

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГАРМОНИЧЕСКОГО СОСТАВА РЕЗУЛЬТИРУЮЩЕГО ТОКА ЧЕТЫРЕХФАЗНОЙ СИММЕТРИЧНОЙ ОБМОТКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ

Терешкин В.М.

*Уфимский государственный авиационный технический университет,
УГАТУ, ул. К. Маркса, 12, Уфа, 450008, Республика Башкортостан, Россия
e-mail: tvn53@mail.ru*

На основе классического подхода проведен анализ гармонического состава результирующего тока четырехфазной обмотки электродвигателя. Установлено, что гармоники 1, 5, 9 являются гармониками прямого следования, а гармоники 3, 7, 11 — это гармоники обратного следования. Так как гармоники 1, 3, 5 результирующего тока соизмеримы, то в пределах периода первой гармоники возможны значительные вибрации электромагнитного происхождения. По гармоническому составу результирующего тока обмотки с нечетным количеством фаз 5, 7, 9 и т.д. имеют преимущество перед четырехфазной обмоткой. Это позволяет предположить, что обмотки с нечетным количеством фаз обеспечивают более низкий уровень вибраций электромагнитного происхождения.

Ключевые слова: четырехфазная обмотка двигателя, результирующий ток четырехфазной симметричной обмотки, гармонический состав результирующего тока, вибрации электромагнитного происхождения.

Современный уровень развития силовой электроники, микропроцессорной техники и информационных технологий обеспечивает возможность создания устройств, преобразующих электроэнергию постоянного тока в систему симметричного многофазного напряжения переменного тока с любым количеством фаз. Симметричное многофазное напряжение может быть применено, например, для питания многофазных обмоток электродвигателей.

В ряде зарубежных работ электропривод на основе многофазных машин рассматривается как альтернатива трехфазному электроприводу. Значительное внимание этому вопросу уделяют при создании электромобилей, гибридных силовых установок и тягового электропривода с использованием топливных элементов [1—3]. Топливные элементы рассматриваются как перспективные источники электроэнергии для применения на водном транспорте.

В работах [4—6] и других работах зарубежных авторов рассмотрены вопросы влияния количества фаз электродвигателя на снижение значения номинального фазного тока, повышение надежности и снижение уровня шума и вибраций.

Работы [16—21] занимают значительное место в создании многофазных электроприводов с пони-

женным уровнем вибраций, которые находят применение в текстильной промышленности.

Вопрос разработки электроприводов на основе многофазных двигателей условно можно разделить на три аспекта.

Первый — это создание многофазных преобразователей, реализующих векторную широтно-импульсную модуляцию. На аппаратном уровне этот вопрос решается установкой дополнительных «диагоналей» в мост преобразователя (два дополнительных транзистора на одну фазу). На программном уровне это разработка алгоритмов управления многофазными преобразователями, реализующими векторную широтно-импульсную модуляцию [23, 24, 26]. На схемотехническом уровне эти вопросы аналогичны вопросам, которые относятся к трехфазному электроприводу. Они рассмотрены, например, в работах [12, 13].

Второй — это разработка теории и создание многофазных двигателей. Некоторые составляющие этого аспекта рассмотрены, например, в работе [25]. Многофазный двигатель может быть создан на основе магнитной системы трехфазного двигателя за счет изменения схемы обмотки.

Третий — это векторное управление многофазными двигателями. Эти вопросы частично рассмот-

рены в работах [11, 14]. Для их решения необходимы соответствующая элементная база и программный продукт, реализующий определенные принципы векторного управления.

Многофазные двигатели с векторным управлением (количество фаз более трех) уже находят применение в тяговом электроприводе. Например, 4-фазные асинхронные двигатели с векторным управлением, разработанные фирмой «Siemens», успешно применяются в тяговом электроприводе на серийном электровозе серии 2ЭС10 «Гранит» [22]. Таким образом, в настоящее время многофазные электродвигатели ($m > 3$) уже являются альтернативой приводам на основе 3-фазного двигателя и дальнейшие исследования в области многофазных электрических машин имеют важное теоретическое и практическое значение.

Спектральный состав результирующего тока 4-фазной обмотки электрической машины, подключенной к мостовому преобразователю, не исследован, как и многие другие вопросы, связанные с созданием электропривода на основе многофазных двигателей. Однако этот вопрос имеет важное практическое значение с точки зрения снижения вибраций электромагнитного происхождения.

Для формирования симметричного 4-фазного напряжения с помощью мостового преобразовате-

ля необходимы восемь силовых ключей и четыре коммутации за период. Для формирования симметричного 3-фазного напряжения мостовым преобразователем необходимы шесть силовых ключей и шесть коммутаций за период. Для формирования симметричного 5-фазного напряжения мостовым преобразователем необходимы десять силовых ключей и десять коммутаций за период [24] и т.д.

По количеству коммутаций за период 4-фазный электропривод имеет преимущество перед 3-фазным и 5-фазным. Однако, как показали предварительные исследования, спектр результирующего тока, создающего намагничивающую силу в воздушном зазоре 5-фазной обмотки, имеет преимущество перед аналогичным параметром 3- и 4-фазных обмоток. Наличие интенсивного спектра гармоник в результирующем токе, создающем намагничивающую силу, может негативно влиять на вибрации электрической машины электромагнитного происхождения.

Данная работа посвящена оценке гармонического состава результирующего тока 4-фазной симметричной обмотки.

На рис. 1 приведены схема 4-фазной обмотки и ее векторное пространственное представление. Схема имеет следующие параметры: $Z = 32$, $p = 2$, $q = Z/2pm = 2$. Угол между соседними пазами равен

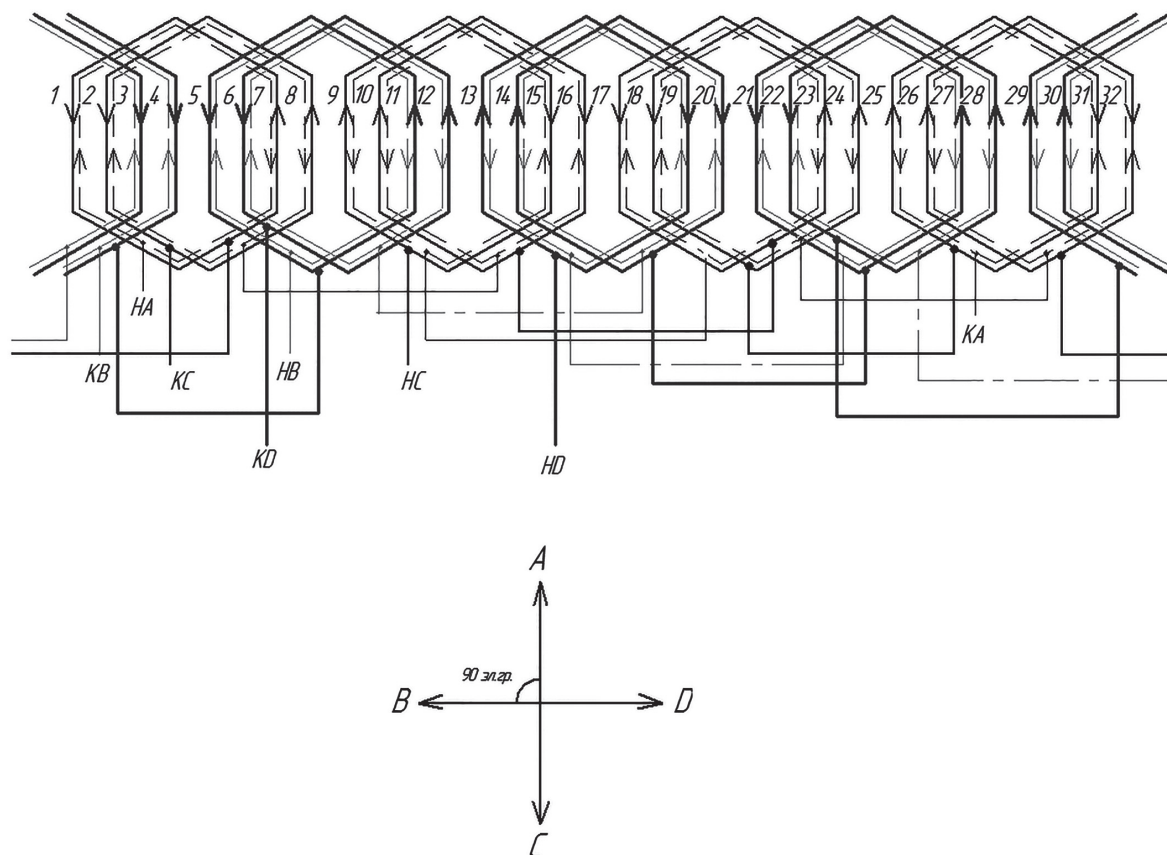


Рис. 1. Схема 4-фазной обмотки и ее векторное пространственное представление

$720/32 = 22,5$ эл.гр. Катушечный шаг обмотки $y = 7 - 1 = 6$. На схеме стрелками показаны направления токов в момент коммутации.

На рис. 2 приведена функциональная схема подключения 4-фазной симметричной обмотки к мостовому преобразователю и симметричное 4-фазное напряжение, которое формируется при реализации следующей последовательности коммутаций ключей преобразователя:

- вектор 1: 1, 4, 6, 7 ($A_+ B_- C_- D_+$);
- вектор 2: 1, 3, 6, 8 ($A_+ B_+ C_- D_-$);
- вектор 3: 2, 3, 5, 8 ($A_- B_+ C_+ D_-$);
- вектор 4: 2, 4, 5, 7 ($A_- B_- C_+ D_+$).

Данная последовательность коммутаций формирует вращающийся вектор, модуль которого при единичном входном напряжении преобразователя равен $\sqrt{2}$. Процесс, проиллюстрированный рис. 2, принято называть векторной широтно-импульсной модуляцией».

Эквивалентная схема нагрузки преобразователя в каждый из четырех моментов коммутации за период приведена на рис. 3. В обозначениях принято: A_+ — ток втекает в фазу A; A_- — ток вытекает из фазы A.

Амплитуда первой гармоники фазного напряжения при единичном входном напряжении преобразователя равна 0,637.

Гармонический состав фазных токов 4-фазной обмотки аналитически может быть представлен в виде:

$$i_A = \sum_{n=1,3,5...} I_{mn} \sin(n \cdot \omega t - 0);$$

$$i_B = \sum_{n=1,3,5...} I_{mn} \sin(n \cdot \omega t - n \cdot 90^\circ);$$

$$i_C = \sum_{n=1,3,5...} I_{mn} \sin(n \cdot \omega t - n \cdot 180^\circ);$$

$$i_D = \sum_{n=1,3,5...} I_{mn} \sin(n \cdot \omega t - n \cdot 270^\circ).$$

На рис. 4 представлены временные гармонические составляющие фазных токов 4-фазной обмотки (нагрузка симметричная), а на рис. 5 в векторной форме представлена симметричная 4-фазная обмотка, в фазах которой протекают гармоники тока, обозначенные векторами. На рис. 5 изображено формирование результирующего вектора тока по 1-й гармонике в момент, когда $\omega t = 45^\circ$.

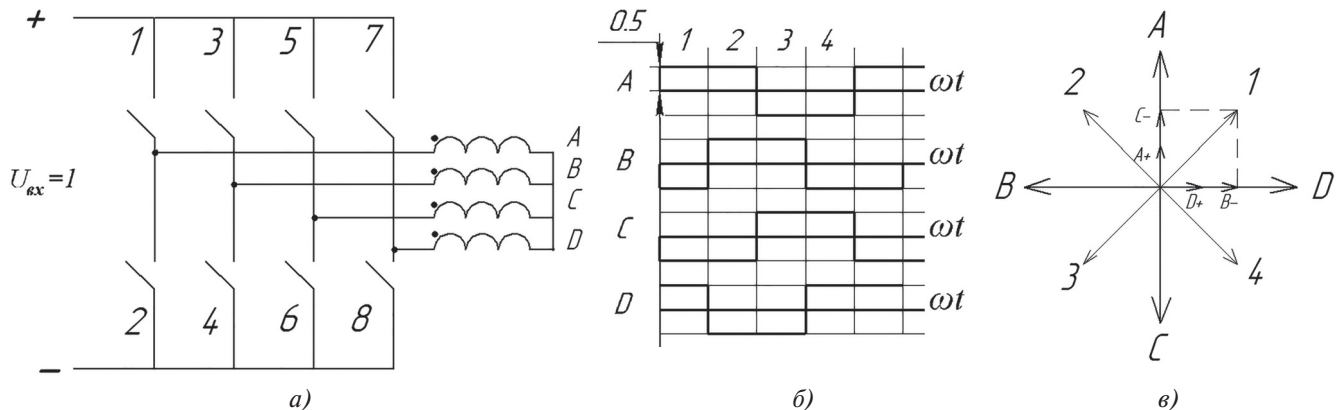


Рис. 2. Векторная широтно-импульсная модуляция 4-фазного преобразователя

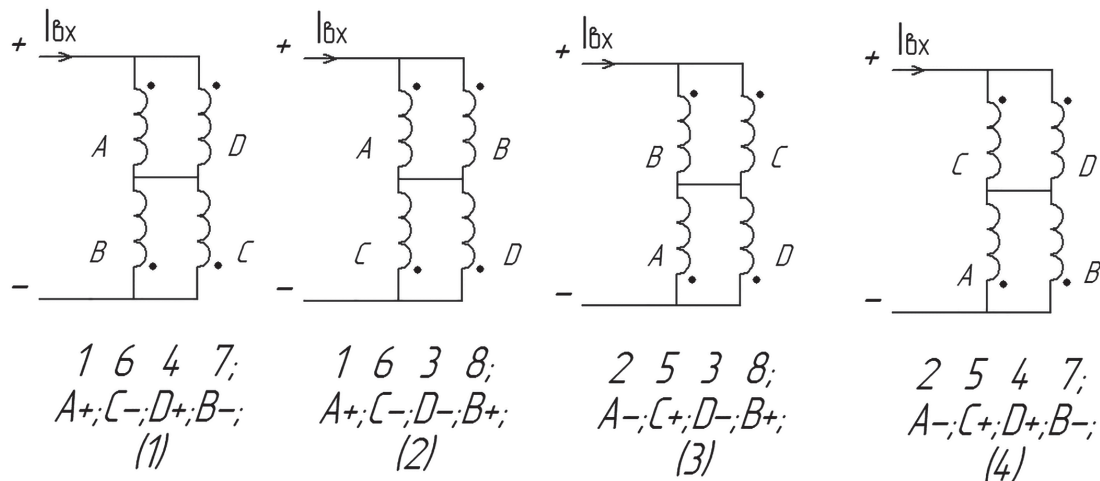


Рис. 3. Эквивалентные схемы нагрузки преобразователя

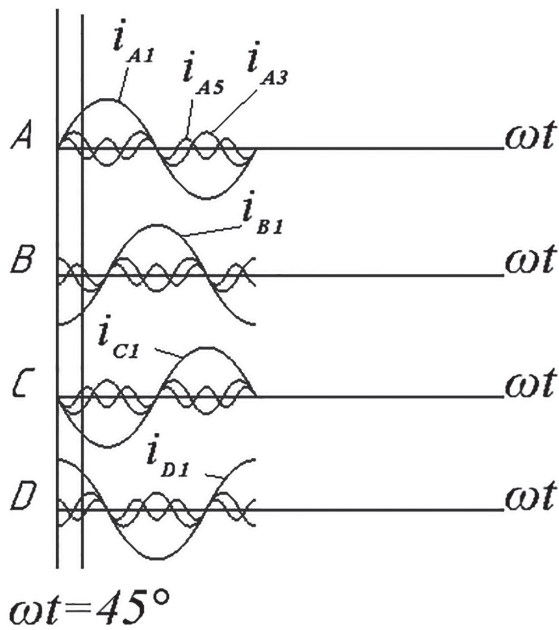


Рис. 4. Гармонические составляющие фазных токов 4-фазной обмотки

В момент $\omega t = 45^\circ$, если амплитуда синусоидального фазного тока равна единице, мгновенные значения фазных токов равны:

$$I_A = \frac{\sqrt{2}}{2}, I_B = -\frac{\sqrt{2}}{2}, I_C = -\frac{\sqrt{2}}{2}, I_D = \frac{\sqrt{2}}{2}.$$

На рис. 5 приведено построение результирующего вектора тока I_1 с учетом пространственного сдвига фаз (угол пространственного сдвига фаз равен 90 эл.гр.). При единичной амплитуде синусоидального фазного тока амплитуда результирующего вектора равна 2 ($|I_1| = 2$).

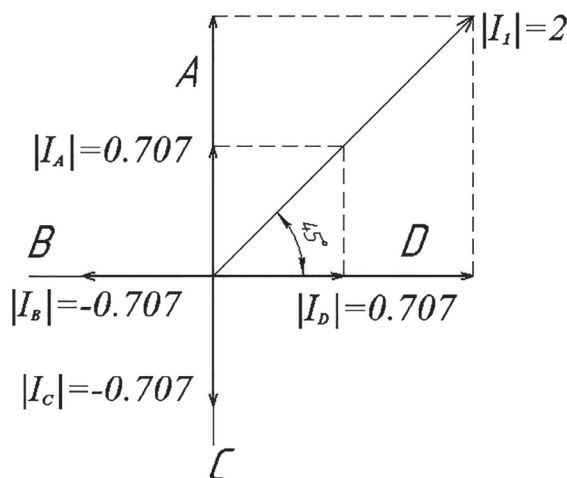


Рис. 5. Формирование результирующего вектора тока по первой гармонике в момент, когда $\omega t = 45^\circ$

Проведем расчет результирующего тока по гармоникам 1, 3, 5, 7, 9, 11, предполагая амплитуду всех гармоник фазного тока равной единице. Расчеты проводим относительно фазы А.

Первая гармоника результирующего тока определяется выражением

$$\begin{aligned} I_1 &= \sin \omega t + \cos 90^\circ \sin(\omega t - 90^\circ) + \\ &+ \cos 180^\circ \sin(\omega t - 180^\circ) + \cos 270^\circ \sin(\omega t - 270^\circ) = \\ &= \sin \omega t + \cos 90^\circ [\sin \omega t \cos 90^\circ - \cos \omega t \sin 90^\circ] + \\ &+ \cos 180^\circ [\sin \omega t \cos 180^\circ - \cos \omega t \sin 180^\circ] + \\ &+ \cos 270^\circ [\sin \omega t \cos 270^\circ - \cos \omega t \sin 270^\circ] = \\ &= \sin \omega t + \sin \omega t = 2 \sin \omega t. \end{aligned}$$

Первая гармоника является гармоникой прямого следования, так как временное чередование фаз ABCD соответствует: $0, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ (ABCD). Амплитуда результирующего тока по первой гармонике при единичном фазном токе равна двум, что справедливо, так как обмотка четырехфазная. (Модуль результирующего вектора тока при единичной амплитуде фазного тока равен $m/2$, где m — число фаз многофазной обмотки).

Третья гармоника результирующего тока определяется выражением

$$\begin{aligned} I_3 &= \sin 3\omega t + \cos 90^\circ \sin(3\omega t - 3 \cdot 90^\circ) + \\ &+ \cos 180^\circ \sin(3\omega t - 3 \cdot 180^\circ) + \\ &+ \cos 270^\circ \sin(3\omega t - 3 \cdot 270^\circ) = \sin 3\omega t + \\ &+ \cos 90^\circ [\sin 3\omega t \cos 270^\circ - \cos 3\omega t \sin 270^\circ] + \\ &+ \cos 180^\circ [\sin 3\omega t \cos 540^\circ - \cos 3\omega t \sin 540^\circ] + \\ &+ \cos 270^\circ [\sin 3\omega t \cos 810^\circ - \cos 3\omega t \sin 810^\circ] = \\ &= \sin 3\omega t + \sin 3\omega t = 2 \sin 3\omega t. \end{aligned}$$

Для наглядности представления временной последовательности чередования фаз проведем расчеты:

$$\begin{aligned} 270/360 &= 0,75 \text{ оборота} & 0,75 \times 360 &= 270 \\ 540/360 &= 1,5 & 1,5 - 1 &= 0,5 \times 360 = 180 \\ 810/360 &= 2,25 & 2,25 - 2 &= 0,25 \times 360 = 90 \end{aligned}$$

Третья гармоника является гармоникой обратного следования, так как пространственное чередование фаз ABCD соответствует временному сдвигу (ADCB). Амплитуда результирующего тока по третьей гармонике, при единичном фазном токе третьей гармонике, равна 2.

Пятая гармоника результирующего тока определяется выражением

$$\begin{aligned}
 I_5 &= \sin 5\omega t + \cos 90^\circ \sin(5\omega t - 5 \cdot 90^\circ) + \\
 &\quad + \cos 180^\circ \sin(5\omega t - 5 \cdot 180^\circ) + \\
 &\quad + \cos 270^\circ \sin(5\omega t - 5 \cdot 270^\circ) = \\
 &= \sin 5\omega t + \cos 90^\circ [\sin 5\omega t \cos 450^\circ - \cos 5\omega t \sin 450^\circ] + \\
 &\quad + \cos 180^\circ [\sin 5\omega t \cos 900^\circ - \cos 5\omega t \sin 900^\circ] + \\
 &\quad + \cos 270^\circ [\sin 5\omega t \cos 1350^\circ - \cos 5\omega t \sin 1350^\circ] = \\
 &= \sin 5\omega t + \sin 5\omega t = 2 \sin 5\omega t.
 \end{aligned}$$

Проведем расчеты:

$$450/360 = 1,25 \text{ оборота}$$

$$1,25 - 1 = 0,25 \times 360 = 90$$

$$900/360 = 2,5$$

$$2,5 - 2 = 0,5 \times 360 = 180$$

$$1350/360 = 3,75$$

$$3,75 - 3 = 0,75 \times 360 = 270$$

Пятая гармоника является гармоникой прямого следования, так как пространственное чередование фаз ABCD соответствует временному сдвигу: 0, 90°, 180°, 270° (ABCD). Амплитуда результирующего тока по 5-й гармонике, при единичном фазном токе пятой гармоники, равна 2.

Седьмая гармоника результирующего тока определяется выражением

$$\begin{aligned}
 I_7 &= \sin 7\omega t + \cos 90^\circ \sin(7\omega t - 7 \cdot 90^\circ) + \\
 &\quad + \cos 180^\circ \sin(7\omega t - 7 \cdot 180^\circ) + \\
 &\quad + \cos 270^\circ \sin(7\omega t - 7 \cdot 270^\circ) = \\
 &= \sin 7\omega t + \cos 90^\circ [\sin 7\omega t \cos 630^\circ - \cos 7\omega t \sin 630^\circ] + \\
 &\quad + \cos 180^\circ [\sin 7\omega t \cos 1260^\circ - \cos 7\omega t \sin 1260^\circ] + \\
 &\quad + \cos 270^\circ [\sin 7\omega t \cos 1890^\circ - \cos 7\omega t \sin 1890^\circ] = \\
 &= \sin 7\omega t + \sin 7\omega t = 2 \sin 7\omega t.
 \end{aligned}$$

Проведем расчеты:

$$630/360 = 1,75 \text{ оборота}$$

$$1,75 - 1 = 0,75 \times 360 = 270$$

$$1260/360 = 3,5$$

$$3,5 - 3 = 0,5 \times 360 = 180$$

$$1890/360 = 5,25$$

$$5,25 - 5 = 0,25 \times 360 = 90$$

Седьмая гармоника является гармоникой обратного следования, так как пространственное чередо-

вание фаз ABCD соответствует временному сдвигу: 0, 270°, 180°, 90° (ADCВ). Амплитуда результирующего тока по 7-й гармонике, при единичном фазном токе 7-й гармоники, равна 2.

Девятая гармоника результирующего тока определяется выражением

$$\begin{aligned}
 I_9 &= \sin 9\omega t + \cos 90^\circ \sin(9\omega t - 9 \cdot 90^\circ) + \\
 &\quad + \cos 180^\circ \sin(9\omega t - 9 \cdot 180^\circ) + \\
 &\quad + \cos 270^\circ \sin(9\omega t - 9 \cdot 270^\circ) = \\
 &= \sin 9\omega t + \cos 90^\circ [\sin 9\omega t \cos 810^\circ - \cos 9\omega t \sin 810^\circ] + \\
 &\quad + \cos 180^\circ [\sin 9\omega t \cos 1620^\circ - \cos 9\omega t \sin 1620^\circ] + \\
 &\quad + \cos 270^\circ [\sin 9\omega t \cos 2430^\circ - \cos 9\omega t \sin 2430^\circ] = \\
 &= \sin 9\omega t + \sin 9\omega t = 2 \sin 9\omega t.
 \end{aligned}$$

Проведем расчеты:

$$810/360 = 2,25 \text{ оборота}$$

$$2,25 - 2 = 0,25 \times 360 = 90$$

$$1620/360 = 4,5$$

$$4,5 - 4 = 0,5 \times 360 = 180$$

$$2430/360 = 6,75$$

$$6,75 - 6 = 0,75 \times 360 = 270$$

Девятая гармоника является гармоникой прямого следования, так как пространственное чередование фаз ABCD соответствует временному сдвигу: 0, 90°, 180°, 270° (ABCD). Амплитуда результирующего тока 9-й гармоники, при единичном фазном токе 9-й гармоники, равна 2.

Одиннадцатая гармоника результирующего тока определяется выражением

$$\begin{aligned}
 I_{11} &= \sin 11\omega t + \cos 90^\circ \sin(11\omega t - 11 \cdot 90^\circ) + \\
 &\quad + \cos 180^\circ \sin(11\omega t - 11 \cdot 180^\circ) + \\
 &\quad + \cos 270^\circ \sin(11\omega t - 11 \cdot 270^\circ) = \\
 &= \sin 11\omega t + \cos 90^\circ [\sin 11\omega t \cos 990^\circ - \cos 11\omega t \sin 990^\circ] + \\
 &\quad + \cos 180^\circ [\sin 11\omega t \cos 1980^\circ - \cos 11\omega t \sin 1980^\circ] + \\
 &\quad + \cos 270^\circ [\sin 11\omega t \cos 2970^\circ - \cos 11\omega t \sin 2970^\circ] = \\
 &= \sin 11\omega t + \sin 11\omega t = 2 \sin 11\omega t.
 \end{aligned}$$

Проведем расчеты:

$$990/360 = 2,75 \text{ оборота}$$

$$2,75 - 2 = 0,75 \times 360 = 270$$

$$1980/360 = 5,5$$

$$5,5 - 5 = 0,5 \times 360 = 180$$

$$2970/360 = 8,25$$

$$8, 25 - 8 = 0,25 \times 360 = 90$$

Одиннадцатая гармоника является гармоникой обратного следования, так как пространственное чередование фаз ABCD соответствует временному сдвигу: 0, 270°, 180°, 90° (ADCB). Амплитуда результирующего тока 11-й гармоники, при единичном фазном токе 11-й гармоники, равна 2.

Таким образом, в гармоническом спектре результирующего тока 4-фазной обмотки присутствуют все нечетные гармоники, причем, гармоники результирующего тока 1, 5, 9 — это гармоники прямого следования, гармоники 3, 7, 11 — это гармоники обратного следования.

Если предположить входное напряжение 4-фазного преобразователя, к которому подключена 4-фазная симметричная обмотка, равным единице, режим работы преобразователя низкочастотным (1–3 Гц), а также сопротивление фазы равным единице, то соотношение амплитуд гармонических составляющих результирующего тока будет иметь вид

$$I_{m1} = 0,637, I_{m3} = 0,2123, I_{m5} = 0,1274, I_{m7} =$$

$$= 0,091, I_{m9} = 0,0707, I_{m11} = 0,0579.$$

Амплитуды гармоник 1, 3, 5 соизмеримы, что может способствовать вибрациям электромагнитного происхождения (в пределах периода первой гармоники).

Выводы

1. Получен спектральный состав результирующего тока симметричной 4-фазной симметричной обмотки машины переменного тока.

2. Установлено, что 4-фазная обмотка формирует гармоники 1, 5, 9 результирующего тока прямого следования и гармоники 3, 7, 11 обратного следования.

3. Амплитуды высших гармоник имеют значения, соизмеримые со значениями первой гармоники, что может стать причиной вибраций электромагнитного происхождения (в пределах периода первой гармоники).

Библиографический список

1. Chan C.C. The State of the Art of Electric, Hybrid and Fuel Cell Vehicles // Proceedings of the IEEE. 2007. Vol. 95. No. 4, pp. 704-718. DOI: 10.1109/JPROC.2007.892489

2. Chan C.C., Bouscayrol A. and Chen K. Electric, Hybrid, and Fuel-Cell Vehicles: Architectures and Modeling / IEEE Transact Vehicular Technol. 2010. Vol. 59. No. 2, pp. 589-598. DOI: 10.1109/TVT.2009.2033605

3. Global EV Outlook: Understanding the Electric Vehicle Landscape to 2020 // Electric Vehicle Initiative, International Energy Agency. 2013, 41 p.

4. Levi E., Bojoi R., Profumo F., Toliyat H.A. and Williamson S. Multiphase induction motor drives — a technology status review // Institution of Engineering and Technology Electric Power Applic. 2007. Vol. 1. No. 4, pp. 489-516. DOI: 10.1049/iet-epa:20060342

5. Dwari S., Parsa L. Fault-Tolerant Control of Five-Phase Permanent-Magnet Motors With Trapezoidal Back EMF // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2011. Vol. 58. No. 2, pp. 476-485. DOI: 10.1109/TIE.2010.2045322

6. Williamson S., Smith S. Pulsating torque and losses in multiphase induction machines // IEEE Transactions on Industry Applications. 2003. Vol. 39. No. 4, pp. 986-993. DOI: 10.1109/TIA.2003.813722

7. Duran M.J., Barrero F.J., Toral S.L. Multi-Phase Space Vector Pulse Width Modulation: Applications and Strategies // Renewable Energies and Power Quality Journal (RE&PQJ). 2007. Vol. 1. No. 5, pp. 580-586. DOI:10.24084/repqj05.341

8. Duran M.J., Barrero F.J., Toral S.L., Levi E. Multi-dimensional space vector pulse width modulation scheme for five-phase series-connected two-motor drives // IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC '07). Antalya, Turkey, 3-5 May 2007. DOI: 10.1109/IEMDC.2007.383602

9. Levi E. Multiphase electric machines for variable-speed applications // IEEE Transactions on Industrial Electronics, May 2008. Vol. 55. No. 5, pp. 1893-1909. DOI: 10.1109/TIE.2008.918488

10. Renukadevi G., Rajambal K. Generalized d-q Model of n-Phase Induction Motor Drive // World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical and Computer Engineering. 2012. Vol. 6. No. 9, pp. 1066-1075.

11. Ле Д.Т., Аверин С.В. Формирование векторной широтно-импульсной модуляции с исключением сквозных токов в трехфазном мостовом инверторе // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 4. С. 155-163.

12. Ле Д.Т., Аверин С.В. Оптимизация алгоритмов коммутации в инверторах с векторной ШИМ // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 3. С. 155-164.

13. Texas Instruments «TMS320C2000 Motor Control Primer: User’s Guide», Literature Number: SPRUGI6, 2010, https://ufa.terraelectronica.ru/pdf/show?pdf_file=%2Fds%2Fpdf%2FT%2FTMDSHVMTRPFCKIT.pdf

14. Lim C.S., Levi E., Jones M., Rahim N.A., Hew W.P. FCS-MPC-based control of a five-phase induction motor and its comparison with PI-PWM control // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2014. Vol. 61. No. 1, pp. 149-163. DOI: 10.1109/TIE.2013.2248334

15. Голубев А.Н., Игнатенко С.В. Влияние числа фаз статорной обмотки асинхронного двигателя на его виброшумовые характеристики // Электротехника. 2000. № 6. С. 28-31.

16. Голубев А.Н., Игнатенко С.В. Многофазный асинхронный электропривод в аномальных режимах работы // Электротехника. 2001. № 10. С. 17-22.
17. Ананьев С.С., Голубев А.Н. Асинхронный m-фазный электропривод с векторным управлением для машин отделочного производства // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2006. № 4(292). С. 84-86.
18. Ананьев С.С., Голубев А.Н. Система векторного управления многофазным асинхронным электродвигателем // Тезисы XII региональной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Электроэнергетика». Иваново: ИГЭУ, 2006. С. 26-27.
19. Бабаев М.Б., Голубев А.Н., Игнатенко С.В. Влияние числа фаз на пульсации момента и виброшумовые характеристики АД // 2-я международная конференция по электромеханике и электротехнологиям: Тезисы докладов в 2 ч. (Крым, 1-5 окт. 1996). М.: Изд. дом МЭИ, Ч. 2. С. 150-152.
20. Голубев А.Н., Игнатенко С.В. Влияние числа фаз на электромагнитную совместимость системы ПЧ-АД с силовым источником // Межвузовский сборник научных трудов по электротехнике. Иваново: ИГЭУ, 1998. С. 3-9.
21. Электровоз грузовой постоянного тока 2ЭС10 (Гранит) с асинхронными тяговыми электродвигателями: Руководство по эксплуатации. — М.: Изд-во конструкторско-исследовательского центра ОАО «СТМ», 2009. — 694 с.
22. Терешкин В.М., Гришин Д.А., Макулов И.А. Перспективы применения многофазных машин переменного тока // Электроника и электрооборудование транспорта. 2017. № 1. С. 19-26.
23. Терешкин В.М., Гришин Д.А. Исследование алгоритмов работы пятифазного преобразователя в режиме векторной широтно-импульсной модуляции // Электротехника. 2017. № 2. С. 46-51.
24. Терешкин В.М., Гришин Д.А., Макулов И.А. Сравнительный анализ эффективности трехфазной и пятифазной вентильных синхронных машин // Электротехника. 2018. № 5. С. 60-67.
25. Терешкин В.М., Гришин Д.А., Терешкин В.В. Исследование алгоритмов работы четырехфазной электромеханической системы // Электротехнические комплексы и системы: Материалы международной научно-практической конференции. Уфа: УГАТУ, 2016. С. 49-55. URL: http://e-library.ufa-rb.ru/dl/lib_net_r/Tereshkin_Issledovanie_algoritmov_2016.pdf

DETERMINING RESULTANT CURRENT HARMONIC COMPOSITION OF AN ELECTRIC MOTOR SYMMETRIC FOUR-PHASE WINDING

Tereshkin V.M.

*Ufa State Aviation Technical University,
USATU, 12, K. Marx str., Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia
e-mail: tvn53@mail.ru*

Abstract

Modern power electronics and microprocessor technology state-of-the-art allows develop DC-AC converter with any number of phases in a wide power range.

Realization of a multiphase motor ($m > 3$) based on the magnetic system of a 3-phase motor is also practically a feasible task with certain modernization of the winding scheme.

As an illustration the article presents a schematic diagram of the four-phase winding, its vector representation, as well as four-phase converter control algorithm while vector pulse-width modulation realization.

The electric drive based on a multiphase motor may display certain advantages in compared to the traditional electric drive based on a three-phase motor and find application wherein the higher requirements are placed on vibrations. The cause of vibrations of electromagnetic origin may be the high-order harmonics of the resulting current, which creates an m.m.f. in the air gap.

Preliminary studies revealed that symmetrical 4-phase winding had the worst figures of the spectral composition of m.m.f., compared to the 5- and 7-phase windings. However, the traction electric drive of the “Granit” electric locomotive was just realized based on the 4-phase asynchronous motor. That is the electric drive based on multiphase motor is already an alternative to the electric drive based on the three-phase motor. It imposes the necessity for comprehensive comparative analysis of multiphase windings and control algorithms for converters to which multi-phase windings are being connected.

The article considers an approach based on classical vector method. With its application harmonic analysis of a resultant current of the symmetrical 4-phase winding. The analysis revealed the phase currents' 1, 5, and 9 harmonics formed the resulting currents of positive-sequence, and the phase currents' 3, 7 and 11 harmonics formed the resulting currents of the negative sequence. Accounting for the fact, that the 1, 3 and 5

harmonics are commensurable in magnitude, significant electromagnetic ripples are theoretically possible within the first harmonic period.

The approach based on the classical vector method considered in the paper can be used to analyze the harmonic composition of the resulting current of multiphase windings with any number of phases. This makes the approach universal for the comparative analysis of multiphase windings on the harmonic composition of the resulting current.

Keywords: four-phase motor winding, resultant current of a four-phase symmetrical winding, harmonic composition of the resultant current, vibrations of electromagnetic origin.

References

- Chan C.C. The State of the Art of Electric, Hybrid and Fuel Cell Vehicles. *Proceedings of the IEEE*, 2007, vol. 95, no. 4, pp. 704–718. DOI: 10.1109/JPROC.2007.892489
- Chan C.C., Bouscayrol A. and Chen K. Electric, Hybrid, and Fuel-Cell Vehicles: Architectures and Modeling. *IEEE Transact Vehicular Technol*, 2010, vol. 59, no. 2, pp. 589–598. DOI: 10.1109/TVT.2009.2033605
- Global EV Outlook: Understanding the Electric Vehicle Landscape to 2020. *Electric Vehicle Initiative, International Energy Agency*, 2013, 41 p.
- Levi E., Bojoi R., Profumo F., Toliyat H.A. and Williamson S. Multiphase induction motor drives – a technology status review. *Institution of Engineering and Technology Electric Power Applic*, 2007, vol. 1, no. 4, pp. 489–516. DOI: 10.1049/iet-epa:20060342
- Dwari S. and Parsa L. Fault-Tolerant Control of Five-Phase Permanent-Magnet Motors With Trapezoidal Back EMF. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, vol. 58, no. 2, pp. 476–485. DOI: 10.1109/TIE.2010.2045322
- Williamson S. and Smith S. Pulsating torque and losses in multiphase induction machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2003, vol. 39, no. 4, pp. 986–993. DOI: 10.1109/TIA.2003.813722
- Duran M.J., Barrero F.J., Toral S.L. Multi-Phase Space Vector Pulse Width Modulation: Applications and Strategies. *Renewable Energies and Power Quality Journal (RE&PQJ)*, 2007, vol. 1, no. 5, pp. 580–586. DOI:10.24084/repqj05.341
- Duran M.J., Barrero F.J., Toral S.L., Levi E. Multi-dimensional space vector pulse width modulation scheme for five-phase series-connected two-motor drives. *IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC '07). Antalya, Turkey, 3-5 May 2007*. DOI: 10.1109/IEMDC.2007.383602
- Levi E. Multiphase electric machines for variable-speed applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, vol. 55, no. 5, pp. 1893–1909. DOI: 10.1109/TIE.2008.918488
- Renukadevi G., Rajambal K. Generalized d-q Model of n-Phase Induction Motor Drive. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2012, vol. 6, no. 9, pp. 1066–1075.
- Le D.T., Averin S.V. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2016, vol. 23, no. 4, pp. 155–163.
- Le D.T., Averin S.V. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2016, vol. 23, no. 3, pp. 155–164.
- Texas Instruments “TMS320C2000 Motor Control Primer: User’s Guide”, Literature Number: SPRUGI6, 2010, https://ufa.terraelectronica.ru/pdf/show?pdf_file=%2Fds%2Fpdf%2FT%2FTMDSHVMTRPFCKIT.pdf
- Lim C.S., Levi E., Jones M., Rahim N.A. and Hew W.P. FCS-MPC-based control of a five-phase induction motor and its comparison with PI-PWM control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, vol. 61, no. 1, pp. 149–163. DOI: 10.1109/TIE.2013.2248334
- Golubev A.N., Ignatenko C.B. *Elektrotehnika*, 2000, no. 6, pp. 28–31.
- Golubev A.N., Ignatenko C.B. *Elektrotehnika*, 2001, no. 10, pp. 17–22.
- Anan’ev S.S., Golubev A.N. *Izvestiya vuzov. Tekhnologiya tekstil’noi promyshlennosti*, 2006, no. 4(292), pp. 84–86.
- Anan’ev S.S., Golubev A.N. *Materialy XII regional’noi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii studentov i aspirantov “Elektroenergetika”*, Ivanovo, IGEU, 2006, pp. 26–27.
- Babaev M.B., Golubev A.N., Ignatenko C.B. *II Mezhdunarodnaya konferentsiya po elektromekhanike i elektrotekhnologiyam (Krym, 1-5 October 1996)*, Moscow, MEI. Part 2, pp. 150–152.
- Golubev A.N., Ignatenko C.B. *Mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov po elektrotehnike*, Ivanovo, IGEU, 1998, pp. 3–9.
- Elektrovoz gruzovoi postoyannogo toka 2ES10 (Granit) s asinkhronnymi tyagovymi elektrodvigatelyami: Rukovodstvo po ekspluatatsii* (DC 2ES10 electric cargo locomotive (Granite) with asynchronous traction motors: manual), Moscow, STM, 2009, 694 p.
- Tereshkin V.M., Grishin D.A., Makulov I.A. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta*, 2017, no. 1, pp. 19–26.
- Tereshkin V.M., Grishin D.A. *Elektrotehnika*, 2017, no. 2, pp. 46–51.
- Tereshkin V.M., Grishin D.A., Makulov I.A. *Elektrotehnika*, 2018, no. 5, pp. 60–67.
- Tereshkin V.M., Grishin D.A., Tereshkin V.V. *Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii “Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy”*, Ufa, UGATU, 2016, pp. 49–55. URL: http://e-library.ufa-rb.ru/dl/lib_net_r/Tereshkin_Issledovanie_algorithmov_2016.pdf