

## Эксцентриситет ротора синхронных машин с постоянными магнитами

БЕСПАЛОВ В.Я., КОВАРСКИЙ М.Е., СИДОРОВ А.О., ИВАНОВ А.С.

*Представлены результаты исследования эксцентриситета в синхронных машинах с постоянными магнитами с различными значениями числа пазов на полюс и фазу ( $q$ ). Показаны преимущества и недостатки использования схем обмоток с различным значением  $q$ . Аналитически получено выражение, описывающее физические процессы взаимодействия пространственных гармоник индукции в воздушном зазоре при эксцентриситете. С помощью полевых моделей и использования максвелловских сил магнитного натяжения определены пульсации электромагнитного момента при различных видах эксцентриситета: статического, динамического и смешанного. Отмечены различия в полученных характеристиках. Представлена методика расчета пульсаций электромагнитного момента в режимах холостого хода и нагрузки с помощью конечно-элементной программы Femt. Даны рекомендации по выбору значения  $q$  для уменьшения негативного влияния различных видов эксцентриситета.*

**Ключевые слова:** синхронная машина, постоянные магниты, эксцентриситет, пульсации момента, дробное значение  $q$

Благодаря использованию в конструкции индуктора синхронных машин с постоянными магнитами (СМПМ) высококоэзитивных постоянных магнитов удается не только избавиться от контактно-щеточного узла и избежать электрических потерь в роторе, но и достичь высоких массогабаритных показателей. Эти преимущества позволяют использовать СМПМ в электроэнергетических установках, гибридном электрическом транспорте, исполнительных механизмах и многих других областях. Кроме того, как показывают исследования, эти машины обладают хорошими виброакустическими показателями, что обуславливает их применение в маломощном электроприводе.

В последнее время в конструкции рассматриваемых машин применяется обмотка с дробным числом пазов на полюс и фазу  $q$ , обладающая рядом преимуществ. В случае использования  $q < 1$  (т.н. дробные зубцовые обмотки) схема обмотки получается достаточно простой, состоящей из ряда сосредоточенных обмоток [1–3]. Магнитопровод статора машин с такими обмотками содержит сравнительно малое число пазов, что позволяет увеличить площадь пазовой зоны и, следовательно, повысить линейную нагрузку машины [3]. В схемах обмоток с дробным  $q > 1$  для симметрирования различных фаз используется переменное, периодически изменяющееся по полюсам, число катушек в катушечной группе. При этом обеспечивается симметрия результирующего магнитного поля.

Для магнитопровода статора СМПМ с  $q > 1$  используется стандартный штамп серийно выпускаемых электрических машин. Другое существенное преимущество заключается в том, что обмотка с

дробным  $q$  позволяет существенно снизить амплитуды зубцовых гармоник, поэтому в спектрах шума и вибрации значительно сокращаются составляющие электромагнитного происхождения [16]. Однако недостатком обмотки является сильное искажение магнитного поля, что приводит к появлению гармоник дробного порядка и субгармоник.

При создании и эксплуатации СМПМ нередко бывают случаи возникновения различного рода дефектов или технологических погрешностей (допуски на точность изготовления, износ подшипников, прогиб вала, несоосность), которые приводят к эксцентрическому расположению ротора по отношению к статору. Появляющиеся при этом дополнительные гармоники проводимости создают искажение электромагнитного поля, что становится причиной появления добавочных потерь, электромагнитных сил и моментов. Пульсирующие электромагнитные силы и моменты при этом являются источниками повышенного шума и вибрации [2]. Возникшие нескомпенсированные электромагнитные силы действуют на ротор неравномерно, усиливая появившийся дефект вплоть до выхода из строя машины. Предугадать момент возникновения подобных процессов достаточно трудно, поэтому предусмотреть и разработать меры по снижению возникающих при эксцентриситете сил и моментов необходимо еще на этапе проектирования. Учет эксцентриситета важен и для расчета вибровозмущающих сил, действующих на постоянные магниты, и последующего выбора способа крепления магнитов. Особенно актуально рассмотрение электромагнитных процессов при эксцентриситете в

высокоскоростных электрических машинах (более 3000 об/мин).

Стоит отметить, что известные способы уменьшения пульсаций электромагнитного момента при наличии эксцентриситета достаточно сложны, к тому же многие из них могут оказаться неэффективными. Поэтому разработка достаточно простых способов устранения пульсаций – важная научная задача.

В отечественной и зарубежной литературе встречаются работы, посвященные изучению эксцентриситета в машинах с постоянными магнитами [3–12]. В [3, 9, 11] рассмотрено влияние статического эксцентриситета на распределение индукции в воздушном зазоре. Способы снижения пульсаций момента при наличии эксцентриситета описываются в [5], анализ влияния эксцентриситета на ЭДС холостого хода – в [6]. Математической модели и расчету радиальных магнитных сил при эксцентриситете посвящены работы [10, 12], а результаты расчета потерь в роторе СМПМ со статическим эксцентриситетом приведены в [7–8].

Несмотря на сравнительно большое число публикаций по данной тематике, исследование особенностей различных видов эксцентриситета и их влияния на характеристики СМПМ остается неполным. Кроме того, практически отсутствуют работы по сравнению характеристик при эксцентриситете машин с различными схемами обмотки.

На практике принято рассматривать три вида эксцентриситета: статический, динамический и смешанный [13]. При статическом эксцентриситете ось вращения совпадает с осью симметрии ротора, но сдвинута относительно центра симметрии статора, при этом минимальный воздушный зазор между статором и вращающимся ротором имеет одну и ту же угловую координату (рис. 1). Как правило, статический эксцентриситет возникает из-за неточной сборки машины или значительного прогиба вала за счет теплового расширения. При динамическом эксцентриситете ось вращения совпадает с центром симметрии статора, а угловая координата минимального зазора при вращении ротора изменяется. Такого рода дефект возникает в случае износа подшипникового узла. Смешанный эксцентриситет представляет собой промежуточный случай, когда ось вращения не совпадает ни с одной из осей симметрии машины.

Для выявления особенностей и различий интегральных характеристик СМПМ, в частности пульсаций момента, при разных видах эксцентриситета необходим расчет поля при различных положениях ротора машины.

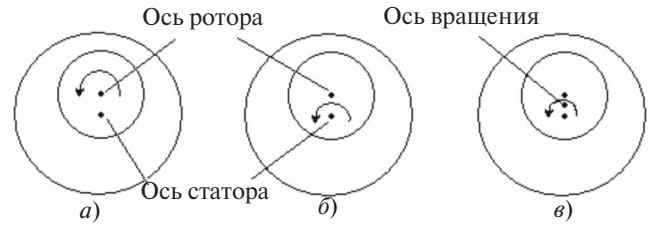


Рис. 1. Виды эксцентриситета: а – статический; б – динамический; в – смешанный

**Аналитическое описание воздействия эксцентриситета на распределение индукции в воздушном зазоре СМПМ.** Воздушный зазор при различных случаях эксцентриситета описывается выражением

$$\delta = \delta_0 - \Delta(\omega_\varepsilon t - \theta),$$

где  $\delta_0$  – воздушный зазор в случае отсутствия эксцентриситета;  $\Delta$  – абсолютное значение эксцентриситета;  $\omega_\varepsilon$  – частота вращения минимального воздушного зазора;  $\theta$  – угловая координата по статору.

С учетом определений, данных различным видам эксцентриситета, в случае статического эксцентриситета частота вращения минимального воздушного зазора (эксцентриситета)  $\omega_\varepsilon$  равна нулю, а при динамическом и смешанном эксцентриситете  $\omega_\varepsilon = \omega_1 / p$ , где  $\omega_1 = 2\pi f$  – частота вращения основной гармоники;  $f$  – частота питания СМПМ;  $p$  – число пар полюсов.

Магнитная проводимость воздушного зазора при эксцентриситете без учета зубчатости [9]:

$$\Lambda_\varepsilon = \frac{\mu_0}{\delta} = \frac{\mu_0}{1 - \varepsilon \cos(\omega t - \theta)}, \quad (1)$$

где  $\mu_0$  – магнитная проницаемость воздуха;  $\varepsilon = \Delta / \delta_0$  – относительный эксцентриситет.

Знаменатель (1) можно разложить в тригонометрический ряд, поскольку  $\cos(\omega t - \theta) \leq 1$ , тогда с учетом двух первых коэффициентов ряда получим

$$\Lambda_\varepsilon = \frac{\mu_0}{\delta} [1 + \varepsilon \cos(\theta - \omega t)]. \quad (2)$$

Магнитная проводимость воздушного зазора при учете зубчатости статора [5]:

$$\Lambda_Z = \Lambda_0 + \sum_{v=1}^{\infty} \Lambda_{vZ} \cos vZ_1 \theta, \quad (3)$$

где  $\Lambda_0$  – магнитная проводимость равномерного воздушного зазора;  $\Lambda_{vZ}$  – амплитуда магнитной проводимости высших зубцовых гармоник;  $Z_1$  – число зубцов статора.

Окончательно выражение проводимости воздушного зазора при эксцентриситете с учетом зуб-

частоты получаем, подставляя в (3) выражение для равномерного зазора с учетом эксцентриситета (2):

$$\Lambda = \frac{\mu_0}{\delta} [1 + \varepsilon \cos(\theta - \omega t)] + \sum_{v=1}^{\infty} \Lambda_{vZ} \cos vZ_1 \theta. \quad (4)$$

МДС постоянных магнитов можно представить в виде ряда Фурье:

$$F = \sum_{i=1}^{\infty} f_{mi} \cos(ip(\theta - \alpha)),$$

где  $i$  – порядок гармоники МДС;  $f_{mi}$  – амплитуда высшей гармоники МДС;  $\alpha$  – угол поворота ротора.

Для простоты насыщением коронок зубцов статора пренебрегаем. Таким образом, индукцию в воздушном зазоре  $B_\delta$  можно представить произведением МДС  $F$  на магнитную проводимость воздушного зазора  $\Lambda$ . В режиме холостого хода МДС создается только постоянными магнитами, при этом

$$B_\delta = \left[ \frac{\mu_0}{\delta} (1 + \varepsilon \cos(\theta - \omega t)) + \sum_{v=1}^{\infty} \Lambda_{vZ} \cos vZ_1 \theta \right] \times \sum_{i=1}^{\infty} f_i \cos(ip(\theta - \alpha)). \quad (5)$$

Перемножая два члена выражения (5) и используя формулу произведения косинусов, получаем окончательно:

$$B_\delta = \sum_{i=1}^{\infty} f_i \frac{\mu_0}{\delta} \left[ \cos(ip(\theta - \alpha)) + \frac{\varepsilon}{2} \cos((1-ip)\theta - \omega t + \alpha) + \cos((1+ip)\theta - \omega t - \alpha) \right] + \sum_{v=1}^{\infty} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\Lambda_{vZ} f_i}{2} \times [\cos((vZ_1 - ip)\theta + ip\alpha) + \cos((vZ_1 + ip)\theta - ip\alpha)]. \quad (6)$$

Таким образом, как видно из (6), составляющие индукции, обусловленные наличием эксцентриситета, имеют порядок  $1 \pm ip$ . Кроме того, при учете зубчатости статора спектр гармоник индукции содержит составляющие порядков  $Z_1 v \pm ip$ .

**Численное решение задачи.** Традиционные методики расчета электрических машин основаны на серьезных допущениях: равномерность воздушного зазора при учете раскрытия паза с помощью коэффициента Картера, пренебрежение реакцией якоря, бесконечно большая магнитная проницаемость материала магнитопровода и др. Расчет магнитного поля и сил с учетом реальной геометрии и свойств электрической машины по этим методикам приводит к большим погрешностям. Получить приемле-

мое решение при минимальном числе допущений позволяют численные методы, основанные на решении уравнений Максвелла при заданных граничных условиях.

Сегодня одним из основных численных методов расчета электромагнитного поля является метод конечных элементов – основа построения многих современных инженерных программ. В данной статье магнитное поле СМПМ рассчитывается в конечно-элементной программе Femm, обладающей рядом преимуществ: простотой, низкими системными требованиями, свободным доступом к программе в сети Internet [14]. Для решения задачи определения пульсаций электромагнитного момента в Femm удобно воспользоваться языком программирования lua, с помощью которого возможен непрерывный расчет множества полей при пошаговом повороте ротора.

Конструкция рассматриваемой СМПМ и ее электромагнитное поле при фиксированном моменте времени представлены на рис. 2.

Основные технические данные СМПМ следующие:

номинальная мощность, Вт	600
число полюсов	10
ток, А	1,6
частота, Гц	50
число фаз	3
напряжение линейное, В	380

Рассмотрим картину поля СМПМ при наличии эксцентриситета  $\varepsilon=0,8$  (рис. 3). Амплитуда индукции в воздушном зазоре на разных полюсах машины изменяется от 0,5 до 1,3 Тл. При увеличении  $\varepsilon$  происходит перераспределение индукции в воздушном зазоре: в зоне уменьшения зазора индукция (и электромагнитный поток) становится больше, а в зоне увеличения зазора – меньше, т.е. по-

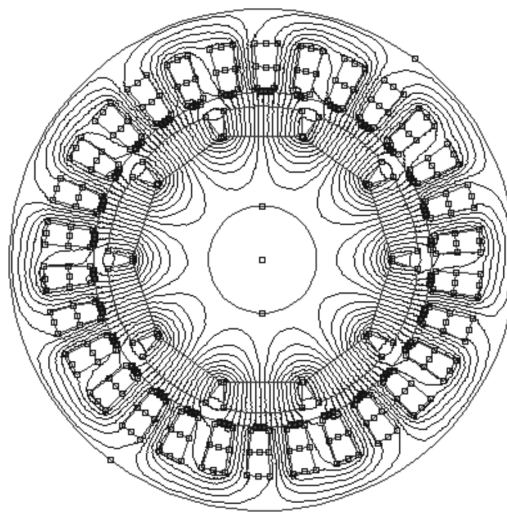


Рис. 2. Конструкция и магнитное поле СМПМ при номинальной нагрузке

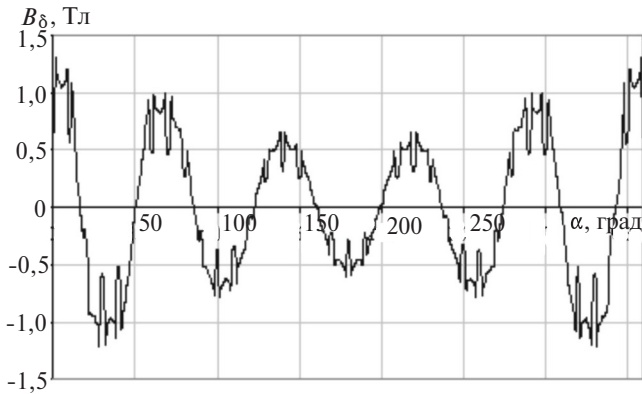


Рис. 3. Кривая индукции в воздушном зазоре СМПМ при  $\varepsilon=0,8$

является несимметрия магнитного потока. При определенном значении эксцентриситета происходит насыщение коронок зубцов в области минимального зазора. Таким образом, в многополюсной конструкции машины вне зависимости от числа полюсов в кривой индукции появляется составляющая, период которой равен диаметру расточки статора.

Разложим кривую индукции в воздушном зазоре (рис. 3) в ряд Фурье (рис. 4). Для того чтобы выявить гармоники, обусловленные наличием эксцентриситета, представим на одном рисунке спектры гармоник при  $\varepsilon=0,2$  и  $0,8$ . Как видно, наличие эксцентриситета вызывает появление гармоник, порядки которых равны  $ip \pm 1$ , т.е. таким образом происходит взаимодействие гармоник МДС магнитов, в том числе и основной гармоники, с субгармоникой магнитной проводимости воздушного зазора, обусловленной наличием эксцентриситета. Кроме того, в спектре гармоник индукции содержатся составляющие, порядки которых равны  $Z_1 v \pm ip$ , обусловленные взаимодействием гармоник МДС магнитов и зубцовых гармоник статора. Таким образом, найденные с помощью численного метода значения порядка гармоник согласуются с таковыми, найденными аналитическим методом.

**Момент СМПМ при эксцентриситете в режиме холостого хода.** С помощью максвелловских сил магнитного натяжения и специальных сценариев, написанных на языке программирования lua, найдем распределение пульсаций электромагнитного

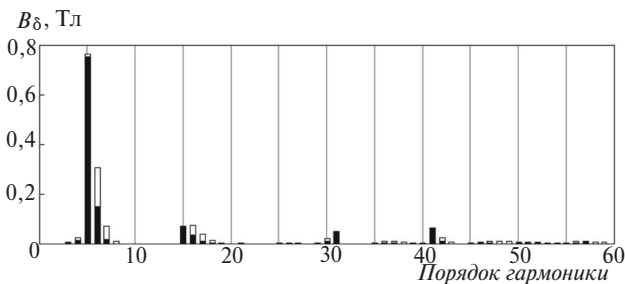


Рис. 4. Спектр гармоник индукции в воздушном зазоре СДПМ при различном эксцентриситете: ■ –  $\varepsilon=0,2$ ; □ –  $\varepsilon=0,8$

момента вдоль рабочего воздушного зазора СМПМ в режиме холостого хода. Для определения момента необходимо вычислить интеграл по поверхности, на которую действуют электромагнитные силы:

$$\bar{M} = \oint_S [\bar{r} \bar{T}_n] dS, \quad (7)$$

где  $\bar{r}$  – радиус-вектор рассматриваемой точки;  $\bar{T}_n$  – тензор натяжений;  $S$  – площадь поверхности действия  $\bar{T}_n$ .

Вектор или тензор магнитного натяжения можно найти в общем виде:

$$\bar{T}_n = \frac{\bar{B} B_n - 0,5 B^2 \bar{n}}{\mu \mu_0}. \quad (8)$$

Удобно разложить тензор натяжений на нормальную и тангенциальную составляющие:

$$\begin{aligned} \bar{T}_n &= \bar{T}_{nn} + \bar{T}_{n\tau}; \\ \bar{T}_{nn} &= \bar{T}_{nn} \bar{n} = \frac{B_n^2 - B_\tau^2}{2\mu\mu_0}; \\ \bar{T}_{n\tau} &= \bar{T}_{n\tau} \bar{\tau} = \frac{B_n B_\tau}{\mu\mu_0} \bar{\tau}, \end{aligned}$$

где  $\bar{B}$  – вектор индукции в рассматриваемой точке поля;  $B_n$  – нормальная составляющая индукции;  $\bar{n}$  – нормальный орт к стороне поверхности действия  $T_n$ ;  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость среды;  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума.

На рис. 5 представлены результаты расчетов пульсаций момента при различных видах и значениях  $q$ . При изменении чисел пазов статора для анализа различных значениях  $q$  форма и площадь пазов остаются неизменными.

В конструкции машин с  $q > 1$  используется сравнительно большое число зубцов для размещения обмотки. Использование дробного значения  $q$  эквивалентно еще большему увеличению числа зубцов статора  $Z_{\text{эКВ}} = qZ_1$ , где  $Z_1$  – число реальных зубцов статора, т.е. использование обмоток с дробным  $q > 1$  позволяет повысить порядок зубцовых гармоник и тем самым значительно снизить их амплитуду. Из рис. 5,а видно, что при отсутствии эксцентриситета пульсации электромагнитного момента практически отсутствуют. В случае же появления эксцентриситета  $\varepsilon=0,8$  амплитуды зубцовых гармоник значительно возрастают, поскольку возникает магнитная несимметрия, вызывающая нескомпенсированные гармоники проводимости (зубцовые гармоники).

При использовании зубцовых дробных обмоток  $q < 1$  число зубцов статора соизмеримо с числом по-

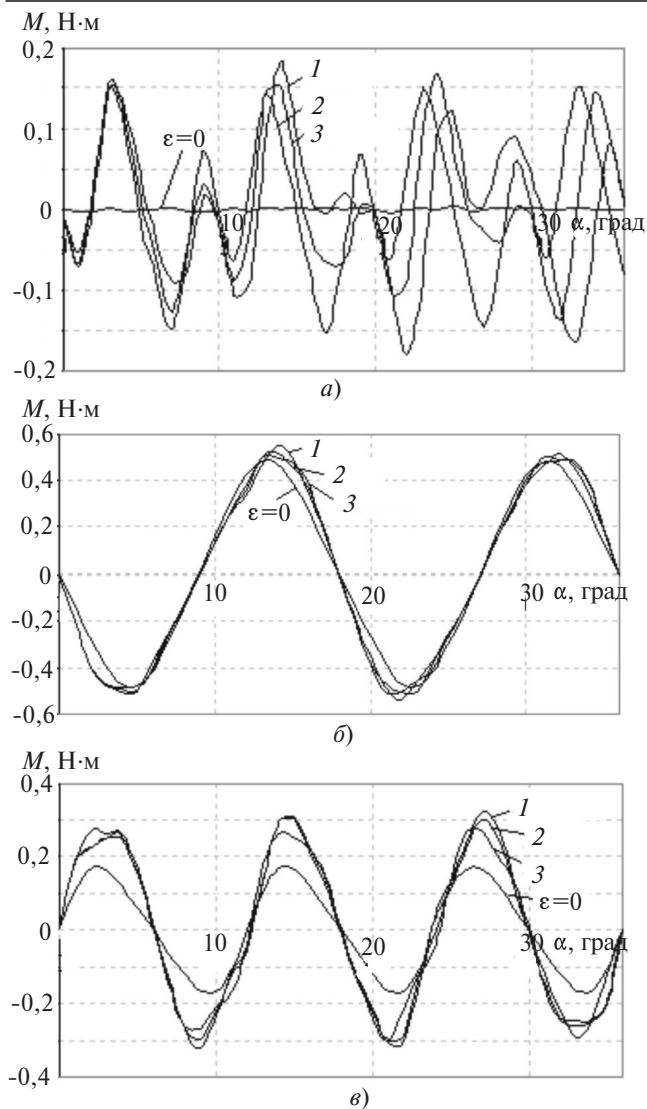


Рис. 5. Кривая момента СМПМ в режиме холостого хода при различном эксцентриситете и  $q$ : а)  $Z_1=36 (q>1)$ ; б)  $Z_1=20 (q<1)$ ; в)  $Z_1=30 (q=1)$

люсов машины, поэтому вероятность возникновения зубцовых пульсаций момента достаточно высока. Таким образом, как видно из рис. 5, б, машина с  $q<1$  без эксцентриситета имеет амплитуду пульсации момента примерно 0,5 Н·м. Возможный эксцентриситет в подобной машине практически не приводит к изменению амплитуды пульсации момента. Стоит также отметить и несущественное различие кривых пульсаций при различных видах эксцентриситета.

В случае использования в конструкции СМПМ обмотки с целым  $q$  амплитуда пульсаций также имеет ненулевое значение без эксцентриситета, что обусловлено действием зубцовых гармоник (рис. 5, в). Однако в этом случае при различных значениях  $\epsilon$  амплитуда пульсаций изменяется на 45%.

Отметим также, что максимальная амплитуда пульсаций как в нормальном состоянии, так и при наличии эксцентриситета наблюдается в случае

$q<1$ . Для устранения этих пульсаций необходимы специальные конструктивные меры [5].

**Момент СМПМ при эксцентриситете в режиме нагрузки.** Для рассмотрения режима нагрузки необходимо задать плотность тока в обмотках, соответствующую номинальному току фазы:

$$J = \frac{\sqrt{2} I_{\Phi} w_n}{S_n},$$

где  $I_{\Phi}$  — действующее значение тока в фазе;  $w_n$  — число витков;  $S_n$  — площадь паза статора.

Поскольку рассматривается магнитостатическая задача, токи фаз имеют мгновенные значения и являются гармоническими функциями:

$$i_A = i_m \sin \omega t; \quad i_B = i_m \sin \left( \omega t - \frac{2}{3} \pi \right); \quad i_C = i_m \sin \left( \omega t + \frac{2}{3} \pi \right).$$

При различных значениях  $q$ , как и в режиме холостого хода, форма и площадь пазов статора остаются постоянными. Для адекватности сравнения обеспечивается постоянство МДС различных фаз.

Для того чтобы согласовать результирующее поле, созданное обмоткой статора, и поле постоянных магнитов, необходимо выполнить предварительный поворот ротора относительно центра симметрии СМПМ при фиксированных значениях плотности тока в пазах статора (в момент времени, при котором ток в одной из фаз имеет максимальное значение) на расстояние, равное значению двойной полюсной дуги. Из всех полученных значений выбираем угловую координату максимального значения момента, которая является начальной точкой вращения электрической машины.

Совмещая пространственную ось с одной из осей фаз, к примеру с осью фазы  $A$ , пульсирующую основную гармонику можно представить функцией двух аргументов — времени и пространственной координаты [15]:

$$F_A = I_m \sin \omega t \cos \frac{\pi}{\tau} x.$$

При изменении тока в обмотках фаз во времени результирующее поле перемещается на электрический угол  $\alpha$ , соответствующий повороту ротора на геометрический угол  $p\alpha$ :  $\omega t = p\alpha$ . Таким образом, для моделирования вращения ротора в магнитостатической задаче необходимо при повороте ротора изменять токи по гармонической функции от аргумента  $p\alpha$ .

Результаты расчета электромагнитного момента при различных видах эксцентриситета представлены на рис. 6. Рассматривается условие  $q$  — целое число, поскольку для данного случая амплитуда момента наиболее вариативна. Ненулевые значения пульсаций при  $\epsilon=0$ , как было показано в [16],

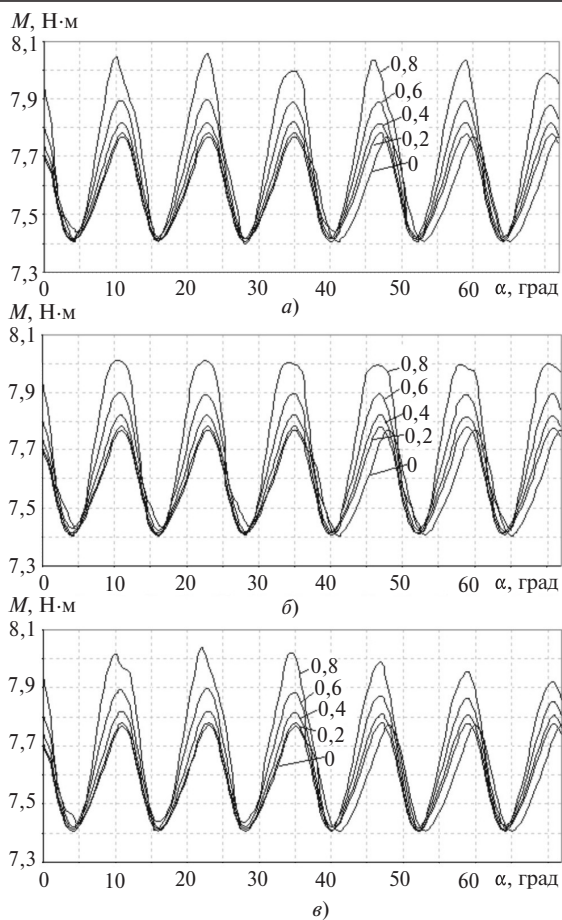


Рис. 6. Кривые момента СДПМ с  $q=1$  в режиме нагрузки при различных значениях эксцентриситета: *а* – статический; *б* – динамический; *в* – смешанный

обусловлены взаимодействием гармоник МДС постоянных магнитов с высшими гармониками статора аналогичного порядка. Из рис. 6 видно, что амплитуда пульсаций при различных видах эксцентриситета различается лишь при значении  $\varepsilon=0,8$ . В случае возникновения статического эксцентриситета наибольшее влияние оказывают зубцовые гармоники, увеличивающие амплитуду пульсаций.

Полученная авторами зависимость амплитуды момента от значения  $\varepsilon$  показала, что, как и было отмечено ранее, амплитуды момента при различных видах эксцентриситета различаются для значения  $\varepsilon=0,8$  на  $0,05$  Н·м.

**Выводы.** 1. Наиболее высокие значения амплитуды пульсации электромагнитного момента при одинаковой форме пазов возникают в синхронных машинах с постоянными магнитами в случае использования целого  $q$ . У машин с  $q>1$  значения амплитуды пульсации меньше, чем машин с  $q<1$ , благодаря высоким значениям порядка зубцовых гармоник.

2. При проектировании малозумной синхронной машины с постоянными магнитами следует использовать  $q>1$ . В случае возникновения эксцентриситета  $\varepsilon=0,8$  в машинах с таким значением  $q$  амплитуда пульсаций составляет не более 30% аналогичного показателя для машин с  $q<1$ .

3. Амплитуды пульсаций электромагнитного момента в случаях статического и динамического эксцентриситетов отличаются менее чем на 3%. В случае динамического эксцентриситета большее влияние на пульсации момента оказывают зубцовые гармоники.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шевченко А.Ф. Многополюсные синхронные машины с дробными  $q>1$  зубцовыми обмотками с возбуждением от постоянных магнитов. – Электротехника, 2007, № 9, с. 3–8.
2. Коробков Ю.С. Обмотки электрических машин переменного тока с целым и дробным числом пазов на полюс и фазу: Учебное пос. по курсам «Электрические машины», «Проектирование электрических машин». М.: Изд-во МЭИ, 2016, 148 с.
3. Шевченко А.Ф., Честюнина Т.В. Анализ магнитодвижущих сил дробных зубцовых обмоток электрических машин. – Электротехника, 2009, № 12, с. 3–7.
4. Gomez I., Zarate S., Almandoz G., Poza J., Ugalde G., Escalada A.J. Analytical model to calculate magnetic flux density in permanent synchronous machines with static eccentricity. – 2016 XXII Intern. Conf. on Electrical Machines (ICEM), pp. 152–158.
5. Приступ А.Г., Топорков Д.М. Исследование способов уменьшения пульсаций момента в магнитоэлектрических синхронных машинах с дробными зубцовыми обмотками. – Изв. вузов. Электромеханика, 2013, № 6, с. 14–17.
6. Исмагилов Ф.Р., Хайруллин И.Х., Вавилов В.Е. Влияние неравномерности воздушного зазора на ЭДС синхронного генератора переменного тока. – Электрические и информационные комплексы и системы, 2013, т. 9 № 4, с. 54–60.
7. Пальцева В.В., Кручинина И.Ю., Любимцев А.С., Хозиков Ю.Ф. Влияние эксцентриситета ротора на искажение электромагнитного поля и распределение потерь в синхронной машине с постоянными магнитами. Современные материалы для энергетики. – СПб: ИХС РАН, с. 177–179.
8. Пальцева В.В., Кручинина И.Ю., Хозиков Ю.Ф. Численные исследования влияния эксцентриситета на распределение тепловых потерь в элементах конструкции ротора (материалы научной конф.). – СПб: ИХС РАН, 2016 с. 162–165.
9. Goktas T., Zafarani M., Akin B. Discernment of broken magnet and static Eccentricity faults in permanent magnet synchronous motors. – IEEE transactions on energy conversion, 2016, pp. 1–10.
10. Song J.Y., Kang K. J., Kang C.H., Jang G.H. Unbalanced magnetic pull due to simultaneous existence of static and dynamic eccentricities and uneven magnetization in permanent magnet motors. – APMRC, 2016.
11. Abdelli R., Bouzida A., Touhani O., Ouadah M. Static eccentricity fault modeling in permanent- magnet synchronous motors. – ICMIC, 2016, pp. 364–368.
12. Mahmoud H., Bianchi N. Comparison between synchronous machines with eccentricity: reluctance and permanent magnets, 2016, pp. 394–400.
13. Шубов И.Г. Шум и вибрация электрических машин. Л.: Энергия, 1973, 200 с.
14. FEMM: [Официальный сайт] <http://www.femm.info> (дата обращения 13.11.2018)
15. Беспалов В.Я., Котеленец Н.Ф. Электрические машины: Учебное пос. для вузов. М.: Изд. центр «Академия», 2006, 320 с.
16. Беспалов В.Я., Коварский М.Е., Сидоров А.О. Исследование пульсаций электромагнитного момента синхронных машин с постоянными магнитами с целым и дробным  $q$ . – Электричество, 2018, № 5 с. 45–51.

[03.05.2018]

А в т о р ы: **Беспалов Виктор Яковлевич** окончил Московский энергетический институт (МЭИ – ныне «Национальный исследовательский университет «МЭИ» – «НИУ «МЭИ») в 1960 г. защитил докторскую диссертацию «Асинхронные машины для динамических режимов работы». Профессор «НИУ «МЭИ».

**Коварский Михаил Ефимович** окончил МЭИ в 1972 г. В 1985 г. защитил кандидатскую диссертацию «Электродинамические процессы в сверхпроводниковых электрических машинах». Главный конструктор регулируемых электроприводов для ВМФ АО «Корпорация «ВНИИЭМ».

**Сидоров Антон Олегович** окончил МЭИ в 2015 г. Инженер НПЦ КЭ (4) АО «Корпорация «ВНИИЭМ».

Аспирант кафедры «Электромеханики, электрических и электронных аппаратов» «НИУ «МЭИ».

**Иванов Александр Сергеевич** окончил МЭИ в 2009 г. В 2012 г. защитил кандидатскую диссертацию «Разработка системы рекуперации энергии на базе асинхронного генератора». Доцент кафедры электромеханики, электрических и электронных аппаратов «НИУ «МЭИ».

*Elektrichestvo*, 2018, No. 12, pp. 34–40

DOI:10.24160/0013-5380-2018-12-34-40

## The Eccentricity of a Permanent Magnet Synchronous Machine Rotor

**BESPALOV Viktor Ya.** (National Research University «Moscow Power Engineering Institute» – NRU «MPEI», Moscow, Russia) – Professor, Dr. Sci. (Eng.)

**KOVARSKY Mikhail Ye.** (JSC «Corporation «VNIEM», Moscow, Russia) – Chief Designer, Cand. Sci. (Eng.)

**SIDOROV Anton O.** «Corporation «VNIEM», Moscow, Russia) – Engineer, Ph.D. Student of NRU «MPEI»

**IVANOV Aleksander S.** (NRU «MPEI», Moscow, Russia) – Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

The article presents the results from studying the eccentricity in permanent magnet synchronous machines having different numbers of slots per pole and phase ( $q$ ). The advantages and drawbacks of using winding arrangements with different values of  $q$  are shown. An expression describing the physical processes of interaction between spatial induction harmonic components in the air gap under eccentricity conditions is analytically obtained. The electromagnetic torque pulsations arising with different kinds of eccentricity—static, dynamic, and mixed—are determined with the aid of field models and using the Maxwell magnetic tension forces. Differences between the obtained characteristics are pointed out. A procedure for calculating the electromagnetic torque pulsations in the no-load and on-load operation modes using the FEMM finite-element computer program is presented. Recommendations on selecting the  $q$  value for reducing the negative effect of different eccentricity kinds are given.

**Key words:** synchronous machine, permanent magnets, eccentricity, torque pulsations, fractional value of  $q$

### REFERENCES

1. Shevchenko A.F. *Elektrotehnika – in Russ. (Electrical Engineering)*, 2007, No. 9, pp. 3–8.
2. Korobkov Yu.S. *Obmotki elektricheskikh mashin peremennogo toka s tselym i drobnym chislom pазov na polyus i fazu: Uchebnoe pos. po kursam «Elektricheskiye mashiny», «Proektirovaniye elektricheskikh mashin»* (Windings of AC Electrical Machines with a Fractional Number of Slots per Pole and Phase: A Handbook for the Education Disciplines «Electrical Machines» and «Designing of Electrical Machines»). Moscow, Publ. of Moscow Power Engineering Institute, 2016, 148 p.
3. Shevchenko A.F., Chestyunina T.V. *Elektrotehnika – in Russ. (Electrical Engineering)*, 2009, No. 12, pp. 3–7.
4. Gomez I., Zarate S., Almandoz G., Poza J., Ugalde G., Escalada A.J., Analytical model to calculate magnetic flux density in permanent synchronous machines with static eccentricity. – 2016 XXII Intern. Conf. on Electrical Machines (ICEM), pp. 152–158.
5. Pristup A.G., Toporkov D.M. *Izv. Vuzov. Elektromekhanika – in Russ. (News of higher education institutions. Electromechanics)*, 2013, No. 6, pp. 14–17.
6. Ismagilov F.R., Khairullin I.Kh., Vavilov V.Ye. *Elektricheskiye i informatsionnyye kompleksy i sistemy – in Russ. (Electric and Information Complexes and Systems)*, 2013, vol. 9 No. 4, pp. 54–60.
7. Pal'tseva V.V., Kruchinina I.Yu., Lyubimtsev A.S., Khozikov Yu.F. *Vliyaniye eksstrentsiteti rotora na iskazheniye elektromagnitnogo polya i raspredeleniye poter' v sinkhronnoi mashine s postoyannymi magnitami. Sovremennyye materialy dlya energetiki* (The Effect of Rotor Eccentricity on the Electromagnetic Field Distortion and on the Distribution of Losses in a Permanent Magnet Electrical Machine. Modern Materials for Power Engineering). St. Petersburg, IKhS RAN, pp. 177–179.
8. Pal'tseva V.V., Kruchinina I.Yu., Khozikov Yu.F. *Chislennyye issledovaniya vliyaniya ekstrentsiteti na raspredeleniye teplovykh poter' v elementakh konstruksii rotora (materialy nauchnoi konf.)* (Numerical investigations into the effect of eccentricity on the heat loss distribution in rotor structural elements (in proceedings of a scientific conference). – St. Petersburg, IkhS RAN, 2016, pp. 162–165.
9. Goktas T., Zafarani M., Akin B. Discernment of broken magnet and static Eccentricity faults in permanent magnet synchronous motors. – IEEE transactions on energy conversion, 2016, pp. 1–10.
10. Song J.Y., Kang K. J., Kang C.H., Jang G.H. Unbalanced magnetic pull due to simultaneous existence of static and dynamic eccentricities and uneven magnetization in permanent magnet motors. – APMRC, 2016.
11. Abdelli R., Bouzida A., Touhani O., Ouadah M. Static eccentricity fault modeling in permanent- magnet synchronous motors. – ICMIC, 2016, pp. 364–368.
12. Mahmoud H., Bianchi N. Comparison between synchronous machines with eccentricity: reluctance and permanent magnets, 2016, pp. 394–400.
13. Shubov I.G. *Shum i vibratsiya elektricheskikh mashin* (Noise and vibration of electric cars). Leningrad, Energiya, 1973, 200 p.
14. FEMM: [Ofits. sait] <http://www.femm.info> (Data Obrashcheniya 13.11.2018)
15. Bepalov V.Ya., Kotelenets N.F. *Elektricheskiye mashiny: Uchebnoe pos. dlya vuzov* (Electric machines: Train aid for institutions of higher learning). Moscow, Publ. centre «Akademiya», 2006, 320 p.
16. Bepalov V.Ya., Kovarskii M.Ye., Sidorov A.O. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2018, No. 5, pp. 45–51.

[03.05.2018]