

СИНХРОННЫЕ МОМЕНТЫ В АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ С НЕТРАДИЦИОННЫМИ ОБМОТКАМИ

Л. Я. Беликова, А. М. Якимец, А. И. Олексюк
Одесский национальный политехнический университет

Аннотация. Предлагается методика проверки наличия синхронных моментов в асинхронных двигателях с нетрадиционными обмотками. Приведены выражения, позволяющие по гармоническому составу МДС обмотки определить рекомендуемые числа пазов ротора из условия отсутствия синхронных моментов при пуске и при вращении. Проведены экспериментальные исследования макетных образцов двухскоростных асинхронных двигателей с разными числами пазов на роторе.

Ключевые слова: синхронные моменты, статорные гармоники МДС, число пазов статора, число пазов ротора, частота вращения.

Введение

К нетрадиционным обмоткам относятся несимметричные [1] и полюсопереключаемые обмотки (ППО) [2]. Характерной особенностью этих обмоток является повышенное содержание гармоник в спектре их МДС. Расширение порядкового состава гармоник прямого и обратного вращения в спектрах МДС асинхронных машин создает предпосылки для возникновения синхронных моментов, как при неподвижном роторе, так и при вращении машины.

Наибольший вред приносят синхронные моменты, возникающие при неподвижном роторе, так как они препятствуют пуску двигателей.

Синхронные моменты, возникающие при вращении ротора, не всегда приводят к отрицательным последствиям, так как в большинстве случаев ротор проходит по инерции через точки синхронизма, взаимодействующих гармоник, не задерживаясь на этой частоте вращения.

Таким образом, наиболее важно ограничить синхронные моменты при неподвижном роторе.

Это может быть осуществлено путем правильного выбора числа пазов ротора Z_2 при известном числе пазов статора Z_1 .

1. Постановка задач исследования

Синхронные моменты возникают в результате взаимодействия гармоник магнитного поля статора и ротора, имеющих одинаковый порядок, но созданных независимо друг от друга.

Порядок роторных гармоник магнитного поля μ_a определяется равенством

$$\mu_a = k_a \cdot Z_2 + \nu_a, \quad (1)$$

где k_a – любое целое число $\pm 1, \pm 2, \dots$ не равное нулю;

ν_a – порядок статорной гармоники.

В выражение (1) порядок статорной гармоники необходимо подставлять с учетом направления ее вращения:

+ ν_a , при вращении в сторону основной волны порядка p ;

– ν_a , при вращении в обратную сторону.

Если в поле статорной обмотки имеется гармоника ν_b , порядок которой совпадает с роторной гармоникой μ_a , то есть $\mu_a = \pm \nu_b$, то появляются условия для возникновения синхронного момента.

Гармоники μ_a и ν_b находятся в синхронизме при равенстве их частот вращения относительно статора, то есть

$$\omega_{1\nu_b} = \omega_{1\mu_a}. \quad (2)$$

Гармоника магнитного поля ν_b вращается относительно статора с угловой частотой

$$\omega_{1\nu_b} = \frac{2\pi f_1}{\nu_b}. \quad (3)$$

Гармоника μ_a вращается относительно ротора с угловой частотой

$$\omega_{2\mu_a} = \frac{2\pi f_1 \cdot s_{\nu_a}}{\mu_a}, \quad (4)$$

где s_{ν_a} – скольжение ротора относительно гармоники порядка ν_a –

$$s_{v_a} = 1 - \frac{v_a}{p}(1-s). \quad (5)$$

Относительно статора роторная гармоника μ_a вращается с угловой частотой

$$\omega_{1\mu_a} = \frac{2\pi f_1}{p}(1-s) + \omega_{2\mu_a}, \quad (6)$$

s – скольжение ротора относительно рабочей гармоники порядка p .

Подставляя в (2) значения соответствующих частот вращения из (3) и (6), получим

$$\frac{2\pi f_1}{v_b} = \frac{2\pi f_1}{p}(1-s) + \frac{2\pi f_1}{\mu_a} \left[1 - \frac{v_a}{p}(1-s) \right],$$

или

$$\frac{1}{v_b} = \frac{\mu_a - v_a}{\mu_a \cdot p}(1-s) + \frac{1}{\mu_a}. \quad (7)$$

При $\mu_a = v_b$ уравнение (7) запишется в виде

$$1 - \frac{\mu_a - v_a}{p}(1-s) + 1 \quad (8)$$

и удовлетворяется при $s = 1$, то есть при неподвижном роторе.

При $\mu_a = -v_b$ уравнение (7) примет вид

$$-1 = \frac{\mu_a - v_a}{p}(1-s) + 1. \quad (9)$$

Из (1)

$$\mu_a - v_a = k_a \cdot Z_2. \quad (10)$$

Подставив (10) в (9) и сделав преобразования, получим

$$1 - s = -\frac{2p}{k_a \cdot Z_2} = \frac{n}{n_1}, \quad (11)$$

где n – частота вращения ротора;

n_1 – частота вращения рабочей гармоники p поля статора.

Таким образом, синхронизм для гармоник $\mu_a = -v_b$ наступит при частоте вращения ротора

$$n = -\frac{2p \cdot n_1}{k_a \cdot Z_2} = -\frac{6000}{k_a \cdot Z_2} \text{ (об/мин)} \quad (12)$$

так как при частоте сети $f_1 = 50$ Гц величина

$$2p \cdot n_1 = 2 \cdot 60 \cdot f_1 = 6000 \text{ об/мин.}$$

При отрицательных значениях k_a синхронизм наступает при положительной частоте вращения ротора, т. е. в двигательном режиме, а для положительных значений k_a – при отрицательной частоте вращения ротора, т. е. в тормозном режиме.

Из (1) получаем

$$Z_2 = \frac{\mu_a - v_a}{k_a}. \quad (13)$$

Синхронизм при неподвижном роторе имеет место при $\mu_a = v_b$.

Следовательно, число пазов ротора, из условия отсутствия синхронных моментов при пуске, должно быть равно

$$Z_2 = \frac{v_b - v_a}{k_a}, \quad (14)$$

где v_a и v_b – гармоники в распределении МДС применяемой обмотки статора.

Наибольшие по амплитуде синхронные моменты будут иметь место при $v_a = p$ и $k_a = 1$ или $k_a = 2$.

Подставив эти значения в (14), получим выражения для неблагоприятных чисел пазов ротора:

$$\begin{cases} Z_2 = |v_b - p|; \\ Z_2 = \left| \frac{v_b - p}{2} \right|. \end{cases} \quad (15)$$

Синхронизм при вращении ротора наступает при $\mu_a = -v_b$, то есть когда имеет место равенство

$$-v_b - v_a = k_a \cdot Z_2,$$

откуда

$$Z_2 = -\frac{v_b + v_a}{k_a}. \quad (16)$$

При $v_a = p$, $k_a = 1$ или $k_a = 2$, получим выражения для неблагоприятных чисел пазов ротора при его вращении:

$$\begin{cases} Z_2 = |v_b + p|; \\ Z_2 = \left| \frac{v_b + p}{2} \right|. \end{cases} \quad (17)$$

2. Материалы и результаты исследований

Зная гармонический состав МДС применяемой обмотки статора, можно, пользуясь уравнениями (15) и (16), определить ряд пазов ротора в двигателе из условия отсутствия синхронных моментов, как при пуске, так и при вращении.

В качестве примера рассмотрим двухскоростную несимметричную обмотку с соотношением чисел полюсов $2p_1:2p_2=6:4$, выполненную в 48 пазах статора [3].

Гармоники МДС с номерами до $\nu = 2Z_1$ и знаками вращения по отношению к рабочей гармонике при $p_1=2$ и $p_2=3$ сведены в табл. 1.

Таблица 1

Номера наиболее весомых гармоник двухскоростной ППО с $2p_1:2p_2=6:4$

$\nu_a = p_1 = 2$	$\nu_b = -8, 14, -34, 40, -46, 50, -56, 62$
$\nu_a = p_2 = 3$	$\nu_b = -7, -13, 19, -29, 35, 41, 51, -55$

Используя формулы (15) и (17), получим числа пазов ротора, при которых возникают синхронные моменты при пуске и при вращении, оставив номера пазов в диапазоне

$$Z_1 - 20 \leq Z_2 \leq Z_1 + 20.$$

Номера пазов определены только при $k_a = 1$. Результаты расчетов сведены в табл. 2.

Таблица 2

Неблагоприятные числа пазов ротора для ППО с $2p_1:2p_2=6:4$

$p_1 = 2$	$s = 1$	$Z_2 = 36, 38, 48, 58, 60$
	$s \neq 1$	$Z_2 = 32, 42, 44, 52, 54, 64$
$p_2 = 3$	$s = 1$	$Z_2 = 32, 38, 48, 58, 64$
	$s \neq 1$	$Z_2 = 38, 42, 44, 52, 54, 58$

Таким образом, чтобы избежать значительных синхронных моментов, как при нулевой скорости, так и при разгоне двигателя, число пазов ротора должно быть выбрано из следующего ряда:

$$Z_2 = 30, 40, 56, 62, 66.$$

Число пазов ротора $Z_2 = 38$ выделено жирным и курсивом, так как в серийном двигателе 4A225M6, в котором предполагалось применение рассматриваемой ППО, на роторе было 38 пазов.

Анализ приведенных данных позволяет предположить, что в двухскоростном двигателе с рассматриваемой обмоткой и ротором, имеющим

38 пазов, могут возникнуть синхронные моменты при включении на $2p=4$ при неподвижном роторе, а при включении на $2p=6$ – как при неподвижном роторе, так и при частоте вращения $n = 157,9$ об/мин.

Из рекомендуемых чисел пазов ротора предпочтение следует отдать числу $Z_2 = 30$ или числу $Z_2 = 40$, которые меньше числа пазов статора $Z_1 = 48$. В этом случае уменьшаются амплитуды возможных асинхронных моментов.

Необходимо изменить число пазов ротора в двигателе 4A225M6, что должно привести к уменьшению или к полному уничтожению синхронных моментов в двигателе с рассматриваемой двухскоростной обмоткой.

Для подтверждения приведенных расчетов были изготовлены макетные образцы двухскоростного двигателя на базе 4A225 M4 с 48 пазами на статоре и с разными числами пазов на роторе – с $Z_2 = 38$, как в базовой машине и, с $Z_2 = 30$, которое рекомендовано по результатам исследований.

Механические характеристики испытанных двигателей показаны на рис. 1.

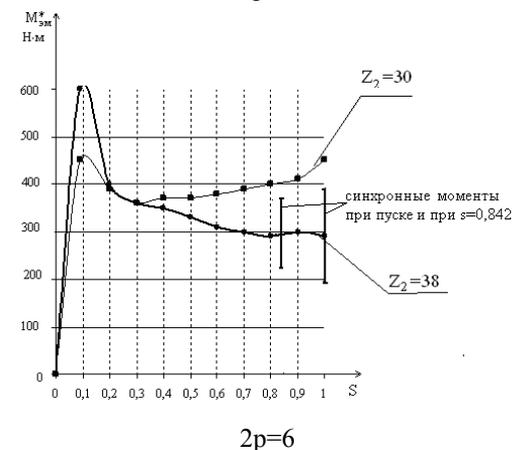
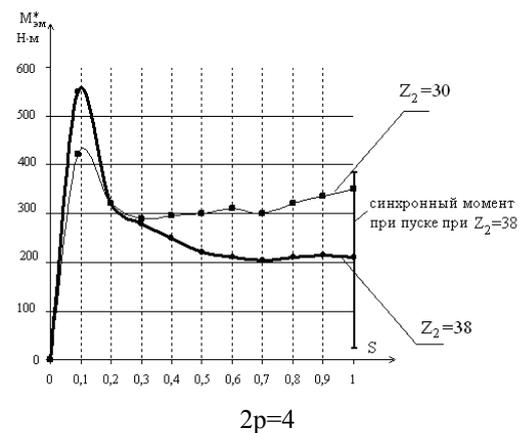


Рис. 1. Экспериментальные характеристики 4A 225 М 6/4 с двухскоростной обмоткой и разными числами пазов на роторе

В двигателе с числом пазов 38 на роторе были зафиксированы синхронные моменты при пуске при $2p_1=4$ и $2p_2=6$ и синхронный момент при вращении при $2p=6$. В двигателе с числом пазов на роторе 30 синхронных моментов не было.

Механические характеристики отличаются величинами максимальных и пусковых моментов вследствие того, что макетный образец был выполнен с 30 двухклеточными пазами на роторе.

Выводы

На основании приведенных результатов, можно утверждать, что для двухскоростных двигателей с соотношением полюсов 6:4 рекомендованным соотношением чисел пазов на статоре и роторе является $Z_1 / Z_2 = 48/30$.

Список использованной литературы

1. Якимец, А. М. Методика определения разностных ЭДС произвольных обмоток [Текст] / А. М. Якимец, Х. Г. Абдулкарим // Холодильная техника и технология. – 2014. – № 5(151). – С. 51 – 54.
2. Беликова, Л. Я. Проектирование полюсо-переключаемых и совмещенных обмоток с малыми коэффициентами переключения. [Текст] / Л. Я. Беликова, Н. И. Билоненко // Киев: Техника. Электромашиностроение и электрооборудование. Респ. межвед. науч.- техн. сб. – 1989, № 43. – С. 90– 99.

вание. Респ. межвед. науч.- техн. сб. – 1989, № 43. – С. 90– 99.

3. Bielikova, L. Enroulement triphase pour moteur électrique à deux vitesses. Brevet d'invention № 7909926, République Française, 1982. – p.5.

References

1. Yakimets, A. M., Al-hasoon Abdulkareem, H. G. (2014). Methods of determining the differential EMF of arbitrary windings [Metodika opredeleniya raznostnykh EDS proizvolnykh obmotok. Holodilnaya tehnika i tehnologiya, № 5(151), p. 51 – 54], Refrigeration equipment and technology, № 5(151), pp. 51 – 54.
2. Bielikova, L., Bilonenko, N. (1989). Designing pole of the switched and the combined windings with small factors of switching. [Proektirovanie pol-yusopereklyuchaemykh i sovmeschennykh obmotok s malyimi koeffitsientami pereklyucheniya. Kiev Tehnika. Elektromashinostroenie i elektrooborudovanie. Resp. mezhved. nachn. tehn. sb., № 43, p. 90–99], Kiev: Technics. Electromechanical engineering and an electric equipment. The republican interdepartmental. sb., № 43. p. 90– 99.
3. Bielikova, L. (1982). Enroulement triphase pour moteur électrique à deux vitesses. Brevet d'invention № 7909926, République Française, p. 5.

THE SYNCHRONOUS MOMENTS IN ASYNCHRONOUS ENGINES WITH NONCONVENTIONAL WINDINGS

L. Bielikova, A. Yakimets, A. Oleksyk
Odessa National Polytechnic University

Abstract. *The synchronous moments result from interaction of harmonics of a magnetic field stator and a rotor, having an identical order, but created independently from each other. The technique of stock-taking of the synchronous moments in asynchronous engines with nonconventional windings is offered. In such windings the maintenance of harmonics of direct and return rotation increases. It creates preconditions for occurrence of the synchronous moments, both at a motionless rotor, and at rotation. The greatest harm is brought by the synchronous moments at a motionless rotor. They interfere with start-up of engines. The synchronous moments arising at rotation of a rotor, not always lead to negative consequences. The expressions allowing on harmonious structure MDS of a winding to define recommended numbers of grooves of a rotor from a condition of absence of the synchronous moments at start-up and at rotation are resulted. As an example the two-high-speed winding with $2p_1:2p_2=6:4$ in 48 grooves stator is considered. Model samples of two-high-speed engines with different numbers of grooves on a rotor are executed. Experimental researches of model samples of two-high-speed asynchronous engines with different numbers of grooves on a rotor are spent. Mechanical characteristics of the tested engines are shown. In the engine with 30 grooves on a rotor there are no synchronous moments. Experimental researches have proved calculations. Techniques of definition of numbers of grooves of a rotor and stator in the asynchronous engine it is recommended for any windings.*

Key words: *the synchronous moments, harmonics MDS of a stator, number of grooves of a stator, number of grooves of a rotor, frequency of rotation.*

СИНХРОННІ МОМЕНТИ В АСИНХРОННИХ ДВИГУНАХ З НЕТРАДИЦІЙНИМИ ОБМОТКАМИ

Л. Я. Бєлікова, А. М. Якимець, О. І. Олексюк
Одеський національний політехнічний університет

Анотація. Пропонується методика перевірки наявності синхронних моментів в асинхронних двигунах з нетрадиційними обмотками. Наведені вирази, що дозволяють по гармонійному составу МРС обмотки визначити числа пазів ротора, що рекомендують з умови відсутності синхронних моментів при пуску та при обертанні. Проведені експериментальні дослідження макетних зразків двошвидкісних асинхронних двигунів з різними числами пазів на роторі.

Ключові слова: синхронні моменти, статорні гармоніки МРС, число пазів статора, число пазів ротора, частота обертання.

Получено 28.01.2017



Бєлікова Людмила Яковлевна, кандидат технических наук, доцент кафедры электрических машин Одесского национального политехнического университета, 65044, Одесса, проспект Шевченко, 1, ОНПУ, тел. (066) 699 33 42. E-mail Conda@ukr.net

Belikova Liudmyla, Ph. D, Electric Cars Department, ONPU, 65044, Odessa, Shevchenko av.,1, ONPU, ph. (066) 699 33 42. E-mail Conda@ukr.net

ORCID ID 0000-0001-5999-8205



Якимец Андрей Миронович, кандидат технических наук, доцент кафедры электрических машин Одесского национального политехнического университета, 65044, Одесса, проспект Шевченко, 1, ОНПУ, тел. (066)427 86 32. E-mail: yakimets_andriy@ukr.net

Yakimets Andrii, Ph. D, Electric Cars Department, ONPU, 65044, Odessa, Shevchenko av.,1, ONPU, ph. (066) 427 86 32. E-mail: yakimets_andriy@ukr.net

ORCID ID: 0000-0002-0588-8606



Олексюк Александр Игоревич, студент кафедры электрических машин Одесского национального политехнического университета. Просп. Шевченко, 1, Одесса, Украина, E-mail: piol@inbox.ru

Oleksyk Aleksandr, Student of the Electric machines department, Odessa National Polytechnic University, Shevchenko av., 1, Ukraine. E-mail: piol@inbox.ru

ORCID ID 0000-0002-3527-2335