

УДК 621.313.333.045

Х.Г. Абдулкарим, магистр, Одес. нац. политехн. ун-т

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НЕСИММЕТРИЧНЫХ ОБМОТОК В АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

Х.Г. Абдулкарим. Дослідження можливості використання несимметричних обмоток у асинхронних двигунах. Розглянуто можливість використання дробових обмоток зі знаменниками дробності, кратними кількості фаз, в процесі ремонту асинхронних короткозамкнених двигунів.

Ключові слова: несиметрія, симетрування, знаменник дробності, асинхронний двигун, робочі й механічні характеристики.

Х.Г. Абдулкарим. Исследование возможности применения несимметричных обмоток в асинхронных двигателях. Рассмотрена возможность использования дробных обмоток со знаменателями дробности, кратными числу фаз, в процессе ремонта короткозамкнутых асинхронных двигателей.

Ключевые слова: несимметрия, симметрирование, знаменатель дробности, асинхронный двигатель, рабочие и механические характеристики.

H.G. Abdulkareem. Investigation of the possibility of using asymmetrical windings in asynchronous motors. The possibility of using fractional windings with fractional denominators multiple of the number of phases in the process of repairing asynchronous squirrel-cage motors is considered.

Keywords: asymmetry, balancing, denominator of the fractional, asynchronous/induction motor, operating and mechanical characteristics.

В практике ремонта асинхронных машин встречаются ситуации, когда выполнение перемотки статорной обмотки двигателя на число полюсов p , кратное числу фаз m , возможно только при использовании несимметричных обмоток. При этом необходимо определить изменение технических показателей ремонтируемого двигателя по сравнению с серийным аналогом. Это может быть реализовано путем выполнения электромагнитного расчета. Общепринятый подход к его выполнению, базирующийся на традиционном представлении обмоточных коэффициентов, в данном случае неприменим. Формальное определение этих коэффициентов для каждой из фаз [1] никакой полезной информации не содержит и не позволяет правильно определить даже обмоточные данные двигателя.

Известно, что при условии кратности числа фаз m знаменателю дробности d выполнить многофазную стандартную обмотку двигателя симметричной невозможно. Подобные несимметричные обмотки не нашли применения в серийном производстве электрических машин из-за резкого ухудшения таких технических показателей как номинальная мощность, значения перегрева обмоток и коэффициент полезного действия [2]. При использовании таких несимметричных обмоток резко ухудшается гармонический состав магнитодвижущих сил (МДС) обмотки — возникают как прямо, так и обратно вращающиеся гармоники, создавая в рабочем воздушном зазоре эллиптические магнитные поля. Особенно опасным оказывается их проявление в отношении рабочей гармоники. В результате растут добавочные потери, в кривой момента двигателя возникают провалы, возрастает несинусоидальность электродвижущих сил (ЭДС) на зажимах генераторов, снижаются энергетические и виброакустические показатели, что приводит к уменьшению мощности по сравнению с серийными машинами.

Предлагаются результаты исследования возможности применения несимметричных дробных обмоток в условиях ремонтного производства и сопоставления степени их использования по сравнению с серийными аналогами. Для решения этой задачи необходимо не только спроек-

тировать обмотку с минимальным уровнем несимметрии, изготовить и уложить ее в пазы асинхронного двигателя, но и определить его рабочие свойства.

При знаменателях дробности d , кратных числу фаз m , обмотки характеризуются недопустимо высоким уровнем несимметрии и, в первую очередь, по рабочей гармонике v .

Для уменьшения этого уровня требуется так переформировать распределение активных катушечных сторон (АКС), чтобы уменьшить или полностью исключить несимметрию хотя бы по рабочей гармонике. Подобное преобразование, которое заключается либо в преобразовании числового ряда обмотки [1, 3], либо в изменении чисел витков катушек [4], принято называть симметрированием.

Первый этап решения поставленной задачи заключается в проектировании таких обмоток с минимально возможным уровнем несимметрии. Выполнен этот этап с применением методики симметрирования [5].

В качестве примера рассматривается перепроектирование серийного асинхронного двигателя 4А112МВ8У3, имеющего на статоре число пазов $z = 48$, на число полюсов $2p = 6$, где p число пар полюсов [3]. В этом случае число пазов на полюс и фазу в отремонтированной машине составит $q = Z / (2pm) = 8/3$, где $m = 3$.

При этих условиях появляется возможность проектирования обмоток с одинаковыми числами витков в катушках, которые характеризуются следующими вариантами повторяющейся части числового ряда обмотки:

I — 3, 3, 2, 3, 3, 2, 3, 3, 2;

II — 3, 3, 2, 2, 3, 3, 3, 3, 2;

III — 3, 3, 2, 3, 2, 3, 2, 3, 3.

Каждому из этих вариантов соответствуют обмотки с возможным распределением фазных зон одного слоя на половине обмоточного пространства из 24 пазов (рис. 1).



Рис. 1. Распределение фазных зон 1/2 обмотки с числом полюсов и пазов соответственно $2p = 6$, $Z = 48$

Нетрудно убедиться, что обмотка по варианту I характеризуется максимальной несимметрией, которая резко проявляется уже в отношении числа активных катушечных сторон (АКС) — фазные зоны A и C содержат по 18 АКС, а фаза B — 12 АКС. В варианте II фазные зоны A и B содержат по 15 АКС, а фаза C содержит 18 АКС. Вариант III в этом отношении полностью симметричен.

Сопоставление вариантов по уровню симметрии в отношении рабочей гармоники МДС $v = p = 3$ на основе векторных диаграмм [6] приводит к следующим результатам.

В варианте I амплитуды МДС $F_A = F_C = 17,09$; $F_B = 11,77$, а их относительные сдвиги $\varphi_{AB} = \varphi_{CB} = 123,75^\circ$; $\varphi_{AC} = 112,5^\circ$. Таким образом, амплитудное рассогласование

$$\Delta F_1 = \frac{F_A - F_B}{F_A} = \frac{17,08 - 11,76}{17,08} = 0,31. \quad (1)$$

Угловое рассогласование векторов МДС $\Delta\varphi = 123,75^\circ - 112,5^\circ = 11,5^\circ$.

В варианте II амплитуды результирующих векторов МДС $F_A = F_B = 4,786$; $F_C = 5,586$; а их относительные сдвиги $\varphi_{AB} = 121,68^\circ$; $\varphi_{CB} = \varphi_{AC} = 119,16^\circ$. Таким образом, амплитудное рассогласование

$$\Delta F_{II} = \frac{F_A - F_C}{F_A} = \frac{4,786 - 5,586}{4,786} = 0,16. \quad (2)$$

Угловое рассогласование векторов МДС $\Delta\varphi = 121,68^\circ - 119,16^\circ = 2,52^\circ$.

В варианте III амплитуды результирующих векторов МДС $F_A = F_C = 15,25$; $F_B = 15,09$; а их относительные сдвиги $\varphi_{AB} = \varphi_{CB} = 120,875^\circ$; $\varphi_{AC} = 118,25^\circ$. Таким образом, амплитудное рассогласование

$$\Delta F_{III} = \frac{F_A - F_B}{F_A} = \frac{15,25 - 15,09}{15,25} = 0,01. \quad (3)$$

Угловое рассогласование векторов МДС $\Delta\varphi = 120,875^\circ - 118,25^\circ = 2,62^\circ$.

По результатам сопоставления вариантов по числу катушек в фазах и в отношении рабочей гармоники ν вариант I исключается сразу. Сопоставление вариантов II и III выполнено на основе детального гармонического анализа, базирующегося на представлении симметричных составляющих обмоточных коэффициентов $k_{wd\nu}$, $k_{wr\nu}$ [4] с применением соответствующей программы [1], реализованной в среде MathCad (табл. 1, где ν — порядок гармоники; $k_{wd\nu}$ — обмоточные коэффициенты прямой последовательности по гармонике ν -го порядка; $k_{wr\nu}$ — обмоточные коэффициенты обратной последовательности по гармонике ν -го порядка;

$H_{(d,r)\nu} = \frac{k_{w\nu} p}{k_{wp} \nu}$ — относительная амплитуда МДС соответственно прямой и обратной последовательности по гармонике ν -го порядка).

Таблица 1

Сравнительный гармонический анализ II и III вариантов обмоток

Вариант II				
ν	$k_{wd\nu II}$	$k_{wr\nu II}$	$H_{d\nu II}$	$H_{r\nu II}$
3	0,947	0,042	1,0000	0,045
9	0,052	0,011	0,018	0,004
15	0,154	0,012	0,033	0,003
21	0,062	0,086	0,009	0,013
Вариант III				
ν	$k_{wd\nu III}$	$k_{wr\nu III}$	$H_{d\nu III}$	$H_{r\nu III}$
1	0,0409	0,0134	0,1290	0,0423
3	0,9502	0,0051	1,0000	0,0053
5	0,0416	0,0231	0,0263	0,0146
7	0,0081	0,0313	0,0037	0,0141
9	0,0129	0,0205	0,0045	0,0072
11	0,0184	0,0231	0,0053	0,0066
13	0,0346	0,0374	0,0084	0,0091
15	0,0378	0,1677	0,0082	0,0353
17	0,0275	0,0409	0,0102	0,0102
19	0,0346	0,0027	0,0115	0,0009
21	0,1045	0,0205	0,0157	0,0030
23	0,0395	0,0081	0,0108	0,0022

Сравнительный анализ проводится в предположении, что указанные обмотки предполагается укладывать в пазы статора короткозамкнутого асинхронного двигателя, предназначенного для длительной работы в двигательном режиме. В этом случае для симметричных обмоток наибольшую опасность представляют прямо вращающиеся высшие гармоники, т.к. они могут вызвать провалы в кривой момента двигателя M и ухудшить пусковые и перегрузочные свойства.

ва двигателя. Сопоставление данных показывает, что, несмотря на большее число таких гармоник в варианте III, по наиболее весомым высшим гармоникам ($H_{d5} = 0,0263$ и $H_{d21} = 0,0157$) он предпочтительнее в варианта II, наиболее весомые гармоники которого составляют $H_{d15} = 0,033$ и $H_{d9} = 0,018$. Кроме того, обмотка III варианта характеризуется и несколько более высоким уровнем обмоточного коэффициента по рабочей гармонике — $k_{wd3} = 0,9504$ против $k_{wd3} = 0,947$, что должно обеспечить улучшение энергетических показателей. Наличие достаточно весомой низшей гармоники с относительной амплитудой $H_{d1} = 0,129$ несколько снизит это преимущество, но обеспечит некоторое увеличение моментов в двигательном режиме. Но главный недостаток второго варианта заключается в возможности создания достаточно заметного обратно вращающегося магнитного поля рабочей гармоники, относительная амплитуда которого составляет 4,5 % ($H_{d1} = 0,045$) от основного. Отрицательное влияние высших гармоник на пусковых свойствах асинхронных двигателей малой мощности проявляются незначительно, но несимметрия рабочей гармоники вызовет их резкое ухудшение независимо от габарита машин.

В результате проведенного анализа для реального использования выбрана обмотка варианта III.

На следующем этапе необходимо выбрать программное обеспечение, позволяющее обеспечить адекватное определение рабочих свойств асинхронных двигателей с обмотками II и III вариантов, которое должно отвечать следующим требованиям:

— подпрограмма расчета обмоточных коэффициентов должна соответствовать их трактовке [4], т.е. основываться на методе симметричных составляющих;

— должна обеспечивать расчет указанных коэффициентов. Этим требованиям отвечает программа электромагнитного расчета короткозамкнутых асинхронных двигателей FLINT [4].

Корректность выбора указанной программы проверена с помощью тестирования двух серийных асинхронных двигателей: 4A112MB8 и 4A112MB6 (табл. 2, где $P_{2н}$ — номинальная мощность двигателя; $I_{1ф}$ — фазный ток; η — коэффициент полезного действия; n_n — номинальная частота вращения двигателя; k_M — кратность максимального момента двигателя; $k_{п}$ — кратность пускового момента двигателя).

Таблица 2

Сравнительные данные двух серийных асинхронных двигателей 4A112MB8 и 4A112MB6

Характеристики двигателя 4A112MB8	$P_{2н}$, кВт	$I_{1ф}$, А	η , %	$\cos\varphi$	n_n , об/мин	k_M	$k_{п}$
Справочные [6]	3,0	7,72	79,5	0,74	707	2,2	1,90
Расчетные	3,0	7,33	79,5	0,78	712	2,22	1,89
Относительное расхождение, Δ %	0	5	0	5	0,7	1	0,1
Характеристики двигателя 4A112MB6							
Справочные [6]	4,0	9,12	82	0,81	953	2,5	2,0
Расчетные	4,0	8,99	82,4	0,817	951	2,49	2,0
Относительное расхождение, Δ %	0	1	0,4	0,8	0,2	0,4	0

Относительные расхождения справочных и расчетных данных не превышают 5 %, что вполне допустимо для инженерных расчетов и позволяет использовать указанную программу для расчетного эксперимента.

Для его проведения в качестве базового был выбран двигатель 4A112MB8, в котором рассматривались замена симметричной серийной обмотки вариантами II и III несимметричных обмоток. Выбор номинальной мощности $P_{2н} = 3,5$ кВт выполнен, исходя из условий сохранения кратностей пускового и максимального моментов и уровня перегрева обмотки статора.

На первом этапе рассчитаны механические характеристики для случаев применения II и III вариантов обмотки в исследуемом двигателе. Рассчитаны зависимости $M_{III}^* = f(s)$ и $M_{II}^* = f(s)$ для применения II и III вариантов, где s — скольжение асинхронного двигателя (рис. 2).

Как следует из сопоставления этих зависимостей, при использовании II варианта наблюдается резкое (11 %) уменьшение максимального момента M_{II}^* , как это и было определено результатами анализа.

Поэтому в последующих расчетах вариант II обмотки не рассматривался, и рабочие характеристики определены только для двигателя с обмоткой по варианту III, где P_1 — потребляемая мощность, P_2 — полезная мощность на валу (рис. 3), получены основные номинальные данные по результатам расчетов (табл. 3).

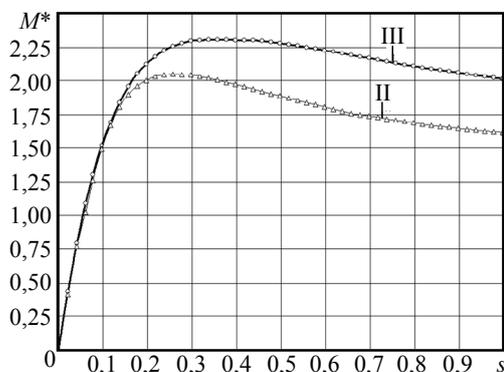


Рис. 2. Пусковая характеристика $M^*=f(s)$ двигателя с обмоткой вариантов II и III

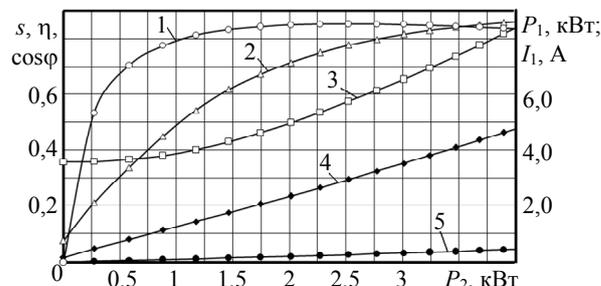


Рис. 3. Рабочие характеристики двигателя 4A112MB6: η (1), $\cos\varphi$ (2), $I_{1\phi}$ (3), P_2 (4), s (5)

Перегрев симметризованной обмотки статора по варианту III составил 60 °С, аналогичные показатели в серийных двигателях 4A112MB6 и 4A112MB8 составили 75 °С и 70 °С, соответственно.

Таблица 3

Сравнительные данные номинальных данных сопоставляемых двигателей

Характеристики двигателя 4A112MB6	$P_{2н}$, кВт	$I_{1\phi}$, А	η , %	$\cos\varphi$	n_n , об/мин	k_M	k_{II}
Справочные серийного[6]	4,0	9,12	82	0,81	953	2,5	2,0
Расчетные серийного	4,0	8,99	82,4	0,817	951	2,49	2,0
Расчетные выбранного	3,5	7,4	84,0	0,853	949	2,4	2,0

Проведенные исследования показывают, что при условии практического сохранения симметрии по рабочей гармонике несимметричной обмотки допустима замена такой обмоткой симметричных серийных в асинхронных короткозамкнутых двигателях мощностью примерно до одного кВт. При этом ожидаемое снижение номинальной мощности составит примерно 12,5 %.

Литература

1. Луцки, В.Д. Универсальная методика расчета обмоточных коэффициентов / В.Д. Луцки. // Электротехника и электромеханика. — 2011. — № 1. — С. 28 — 30.
2. Дегтев, В.Г. Анализ намагничивающих сил обмоток переменного тока / В.Г. Дегтев, И.Н. Радимов // Электромашиностроение и электрооборудование: респ. межвед. науч.-техн. сб. — К.: Техника, 1975. — Вып. 20. — С. 122 — 128.
3. Лившиц-Гарик, М. Обмотки машин переменного тока / М. Лившиц-Гарик. — М.: Госэнергоиздат, 1959. — 766 с.
4. Дегтев, В.Г. Особенности гармонического анализа многофазных несимметричных обмоток / В.Г. Дегтев, Х.Г. Абдулкарим, М.П. Буцацкая // Электротехника и электромеханика — 2012. — № 4. — С. 31 — 35.

5. Дегтев, В.Г. Симметрирование обмоток / В.Г. Дегтев, Х.Г.Абдулкарим, М. П. Бучацкая // Электротехнические и компьютерные системы. — К.: Техніка, 2011. — № 4(80), — С. 101 — 105. — 2012. — № 5(81). — С.101 — 105.
6. Асинхронные двигатели серии 4А / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонии, Е.А. Соболенская // Справочник. А90. — М: Энергоиздат, 1982. — 504 с.

References

1. Lushchik, V.D. Universal'naya metodika rascheta obmotochnykh koeffitsientov [The universal method of calculating the winding ratios] / V.D Lushchik, // Elektrotehnika i elektromekhanika [Electrical Engineering and Electromechanics]. — 2011. — #1. — pp. 28 — 30.
2. Degtev, V.G Analiz namagnichivayushchikh sil obmotok peremennogo toka [Analysis of the magnetizing forces in AC windings] / V.G Degtev, I.N Radimov // Elektromashinostroenie i elektrooborudovanie: resp. mezhved. nauch-tekhn. sb. [Electrical Machine Industry and Electrical Equipment] Resp. Interagency Sci. and Eng. Coll. — 1975. — Vol. 20, pp. 122 — 128.
3. Livshits-Garik, M. Obmotki mashin peremennogo toka [Windings of AC Machines] / Livshits-Garik M. — Moscow, 1959. — 766 p.
4. Degtev, V.G. Osobennosti garmonicheskogo analiza mnogofaznykh nesimmetrichnykh obmotok [Features of the harmonic analysis of multi-phase asymmetrical windings] / V.G. Degtev, Kh.G. Abdulkarim, M.P. Buchatskaya // Elektrotehnika i elektromekhanika [Electrical Engineering and Electromechanics]. — 2012. #4. — pp. 31 — 35.
5. Degtev, V.G.. Simmetrirovaniye obmotok [Balancing of windings] / V.G. Degtev, Kh.G.Abdulkarim, M.P. Buchatskaya // Elektrotekhnicheskie i komp'yuternye sistemy [Electrotechnical and Computer Systems.] Kyiv, 2011. — # 4(80). — pp. 101 — 105. — 2012. — #5(81). — pp. 101 — 105.
6. Asinkhronnye dvigateli serii 4A [Induction motors of the series 4A] / A.E. Kravchik, M.M. Shlav, V.I. Afonin, E.A. Sobolenskaya // Spravochnik. A90 [Induction motors of the series 4A // Directory. A 90] — Moscow, 1982. — 504 p.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. политехн. ун-та Пуйло Г.В.

Поступила в редакцию 24 сентября 2013 г.