДС двух полос оказываются сдвинутыми относительно друг друга на угол  $a_z / 4 = 3,3$ °.

Процедура расчёта реактивного момента этого ВДПМ численным методом сопряжения конформных отображений подробно рассмотрена в [5]. Для модифицированного ротора были вычислены моменты для каждой из полос\*. Они оказались близкими к двум синусоидальным кривым  $M = M_m \sin 2 \rho n J = 1,108 \sin 54 J$ , сдвинутым на угол, равный примерно 180°. В результате суммарный момент двух полос оказался близким к нулю.

**П р и л о ж е н и е.** Найдем амплитуду  $n$ -й гармоники МДС цилиндрической магнитной полосы ротора с неравными полюсными зонами, выбрав немагнитным локальный участок увеличенной полюсной зоны ( ${}^1 F_{mn} = 0$ ). Из (5) и (6):

$$F_{mn}^{\text{с}} = \frac{1}{\rho n} {}^2 F_m \left[ 3 \sin \frac{g}{2} \rho n + \sin g_1 \rho n \right] \quad (П-1)$$

$$F_{mn}^{\text{н}} = \frac{1}{\rho n} {}^2 F_m \left[ \cos \frac{g}{2} \rho n - \cos g_1 \rho n \right]$$

При  ${}^1 F_{mn} = 0$  из (10) следует  $d_1 = 1 - \frac{3}{2} d$ , тогда

$$g_1 = d_1 T = \frac{2p}{p} - \frac{3}{2} g.$$

В результате из (П-1) можем получить выражение для амплитуды  $n$ -й гармоники МДС цилиндрической магнитной полосы:

$$F_{mn} = \sqrt{(F_{mn}^{\text{с}})^2 + (F_{mn}^{\text{н}})^2} = \frac{4}{\rho n} {}^2 F_m \sqrt{\sin^6 \frac{g}{2} \rho n + \cos^2 \frac{g}{2} \rho n \sin^4 \frac{g}{2} \rho n} = \frac{4}{\rho n} {}^2 F_m \sqrt{\sin^6 \rho d n + \cos^2 \rho d n \sin^4 \rho d n}.$$

\* Численный расчет реактивных моментов выполнил к.т.н. В.В.Ефимов.

**Выводы.** 1. При формировании слоя ротора из постоянных магнитов в виде двух или более пар цилиндрических полос с совмещёнными магнитными периодами, увеличенные полюсные зоны которых удовлетворяют условию (18), можно достичь минимального значения реактивного момента.

2. Для устранения униполярного поля, вызванного неодинаковостью полюсных зон, необходимы локальные участки в расширенных зонах, размеры и уровни намагничивания которых могут варьироваться исходя из технологических и ценовых условий.

3. Реактивный момент цилиндрической полосы с неравными полюсными зонами более чем в 3 раза меньше по сравнению с моментом аналогичной полосы с равными зонами.

4. Искусственное формирование неодинаковых полюсных зон вызывает малозаметное (не более 2%) уменьшение основной гармоники МДС ротора.

5. Результаты численного расчёта подтвердили возможность практического устранения реактивного момента рассмотренным способом, не требующим скоса пазов статора.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Афанасьев А.А.** Реактивный момент обесточенного вентильного двигателя с постоянными магнитами. – Электричество, 2011, № 3.

2. **Жуков В.П., Нестерин В.А.** Высокомоментные вентильные электродвигатели серии 5 ДВМ. – Электротехника, 2000, №6. С. 19 – 21.

3. **Шевченко А.Ф., Комаров А.В., Новокрещенов О.И., Мизевич В.В.** Безредукторный электромеханический усилитель рулевого управления легковых автомобилей. – Электротехника, 2007. №9.

4. **Лузин М.И.** Магнитоэлектрический вентильный двигатель с улучшенными массогабаритными показателями и малым значением момента «залипания» ротора. – Электричество, 2010, № 6.

5. **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.

6. **Иванов-Смоленский А.В.** Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах. – М.: Высшая школа, 1989.

[ 22.08.11 ]

*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. Заведующий кафедрой управления и информатики в технических системах Чувашского государственного университета.*