

УДК 621.313.3.045

В.Г. Дёгтев, д-р техн. наук,
Х. Г. Абдулкарим, М. П. Бучацкая

СИММЕТРИРОВАНИЕ ОБМОТОК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Предложена методика симметрирования многофазных обмоток асинхронных электрических машин, основанная на преобразовании числового ряда и использовании катушек с неодинаковыми числами витков. Показано, что указанная методика позволяет обеспечить полную симметрию по рабочей гармонике и возможность практического использования симметрированных обмоток.

Ключевые слова: методика, симметрия обмотки, рабочая гармоника.

W.G. Degtev, ScD,
Ch. G Abdulcarim, M. P. Buchacka

WINDINGS SYMMETRIZING OF ELEKTRICAL MACHINE

The technique of multiphase windings symmetrizing based on the transformation of a series of numbers and the use of coils with unequal turns numbers is presented. It is shown that this technique allows providing full symmetry of the working harmonic and the possibility of practical use of symmetrized windings.

Keywords: methods, symmetry, winding, working harmonica.

В.Г. Дёгтев, д-р техн. наук,
Х. Г. Абдулкарим, М. П. Бучацкая

СИМЕТРУВАННЯ ОБМОТОК ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

Запропоновано методику симетрування багатофазних обмоток асинхронних електричних машин, яка базується на перетворенні числового ряду і використанні катушок з різними числами витків. Показано, що зазначена методика дає змогу забезпечити повну симетрію по робочій гармоніці та можливість практичного використання симетрованих обмоток.

Ключові слова: методика, симетрія обмотки, робоча гармоніка.

Известно [5], что в случае, если в обмотке с дробным числом q пазов на полюс и фазу, а знаменатель дробности d кратен числу фаз m , то такую обмотку невозможно выполнить симметричной. Подобные обмотки не нашли применения в серийном производстве электрических машин, но на ремонтных предприятиях обмотки с подобными числами q приходится выполнять из-за ограниченного выбора статоров с необходимым числом пазов. При использовании известного алгоритма формирования числового ряда [2] уровень несимметрии таких обмоток оказывается недопустимо высоким. Их применение, например в асинхронных двигателях, приводит к резкому снижению их технико-экономических показателей.

Для уменьшения уровня несимметрии таких обмоток требуется так переформировать распределение активных катушечных сторон (АКС), чтобы уменьшить или полностью исключить несимметрию хотя бы по рабочей гармонике.

© Дёгтев В. Г., Абдулкарим Х.Г.,
Бучацкая М.П., 2012

Подобное преобразование принято называть симметрированием. Оно заключается либо в преобразовании числового ряда обмотки [4,5], либо в изменении чисел витков катушек [3].

Задачей настоящей статьи является усовершенствование методики симметрирования многофазных дробных обмоток путем последовательного применения указанных приемов.

Рассмотрим в качестве примера исходную трехфазную ($m=3$) шестиполусную обмотку ($2p=6$), выполненную в тридцати пазах ($Z=30$). Число пазов на полюс и фазу составит $q=Z/(2pm)=5/3$, а повторяющаяся часть числового ряда – 2,2,1. Полному числовому ряду – 2,2,1, 2,2,1, 2,2,1, 2,2,1, 2,2,1, 2,2,1 – соответствует распределение фазных зон одного слоя обмотки представлено на рис. 1.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
A	z	B	x	C	y	A	z	B	x	C	y	A	z	B	x	C	y	A	z	B	x	C	y	A	z	B	x	C	y

Рис. 1. Исходное распределение фазных зон слоя обмотки ($Z=30, q=5/3$)

Данному распределению соответствует векторная диаграмма в масштабе рабочей гармоники ($v=p=3$), приведенная на рис. 2.

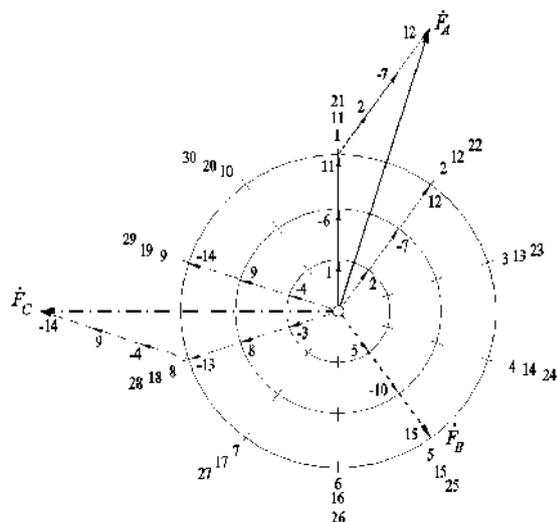


Рис. 2. Векторная диаграмма МДС исходной трехфазной обмотки ($Z=30, q=5/3, v=p=3$)

Здесь и далее на диаграммах векторы элементарных МДС изображены тонкими линиями со стрелкам, причем векторы фазы A – сплошными, фазы B – пунктирными, а фазы C – штрих–пунктирными линиями. Цифры около стрелок соответствуют номеру паза, в котором расположена АКС, создающая данную элементарную МДС. Знак минус указывает на принадлежность к инверсным фазам (x, y, z). На диаграммах показаны векторы элементарных МДС первых половин рассматриваемых обмоток, так как аналогичные векторы, создаваемые АКС смещенными на половину числа пазов, совпадают с исходными. Результирующие векторы МДС фаз $\dot{F}_A, \dot{F}_B, \dot{F}_C$, отображены на диаграммах утолщенными линиями.

Для исходной обмотки (рис. 1) амплитуды результирующих МДС $F_A=F_C=11,4; F_B=6$. Угловые координаты соответствующих векторов фаз $\varphi_A=54^\circ, \varphi_C=-54^\circ, \varphi_B=180^\circ$, а их относительные сдвиги: $\varphi_{AB}=\varphi_{CB}=126^\circ; \varphi_{AC}=108^\circ$.

Таким образом, в исходной обмотке проявляется как амплитудная, так и угловая несимметрия результирующих векторов МДС по рабочей гармонике. Так, относительная разница амплитуд результирующих векторов фаз

$$\Delta F = \frac{F_A - F_B}{F_A} = \frac{11,4 - 6}{11,4} = 0,474.$$

Максимальное отклонение относительного сдвига результирующих векторов МДС от 120° достигает 12° . Это приводит к неравенству сопротивлений фаз и несимметрии фазных токов, что полностью исключает практическое применение такой обмотки.

Известный способ симметрирования подобных обмоток [4] ограничивается изменением числового ряда обмотки, что, в первую очередь, обеспечивает равенство чисел АКС в фазах обмотки. Указанное преобразование заключается в выполнении циклических перестановок в каждой из последующих повторяющихся частей. После такого преобразования числовой ряд рассмотренной на рис.1 обмотки будет иметь вид

$$2,2,1,2,1,2,1,2,2, 2,2,1,2,1,2,1,2,2.$$

Соответственно этому числовому ряду распределение фазных зон представлено на рис.3.

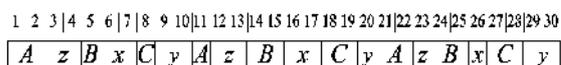


Рис. 3. Распределение фазных зон слоя обмотки после первого этапа симметрирования ($Z=30, q=5/3$)

Проведенное преобразование приводит и к уменьшению уровня несимметрии. Это наглядно иллюстрирует векторная диаграмма МДС по рабочей гармонике, приведенная на рис. 4. Диаграмма свидетельствует, что первый этап симметрирования позволил резко уменьшить как амплитудную, так и угловую несимметрию.

Действительно, амплитуды результирующих векторов МДС изменились $F_A=F_B=9,53; F_C=9,24$. Угловые координаты соответствующих векторов фаз теперь $\varphi_A=50,28^\circ, \varphi_C=-72^\circ, \varphi_B=165,72^\circ$, а их относительные сдвиги $\varphi_{AC}=\varphi_{CB}=122,28^\circ; \varphi_{AB}=115,44^\circ$.

Таким образом, относительная разница амплитуд результирующих векторов МДС уменьшилась до значения

$$\Delta F = \frac{F_A - F_C}{F_A} = \frac{9,53 - 9,24}{9,53} = 0,03,$$

а максимальное отклонение относительного сдвига результирующих векторов МДС от 120° уменьшилось с 12° до $4,56^\circ$.

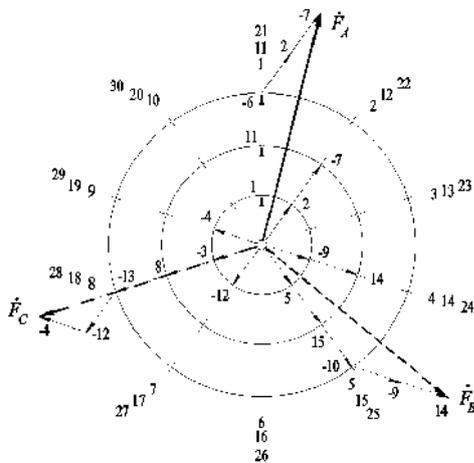


Рис. 4. Векторная диаграмма МДС трехфазной обмотки после преобразования числового ряда

Окончательное устранение несимметрии по рабочей гармонике производится изменением чисел витков в катушках обмотки. Выбор катушек и определение необходимого числа витков выполняется на основании анализа векторной диаграммы (рис.4).

В первую очередь, целесообразно устранить угловую несимметрию. Из диаграммы следует, что вектор \dot{F}_C расположен симметрично относительно векторов \dot{F}_A и \dot{F}_B , поэтому для достижения равенства $\varphi_{AC}=\varphi_{CB}=120^\circ$ необходимо выполнить взаимно противоположное перемещение этих векторов в сторону \dot{F}_C . Необходимое смещение вектора \dot{F}_A против часовой стрелки обеспечивает уменьшение на 23,4 % суммарного вклада элементарных векторов МДС 2 и -7, а смещение \dot{F}_B по часовой стрелке – такое же уменьшение суммы элементарных векторов МДС -9 и 14.

Одним из возможных вариантов реализации указанной трансформации векторной диаграммы является пропорциональное сокращение чисел проводников в АКС с номерами: 2, 7, 17, 22 и 9, 14, 24, 29.

При этом угловые координаты векторов \dot{F}_A и \dot{F}_B станут равными $\varphi_A=48^\circ$ и $\varphi_B=168^\circ$, а амплитуды $F_A=F_B=8,66$. В результате полностью устранена угловая несимметрия, но

при этом несколько возрастет относительная разница амплитуд:

$$\Delta F = \frac{F_C - F_A}{F_A} = \frac{9,24 - 8,66}{9,24} = 0,063.$$

Для равенства амплитуд результирующих векторов МДС фаз $\dot{F}_A, \dot{F}_B, \dot{F}_C$ следует уменьшить величину \dot{F}_C , что может быть выполнено, например, уменьшением на 6 % числа проводников в АКС с номерами: 3, 4, 8, 12, 13, 18, 19, 23, 27, 28. В итоге несимметрия по рабочей гармонике полностью устранена, о чем свидетельствует векторная диаграмма, приведенная на рис. 5.

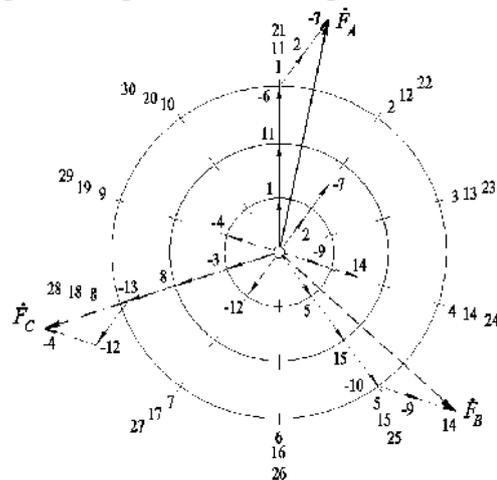


Рис. 5. Векторная диаграмма МДС трехфазной неравновитковой обмотки после завершения симметрирования

Следует отметить, что в данном случае характер распределения АКС с разными числами проводников позволяет реализовать симметрированную обмотку только в двухслойном варианте. При этом заполнение пазов оказывается неравномерным, как это показано на рис. 6. На рисунке полное заполнение пазов условно обозначено штрихпунктирной линией, а ломаной линией соответствует фактическое их заполнение. Использование обмоточного пространства по сравнению с равнокатушечными обмотками уменьшается на 8,3 %.

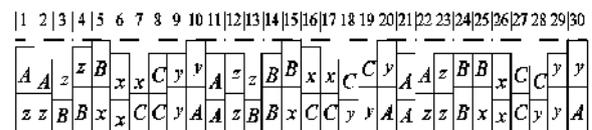


Рис. 6. Распределение АКС трехфазной двухслойной симметрированной обмотки

Предложенная методика применима и для двухфазных обмоток конденсаторных двигателей.

Рассмотрим, например, двухфазную четырехполюсную обмотку, выполненную в 20 пазах. Тогда число пазов на полюс и фазу составит $q=Z/(2pm)=5/2$, а числовой ряд – 3,2, 3,2, 3,2, 3,2, (рис. 7).

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
A	y	x	B	A	y	x	B	A	y	x	B	A	y	x	B	A	y	x	B

Рис. 7. Исходное распределение АКС двухфазной обмотки

Соответствующая векторная диаграмма по рабочей гармонике ($v=p=2$) приведена на рис. 8.

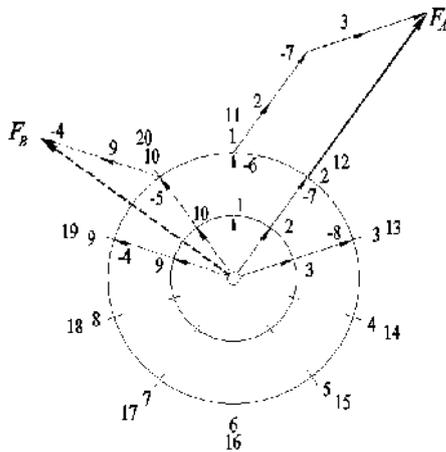


Рис. 8. Векторная диаграмма МДС исходной двухфазной обмотки

Как следует из диаграммы, в исходной обмотке полностью отсутствует угловая несимметрия – результирующие векторы МДС \dot{F}_A и \dot{F}_B сдвинуты на 90° , но относительная разница амплитуд недопустимо велика:

$$\Delta F = \frac{F_A - F_B}{F_A} = \frac{10,472 - 7,6}{10,472} = 0,274.$$

После симметрирования числового ряда обмотки к виду

3, 2, 2, 3, 3, 2, 2, 3

получаем распределение АКС, представленное на рис. 9.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
A	y	x	B	A	y	x	B	A	y	x	B	A	y	x	B	A	y	x	B

Рис. 9. Распределение АКС двухфазной обмотки

В результате амплитудная несимметрия полностью исчезает, но возникает угловое рассогласование $\varphi_A=64,44^\circ$, $\varphi_B=-28,44^\circ$, а относительный сдвиг результирующих векторов фаз $\varphi_{AB}=92,88^\circ$ (рис.10).

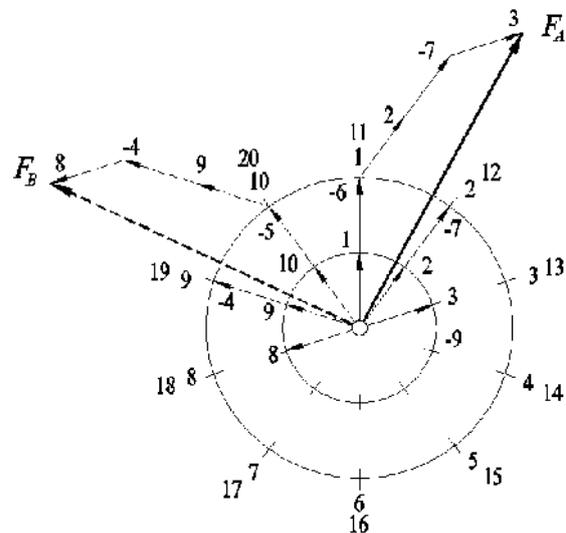


Рис. 10. Векторная диаграмма МДС двухфазной обмотки после первого этапа симметрирования

Из диаграммы МДС следует, что для устранения угловой несимметрии необходимо уменьшить число проводников в АКС с номерами: 3, 8, 13, 18 на 5,8 %. При условии выполнения обмотки двухслойной с шагом по пазам $y=4$ распределение АКС преобразуется так, как показано на рис. 11.

Как следует из рис.11, уменьшение числа витков необходимо выполнить в данном случае только в 8 катушках из 20.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
A	A	A	y	y	x	x	B	B	B	A	A	A	y	y	x	x	B	B	B
A	y	y	y	x	x	x	B	B	A	A	y	y	y	x	x	x	B	B	A

Рис. 11. АКС двухфазной двухслойной симметрированной обмотки

Приведенная на рис. 12 векторная диаграмма свидетельствует о полной симметрии в отношении рабочей гармонике.

Опыт применения предложенного подхода к симметрированию несимметричных обмоток асинхронных короткозамкнутых

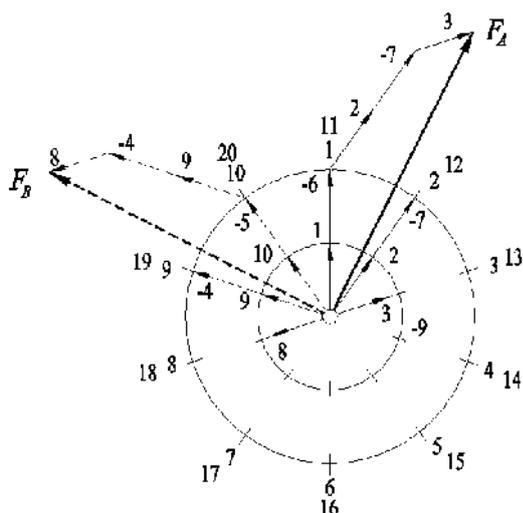


Рис. 12. Векторная диаграмма двухфазной неравновитковой обмотки после завершения симметрирования

двигателей [1,5] показывает, что в режиме нагрузки система токов двигателей оказывается практически симметричной, а их технические показатели незначительно уступают двигателям с симметричными обмотками.

Список использованной литературы

1. А. с. 782046 СССР, М. Кл.³ Н 02 К 3/28. Трехфазная двухскоростная полюсопереключаемая обмотка / Л. Я. Беликова, В. Г. Дегтев, И.Н. Радимов (СССР). – № 2510762; заявл. 20.07.77; опубл.23.11.80. Бюл. № 43.
2. Вольдек А.И. Электрические машины / А.И. Вольдек.– Л.: Энергия, 1974. –839 с.
3. Дегтев В.Г. Методика симметрирования совмещенных обмоток / В.Г. Дегтев, Н.И. Билоненко, В.П. Сверщевский // Электротехника. – № 9. – 1987. – С. 59–64.
4. Лившиц-Гарик М. Обмотки машин переменного тока / М. Лившиц-Гарик. – М.: Госэнергоиздат, 1959. – 766 с.
5. Arnold E. Die Wicklungen der Wechselstrommaschinen /E. Arnold. – Berlin: Verlag von Julius Springer, 1912. – 463 p.

Получено 28.02.2012

References

1. Copyright certificate 782046 USSR, Moscow: Cl.³ H 02 K 3/28. Three-phase two-speed pole switchable coil / L. Ya Belikova, VG money-TEB, IN Radimov (USSR). – № 2510762; req. 20.07.77; publ.23.11.80. Bull. № 43 [in Russian].
2. Voldek A. Electrical machinery. – Leningrad: Energiya, 1974. – 839 p. [in Russian].
3. Degtev V.G., Bilonenko N.I., Svershevsky V.P. The method of balancing the combined windings / Electrician. – № 9. – 1987. – P. 59–64 [in Russian].
4. Livshits-Garik M. winding machines AC. – Moscow: Gosenergoizdat, 1959. - 766 p. [in Russian].
5. Arnold E. Die Wicklungen der Wechselstrommaschinen. – Berlin: Verlag von Julius Springer, 1912. – 463 p. [in German].



Дегтев
Владимир Григорьевич,
д.т.н., проф. каф. Электрических машин Одесск. нац. политехн. ун-та



Абдулькарим
Хусейн Гени,
аспирант каф. Электрических машин Одесск. нац. политехн. ун-та



Бучацкая
Марина Петровна,
студентка каф. Электрических машин Одесск. нац. политехн. ун-та