

ОПТИМАЛЬНАЯ КОНФИГУРАЦИЯ ОБМОТКИ СТАТОРА ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ ПУЛЬСАЦИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОМЕНТА

М. Б. Панасюк, В. В. Магин

Рассмотрены способы уменьшения пульсаций частоты вращения ротора и пульсаций электромагнитного момента за счет применения различных схем обмоток статора. Описаны способы уменьшения пульсаций электромагнитного момента, вызванных зубцовыми высшими гармоническими составляющими электромагнитного поля в зазоре электрической машины, с помощью применения обмоток статора с дробным числом пазов на полюс и фазу. Описан и проиллюстрирован способ уменьшения пульсаций электромагнитного момента низкого порядка за счет применения многофазных обмоток статора, состоящих из двух независимых трехфазных обмоток, соединенных в «звезду» и сдвинутых на 30 электрических градусов. Представлено расчетно-экспериментальное исследование оптимальной конфигурации обмотки статора, позволяющей значительно снизить пульсации электромагнитного момента в широком диапазоне частот, и дано ее описание.
Ключевые слова: электрические машины, снижение пульсаций момента, снижение пульсаций частоты вращения, многофазные обмотки статора, обмотки с дробным числом на полюс и фазу, оптимальная конфигурация обмотки статора.

Введение

В современном мире электрические машины (ЭМ) нашли широкое применение в различных сферах деятельности человека. При этом во многих сферах применения ЭМ требуются пониженные уровни пульсаций частоты вращения и электромагнитного момента, например, при применении в приводах высокоточных станков, в гидрогенераторах, в ветрогенераторах, в приводе электромобилей, а также многих других механизмах и устройствах.

Основной причиной пульсаций частоты вращения и электромагнитного момента является наличие высших гармонических составляющих (как пространственных, так и временных) в электромагнитном поле в зазоре ЭМ, вызванных несинусоидальным распределением магнитодвижущей силы (МДС) статора и ротора, зубчатой структурой статора, а также работой ЭМ совместно с преобразователем частоты (выпрямителем для генераторов и инвертором для двигателей), причем значительное влияние оказывают гармоники низкого (до 25) порядка [1].

Снижение пульсаций момента, вызванных зубцовыми гармониками

Одним из источников пульсаций электромагнитного момента являются зубцовые гармоники МДС.

Порядок зубцовых гармоник (v_{Z_MMF}) МДС в симметричной ненасыщенной магнитной системе определяется формулой [2]:

$$v_{Z_MMF} = kZ/p \pm 1 = 2mqk \pm 1, \quad (1)$$

где k – любое целое число; Z – число пазов; p – число пар полюсов; m – число фаз; q – число пазов на полюс и фазу.

Порядок зубцовых гармоник (v_{Z_T}) пульсаций электромагнитного момента определяется по аналогии с (1):

$$v_{Z_T} = kZ/p = 2mqk.$$

Например, для двигателя с $q = 2$ порядок зубцовых гармоник будет – 11, 13; 17, 19; 23, 25 и т. д., что соответствует 12-й, 18-й, 24-й и т. д. высшим гармоническим составляющим электромагнитного момента.

Уменьшение зубцовых гармонических составляющих пульсаций электромагнитного момента, в определенных случаях при ограничении внешнего габарита ЭМ, возможно за счет применения симметричной обмотки статора с дробным числом на полюс и фазу [3].

Дробное число пазов на полюс и фазу произвольного вида может быть описано в виде формулы:

$$q = b + c/d,$$

где q – число пазов на полюс и фазу; b – целочисленная часть; c – числитель дроби; d – знаменатель дроби.

Анализ обмоток с дробным числом пазов на полюс и фазу, приведенный в [4, 5], показывает, что применение обмоток с дробным числом на полюс и фазу с четным знаменателем дроби имеет в спектре МДС гармонические составляющие нечетного и четного целого порядка и гармонические составляющие дробного порядка (субгармоники). Применение обмоток с дробным числом пазов на полюс и фазу с нечетным знаменателем дроби позволяет исключить из спектра гармонические составляющие четного целого порядка. Таким образом, для уменьшения спектра гармонических со-

ставляющих в кривой МДС целесообразно выбирать дробное число пазов на полюс и фазу с нечетным знаменателем дробности, причем, как описано в указанной выше литературе, знаменатель дробности не должен быть кратен числу фаз обмотки статора.

Исходя из указанного выше, знаменатель дробности обмотки с дробным числом на полюс и фазу для увеличения порядка зубцовых гармонических составляющих определяется формулой:

$$d = 2mk \pm 1,$$

где m – число фаз; k – любое натуральное число.

Уменьшение амплитуды и увеличение порядка, а, следовательно, и частоты пульсаций электромагнитного момента достигается за счет того, что при определении порядка зубцовых гармонических составляющих для обмотки с дробным числом на полюс и фазу по (1) необходимо учитывать, что порядок зубцовых составляющих должен быть целым, для этого коэффициент k должен быть минимально равен знаменателю дробности числа пазов на полюс и фазу.

Применение обмотки с дробным числом на полюс и фазу позволяет значительно снизить амплитуду и увеличить порядок зубцовых гармонических составляющих электромагнитного момента, при условии ограничения внешнего габарита электрической машины.

Снижение пульсаций момента, вызванных несинусоидальным распределением электромагнитных полей статора и ротора

При работе электрической машины возникают пульсации электромагнитного момента на частоте кратной $6fc$, где fc – частота сети, Гц. Данные пульсации вызваны взаимодействием высших гармонических составляющих поля в зазоре электрической машины:

- со стороны ротора, обусловленные несинусоидальным распределением поля возбуждения ротора для синхронных ЭМ;

- со стороны статора, обусловленные дискретно распределенной обмоткой статора, либо временными гармониками тока питающей сети.

В настоящее время работа ЭМ чаще всего связана с применением преобразовательной техники, которая позволяет выполнять ЭМ с любым количеством фаз обмотки статора. Исходя из этого, возможно использование другого известного метода, при котором уменьшение (вплоть до 0) амплитуды пульсаций 6-й гармоники электромагнитного момента возможно за счет применения шестифазной

обмотки статора, состоящей из двух независимых трехфазных обмоток, сдвинутых на 30 электрических градусов, соединенных в «звезду» [6].

Для иллюстрации действия предложенного метода на рис. 1 рассмотрена электрическая машина с двумя трехфазными независимыми обмотками, сдвинутыми на 30 электрических градусов. На рис. 1 условно показаны первые ($b(t)$ и $c(t)$) и шестые ($e(t)$ и $a(t)$) гармонические составляющие поля в зазоре, полученные от двух одноименных фаз разных обмоток, имеющих временной сдвиг 30 электрических градусов. Общий магнитный поток электрической машины является суммой магнитных потоков каждой фазы и, соответственно, суммой всех гармоник поля. Шестые гармоники поля каждой независимой трехфазной обмотки, соединенной в «звезду», при смещении общих полей фаз на 30 электрических градусов, находятся в противофазе и их сумма равняется нулю (прямая $d(t)$).

Снижения пульсаций электромагнитного момента посредством применения оптимальной конфигурации обмотки статора

Известна комбинация указанных выше методов – в патенте на изобретение [7] описана обмотка статора электрической машины переменного тока с дробным числом пазов на полюс и фазу, причем обмотка статора выполнена по схеме «две звезды под 30° эл.» и со знаменателем дробности d , соответствующим соотношению $d = 6k \pm 1$, где $k = 1, 3, 5 \dots$. Указанное изобретение направлено на уменьшение субгармоник ($\nu < 1$) и 5-й, 7-й гармоники высшего порядка, что соответствует 6-й гармонике пульсаций электромагнитного момента. При этом такие гармоники как 12-я и 24-я остаются в спектре пульсаций электромагнитного момента, и, следовательно, такого технического решения может быть недостаточно для обеспечения заданных требований.

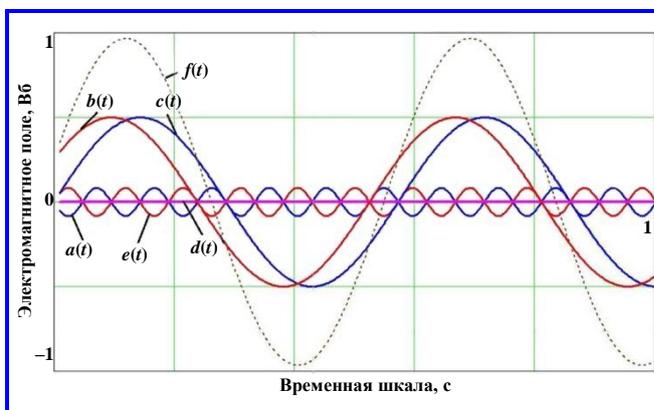


Рис. 1. Иллюстрация действия метода улучшения спектра вибровозмущающих усилий при применении многофазной структуры статора

Для разработки более эффективного метода борьбы с пульсациями электромагнитного момента посредством выбора оптимальной конфигурации обмотки статора проведено расчетно-экспериментальное исследование.

Расчетно-экспериментальное исследование проведено на макете, изготовленном на базе серийного асинхронного двигателя 5A180M8, в котором стандартная обмотка статора заменена на специальную. Особенностью специальной обмотки является то, что благодаря большому количеству выводных концов (24 выводных конца) на одном двигателе можно исследовать несколько различных схем соединения обмоток (рис. 2).

Схемы соединения обмоток рис. 2, а и в питаются от трехфазного источника напряжения. Схема соединения рис. 2, б требует питания от шестифазного источника напряжения.

Схема соединения обмотки статора макета по рис. 2, а, представляет собой трехфазную обмотку, фазы которой соединены по схеме «звезда», с 10-ю полюсами и дробным числом пазов на полюс и фазу ($q = 2^2/5$).

Схема соединения обмотки статора макета по рис. 2, б представляет собой шестифазную обмотку (комбинацию двух независимых трехфазных обмоток, соединенных в «звезду», и смещенных на 30 электрических градусов) с 10-ю полюсами и дробным числом пазов на полюс и фазу ($q = 1^{1/5}$). В такой схеме вектора МДС смежных фаз ($A - A1$, $B - B1$, $C - C1$) смещены на 30 электрических градусов в пространстве и времени.

Схема соединения обмотки статора макета по рис. 2, в представляет собой шестифазную обмотку, фазы которой соединены в совмещенную схему «звезда/треугольник» (последовательное соединение), с дробным числом пазов на полюс и фазу ($q = 2^2/5$). Такое соединение фаз обмотки в общую схему позволяет обеспечить временное и пространственное смещение между векторами МДС смежных фаз ($A - A1$, $B - B1$, $C - C1$) схемы «звезда» и схемы «треугольник», в результате чего шестифазная обмотка статора может быть запитана от трехфазного источника напряжения.

Для проведения расчетного исследования различных схем соединения разработана двухмерная модель макета электродвигателя с экспериментальной обмоткой в программе конечно-элементного динамического моделирования электромагнитных полей.

В результате моделирования получен гармонический состав пульсаций электромагнитного момента (рис. 3) электродвигателя для различных схем соединения обмоток статора.

На рис. 3, а представлены пульсации электромагнитного момента электродвигателя со схемой обмотки рис. 2, а.

На рис. 3, б представлены пульсации электромагнитного момента электродвигателя со схемой обмотки рис. 2, б.

На рис. 3, в представлены пульсации электромагнитного момента электродвигателя со схемой обмотки рис. 2, в.

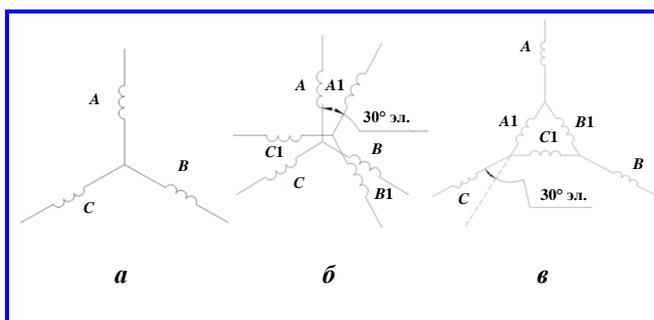


Рис. 2. Возможные схемы соединения обмотки статора

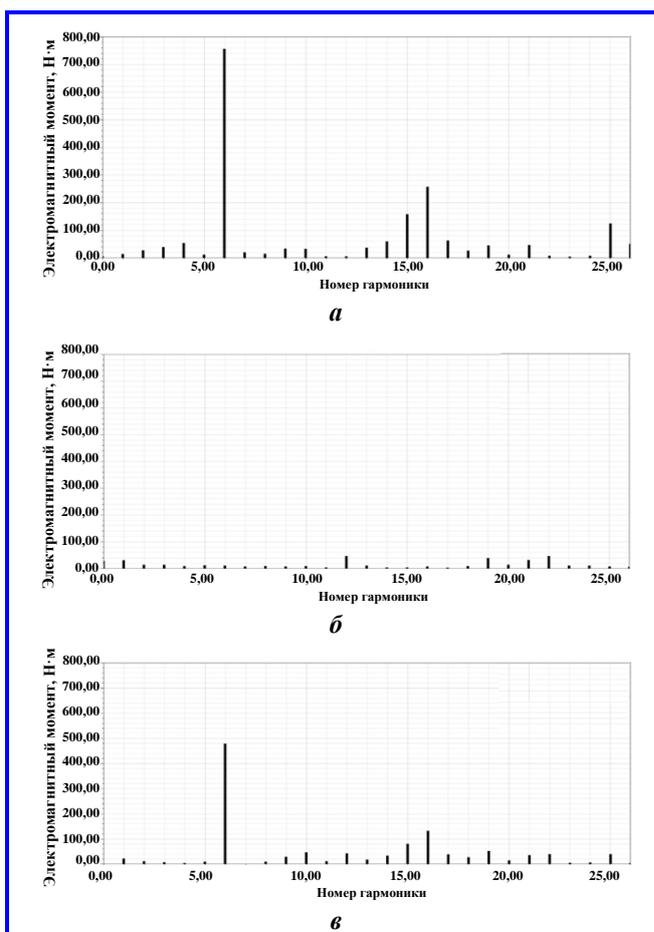


Рис. 3. Гармонический состав электромагнитного момента при различных схемах соединения обмотки статора

Как видно из диаграмм на рис. 3, при переходе от схемы рис. 2, *а* к схеме рис. 2, *в* можно в 1,6 раз снизить 6-ю гармонику пульсаций момента при этом общий гармонический состав снижен приблизительно на 26%. В то же время использование схемы рис. 2, *б* позволяет практически полностью избавиться от 6-й гармоники пульсаций электромагнитного момента, при этом общий гармонический состав снижен более чем на 50% по сравнению со схемой рис. 2, *а*.

Для проведения экспериментального исследования, верификации примененных расчетных методик и заложенных технических решений создан макетный образец с экспериментальной обмоткой (рис. 4), позволяющей собирать различные схемы соединения на одном двигателе.

Перед внедрением в макет экспериментальной обмотки электродвигатель был испытан с заводской обмоткой (асинхронный электродвигатель 5A180M8), для дальнейшего сравнения двигателя с тремя вариантами схемы соединения обмотки.

Влияние схемы соединения обмотки статора на пульсации электромагнитного момента оценивались по вибрации двигателя 1/3 октаве, так как конструктивные элементы двигателя не изменялись при переходе от одной схемы к другой.

Результаты экспериментального исследования различных схем соединения обмотки статора (вибрации двигателя в 1/3 октаве) представлены на рис. 5.

Как видно из рис. 5, применение схемы обмотки (рис. 2, *а*) с дробным числом пазов на полюс и фазу значительно снижает вибрации макета электродвигателя практически во всем диапазоне частот по сравнению с заводской схемой обмотки электродвигателя. Снижение вибраций на частоте 100 Гц относительно заводской обмотки составило 10 дБ за счет увеличения количества пар полюсов двигателя. Снижение вибраций на частотах свыше 500 Гц достигает значения 25 дБ и обусловлено снижением пульсаций электромагнитного момента, вызванных зубцовыми гармониками, за счет применения обмотки с дробным числом на полюс и фазу.

При применении совмещенной схемы обмотки (рис. 2, *в*) с дробным числом пазов на полюс и фазу также происходит значительное снижение вибраций испытуемого макета электродвигателя практически во всем диапазоне частот. Снижение вибраций на частоте 100 Гц относительно трехфазной обмотки составило 5 дБ за счет улучшения формы электромагнитного поля в зазоре. Снижение вибраций на частотах свыше 200 Гц достигает значения 5 дБ за счет снижения пульсаций электромагнитного момента, вызванных зубцовыми гармониками кратностью 6к.

Полученные результаты расчетно-экспериментального исследования подтвердили возможность значительного уменьшения пульсаций электромагнитного момента за счет правильного выбора схемы обмотки статора.

При проведении расчетно-экспериментального исследования определена оптимальная конфигурация обмотки статора, которая позволяет исключить гармоники пульсаций электромагнитного момента порядка 6к, значительно снизить (вплоть до 0) гармоники порядка 12к, а также значительно снизить амплитуду и увеличить порядок зубцовых гармоник.

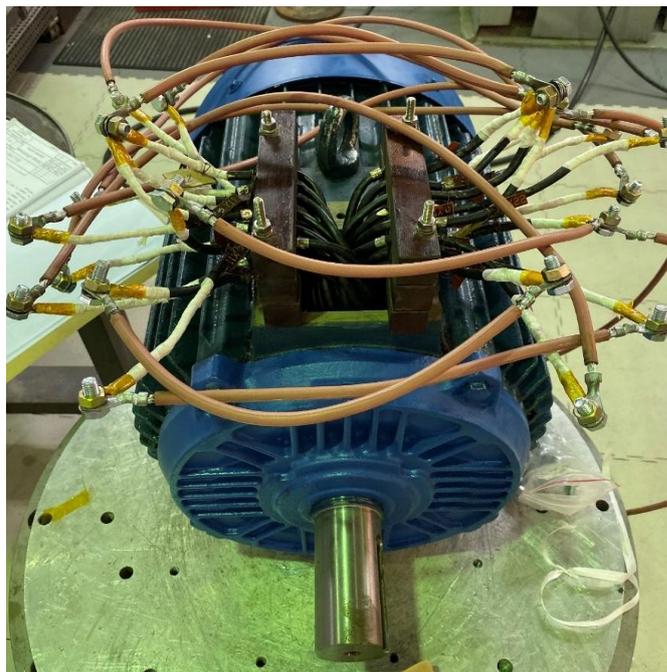


Рис. 4. Макетный образец с экспериментальной обмоткой

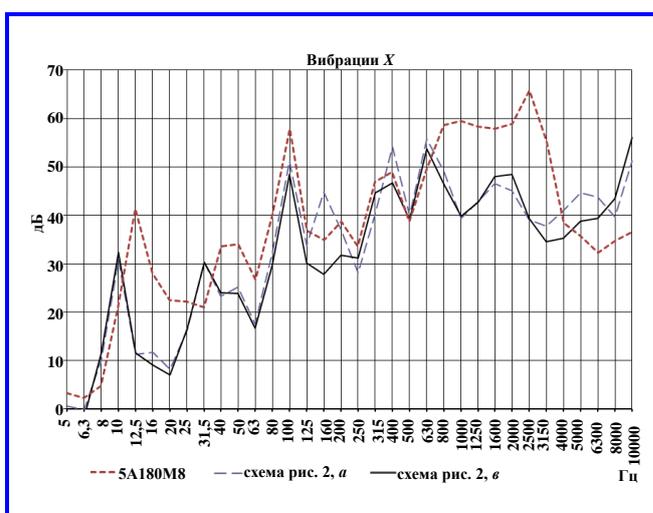


Рис. 5. Вибрации макета электродвигателя для различных схем соединения обмотки

Оптимальная конфигурация обмотки представляет собой многофазную ($m \geq 6$) обмотку статора, состоящую из $2k$ трехфазных независимых обмоток, соединенных в «звезду», сдвинутых на $\frac{30}{2^{k-1}}$ электрических градусов, где k – любое натуральное число, причем обмотка выполнена с дробным числом пазов на полюс и фазу ($q = b + \frac{c}{d}$) со знаменателем дробности $d = 12k - 1$, причем $b = 1, c = 1$.

Снижение пульсаций электромагнитного момента осуществляется за счет того, что в спектре электромагнитного момента:

– исключаются гармоники порядка $6k$ за счет применения $2k$ трехфазных обмоток, сдвинутых на $\frac{30}{2^{k-1}}$ электрических градусов (иллюстрация метода рис. 1);

– значительно снижаются амплитуды гармоник порядка $12k$ до значений не более 2% от значений амплитуд аналогичных гармоник в ЭМ без применения оптимальной обмотки статора.

Снижение амплитуды гармоник порядка $12k$ осуществляется за счет того, что в оптимальной обмотке относительный шаг равен:

$$\beta = \frac{y}{\tau} = \frac{6k}{6k \frac{d+1}{d}} = \frac{d}{d+1} = \frac{12k-1}{12k-1+1} = \frac{12k-1}{12k}.$$

Гармоники электромагнитного момента порядка $12k$ определяются гармониками МДС порядка $12k \pm 1$. Коэффициент укорочения для гармоник МДС порядка $12k \pm 1$ равен [8]:

$$k_{y(12k+1)} = \sin \frac{(12k+1) \frac{12k-1}{12k} \pi}{2};$$

$$k_{y(12k-1)} = \sin \frac{(12k-1) \frac{12k-1}{12k} \pi}{2}.$$

Коэффициент укорочения для гармоники электромагнитного момента порядка $12k$ равен произведению коэффициентов укорочения для гармоник МДС порядка $12k \pm 1$ при одном и том же k .

В таблице представлены результаты расчетов коэффициента укорочения для гармоники электромагнитного момента порядка $12k$ для $k = 1, 2, 3, 4, 5$.

Таблица

k	Коэффициент укорочения для гармоники электромагнитного момента порядка $12k$, %
1	1,7
2	0,4
3	0,19
4	0,1
5	0,069

Максимальное значение коэффициента укорочения для гармоники электромагнитного момента порядка $12k$ составляет 1,7%, это означает, что значение амплитуды пульсаций электромагнитного момента порядка $12k$ снижено до 1,7% от значений амплитуд аналогичных гармоник в ЭМ без применения настоящего метода.

Таким образом, применение представленного метода позволяет значительно снизить пульсации электромагнитного момента и частоты вращения вибрации ЭМ.

Заключение

В результате проведенного расчетно-экспериментального исследования получена оптимальная конфигурация обмотки статора, позволяющая значительно снизить пульсации электромагнитного момента. Оптимальная конфигурация обмотки статора представляет собой многофазную ($m \geq 6$) обмотку статора состоящую из $2k$ трехфазных независимых обмоток, соединенных в «звезду», сдвинутых на $\frac{30}{2^{k-1}}$ электрических градусов, где k – любое натуральное число, причем обмотка выполнена с дробным числом пазов на полюс и фазу ($q = b + \frac{c}{d}$) со знаменателем дробности $d = 12k - 1$, причем $b = 1, c = 1$.

Литература

1. Методы проектирования малошумных электрических машин // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ : научно-технический журнал / В. А. Воронкин, В. Я. Геча, Э. А. Городецкий, В. В. Евланов, А. Б. Захаренко, Б. И. Зубренков, А. И. Каплин, В. И. Ледовской, И. В. Склярова, Л. П. Смирнова, М. Х. Шапиро. – 2006. – Т. 103. – 176 с.
2. Иванов – Смоленский А. В. Электрические машины : Учебник для вузов / А. В. Иванов-Смоленский. – Москва : Энергия, 1980. – 928 с.
3. Результаты разработки нового поколения малошумных электроприводов герметичных электронасосов / М. Е. Коварский, Ю. Т. Портной, В. В. Магин [и др.] // Труды VII Международной (XVIII Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2012 ; Мин-во образования и науки Российской Федерации, Акад.

- электротехнических наук Российской Федерации, Ассоц. инженеров по электроприводу, Ивановский гос. энергетический ун-т им. В. И. Ленина, Нац. исследовательский ун-т МЭИ. – Иваново : ФГБОУ ВПО «Ивановский гос. энергетический ун-т им. В. И. Ленина», 2012. – 707 с. : ил.
4. Исследование пульсаций электромагнитного момента синхронных машин с постоянными магнитами с целым и дробным значениями q / В. Я. Беспалов, М. Е. Коварский, А. О. Сидоров // Электричество. – 2018. – № 5. – С. 45 – 51. – DOI : 10.24160/0013 5380 2018 5 45 51.
5. Домбровский В. В. Основы проектирования электрических машин переменного тока / В. В. Домбровский, Г. М. Хуторецкий. – Ленинград : Энергия. Ленингр. отделение, 1974. – 504 с. : ил.
6. Особенности конструкции высокоскоростных синхронных генераторов с постоянными магнитами, предназначенные для работы в составе системы электродвижения / М. Б. Панасюк, В. В. Магин // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2015. – Т. 149. – № 6. – С. 18 – 23.
7. Патент № 2498481 Российская Федерация, МПК H02K 3/28, H02K 3/04. Обмотка электрической машины переменного тока : № 2009125295/07 : заявл. 01.07.2009 : опублик. 10.11.2013 / И. З. Богуславский, Я. Б. Данилевич, И. Ю. Кручилина, Л. Ю. Штайнле; заявитель и патентообладатель Учреждение Российской академии наук Ордена Трудового Красного Знамени Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН. – Бюл. № 31. – 4 с.

Поступила в редакцию 05.04.2022

*Максим Борисович Панасюк, ведущий инженер.
Вячеслав Валерьевич Магин, начальник лаборатории.
Т. (495) 365-26-14.
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).*

OPTIMAL STATOR WINDING CONFIGURATION TO REDUCE ELECTROMAGNETIC TORQUE PULSATIОNS

M. B. Panasyuk, V. V. Magin

The methods of reduction of rotor speed pulsations and electromagnetic torque pulsations due to application of various stator winding schemes, are considered. The article describes the methods of reduction of electromagnetic torque pulsations caused by tooth higher harmonic components of electromagnetic field in the gap of electrical machine, by means of application of fractional slot stator windings. The method of reduction of low-order electromagnetic torque pulsations due to application of polyphase stator windings consisting of two star-connected independent three-phase windings having a shift of 30 electrical degrees, is described and illustrated. The calculation and experimental investigation of an optimal stator winding configuration allowing a considerable reduction of electromagnetic torque pulsation in a wide frequency band and a description thereof are provided in the article.

Key words: electrical machines, reduction of torque pulsations, reduction of rotor speed pulsations, polyphase stator windings, fractional slot windings, optimal stator winding configuration.

References

1. Methods of designing low-noise electrical machines // Matters of electromechanics. VNIIEМ proceedings: scientific and technical journal / V. A. Voronkin, V. Ia. Gecha, E. A. Gorodetskii, V. V. Evlanov, A. B. Zakharenko, B. I. Zubrenkov, A. I. Kaplin, V.I. Ledovskoy, I.V. Sklyarova, L. P. Smirnova, M. Kh. Shapiro. – 2006. – V. 103. –176 p.
2. Ivanov-Smolensky A. V. Electrical Machines : Textbook for universities/ A. V. Ivanov-Smolensky. – Moscow : Energia, 1980. –928 p.
3. Results of development of a new generation of low-noise electrical drives for sealed electrical pumps / М. Е. Kovarskii, Iu. T. Portnoi, V. V. Magin [et al.] // Proceedings of VII International (XVIII All-Russia) Conference on Automatic Electric Drives. AEP-2012; RF Ministry of Education and Science, RF Academy of Electrotechnical Sciences, Electrical Drive Engineers Association, Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin, National Research University MPEI. – Ivanovo : ‘Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin’, 2012. – p. 707 : with figures.
4. Study of pulsations of electromagnetic torque of synchronous machines with permanent magnets with integer and fractional q values / V.Ia. Bepalov, M.E. Kovarskii, A.O. Sidorov // Electricity. – 2018. – No. 5. – Pp. 45 – 51. – DOI : 10.24160/0013 5380 2018 5 45 51.
5. Dombrovsky V. V. Basic principles of alternating current machine design / V. V. Dombrovsky, G. M. Khutoretsky. – Leningrad: Energia. Leningrad department, 1974. – p. 504 : with figures.
6. Design features of high-frequency synchronous generators with permanent magnets, intended for operation in electric propulsion systems / М. В. Panasyuk, V. V. Magin // Matters of electromechanics. VNIIEМ proceedings. – 2015. – V. 149. – No. 6. – Pp. 18 – 23.

7. Patent No. 2498481 Russian Federation, IPC H02K 3/28, H02K 3/04. Alternating current machine winding : No. 2009125295/07 : appl. dated 01.07.2009 : publ. on 10.11.2013 / I.Z. Boguslavsky, Ya.B. Danilevich, I. Yu. Kruchilina, L.Yu. Shtainle; applicant and patent holder: Institution of Russian Academy I. V. Grebenshchikov Institute of Silicate Chemistry of RAS. – Bull. No. 31. – p. 4.

*Maksim Borisovich Panasiuk, Leading engineer.
Viacheslav Valerevich Magin, Head of Laboratory.
Tel. (495) 365-26-14.
(JC «VNIEM Corporation»).*