

УДК 621.3.07

В.И. Носков, Н.В. Мезенцев, Г.В. Гейко, М.В. Липчанский

Национальный технический университет "ХПИ", Харьков

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГАРМОНИЧЕСКОГО СОСТАВА ФАЗНОГО ТОКА СТАТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В СИСТЕМАХ РЕГУЛИРУЕМЫХ ПРИВОДОВ

Предлагается метод определения гармонического состава фазного тока статора асинхронного двигателя (АД), запитанного от автономного инвертора напряжения (АИН) в системах регулируемых тяговых и промышленных приводов. Ток статора является одним из основных регулируемых параметров для систем автоматического управления указанных выше приводов, поэтому, зная информацию о реальном значении его первой гармоники, которая определяет выходные характеристики АД, можно более точно проводить идентификацию этого тока, что необходимо для контроля и регулирования параметров АД. Предложенный метод отличается высоким быстродействием и точностью по сравнению с методом, основанным на регулировании АД по усреднённым или амплитудным значениям тока.

Ключевые слова: гармонический состав, фазный ток, асинхронный двигатель, автономный инвертор напряжения.

Введение

Постановка проблемы. В настоящее время в тяговых и промышленных приводах широко используются трёхфазные АД, получающие питание от АИН, выполненных либо на запираемых тиристорах GTO, либо на биполярных транзисторах IGBT [1]. Известно, что при питании АД от АИН, в его фазном токе присутствуют высшие гармоники, что оказывает отрицательное влияние на момент, развиваемый АД, и величину потерь мощности [2].

Особенно велика доля высших гармоник при работе АД на низких частотах (в ряде случаев она может составлять 15-20% от первой гармоники). Поскольку для систем автоматического управления указанных выше приводов, фазный ток АД является одним из основных регулируемых параметров, информация о реальном его значении, в частности о действующем значении первой гармоники, которая определяет выходные характеристики АД, является актуальной [3].

Регулирование АД по некоторым усреднённым или амплитудным значениям тока, как это делается в большинстве приводов, может привести к серьёзным отклонениям от требуемых параметров в работе системы привода [4].

Актуальность получения реальной информации о фазном токе АД состоит ещё в том, что с помощью гармонического анализа можно установить техническое состояние самого АД. Возникновение межвитковых замыканий, биение вала двигателя приводят к несимметрии фазных токов, что, в свою очередь, приводит к увеличению амплитуды высших гармоник относительно первой гармоники [5, 6]. Кроме того, сбои и отклонения в работе АИН

также приводят к изменению спектра частот в фазном токе АД [7, 8].

Гармонический состав и определение первой гармоники фазного тока АД, по которой рассчитываются и поддерживаются пусковые и рабочие характеристики приводов, могут быть получены различными методами.

Одним из основных методов гармонического анализа функций, удовлетворяющих условиям Дирихле, является метод, построенный на преобразованиях Фурье. Однако, этот метод хорошо работает при обработке информации относительно большой длительности и мало меняющихся параметрах нагрузки. Поэтому для АД, используемого в тяговых и промышленных приводах с изменяющимися режимами (пуск, разгон, торможение и т.д.) этот метод гармонического анализа тока фазы двигателя неприемлем. В этой связи, потребовалась разработка метода определения гармонического состава фазного тока АД, который бы отличался требуемой точностью и высоким быстродействием.

Целью статьи является разработка метода определения гармонического состава тока фазы статора асинхронного двигателя в системах регулируемых тяговых и промышленных приводов.

Основная часть

Как известно, периодическая функция может быть представлена тригонометрическим полиномом вида:

$$y = \sum_{k=0}^n (A_k \cos kx + B_k \sin kx). \quad (1)$$

При этом, гармоники k -го порядка этого полинома определяются согласно соотношений:

$$y_k = r_k \cdot \sin(kx + \varphi_k) = r_k \sin \varphi_k \cos kx + r_k \cos \varphi_k \sin kx, \quad (2)$$

где r_k и φ_k – соответственно амплитуда и фаза k -й гармоники ($k = \overline{0, n}$).

Введя обозначения:

$$\begin{aligned} A_k &= r_k \sin \varphi_k; \\ B_k &= r_k \cos \varphi_k. \end{aligned} \quad (3)$$

получаем:

$$y_k = A_k \cos kx + B_k \sin kx. \quad (4)$$

Из (4) следует, что амплитуда k -й гармоники может быть получена следующим образом:

$$r_k = \sqrt{A_k^2 + B_k^2}. \quad (5)$$

При этом, коэффициенты A_k и B_k могут быть получены из формул Бесселя:

$$\begin{aligned} A_k &= \frac{1}{n} \sum_{l=0}^{2n-1} y_\lambda \cdot \cos k\lambda \frac{p}{v}; \\ B_k &= \frac{1}{v} \sum_{\lambda=0}^{2v-1} y_\lambda \cdot \sin k\lambda \frac{p}{v}, \quad (k = \overline{1, v-1}), \end{aligned} \quad (6)$$

где k – номер гармоники, v – количество интервалов, на которые разбивается период, y_λ – значение ординаты соответствующей функции.

Разбивая период функции на 24 равных интервала ($2v = 24$) по выражениям (5 – 6) могут быть получены амплитуды 12 гармоник, входящих в исследуемую функцию.

Так, коэффициенты, которые определяют амплитуду первой гармоники, могут быть получены по выражениям:

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{1}{12} (y_0 - y_{12} + (y_1 - y_{11} - y_{13} + y_{23}) \cdot \cos 15^\circ + \\ &+ (y_2 - y_{10} - y_{14} + y_{22}) \cdot \cos 30^\circ + (y_3 - y_9 - \\ &- y_{15} + y_{21}) \cdot \cos 45^\circ + (y_4 - y_8 - y_{16} + \\ &+ y_{20}) \cdot \cos 60^\circ + (y_5 - y_7 - y_{17} + y_{19}) \cdot \cos 75^\circ); \\ B_1 &= \frac{1}{12} (y_6 - y_{18} + (y_1 + y_{11} - y_{13} - y_{23}) \cdot \sin 15^\circ + \\ &+ (y_2 + y_{10} - y_{14} - y_{22}) \cdot \sin 30^\circ + (y_3 + y_9 - \\ &- y_{15} - y_{21}) \cdot \sin 45^\circ + (y_4 + y_8 - y_{16} - \\ &- y_{20}) \cdot \sin 60^\circ + (y_5 + y_7 - y_{17} - y_{19}) \cdot \sin 75^\circ). \end{aligned} \quad (7)$$

Данный способ группирования ординат был разработан математиком Ларом [9]. Однако, этот способ подходит для определения гармонического состава функций, у которых формы положительной и отрицательной полуволн одного периода отличаются незначительно, что не характерно для формы фазных токов статора АД в динамических режимах работы приводов.

В связи с этим, потребовалось развитие метода группирования Лара, позволяющее его использова-

ние в системах управления асинхронными приводами с высокими динамическими свойствами.

Для этого предложено производить расчёт гармонического состава тока фазы АД на каждом полупериоде по выражениям:

$$\begin{aligned} A_k^* &= \frac{1}{n} \sum_{l=0}^{n-1} 2y_\lambda \cdot \cos k\lambda \frac{p}{v}; \\ B_k^* &= \frac{1}{v} \sum_{\lambda=0}^{v-1} 2y_\lambda \cdot \sin k\lambda \frac{p}{v}, \quad (k = \overline{1, v-1}), \\ r_k &= \sqrt{(A_k^*)^2 + (B_k^*)^2}. \end{aligned} \quad (8)$$

В результате преобразования (8) мы получаем кривую тока со сдвинутой симметрией относительно оси абсцисс. На рис. 1 приведена осциллограмма фазного тока статора АД при трогании с места и разгоне дизель-поезда.

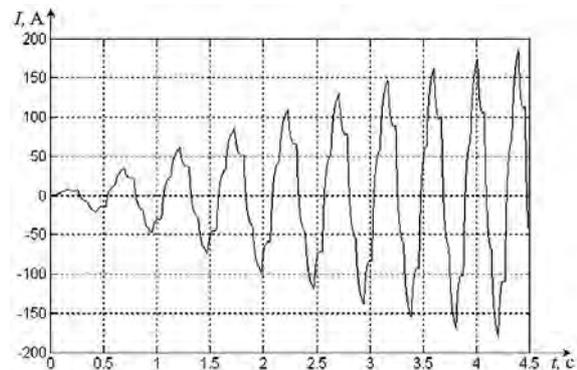


Рис. 1. Фазный ток тягового АД в момент трогания с места и разгоне дизель-поезда

На рис. 2 приведен один полупериод тока статора АД.

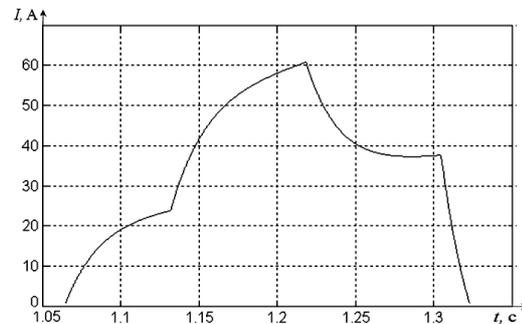


Рис. 2. Полупериод фазного тока АД

Для тока, приведённого на рис. 2, амплитуды первых девяти гармоник, рассчитанные по выражениям (8), следующие: $r_1 = 53,6$ А; $r_3 = 1,9$ А; $r_5 = 6,6$ А; $r_7 = 3,7$ А; $r_9 = 2,5$ А.

Расчёт выполнен в соответствии с модифицированным методом определения гармонического состава тока тягового АД и который был использован в системе управления асинхронным приводом украинского дизель-поезда.

На рис. 3 показано изменение действующего значения первой гармоники тока тягового АД при разгоне дизель-поезда ДЭЛ-02.

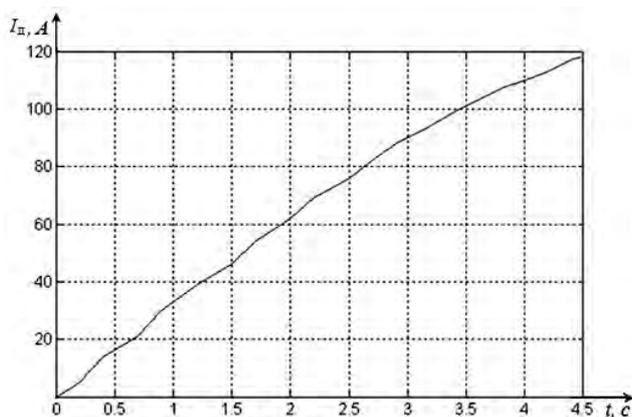


Рис. 3. Изменение действующего значения первой гармоники тока тягового АД при разгоне дизель-поезда

Выводы

Разработан модифицированный метод определения гармонического состава тока статора АД, который позволяет более точно его идентифицировать и даёт возможность в реальном времени контролировать и регулировать параметры асинхронного двигателя. Этот метод был использован в системе управления приводом первых украинских дизель-поездов ДЭЛ-02 с тяговыми АД, АИН и микропроцессорной системой управления, которые в настоящее время эксплуатируются на Одесской железной дороге.

Список литературы

1. Любарский Б.Г. Моделирование тягового привода на основе СДПМ / Б.Г. Любарский, А.В. Демидов,

Т.В. Парфенюк. – Х.: Світлотехніка та електроенергетика. – 2014. – № 2. – С. 41–46.

2. Немцев Г.А. Влияние высших гармонических составляющих на работу асинхронных двигателей / Г.А. Немцев, Е.А. Селезнёв, Л.А. Шестакова // Вестник Чувашского университета. – 2014. – № 2. – С. 46-51.

3. Родькин Д.И. Обоснование расчётных схем замещения асинхронных двигателей / Д.И. Родькин, Ю.В. Ромашихин // Технічна електродинаміка. – 2012. – № 2. – С. 89-90.

4. Кондратюк О.Ю. Анализ аварийных режимов работы асинхронных двигателей к вопросу выбора их эффективной защиты / О.Ю. Кондратюк, А.Б. Егоров // Системы обработки информации. – Х.: ХУ ПС, 2006. – Вып. 4 (53). – С. 79-86.

5. Тутко А.И. Новые методы диагностики асинхронных двигателей / А.И. Тутко, В.М. Андриенко, А.В. Худяков, М.С. Гуторова // Праці Інституту електродинаміки НАН України. – 2014. – Вып. 37. – С. 58-61.

6. Бобров В.В. Оценка эффективности основных методов диагностики асинхронных электродвигателей / В.В. Бобров // Ползуновский вестник. – 2012. № 3/1. – С. 198-203.

7. Куццов В.В. Разработка методики токовой диагностики асинхронных двигателей по осциллограммам нестационарных режимов работы / В.В. Куццов, А.С. Горзунов, А.С. Сарваров – Магнитогорск: Вестник ЮУрГУ, 2009. – № 34. – С. 60-67.

8. Петухов В.С. Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока / В.С. Петухов, В.А. Соколов // Новости электротехники. – 2005. – №31. – С. 50-52.

9. Серебренников М.Г. Гармонический анализ / М.Г. Серебренников. – М.: Гостехиздат, 1948. – 504 с.

Поступила в редколлегию 16.04.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.А. Серков, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков.

МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ГАРМОНІЧНОГО СКЛАДУ ФАЗНОГО СТРУМУ СТАТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГУНА В СИСТЕМАХ РЕГУЛЬОВАНИХ ПРИВОДІВ

В.І. Носков, М.В. Мезенцев, Г.В. Гейко, М.В. Ліпчанський

Пропонується метод визначення гармонічного складу фазного струму статора асинхронного двигуна (АД), який живиться від автономного інвертора напруги (АІН) в системах регульованих тягових і промислових приводів. Струм статора є одним з основних регульованих параметрів для систем автоматичного управління зазначених вище приводів, тому, знаючи інформацію про реальне значення його першої гармоніки, яка визначає вихідні характеристики АД, можна більш точно проводити ідентифікацію цього струму, що необхідно для контролю і регулюванню параметрів АД. Запропонований метод відрізняється високою швидкістю і точністю в порівнянні з методом, який базується на регулюванні АД за усередненим або амплітудним значенням струму.

Ключові слова: гармонічний склад, фазний струм, асинхронний двигун, автономний інвертор напруги.

THE METHOD FOR DETERMINATION HARMONIC CONTENT OF INDUCTION MOTORS STATOR PHASE CURRENT IN THE SYSTEMS OF VARIABLE SPEED DRIVES

V.I. Noskov, N.V. Mezentsev, G.V. Gejko, M.V. Lipchanskij

The method for determination harmonic content of the stator phase current of induction motor (IM) that is powered with an autonomous voltage inverter (AVI) in controlled traction and industrial drives systems is proposed. The stator current is one of the main adjustable parameters for automatic control systems of drives indicated earlier. Knowing about the real meaning of the stator current first harmonic, which determines the IM output characteristics, it is possible to realize this current identification more exactly, which is necessary for the control and regulation IM parameters. The proposed method is faster and more accurate than the method based on the IM regulation with average or amplitude current values.

Keywords: harmonic composition, phase current, induction motor, autonomous voltage inverter.