

СИНТЕЗ ОБМОТОК С УМЕНЬШЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ПРЯМОВРАЩАЮЩИХСЯ ГАРМОНИК МДС

Дёгтев В. Г., д.т.н., Шульгин Д.Н.

Одесский национальный политехнический университет

Украина, 65044, Одесса, пр-т Шевченко, 1, ОНПУ, кафедра “Электрические машины”

тел.(048-288681), E-mail: dankov@paco.net

Выполнен синтез структуры обмоток с возможностью регулирования гармонического состава МДС, исследованы их свойства и сформулированы рекомендации по выбору соотношения структурных составляющих. Спроектирована двухслойная двухполюсная обмотка в 48 пазах статора, использованная при изготовлении экспериментального образца короткозамкнутого асинхронного двигателя. Приведены данные сравнительного анализа технико-экономических показателей экспериментального и серийного двигателей.

Виконано синтез структури обмоток з можливістю регулювання гармонійного складу МРС, досліджені їх властивості і сформульовані рекомендації з вибору співвідношення структурних складових. Спроектовано двошарова двополюсна обмотка в 48 пазах статора, яка використана при виготовленні експериментального зразка короткозамкнутого асинхронного двигуна. Приведені дані порівняльного аналізу техніко-економічних показників експериментального і серийного двигунів.

В трехфазных электрических машинах общепромышленного назначения преимущественно применяются симметричные шестизонные обмотки с целыми числами пазов на полюс и фазу. Основное требование, предъявляемое к ним, заключается в достижении максимального потокосцепления по рабочей гармонике, порядок v которой равен числу пар полюсов p , и оценивается величиной обмоточного коэффициента k_{w1} . Максимальные значения коэффициентов k_{w1} , обеспечивают однослойные обмотки, но их применение ограничено электрическими машинами относительно небольшой мощности. В более крупных машинах используются двухслойные обмотки, шаг u по пазам в которых выбирается обычно в диапазоне $(0,8 \div 0,857)\tau$, где τ - полюсное деление. Исключение составляют двухполюсные обмотки, у которых в целях сокращения длины лобовых частей и уменьшения расхода обмоточного провода $u \leq 0,667\tau$. При этом значение обмоточного коэффициента уменьшается, что отрицательно сказывается на энергетических показателях электрических машин с указанными обмотками.

В настоящей статье поставлена задача проектирования такой модификации двухполюсных трехфазных обмоток, применение которой в серийных асинхронных машинах обеспечит экономию обмоточных и изоляционных материалов.

Проектирование выполнено на базе обобщенного структурного представления многофазных обмоток в виде матричных моделей [1] и методов их структурного синтеза [2]. Матричная модель базируется на регламентированной организации пространства, в котором размещаются катушечные стороны обмотки. Любая трехфазная обмотка представляется в виде прямоугольной матрицы содержащей 6 столбцов и Q строк. Значение Q определяется числом пазов на фазную зону и рассчитывается по выражению: $Q=Z/6$, где Z число пазов электрической машины. Суть заключается в том, что модель любой реальной обмотки такого типа может быть представлена в виде композиции модулей (блоков), отображающих все разновидности

простейших обмоток, выполнимых в шести равномерно распределенных пазах. Все модули обладают способностью выполнять важнейшие функции обмотки: создавать круговые вращающиеся магнитные поля или индуктировать трехфазную систему ЭДС. Каждый из модулей представляет собой простейшую трехфазную обмотку, выполнимую в 6 пазах, и отображается в виде сочетания цифровых кодов, соответствие которых общепринятому буквенному обозначению фаз можно представить такой последовательностью: $0 \leftrightarrow A, 1 \leftrightarrow z, 2 \leftrightarrow B, 3 \leftrightarrow x, 4 \leftrightarrow C, 5 \leftrightarrow y$.

В качестве составляющих синтезируемой структуры двухполюсных трехфазных обмоток выберем активный модуль $b_5=|012345|$, обладающий максимальным потокосцеплением по нечетным гармоникам, и инвариантный пространственный блок b_0 , отображающий 6 пассивных катушечных сторон.

Используя операцию сборки [2] выберем такой ее порядок, что из общего числа Q используемых модулей первые k являются инвариантными блоками b_0 , а все последующие $(Q-k)$ – модули b_5 . Тогда обобщенная символическая модель M_{QC} синтезируемой структуры представляется в виде

$$M_{QC} = \bigcup_{j=1}^k b_0 \cup \bigcup_{j=k+1}^Q b_5$$

Базируясь на соответствии символической и матричной моделей [1], можно вывести аналитическое выражение расчета коэффициента распределения k_{wv} для гармоник МДС произвольных порядков v .

При произвольно выбранном общем числе модулей Q угловое смещение α_v между соседними модулями в масштабе гармоник v -го порядка определяется по выражению

$$\alpha_v = \pi v / (6Q).$$

В соответствии с традиционной методикой [3] абсолютная величина вектора МДС f_v фазы модуля b_5 , на диаграмме в масштабе v -ой гармоники равна

$$f_v = 4R \sin(\alpha_v / 2).$$

где R – радиус окружности.

Тогда абсолютное значение геометрической суммы МДС F_v , создаваемой $(Q-k)$ активными модулями одной из фаз, можно определить по выражению

$$F_v = 4R \sin[\alpha_v(Q-k)/2] = 4R \sin[\pi v(Q-k)/(6Q)]$$

Коэффициент распределения k_{Rv} для гармоники порядка v по [2] определяется отношением абсолютной величины геометрической суммы F_v МДС к арифметической сумме составляющих $(Q-k)f_v$

$$k_{Rn} = \frac{F_{1v}}{(Q-k)f_v} = \frac{\sin[\pi v(Q-k)/(6Q)]}{(Q-k) \sin[\pi v/(6Q)]} \quad (1)$$

Если ввести соотношение $k^* = k/Q$, то получим выражение, удобное для исследования свойств обмоток синтезированной структуры

$$k_{Rn} = \frac{\sin[\pi v(1-k^*)/Q]}{(1-k^*) \sin[\pi v/(6Q)]} \quad (2)$$

Выражение (2) позволяет определить соотношения $k^* = k/Q$, необходимые для подавления гармоник МДС заданных порядков. Для этого достаточно приравнять нулю числитель правой части формулы (2), чему соответствует равенство

$$\pi v(1-k^*) = 6\pi n$$

где $n = 1, 2, 3, \dots$

Откуда получаем

$$k^* \Big|_{k_{Rn}=0} = (v-6n)/v \quad (3)$$

Анализ выражения (3) показывает, что для обратно вращающихся гармоник с порядками $v=6n-1$ соотношение $k^* = k/Q$ приобретает отрицательное значение, что лишено физического смысла. Поэтому полное подавление указанных гармоник невозможно.

Для нечетных гармоник с порядками $v=6n+1$, направление вращения которых совпадает с направлением вращения рабочей гармоники ($v=p$), в соответствии с (3) значения k^* , при которых выполняется их полное подавление, обратно пропорциональны их порядку и могут быть сведены в табл. 1.

Таблица 1

v	7	13	19	25
k^*	0,143	0,077	0,053	0,04

Для короткозамкнутых асинхронных машин, работающих в режиме двигателя, увеличение содержания обратно вращающихся гармоник приводит к некоторому увеличению добавочных потерь и вызывает незначительное снижение энергетических показателей. Наибольшую опасность представляют прямо вращающиеся пространственные гармоники МДС, проявление которых может вызвать асинхронные провалы в кривой момента в процессе пуска.

На практике стремятся, чтобы относительная амплитуда МДС H_v [4] по указанным гармоникам не превышала значения 0,01. Величина H_v рассчитывается по выражению

$$H_n = \frac{k_{Rn} \cdot P}{k_{Rp} \cdot v} \quad (4)$$

Особенно весомой является гармоника с порядком $v=7$. С использованием выражений (2) и (4) на рис. 1 построен график зависимости $H_7=f(k^*)$, на основании которого предварительно определен диапазон (0,084÷0,194) измене-

ния k^* , при котором значение H_7 не превышает 0,01.

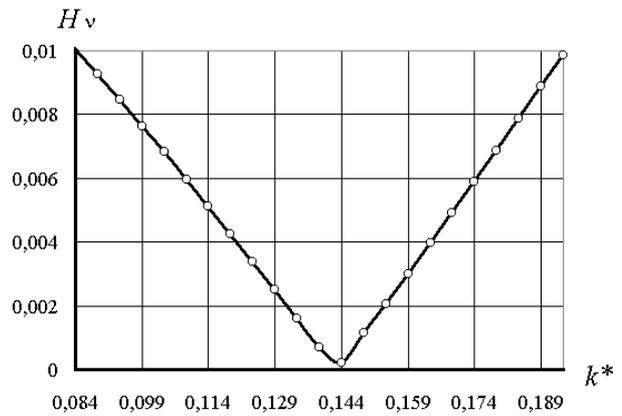


Рис. 1

При решении конкретных задач при заданном числе Q следует знать абсолютное значение k , которое может быть только целым числом. Результаты расчетов предпочтительных значений k для наиболее вероятного диапазона применения обмоток синтезированной структуры приведены в табл. 2. Там же приведены соответствующие значения относительных амплитуд по наиболее опасной 7-ой гармонике H_7 и коэффициентов распределения предлагаемых k_{RvH} и серийных k_{RvC} обмоток по рабочей гармонике.

Таблица 2

Q	k^*_{\min}	k^*_{\max}	K	k_{RvH}	k_{RvC}	H_7
4	0,336	0,776	1	0,0235	0,977	0,958
5	0,420	0,970	1	0,0114	0,97p	0,957
6	0,504	1,164	1	0,0045	0,970	0,956
7	0,588	1,358	1	0,0000	0,960	0,956
8	0,672	1,552	1	0,0031	0,966	0,956
9	0,756	1,746	1	0,0054	0,965	0,956
10	0,840	1,940	1	0,0072	0,964	0,955
11	0,924	2,134	2	0,0071	0,970	0,955
12	1,008	2,328	2	0,0043	0,969	0,955

Проиллюстрируем возможность применения обмоток синтезированной структуры на примере замены двухполюсной двухслойной обмотки, уложенной в 48 пазах статора серийного двигателя 4AMУ250М2У2 с шагом $y=14$. Результаты детального гармонического анализа серийной обмотки представлены в табл. 3.

Таблица 3

v	k_{Yv}	k_{Rv}	k_{Wv}	H_v
1	0,793	0,956	0,758	1,000
5	0,991	0,194	0,193	0,051
7	0,130	0,141	0,018	0,004
11	0,609	0,095	0,058	0,007
13	0,609	0,083	0,051	0,005
17	0,130	0,070	0,009	0,001
19	0,991	0,066	0,065	0,004
$k_{Wp} = 0,758; \tau_{dv} = 0,00386$				

Соответствующее значение Q для обмотки синтезированной структуры равно 8, а $k=1$ (см. табл. 2).

Выберем шаг обмотки по пазам равный 16 и выполним гармонический анализ, результаты которого приведены в табл.4.

Таблица 4.

ν	$k_{Y\nu}$	$k_{R\nu}$	$k_{W\nu}$	H_ν
1	0,866	0,966	0,837	1,000
5	0,866	0,334	0,289	0,069
7	0,866	0,021	0,018	0,003
11	0,866	0,205	0,178	0,019
13	0,866	0,061	0,053	0,005
17	0,866	0,159	0,138	0,010
19	0,866	0,100	0,086	0,005
23	0,866	0,128	0,111	0,006
$k_{wp}=0,8367; \tau_{dv}=0,00677$				

Сопоставление данных табл.3 и 4 показывает, что предложенная обмотка по сравнению с серийной имеет повышенное содержание высших обратно вращающихся гармоник. Это подтверждается величиной коэффициента дифференциального рассеяния τ_{dv} (0,00677 вместо 0,00386). В то же время в отношении

прямо вращающихся гармоник обе обмотки практически равноценны, а обмоточный коэффициент k_{wp} по рабочей гармонике предлагаемой обмотки более чем на 10% превосходит аналогичный показатель серийной обмотки (0,8367 против 0,758).

Результаты расчетов позволили изготовить экспериментальный образец с использованием спроектированной обмотки и геометрии серийного двигателя 4АМУ250М2У4. Образец был изготовлен в ООО «Контакт» (г. Одесса) и испытан в лаборатории Новокаховского Отделения украинского научно-исследовательского института взрывозащищенного и рудничного электрооборудования (аттестат аккредитации №UA6.001.Т.703 от 04.09.2001 г.).

Характер экспериментальной кривой момента двигателя с предложенной обмоткой, приведенной на рис. 2, свидетельствует об отсутствии асинхронных провалов, что подтверждает справедливость вышеизложенных теоретических обоснований.

Основные технико-экономические показатели серийного двигателя и данные испытаний экспериментального образца приведены в табл. 5.

Таблица 5

4АМУ250М2	$P_{2н}$	$I_{1ф}$	η	$\cos\varphi$	s_n	$s_{кр}$	k_m	k_1	k_n	G_{Cu}	G_n
	κBm	A	%	—	%	%	—	—	—	κZ	κZ
Справочные данные серийной машины [5]	90	95,35	92	0,9	1,4	10	2,5	7,5	1,2	35,1	0,665
Данные экспериментального образца	90	96,1	91,5	0,9	1,42	9,6	3,3	7,45	1,4	32,1	0,582

Сравнительный анализ данных, приведенных в табл. 5, показывает, что в двигателе с предлагаемой обмоткой расход обмоточного провода G_{Cu} , по сравнению с серийной машиной, уменьшился на 8,5%. Расход изоляционных материалов G_n уменьшился на 12,5%. Снижение коэффициента полезного действия на полпроцента объясняется увеличением потерь в стали, причиной которого явилось температурное и механическое воздействие на сердечник экспериментального образца в процессе замены серийной обмотки на предложенную. (Потери в стали возросли с 864 Вт в серийной машине до 2140 Вт в образце при изменении индукции в рабочем воздушном зазоре с 0,75 Тл до 0,774 Тл соответственно).

Результаты проведенных исследований показывают, что разработанная обмоточная структура может быть эффективно использована как при промышленном производстве двухполюсных асинхронных двигателей с высотами осей вращения свыше 160 мм, так и при их ремонте.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Дегтев В.Г. Обобщенная структурная модель многофазных обмоток электрических машин// Электричество. — 1990.— №11.— С. 40-45.
- [2] Дегтев В.Г., Лаврук И.С., Смирнов С.Б. Структурный синтез обмоток//Вісник національного технічного університету ХПІ.— 2001.—№16.—С.65-68.
- [3] Вольдек А.И. Электрические машины.— Л.: Энергия, 1974.— 839 с.
- [4] Геллер Б., Гамата В. Дополнительные поля, моменты и потери мощности в асинхронных машинах. — М.: Энергия, 1981.— 352 с.
- [5] Кравчик А.Е., Шлаф М.И., Афонин И., Соболенская Е.А. Асинхронные двигатели серии 4А://Справочник.— М.: Энергоиздат, 1982.— 504 с.

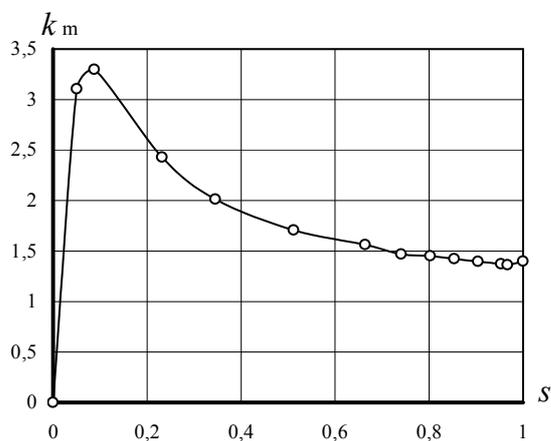


Рис.2

Поступила 12.09.2003