

УДК 621.313.333.045

В. Г. Дегтев, Х. Г. Абдулкарим, С. Ю. Марулин

Одесский национальный политехнический университет, пр. Шевченко 1, г. Одесса 65044

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ СИНТЕЗ НЕСИММЕТРИЧНЫХ МНОГОФАЗНЫХ ОБМОТОК

Разработано программное обеспечение автоматизированного синтеза двух- и трехфазных обмоток с пониженным уровнем несимметрии, предназначенных для использования в процессе ремонта электрических машин. Алгоритм синтеза основан на достижении практической симметрии по рабочим гармоникам, что позволяет применить метод симметричных составляющих для выполнения детального гармонического анализа и последующего определения эксплуатационных свойств электрических машин, в которых такие обмотки используются.

Ключевые слова: автоматизированный синтез, многофазные обмотки, рабочие гармоники, гармонический анализ, метод симметричных составляющих.

В. Г. Дьогтєв, Х. Г. Абдулкарим, С. Ю. Марулін

Одеський національний політехнічний університет, пр. Шевченка 1, м. Одеса 65044

АВТОМАТИЗОВАНИЙ СИНТЕЗ НЕСИММЕТРИЧНИХ ТРИФАЗНИХ ОБМОТОК

Розроблене програмне забезпечення автоматизованого синтезу дво- та трифазних обмоток з зниженим рівнем несиметрії, які призначені до застосування у процесі ремонту електричних машин. Алгоритм синтезу заснований на досягненні практичної симетрії до робочих гармонік, що дозволяє застосувати метод симетричних складових для виконання детального гармонійного аналізу та подальшого визначення експлуатаційних властивостей електричних машин, у яких дані обмотки використовуються.

Ключові слова: автоматизований синтез, багатофазні обмотки, робочі гармоніки, гармонійний аналіз, метод симетричних складових

I. ВВЕДЕНИЕ

Известно [1, 2], что при условии кратности знаменателя дроби d числу фаз m в обмотках с дробными числами пазов на полюс и фазу или в случае кратности одного из чисел полюсов p полюсопереключаемой обмотки выполнить их симметричными невозможно. Однако, на практике встречаются ситуации, когда выполнение ремонта электрической машины требует использования именно подобных несимметричных обмоток. В таких случаях задача решается снижением несимметрии обмоток до допустимого уровня. Практика применения таких симметрированных обмоток в асинхронных короткозамкнутых двигателях показывает [2, 3], что их эксплуатация возможна при условиях, когда угловая несимметрия по рабочей гармонике не превышает $1^\circ \div 3^\circ$, а амплитудная – $2\% \div 5\%$. При обеспечении этих условий эксплуатационные свойства двигателя незначительно ухудшаются по сравнению с серийными машинами. Учет снижения технических показателей двигателя возможен только с использованием результатов детального гармонического анализа МДС симметрированной обмотки [4, 5].

Симметрирование обмоток состоит из двух этапов. На предварительной стадии выполняется перераспределение активных катушечных сторон

(АКС) исходной обмотки путем изменения числового ряда [2, 4]. При этом хотя и достигается некоторое снижение уровня несимметрии, однако, полностью устранить ее даже в отношении рабочей гармоники $v=r$ не удается. Целью окончательного симметрирования является обеспечение полной симметрии по $v=r$, которое достигается подбором определенного соотношения чисел витков в катушках обмотки [6]. Система токов в двигателях с обмотками, удовлетворяющими последнему условию, практически симметрична, что позволяет выполнить детальный гармонический анализ, основанный на методе симметричных составляющих [4].

Симметрирование обмоток связано с многократными графическими построениями векторных диаграмм, а выполнение гармонического анализа – с большим объемом расчетов. Поэтому создание специального программного обеспечения (ПО), автоматизирующего эти процессы является актуальной практической задачей, решение которой позволит резко снизить трудоемкость проектирования таких специальных обмоток.

Задачей настоящей статьи является создание программного обеспечения автоматизированного синтеза симметрированных двух- и трехфазных обмоток и детального гармонического анализа их МДС.

Занесение исходных данных иллюстрирует панель программы, приведенная на рис.3. Число фаз $m=3$ задается простановкой метки в соответствующем круглом окошке в верхней части панели. Ниже в соответствующих окнах заносятся числа полюсов $p=3$ и шаг обмотки по пазам, выбранный в данном случае диаметральный ($y=4$).



Рисунок 3 – Панель ввода данных

Числа АКС n_j в каждой из фаз, массивы номеров пазов $\{N_j\}$ и относительных чисел витков $\{w_j\}$ могут быть подготовлены заранее в виде таблиц EXCEL и введены нажатием кнопки «Загрузить данные».

Допускается занесение перечисленных выше данных вручную после ввода чисел АКС n_j в каждой из фаз после нажатием кнопки с соответствующим названием, после чего активизируются два или три окна (в соответствие с числом фаз) с ячейками для ввода номеров пазов $\{N_j\}$ в соответствие с (1). Ячейки массивов $\{w_j\}$ относительных чисел витков в этом случае автоматически заполняются значениями, равными 1.

В нижней части панели выбираем режим «Отладка» и нажимом кнопки «Вывести результат» активируем появление окна отладки (рис.4) с векторной диаграммой и координатами результирующих векторов МДС каждой из фаз.

Выполним анализ полученных результатов. Из диаграммы и данных, приведенных в таблице следует, что результирующие векторы **F1** и **F2** равны и располагаются симметрично относительно вектора **F3**, имеющего меньшую амплитуду. Кроме того, табличные данные свидетельствуют о том, что $\Delta\alpha_{13}=\Delta\alpha_{23}=123,3^\circ$, а $\Delta\alpha_{12}=113,4^\circ$, т.е. отличаются от необходимых для выполнения угловой симметрии 120° . Понятно, что для устранения указанного углового рассогласования необходимо векторы **F1** и **F2** повернуть на $3,3^\circ$ в направлении вектора **F3**. Выполнить такой поворот можно,

уменьшив величину единичных векторов с номерами 2, 14, 11 и 23. Реализация такого преобразования осуществляется путем уменьшения относительного числа витков w^* в АКС с соответствующими номерами.

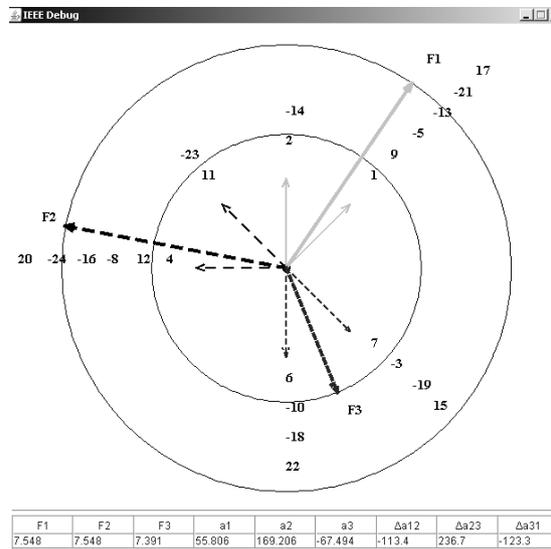


Рисунок 4 – Окно с векторной диаграммой в режиме отладки

Необходимые значения относительных чисел витков указанных АКС определяются методом последовательных приближений в интерактивном режиме вплоть до достижения требуемой точности. После нескольких циклов последовательных приближений при $w^*=0,642$ получаем практически одинаковые углы $\Delta\alpha_{ij}\approx 120^\circ$ между результирующими векторами МДС, приведенные в табл. 1.

Таблица 1 – Данные для симметрирования

F1	F2	F3	a1	a2	a3	Δa12	Δa23	Δa31
6.969	6.969	7.391	52.505	172.508	-67.494	-113.4	240.002	-119.999

Из этой же таблицы следует, что амплитуда МДС третьей симметрирующей фазы составляет 7,391 и превышает величины МДС остальных двух фаз на 0,422.

Приступим к амплитудному симметрированию, которое, очевидно, должно заключаться в уменьшении МДС F3. Такое уменьшение можно выполнить разными способами, но при соблюдении одного важного условия – сохранении угловой симметрии.

Проще всего обеспечить это условие при одновременном уменьшении величин всех единичных векторов МДС указанной фазы. Степень такого уменьшения определяется как отношение амплитуд МДС:

$$w^* = F1(2) / F3 = 6,97 / 7,391 = 0,943.$$

После занесения этих значений получаем окно программы, приведенное на рис.5.

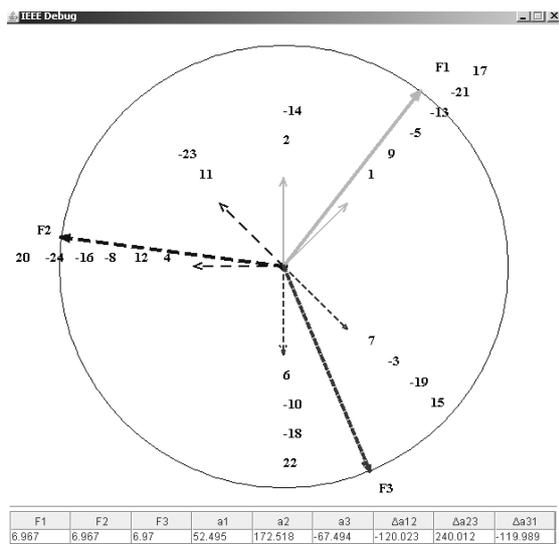


Рисунок 5 – Вид окна программы после завершения симметрирования

Полученные результаты свидетельствуют о достижении практически полной симметрии в отношении рабочей гармоники и завершении процесса симметрирования обмотки.

Далее, посредством активации кнопки «Расчет» программа выполняет детальный гармонический анализ симметрированной обмотки, результаты которого могут быть просмотрены и проанализированы в соответствующем окне программы или сохранены на диске в виде файла EXEL, после чего могут быть распечатаны. Результаты полного гармонического анализа исходной и симметрированной обмоток приведены ниже в табл.2 и 3 соответственно.

В приведенных таблицах выделены жирным шрифтом две строки, отображающие важнейшие показатели сопоставляемых обмоток.

Таблица 2 – Результаты гармонического анализа исходной обмотки

v	k_{Yv}	k_{D0v}	k_{D1v}	k_{Ddv}	k_{W0v}	H_{0v}	k_{Wrv}	H_{rv}	k_{Wdv}	H_{dv}
1	0,5	0,128	0,102	0,165	0,064	0,204	0,051	0,163	0,083	0,265
3	1,0	0,034	0,936	0,025	0,037	0,040	0,936	1,0	0,025	0,027
5	0,5	0,308	0,132	0,022	0,154	0,099	0,066	0,042	0,011	0,007
7	0,5	0,128	0,165	0,102	0,064	0,029	0,083	0,038	0,051	0,023
9	1,0	0,526	0,104	0,039	0,526	0,187	0,104	0,037	0,039	0,014
11	0,5	0,308	0,022	0,132	0,154	0,045	0,011	0,003	0,066	0,019
$S_D=0,10986$ $S_R=1,06067$ $S_0=0,07276$ $\tau_d=0,24330$ $\tau_{da}=0,17054$										

Во первых, это составляющие обмоточных коэффициентов k_{Y3} , k_{D03} , k_{D13} , k_{Dd3} , k_{W03} , k_{W13} , k_{Wd3} и их относительных амплитуд H_{03} , H_{d3} , H_{r3} по рабочей гармонике $v=p=3$. Сопоставление этих строк наглядно демонстрирует преимущество симметрированной обмотки по сравнению с исходной.

Действительно, величина обмоточного коэффициента по рабочей гармонике k_{W13} увеличилась с 0,939 до 0,945, а симметричные составляющие k_{W03} и k_{W03} отсутствуют, что гарантирует создание практически кругового вращающегося поля в зазоре электрической машины и лучшее использование ее активной части.

Таблица 3 – Результаты гармонического анализа симметрированной обмотки

v	k_{Yv}	k_{D0v}	k_{D1v}	k_{Ddv}	k_{W0v}	H_{0v}	k_{Wrv}	H_{rv}	k_{Wdv}	H_{dv}
1	0,5	0,110	0,136	0,050	0,068	0,216	0,025	0,079	0,055	0,174
3	1,0	0,000	0,000	0,945	0,000	0,000	0,945	1,000	0,000	0,000
5	0,5	0,265	0,065	0,142	0,033	0,021	0,071	0,045	0,132	0,084
7	0,5	0,110	0,050	0,136	0,025	0,011	0,068	0,031	0,055	0,025
9	1,0	0,588	0,011	0,185	0,011	0,004	0,185	0,065	0,588	0,207
11	0,5	0,265	0,142	0,065	0,071	0,021	0,033	0,009	0,132	0,038
$S_D=0,103849$ $S_R=1,04444$ $S_0=0,048106$ $\tau_d=0,19640$ $\tau_{da}=0,14829$										

Во вторых, в последней строке выделены интегральные показатели гармонического состава МДС обмоток, включающие в себя S_D , S_R , S_0 , представляющие собой суммы квадратов относительных амплитуд H_{0v} , H_{dv} , H_{rv} добавочных гармоник и коэффициенты дифференциального рассеяния τ_d и τ_{da} . Первый из них τ_d трактуется традиционно [7] и оценивает относительные затраты энергии на создание полей этих гармоник, которые вызывают только увеличение добавочных потерь. Второй показатель τ_{da} представляет собой интерпретацию первого с учетом того факта, что в асинхронных машинах симметричные составляющие нулевой последовательности соответствующих магнитных полей не генерируют. Как следует из сопоставления указанных данных все перечисленные показатели последних строк таблиц 2,3 в обмотке, симметрированной с применением разработанного ПО уменьшились.

Аналогичным образом ПО позволяет осуществлять синтез симметрированных двухфазных обмоток.

III. ВЫВОДЫ

Разработанное программное обеспечение, основанное на методике симметрирования [6] по рабочей гармонике и использовании метода симметричных составляющих [4], позволило на порядок сократить время синтеза слабо несимметричных многофазных обмоток.

Модуль визуализации векторных диаграмм исключает необходимость выполнения трудоемких графических построений и упрощает реализацию метода последовательных приближений в процессе симметрирования и обеспечивает решение задачи проектирования таких обмоток на высоком техническом уровне.

ЛИТЕРАТУРА

1. **В. Г. Дегтев, Е. Н. Radimov.** Анализ намагничивающих сил обмоток переменного тока. Электромашиностроение и электрооборудование.–Респ. межвед.науч.-техн. сб.–К.: Техника 1975.–Вып. 20. – С.122-128.
2. **М. Лившиц-Гарик.** Обмотки машин переменного тока/ М.: Госэнергоиздат, 1959.–766 с.
3. **Х. Г. Абдулкарим.** Исследование возможности применения несимметричных обмоток в асинхронных двигателях //Праці Одеського політехнічного університету//Вип.3 (42), 2013.– С. 117-123.
4. **В. Г. Дегтев, Х. Г. Абдулкарим, М. П. Бучацкая.** Особенности гармонического анализа много-

фазных несимметричных обмоток // Электротехника и электромеханика.–2012.–№4.–С. 31-35.

5. **Лущик В. Д.** Универсальная методика розрахунку обмоткових коефіцієнтів //Електротехніка і електромеханіка.–2011.–№1.–С. 28-30.
6. **В. Г. Дегтев, Х. Г. Абдулкарим, М. П. Бучацкая.** Методика симметрирования обмоток// Электротехника и электромеханика.–2012.–№5.– С. 100-105.
7. **Геллер Б., Гамата В.** Дополнительные поля, моменты и потери мощности в асинхронных машинах. –М.: Энергия, 1981. –352 с.

W. G. Degtev, H. G. Abdulkareem, S. J. Marulin

Odessa national polytechnic university, Shevchenko avenue, 1, Odessa, 65044

AUTOMATED SYNTHESIS OF ASYMMETRIC MULTIPHASE WINDINGS

The article presents the results of the software of the automated synthesis of two-and three-phase windings with a reduced level of asymmetry. The necessity of using such a weakly asymmetric windings periodically arises on the enterprises specializing in the repair of electrical machines, so the task of such symmetrize windings design is relevant. Algorithm of synthesis of these multi-phase windings is based on balancing - achieving of practical symmetry on harmonics symmetry that ensures the correct application of the method of symmetrical components to perform a detailed harmonic analysis of the winding MDS. Implementation of this algorithm in manual mode requires multiple graphic design of vector diagrams and performing of repetitive routine calculations, therefore characterized by higher labor input. The proposed software is characterized by a user-friendly interface. Both automated and manual input of initial data, as well as their operational adjustment are provided. Visualization module of vector diagrams eliminates the need of manual graphic design, on the order reduces the time required in the process of balancing using the method of successive approximations and provides almost complete symmetry by working harmonica. On the second stage the compliance of detailed harmonic analysis and printing of the obtained results or saving in files are provided so you can use them for subsequent determination of operational properties of electric machines, in which such winding are used. Effectiveness of the developed software is illustrated by the example of symmetrize three-phase winding synthesis with demonstration of performance technology of each stage of design and comparing of its electromagnetic properties before and after balancing.

Keywords: automated synthesis, multiphase windings, workers harmonic, harmonic analysis, symmetrical components method.

REFERENCES

1. **V. G. Degtev, E. N. Radimov.** Analiz namagnichivaayushikh ssl obmotok peremennogo toka [Analysis of the magnetizing force winding AC]//Elektromashinostroyeniye I elektrooborudovaniye [electrical machinery and electrical equipment]: Resp. Interagency. scientific and engineering. Sat – 1975. – Vol. 20, page 122-128.
2. **M. Livshits-Garik.** Obmotki mashin peremennogo toka [Winding machines AC].-Moscow: Gosenergoizdat, 1959. –766 p.[in Russian].
3. **H. G. Abdulkareem.** Issledovaniye vozmojnosti primeneniya nesimetrichnikh obmotok v asinkhronnikh dvigatelyakh [Investigation of the possibility of using asymmetrical windings in asynchronous motors] // pratsi Odeskogo politekhnicheskogo universyteta // № 3 (42), 2013 – p. 117-123.
4. **V. G. Degtev., H. G. Abdulkareem., M. P. Buchatskaya.** Osobennost garmonicheskogo analiza mnogofaznikh nesimetrechnikh obmotok [Features of

the harmonic analysis of vulti-phase windings asymmetrical] //Elektrotekhnika i elektromekhanika// 2012. – №4. – 31-35 p.

5. **V. D. Lushek.** Universal`naya metodika rascheta obmotochnykh koeffitsientov[Universal design procedure of winding coefficients] // Electronics and elektromekhanika. 2011. – № 1. – P. 28-30.
6. **V. G. Degtev., H. G. Abdulkareem., M. P. Buchatskaya.** Metodika simetirovaniya [Technique of windings symmetrizing] //Elektrotekhnika i elektromekhanika. 2012. – №5. – 100-105 p.
7. **Geller B., Gamata B.** Dopolnitelniye polya, momenty i potery moschnosti v asinkhronnikh mashinakh [Additional fields, the moments and power losses in asynchronous machine. – М.: Энергия, 1981. –352 p.

Отримана в редакції 10.03.2014, прийнята до друку 29.04.2014