

Исследование пульсаций электромагнитного момента синхронных машин с постоянными магнитами с целым и дробным значениями q

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

Рассматривается синхронная машина с постоянными магнитами при различных значениях числа пазов на полюс и фазу, рассчитывается электромагнитный момент машины в режимах холостого хода и нагрузки. Сравниваются пульсации электромагнитного момента в случаях целого и дробного значения числа пазов на полюс и фазу при изменении чисел пазов статора и полюсов и сохранении формы пазов и геометрических размеров электрической машины. В режиме холостого хода пульсации момента обусловлены взаимодействием МДС магнитов и проводимости воздушного зазора. В режиме нагрузки пульсации электромагнитного момента обусловлены взаимодействием высших гармоник. При этом в гармоническом ряду дробного q содержится меньше составляющих, поэтому эффект пульсаций практически не проявляется. При выборе значений q для уменьшения пульсаций электромагнитного момента предпочтительным является использование его дробного значения. При применении зубцовой обмотки ($q < 1$) в некоторых случаях могут возникать повышенные значения амплитуды пульсации момента. Для их устранения необходимо предусматривать изменения: ширины раскрытия паза, коэффициента полюсного перекрытия, размера воздушного зазора и др.

К л ю ч е в ы е с л о в а: синхронная машина с постоянными магнитами, значение числа пазов на полюс и фазу, пульсации электромагнитного момента, режим холостого хода, режим нагрузки

Использованию синхронных машин с постоянными магнитами (СМПМ) в регулируемом электроприводе во многом способствует применение в конструкции магнитной системы индуктора машины редкоземельных магнитов, обладающих высокой удельной электромагнитной энергией. Это позволяет сократить габариты электрической машины и электропривода в целом, а также исключить потери на возбуждение. Успешным оказалось также использование СМПМ в области маломощного электропривода. Отсутствие зубчатости индуктора и малый состав высших гармоник МДС магнитов позволили значительно уменьшить электромагнитные источники шума и вибрации.

В конструкции СМПМ находит применение обмотка с дробным числом пазов на полюс и фазу q . Изначально использование таких обмоток в крупных тихоходных синхронных машинах с электромагнитным возбуждением позволило уменьшить их габариты за счет создания многополюсного поля при ограниченном числе зубцов статора [1]. В машинах малой и средней мощности дробное значение q позволило существенно уменьшить амплитуды зубцовых гармоник, значительно увеличив их порядок [2].

Недостаток использования подобных обмоток – возникновение электромагнитных колебаний низкого порядка, что может негативно сказаться на виброакустических показателях машины. Во мно-

гом из-за этого вопрос использования дробного q до сих пор является дискуссионным. Множество работ по исследованию свойств и характеристик электрических машин с дробным q (зубцовые дробные обмотки с $q < 1$) принадлежит коллективу кафедры электромеханики Новосибирского электротехнического института (НЭТИ) [3, 4]. Особенность конструкции подобных машин в том, что число пазов статора незначительно отличается от числа полюсов ротора (обычно на 2–4 полюса). При этом, поскольку длина лобовых частей такой обмотки приблизительно равна зубцовому делению, применение зубцовых дробных обмоток позволяет сократить расход меди, вследствие чего повышается КПД машины. Однако в области маломощного электропривода находят применение конструкции синхронных машин с постоянными магнитами, в которых число пазов существенно превышает число полюсов, а значение $q > 1$ [5]. При этом вопрос уменьшения электромагнитных источников вибровозмущающих сил выходит на первый план.

Работ, в которых сравнивались бы электрические машины с целым и дробным значениями q , практически не встречается. В [6] проводится сравнение моментов (электромагнитного и реактивного) вентильных электрических машин с целым и дробным q . Однако исследования проводились лишь для двух значений q , а влияние конструктивных параметров не рассматривалось.

Целью настоящей работы является исследование пульсаций электромагнитного момента синхронной машины с постоянными магнитами в случаях целого и дробного q , сравнение данного показателя в различных режимах работы. Зубцовые пульсации момента возникают в электрической машине вследствие взаимодействия гармоник МДС магнитов и гармоник проводимости воздушного зазора. Такой эффект могут вызвать так называемые «залипания» электрической машины при отсутствии тока в обмотке статора. Кроме того, в СПМП возможно также возникновение пульсаций электромагнитного момента при взаимодействии гармоник МДС статора и ротора, вызывающие дополнительные потери, а также являющиеся источником повышенного шума и вибрации.

Метод исследования и расчетная модель. При анализе электромагнитного поля электрической машины широкое распространение получили численные методы, которые позволяют с высокой степенью точности рассчитывать полную модель электрической машины с минимальным числом допущений. Этому способствует развитие вычислительных систем, предоставляющих возможность проводить множество итераций вычисления искомых величин за короткое время. Основным методом расчета выбран метод конечных элементов с использованием энергетического функционала для решения вариационной задачи.

Среди множества программ по расчетам электромагнитного поля электрических машин выделим программу FEMM, которая при малых ресурсных и временных затратах позволяет рассчитывать двумерные (плоскопараллельные и осесимметричные) стационарные электромагнитные поля методом конечных элементов и находится в свободном доступе в сети Internet [7]. Помимо указанных преимуществ в программе FEMM существует возможность автоматизации процессов построения и расчетов модели посредством встроенного языка программирования lua. Таким образом, с помощью программы можно непрерывно рассчитывать целую группу электромагнитных полей при изменении геометрии, материалов и угловых положений ротора.

В качестве объекта исследования рассматривается специально спроектированная СМПП, прототипом которой является асинхронный двигатель АДА71В6 [8]. Ротор выполнен по типу «звездочка» с поверхностной установкой постоянных магнитов. Подобная конструкция индуктора является одной из наиболее простых и позволяет снизить потоки рассеяния магнитов. Номинальные и конструктивные данные СМПП следующие

номинальная мощность, Вт	600
число полюсов	10
ток, А	1,6

частота, Гц	50
внешний диаметр статора, мм	117
внутренний диаметр статора, мм	78
внешний диаметр ротора, мм	72
диаметр вала, мм	25
число пазов статора	36
число фаз	3
длина пакета статора/ротора, мм	90

Моделирование электромагнитных полей выполнено в программе FEMM. На рис. 1 представлено поперечное сечение рассматриваемой СМПП. На внешней границе расчетной модели заданы граничные условия Дирихле. Нелинейность магнитных свойств учитывается заданием кривой зависимости индукции от напряженности. В данном случае в качестве материала магнитопровода использовалась электротехническая сталь 2412.

Исходя из определения

$$q = \frac{Z_1}{2pt}, \quad (1)$$

где Z_1 – число пазов статора; p – число полюсов; t – число фаз, следует, что сравнение трехфазных машин с различным q при одинаковых габаритных размерах и с неизменной формой пазов статора можно провести двумя способами: либо варьированием числа пазов на статоре, либо изменением числа полюсов электрической машины. Базовый вариант СМПП содержит 36 пазов, т.е. $q=6/5$. При изменении числа пазов статора можно рассматривать лишь один вариант электрической машины с целым q , поскольку увеличение числа пазов приведет к насыщению зубцов статора. Поэтому рассмотрен также и вариант с изменением числа полюсов ротора.

Результаты исследований влияния скоса пазов на размер пульсаций момента показал, что при выполнении скоса пазов ротора на одно зубцовое деление (оптимальное значение) амплитуда пульсаций момента уменьшается более чем на 50%, одна-

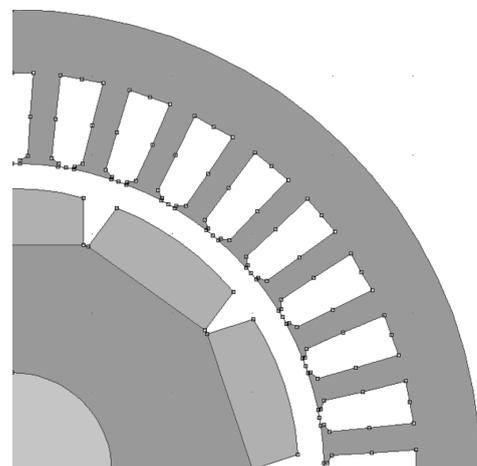


Рис. 1. Поперечное сечение СМПП

ко их уровни остаются значительными [6]. Поэтому скос пазов здесь не рассматривается.

Момент СМПМ рассчитывается с помощью максвелловских сил магнитного натяжения:

$$\bar{M} = \oint \bar{r} \bar{T}_n |iS; \tag{2}$$

$$T_n = \frac{\bar{B} B_n - 0,5 B^2 \bar{n}}{\mu \mu_0}, \tag{3}$$

где \bar{r} – радиус-вектор рассматриваемой точки; \bar{T}_n – тензор натяжений; S – площадь поверхности действия \bar{T}_n ; \bar{B} – вектор индукции в рассматриваемой точке поля; B_n – нормальная составляющая индукции; \bar{n} – нормальный орт к стороне поверхности действия T_n ; μ – относительная магнитная проницаемость среды; μ_0 – магнитная проницаемость воздуха.

Для моделирования вращения ротора и последующего расчета пульсаций момента СМПМ были созданы скрипты на языке программирования lua (см. приложение), которые позволили осуществить дискретный поворот ротора и при этом в случае необходимости изменять свойства электрической машины.

Холостой ход. В режиме холостого хода пульсации момента обусловлены взаимодействием гармоник МДС магнитов и гармоник переменной магнитной проводимости вследствие зубчатости статора. Для представления данного режима зададимся нулевыми значениями тока в обмотке статора.

Аналитически зависимость электромагнитного момента от углового положения ротора можно представить выражением [9]:

$$M(\alpha) = \frac{\pi l_\delta R_\delta p}{2} \left[\sum_{v=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} k F_{mk}^2 \Lambda_{mv} \sin v z_1 \alpha + 2 \sum_{v=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{l=1}^{\infty} k F_{mk} F_{ml} \Lambda_{mv} \sin v z_1 \alpha \right]. \tag{4}$$

В (4) нем первое слагаемое обусловлено взаимодействием отдельных гармоник МДС и проводимости воздушного зазора. Вторая составляющая появляется при взаимодействии гармоник проводимости воздушного зазора с комбинационными гармониками МДС магнитов. Эти слагаемые не равны нулю при выполнении условий:

для первого слагаемого

$$\frac{k}{v} = \frac{z_1}{2p}; \tag{5}$$

для второго слагаемого

$$\frac{(k \pm l)}{v} = \frac{z_1}{2p}. \tag{6}$$

На рис. 2 представлены результаты расчетов электромагнитного момента СМПМ в режиме холостого хода для различных значений Z_1 при сохранении формы пазов и геометрических размеров электрической машины. Частота дискретизации положения ротора составила 1° . Максимальный рассматриваемый угол поворота ротора принят равным значению двойного полюсного деления и составил 72° . Отметим, что при определенных значениях q пульсации момента имеют достаточно высокие амплитуды, при других значениях пульсаций практически не наблюдается.

Для анализа и наглядного представления разницы величин пульсаций СМПМ при различных q представим результаты расчета момента в зависимости от числа зубцов статора (рис. 3). Как видно из рисунка, пиковые значения момента наблюдаются для $Z_1 = 10, 20, 30$. При остальных значениях Z_1 момент практически отсутствует. Таким образом, существенные значения момента возникают при

$$Z_1 v = 2pk, \tag{7}$$

т.е. в конкретных случаях гармоник МДС магнитов взаимодействуют с зубцовыми гармониками статора, порядок которых равен $Z_1 v$. При этом во всех случаях, соответствующих выражению (7),

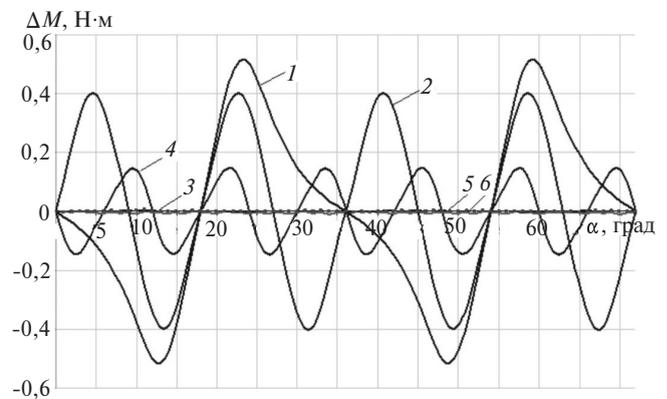


Рис. 2. Пульсации электромагнитного момента при холостом ходе: 1 – $Z_1 = 10(1/3)$; 2 – $Z_1 = 20(2/3)$; 3 – $Z_1 = 28(14/15)$; 4 – $Z_1 = 30(1)$; 5 – $Z_1 = 32(16/150)$; 6 – $Z_1 = 36(6/50)$

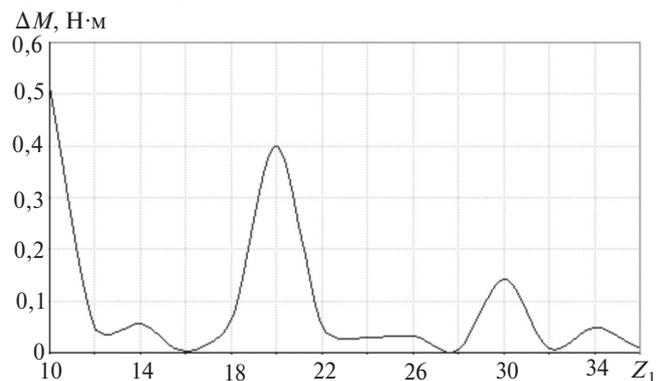


Рис. 3. Электромагнитный момент при холостом ходе

имеет место дробное значение q . Отметим, что при сравнении выражений (1) и (7) в случае $q > 1$ пульсации момента всегда будут приобретать минимальные значения, действительно:

$$Z_1 = 2mq = 2mk \neq Z_1 \text{ вт.} \quad (8)$$

Аналогичный результат получается и при варьировании числа полюсов при неизменном числе пазов статора. Для проведения эксперимента по определению пульсации момента при изменении числа полюсов СМППМ в качестве критерия подобия возьмем значение полюсной дуги τ . Во всех рассматриваемых вариантах $\tau = 0,81$.

В табл. 1 дан набор рассматриваемых значений q и представлены соответствующие им пульсации электромагнитного момента. Размер пульсаций оценивался по амплитудному значению ΔM . Зачеркнутые цифры соответствуют вариантам использования несимметричной обмотки и в рамках данной работы не рассматриваются.

При возрастании числа полюсов амплитуда пульсаций момента увеличивается, поскольку число полюсов становится все более соизмеримым с числом зубцов статора, т.е. порядок гармоник МДС приближается к порядкам зубцовых гармоник проводимости воздушного зазора. Выделенные в табл. 1 значения, соответствующие целым q , имеют сравнительно большие значения в сравнении со случаями дробного q , что подтверждает выводы, полученные для вариантов при $2p = 10$. Исключением является лишь вариант СМППМ с $2p = 2$, в котором амплитуды пульсаций имеют низкие значения из-за значительной разницы числа полюсов и пазов и, как следствие, порядков взаимодействующих гармоник.

Таким образом, можно подобрать определенные соотношения чисел пазов статора и полюсов на роторе (что в случае трехфазной обмотки будет соответствовать определенному значению q), изменив тем самым состав взаимодействующих гармоник МДС и проводимости воздушного зазора.

Режим нагрузки. В режиме нагрузки обмотка статора подключается к источнику питания с частотой 50 Гц, при этом в обмотке – номинальное

значение тока. Для моделирования данного процесса зададимся плотностью тока в пазу:

$$J = \frac{\sqrt{2} I_{\phi} w_{\Pi}}{S_{\Pi}}, \quad (9)$$

где I_{ϕ} – ток в фазе; w_{Π} – число витков в пазу; S_{Π} – площадь паза статора.

Трехфазная система токов обмотки:

$$\begin{aligned} i_A &= i_m \sin \omega t; \\ i_B &= i_m \sin \left(\omega t - \frac{2}{3} \pi \right); \\ i_C &= i_m \sin \left(\omega t + \frac{2}{3} \pi \right). \end{aligned} \quad (10)$$

В этом случае сделано предположение, что система питания СМППМ симметрична, а действием временных гармоник можно пренебречь.

Для согласования результирующей МДС и положения ротора предварительно выполним поворот при максимальном значении одной из фаз, например $i_A = I_m$, $i_B = I_m/2$, $i_C = I_m/2$. Таким образом находим первоначальное положение ротора. Электромагнитный момент также вычисляется непрерывно при различных положениях ротора с помощью скрипта lua.

Рассмотрим числа пазов на полюс и фазу симметричных обмоток трехфазного тока с заполнением всех пазов. Такому критерию для числа пар полюсов $p = 5$ соответствуют значения $Z_1 = 18, 24, 30, 36$ [2]. Выполнить большие значения числа пазов не представляется возможным из-за технологических трудностей изготовления зубцов и их насыщения в процессе работы машины в номинальном режиме.

Сравнение пульсаций электромагнитного момента для двух моделей оценивалось с помощью коэффициента пульсаций:

$$K_{\Pi} = \frac{M_{\max} - M_{\min}}{2M_{\text{ср}}},$$

где M_{\max} и M_{\min} – максимальное и минимальное значения пульсаций электромагнитного момента;

Таблица 1

$2p$	$Z_1 = 18$		$Z_1 = 24$		$Z_1 = 30$		$Z_1 = 36$	
	q	ΔM	q	ΔM	q	ΔM	q	ΔM
2	3	0,027	4	0,055	5	0,026	6	0,029
4	3/2	0,056	2	0,138	5/2	0,035	3	0,072
6	1	0,222	4/3	0,055	5/3	0,216	2	0,148
8	3/4	0,072	1	0,196	5/4	0,045	3/2	0,07
10	3/5	0,084	4/5	0,029	1	0,146	6/5	0,014

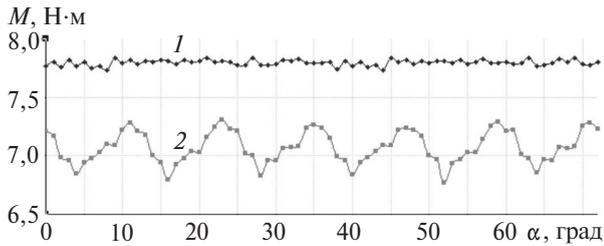


Рис. 4. Пульсации электромагнитного момента при нагрузке: 1 – $q = 6/5$; 2 – $q = 1$

$M_{ср}$ – среднее значение электромагнитного момента.

Результаты расчетов электромагнитного момента при различном q представлены на рис. 4. Как видно из рисунка, СПМП с целым q создает пульсации электромагнитного момента, амплитуда которых превышает 5%. Причину возникновения этих пульсаций можно найти, разложив кривую индукции в воздушном зазоре в гармонический ряд Фурье (рис. 5).

Как видно из рис. 4, машина с целым значением q создает множество гармоник нечетного порядка в отличие от случаев дробного q , ряды которых содержат лишь составляющие зубцового порядка, а также третью гармонику, которая устраняется соединением обмотки статора по схеме «звезда».

При рассмотрении рис. 4 можно заметить, что на двойном полюсном делении содержится 6 периодов пульсаций. При этом в гармоническом ряду индукции в случае целого q присутствуют составляющие 5-й и 7-й гармоник. Гармоники МДС магнитов содержат 5-ю гармонику, которая при взаимодействии с гармониками того же порядка статора создает дополнительный момент; он и является преобладающим в пульсациях.

В табл. 2 приведены значения коэффициента пульсаций при изменении числа пазов статора и числа полюсов для симметричных обмоток. Для случаев $2p=6$ при $Z_1=24$, $Z_1=30$ выполнить симметричную обмотку не удается, поскольку одним из условий симметрии обмотки является отношение d/m – дробное число, где d – знаменатель q ; m – число фаз.

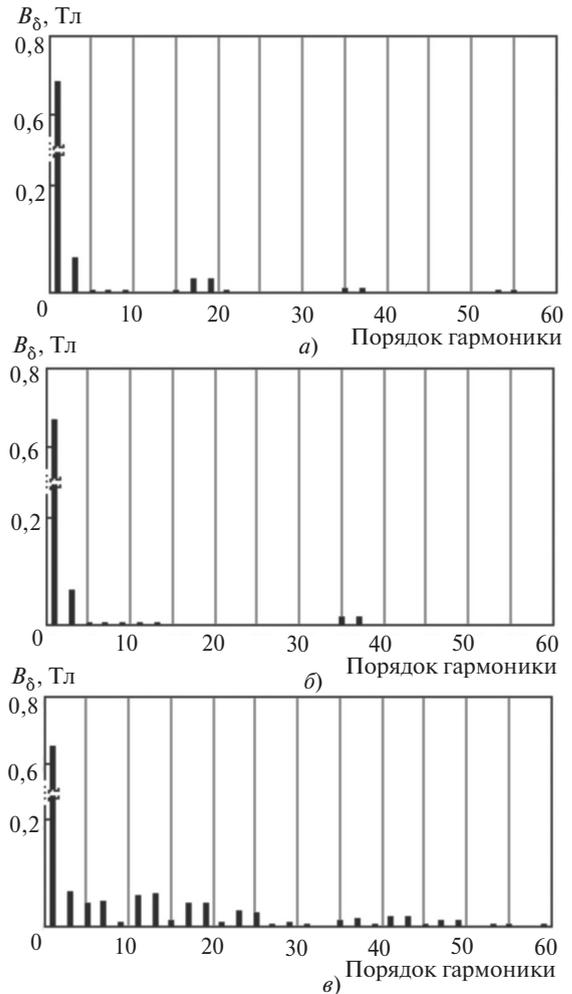


Рис. 5. Гармоники индукции в воздушном зазоре СПМП: а – $q = 3/5$; б – $q = 6/5$; в – $q = 1$

Из табл. 2 видно, что при дробном q для всех случаев $K_{п}$ не превышает 2, при том что для целого q минимальное значение $K_{п}$ составляет 2,17. Таким образом, с точки зрения уменьшения пульсаций электромагнитного момента предпочтительным является использование дробного q .

Отметим также, что в режиме холостого хода, как и в режиме нагрузки, амплитуда пульсаций электромагнитного момента больше для случая $q < 1$. В случае $q > 1$ с ростом q происходит возрастание амплитуды ΔM , а с ней и $K_{п}$.

Таблица 2

$2p$	$Z_1=18$		$Z_1=24$		$Z_1=30$		$Z_1=36$	
	q	$K_{п}$	q	$K_{п}$	q	$K_{п}$	q	$K_{п}$
2	3	2,31	4	3,2	5	3,45	6	4,38
4	3/2	1,35	2	1,98	5/2	1,98	3	2,28
6	1	4,04	–	–	–	–	2	2,17
8	3/4	0,86	1	3,21	5/4	0,63	3/2	0,67
10	3/5	1,36	4/5	0,87	1	3,8	6/5	0,77

Для уменьшения пульсаций момента в [10] предлагается увеличивать число пазов на статоре, т.е. на коронках зубцов выполнять специальные канавки, разделяющие коронку зубца на определенное число частей. Но, как видно из табл. 2, для определенного числа полюсов, например для $2p=10$, увеличение числа зубцов позволяет несколько сократить пульсации, не устраняя их полностью.

Приложение. Скрипты lua для вычисления пульсаций электромагнитного момента

– *Пульсации момента на холостом ходу*

showconsole()

print(«Начало вычислений»);

rotor = 1 – Группа элементов ротора

p = 5 – Число пар полюсов ротора

a = 0 – Начальный угол (при t=0)

a_step = 1 – Шаг (пр. градусов)

a_end = 72 – Конечный угол (пр. градусов)

while a <= a_end do – Начало цикла

mi_analyze(0) – Решаем задачу, открываем решение

showconsole()

mi_loadsolution()

mo_groupselectblock(1)

mo_blockintegral(22)

print(mo_blockintegral(22)) –Измеряем момент

mo_close()

mi_selectgroup(rotor) – Вращаем ротор

mi_moverotate(0,0,-a_step,4)

a = a + a_step

end – Конец цикла

print(«Конец вычислений»);

– *Пульсации момента в режиме нагрузки*

showconsole()

print(«Начало вычислений»);

rotor = 1 – Группа элементов ротора

p = 5 – Число пар полюсов ротора

a = 0 – Начальный угол (при t=0)

a_step = 1 – Шаг (пр. градусов)

a_end = 72 – Конечный угол (пр. градусов)

while a <= a_end do – Начало цикла

mi_analyze(0) – Решаем задачу, открываем решение

showconsole()

mi_loadsolution()

mo_groupselectblock(1)

mo_blockintegral(22)

print(mo_blockintegral(22)) –Измеряем момент

mo_close() – Вращаем ротор

mi_selectgroup(rotor)

mi_moverotate(0,0,-a_step,4)

mi_modifymaterial(«А»,4,3.8*sin(a*p+90)) – Меняем плотность тока в обмотке

mi_modifymaterial(«Х»,4,3.8*sin(a*p-90))

mi_modifymaterial(«В»,4,3.8*sin(a*p-30))

mi_modifymaterial(«Y»,4,3.8*sin(a*p+150))

mi_modifymaterial(«С»,4,3.8*sin(a*p+210))

mi_modifymaterial(«Z»,4,3.8*sin(a*p+30))

a = a + a_step – Конец цикла

end

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Копылов И.П.** Проектирование электрических машин. – М.: Энергия, 1980, 496 с.
2. **Жерве Г.К.** Обмотки электрических машин. – Л.: Энергоатомиздат, 1989, 400 с.
3. **Шевченко А.Ф.** Многополюсные синхронные машины с дробными $q < 1$ зубцовыми обмотками с возбуждением от постоянных магнитов. – Электротехника, 2007, № 9, с. 3–8.
4. **Шевченко А.Ф., Честюнина Т.В.** Анализ магнитодвижущих сил дробных зубцовых обмоток электрических машин. – Электротехника, 2009, № 12, с. 3–7.
5. **Магин В.В.** Особенности проектирования роторов малошумных синхронных двигателей с возбуждением от постоянных магнитов. – Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ, 2015, № 1, с. 3–15.
6. **Ганджа С.А., Согрин А.И., Киесш И.Е.** Исследование момента вентильных машин с целым и дробным числом пазов на полюс и фазу. – Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике, 2015, т. 1, с. 105–111.
7. **Буль О.Б.** Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов: Магнитные цепи, поля и программа FEMM. – М.: Изд. Центр «Академия», 2005, 288 с.
8. **Жемчугов Г.А., Лопатин В.В., Коварский М.Е., Плещунов Н.Н., Самойлов С.Ф., Швецов Н.И.** Серия асинхронных двигателей АДА для приводов механизмов атомных электростанций. – Электротехника, 2001, № 7, с. 6–8.
9. **Топорков Д.М.** Зубцовые пульсации момента в машинах с дробными обмотками и возбуждением от постоянных магнитов: Автореф. дисс.... канд. техн. наук. – Новосибирск: Новосибирский государственный университет, 2016, 20 с.
10. **Liu Y., Yin J., Gong B., Yang G.** Comparative analysis of cogging torque reduction methods of variable flux reluctance machines for electric vehicles/ ICEMS, 2017, pp. 1–6.

[14.02.2018]

А в т о р ы: Беспалов Виктор Яковлевич окончил Московский энергетический институт (МЭИ – ныне «Национальный исследовательский университет «МЭИ» – «НИУ «МЭИ»») в 1960 г. В 1992 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».

Studying the Electromagnetic Torque Pulsations in Permanent Magnet Synchronous Machines with Integer and Fractional q Numbers

BESPALOV Victor Y. (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. (JSC «Corporation «VNIEM», Moscow, Russia) – Engineer, Ph.D. Student of NRU «MPEI»

A permanent magnet synchronous machine with different numbers of slots per pole and phase is considered, and the machine electromagnetic torque is calculated in its idle and loaded operating modes. The electromagnetic torque pulsation levels are compared for a machine having an integer and a fractional number of slots per pole and phase for different numbers of the stator slots and poles with retaining the slot shape and the electrical machine geometrical sizes. The torque pulsations arising in the idle operation mode result from interaction between the permanent magnet MMF and the air gap permeance. In the loaded operation mode, the electromagnetic torque pulsations result from interaction of higher harmonic components. The harmonic series of a machine with a fractional q contains a fewer number of components, due to which the pulsations almost do not manifest themselves. In selecting the values of q for decreasing the electromagnetic torque pulsations, its fractional value is preferred. In case of using a tooth winding ($q < 1$), increased torque pulsation amplitudes may arise under certain conditions. To eliminate these pulsations, it is recommended to change the slot opening width, pole overlap ratio, air gap width, etc.

Key words: permanent magnet synchronous machine, number of slots per pole and phase, electromagnetic torque pulsations, idle operating mode, loaded operating mode

REFERENCES

1. **Kopylov I.P.** *Proyektirovaniye elektricheskikh mashin* (Designing electrical machines). Moscow, Publ. «Energiya», 1980, 496 p.
2. **Zherve G.K.** *Obmotki elektricheskikh mashin* (Windings of electrical machines). Leningrad, Energoatomizdat, 1989, 400 p.
3. **Shevchenko A.F.** *Elektrotekhnikha – in Russ. (Electrical Engineering)*, 2007, No. 9, pp. 3–8.
4. **Shevchenko A.F., Chestyunina T.V.** *Elektrotekhnikha – in Russ. (Electrical Engineering)*, 2009, No. 12, pp. 3–7.
5. **Magin V.V.** *Trudy VNIEM. Voprosy elektromekhaniki – in Russ. (Proc. of the VNIEM. Questions of electromechanics)*, 2015, No. 1, pp. 3–15.
6. **Gandzha S.A., Sogrin A.I., Kiyessh I.Ye.** *Avtomatizatsiya v elektroyenergetike i elektrotekhnikhe – in Russ. (Automation in Electric Power Engineering and Electrical Engineering)*, 2015, vol. 1, pp. 105–111.
7. **Bul' O.B.** *Metody rascheta magnitnykh sistem elektricheskikh apparatov. Magnitnye tsepi, polya i programma FEMM* (Methods of

calculation of magnetic systems of electric devices. Magnetic circuits, fields, and the program FEMM). Moscow, Publ. Centre «Akademiya», 2005, 288 p.

8. **Zhemchugov G.A., Lopatin V.V., Kovarskii M.Ye., Pleshchunov N.N., Samoilov S.F., Shvetsov N.I. Pleshchunov N.N., Samoilov S.F., Shvetsov N.I.** *Elektrotekhnikha – in Russ. (Electrical Engineering)*, 2001, No. 7, pp. 6–8.

9. **Toporkov D.M.** *Zubstovye pul'satsii momenta v mashinakh s drobnymi obmotkami i vzbuzhdeniyem ot postoyannykh magnitov: Avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk* (Gear moment pulsations in machines with fractional windings and excitation from permanent magnets: Authors abstract of Cand. Sci. (Eng.)). Novosibirsk State Technical University, 2016, 20 p.

10. **Liu Y., Yin J., Gong B., Yang G.** Comparative analysis of cogging torque reduction methods of variable flux reluctance machines for electric vehicles/ ICEMS, 2017, pp. 1–6.

[14.02.2018]