

АНАЛИЗ УЧЕТА ЗУБЦОВЫХ ГАРМОНИК ЭДС СТАТОРА ПРИ МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССА ИСПЫТАНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ МЕТОДОМ ВЗАИМНОЙ НАГРУЗКИ

В статье представлены результаты математического моделирования асинхронных двигателей, получающих питание от преобразователей частоты, с учетом зубцовых гармоник ЭДС и тока статора, обусловленных соответствующей пульсацией индукции магнитного поля в воздушном зазоре. Проанализированы полученные в результате расчетов спектры напряжения и тока для двигателей малой, средней и большой мощности. Показана возможность применения метода спектр-токового анализа для определения угловой скорости вращения асинхронных машин при их испытании методом взаимной нагрузки. Предложен способ определения интервалов поиска зубцовых гармоник.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, преобразователь частоты, математическая модель взаимной нагрузки, зубцовые гармоники, спектр тока, частота вращения.

При разработке современных электротехнических комплексов в них должны быть обеспечены высокие показатели производительности, надежности, безопасности, эргономичности, энергоэффективности и др.

С целью обеспечения высокой энергоэффективности электротехнических комплексов при нагрузочных испытаниях электрических машин разработан ряд схем с рекуперацией энергии от нагрузочного устройства [1–5]. Для испытаний асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, питающимся в эксплуатации от преобразователей частоты [6–8], необходимо применение схем взаимной нагрузки с таким же типом питания. Применение данных схем позволяет при испытаниях обеспечить условия, соответствующие эксплуатационным [9–10].

При нагрузочных испытаниях асинхронного двигателя измеряют температуру после часового номинального режима работы, определяют КПД, производят вибродиагностику и т.д. Для точного определения КПД и частот гармоник при вибродиагностике необходимо осуществлять определение скорости вращения ротора с высокой точностью. Для этой цели разработаны устройства, использующие метод спектр-токового анализа, позволяющий также повысить технологичность процесса измерения скорости вращения ротора за счет исключения специальных датчиков и необходимости их монта-

жа [11–13]. Данные устройства основаны на выявлении в спектре тока, потребляемого асинхронным двигателем, зубцовых гармоник, и определении их частот, которые функционально связаны с частотой вращения ротора по выражению:

$$f_z = \frac{f_1 Z_2 (1-s)}{p} \pm f_1 k, \quad (1)$$

где f_1 — частота тока в обмотке статора двигателя; p — число пар полюсов асинхронного двигателя; Z_2 — количество зубцов ротора; s — скольжение; k — целое нечетное число.

Исследование процесса образования зубцовых гармоник в спектре тока асинхронного двигателя, питающегося от сети с синусоидальным напряжением, выполнено в работе [14]. Однако в схемах испытания асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки преобразователь частоты, питающий обмотку статора, генерирует множество высших гармоник с относительно высокими амплитудами [15]. Следовательно, для проверки возможности выявления существующими методами [11–13] пазовых гармоник в зашумленном спектре тока необходимо выполнить соответствующие исследования.

Исследование процесса появления зубцовых гармоник ротора в токе статора выполнено с использованием известной математической модели, приведенной в [14]. Принятая математическая мо-

дель учитывает пульсацию коэффициента взаимной индуктивности между фазами статора и ротора по выражению:

$$L'_m = L_m + A \sin(Z_2 \omega t), \quad (2)$$

где L_m — среднее значение коэффициента взаимной индуктивности; A — амплитуда пульсаций; ω — угловая скорость вращения ротора.

Для исследования выбраны асинхронные двигатели типов АИР63В4, 5АМ112М4 и 5АМН315М4 с номинальными мощностями 0,37; 5,5 и 250 кВт соответственно. Параметры их схем замещения приближенно определены, исходя из каталожных данных, по известной методике, приведенной в [16]. Число зубцов ротора при расчете принято $Z_2 = 24$. Математическое моделирование выполнено в системе компьютерной алгебры *Mathcad*.

Моделирование работы произведено на промежутке времени 2,58 с для асинхронных двигателей типа АИР63В4 и 5АМ112М4 и 5,16 с для асинхронного двигателя типа 5АМН315М4 (ввиду его больших момента инерции и постоянной времени переходного электромеханического процесса). Количество расчетных точек на секунду для всех рассматриваемых типов двигателей принято равным 409600. Начальная скорость вращения вала в расчете задавалась равной величине синхронной скорости. Частота питающего напряжения на входе обмотки статора двигателя задана равной 50 Гц. На входе обмотки статора генератора подобрана такая величина частоты питающего напряжения, при которой устанавливается номинальное скольжение.

Ввиду наличия относительно небольших незатухающих колебаний скорости вращения вала после завершения основного переходного электромеханического процесса, обусловленного заданием номинальной нагрузки, установившаяся частота вращения принята как средняя арифметическая величина от всех значений, соответствующих второй половине рассчитываемого промежутка времени.

Над напряжением и током одной фазы статора, найденными в результате моделирования, произведено быстрое преобразование Фурье и получены спектры их гармоник. Расчетный фрагмент спектра гармоник напряжения на выходе преобразователя частоты, работающего с частотой модуляции 4 кГц, приведен на рис. 1.

Для исключения влияния гармоник напряжения на спектр тока выполнено деление амплитуд гармоник тока на амплитуды соответствующих гармоник

напряжения. Результат данной операции для асинхронных двигателей трех рассматриваемых типов приведен на рис. 2.

Поиск зубцовых гармоник рационально осуществлять в определенных границах, за которыми они в принципе оказаться не могут. Определим эти границы. В алгоритме задания режима нагрузки в известных способах асинхронные двигатели сначала разгоняются без нагрузки на валу путем одно-временного увеличения частоты питающих напряжений, подаваемых на обе машины [6–8]. На этом этапе измерение частоты вращения не требуется. Далее снижается частота напряжения, питающего нагрузочную машину, за счет чего она переходит в режим рекуперативного торможения, и частота вращения ротора снижается. С одной стороны, частота вращения ротора не может быть выше частоты вращения магнитного поля, что может служить для определения верхней границы диапазонов поиска зубцовых гармоник:

$$f_{z_{rp1}} = f'_1 \frac{Z_2}{p} \pm f'_1 k. \quad (3)$$

Значение частоты вращения вала, установившееся по окончании переходного электромеханического процесса, можно приближенно определить по формуле:

$$n_2 \approx \frac{n'_1 + n''_1}{2}, \quad (4)$$

где n'_1 , n''_1 — частоты вращения магнитного поля испытываемого асинхронного двигателя и нагрузочной асинхронной машины соответственно.

Отсюда следует, что скольжение машины, работающей в двигательном режиме:

$$s \approx \frac{f'_1 - f''_1}{2f'_1}, \quad (5)$$

где f''_1 — частота тока в обмотке статора генератора.

В том случае, если оба асинхронных двигателя получают питание от статических преобразователей, для расчета скольжения могут быть использованы значения f'_1 и f''_1 , полученные от вычислителей частоты питающего напряжения, интегрированных в данные преобразователи [10]. Если в схеме один из двигателей питается от статического преобразователя, а другой — от сети, то значение f'_1 известно

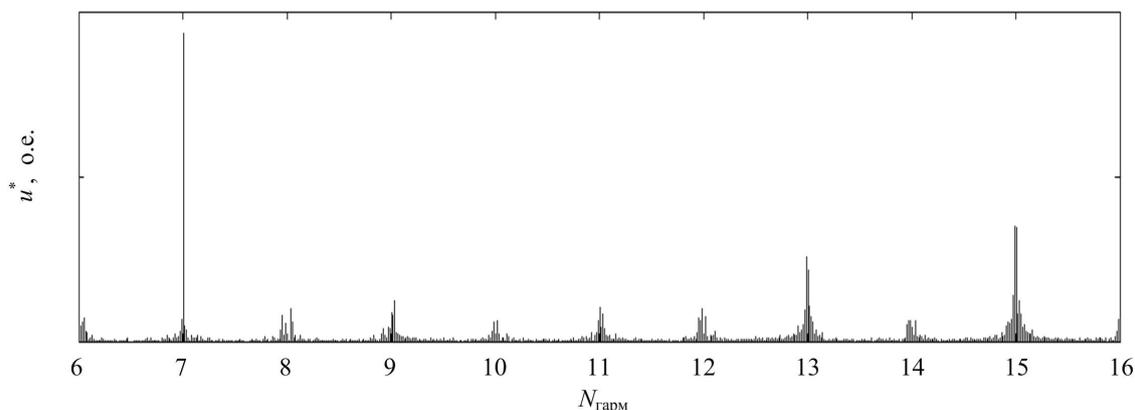


Рис. 1. Фрагмент спектра гармоник напряжения, подаваемого на обмотку статора асинхронного двигателя от преобразователя частоты

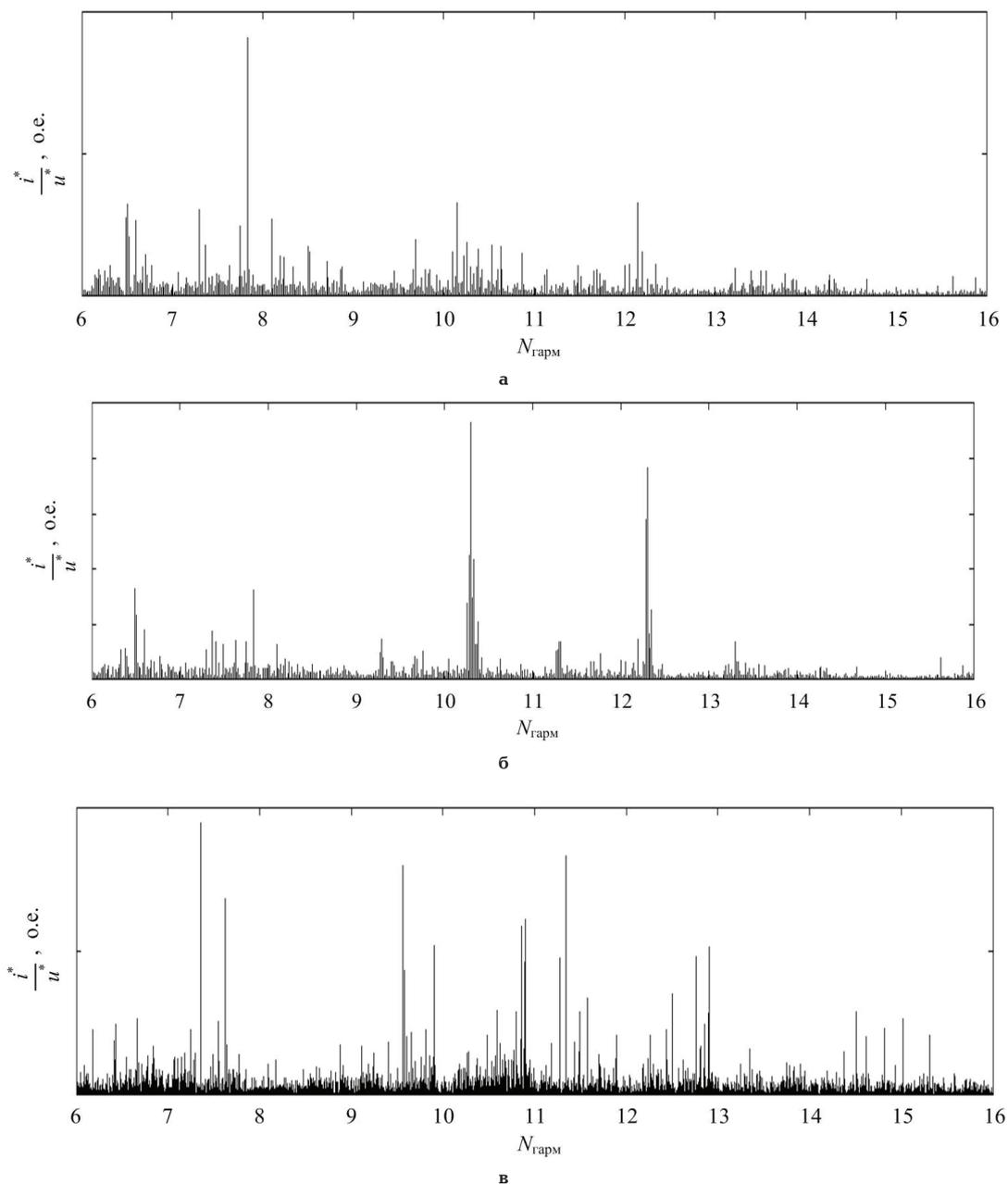


Рис. 2. Фрагмент спектра, полученного в результате деления амплитуд гармоник тока на амплитуды соответствующих гармоник напряжения одной фазы обмотки статора асинхронного двигателя мощностью: а — 0,3 кВт; б — 5,5 кВт; в — 250 кВт

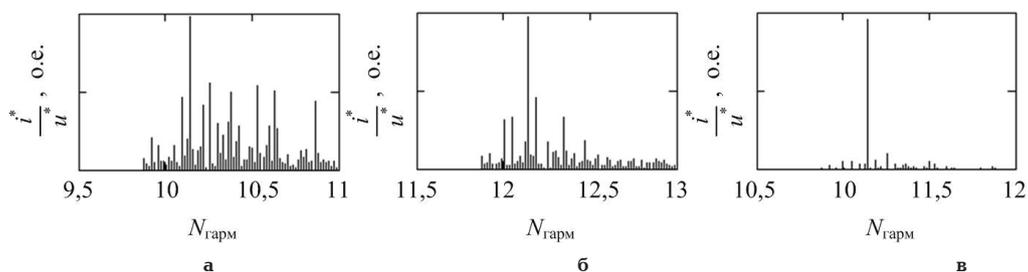


Рис. 4. Диапазоны поиска зубцовых гармоник для двигателя мощностью 5,5 кВт: а — первый диапазон; б — второй диапазон; в — произведение соответствующих амплитуд двух диапазонов

и равняется 50 Гц [9]. В последнем случае рациональнее анализировать спектр тока того двигателя, который подключен непосредственно к сети.

Для учета некоторого отклонения частоты вращения от величины, найденной по формуле (5),

и наличия погрешности при определении величин f_1' и f_1'' при вычислении нижней границы диапазонов поиска зубцовых гармоник введем коэффициент $K_\Delta < 1$. Тогда данная граница может быть найдена по формуле:

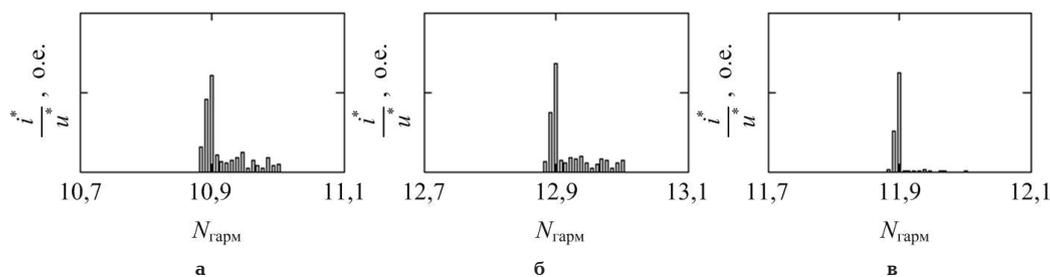


Рис. 5. Диапазоны поиска зубцовых гармоник для двигателя мощностью 250 кВт: а — первый диапазон; б — второй диапазон; в — произведение соответствующих амплитуд двух диапазонов

$$f_{z \text{ тр}} = \frac{(f_1' + f_1'')}{2} \frac{Z_2}{p} K_{\Delta} \pm f_1' k. \quad (6)$$

Фрагменты спектров, соответствующие расчетным диапазонам поиска зубцовых гармоник, приведены на рис. 3–5а, б.

Для подавления шумов в диапазонах поиска зубцовых гармоник произведено перемножение соответствующих амплитуд первого и второго диапазона. Результаты данной операции представлены на рис. 3–5в, на которых номера гармоникам присвоены средние арифметические от номеров перемножаемых гармоник. В полученном спектре явно выделяется зубцовая гармоника порядка N_z' , имеющая частоту

$$f_z = f_1' N_z. \quad (7)$$

После нахождения зубцовой гармоники может быть определено скольжение асинхронного двигателя по выражению:

$$s = 1 - \frac{p}{Z_2} N_z. \quad (8)$$

Анализ полученных результатов позволил сделать следующие выводы:

1) при испытании асинхронных двигателей по схемам взаимной нагрузки с питанием от статических преобразователей частоты возможно применение метода спектр-токового анализа для определения угловой скорости вращения асинхронных машин как малой, так и большой мощности;

2) в схемах взаимной нагрузки возможно сужение границ диапазонов поиска зубцовых гармоник за счет использования известных в данном случае частот напряжений, подаваемых на обмотки статора обеих машин;

3) применение метода спектр-токового анализа для определения угловой скорости вращения асинхронных машин позволяет осуществлять определение скорости вращения ротора с высокой точностью, а также повысить технологичность процесса измерения скорости вращения ротора за счет исключения специальных датчиков и необходимости их монтажа.

Библиографический список

1. Пат. 2200960 Российская Федерация, МПК G 01 R 31/34. Устройство для испытаний бесколлекторных электрических машин переменного тока / Курбасов А. С., Таргонский И. Л., Долгошеев Э. А. № 2001101213/09; заявл. 12.01.01; опубл. 20.03.03, Бюл. № 8.

2. Дорощенко И. В., Захаренко В. С. Динамика инвариантного испытательного стенда на основе асинхронно-вентильного каскада // Известия Томского политехнического университета. 2013. Т. 322, № 4. С. 110–115.

3. Beyerleyn E. V., Tyuteva P. V. Energy efficiency of back-to-back method for induction traction motors testing // Proc. of the 15th Intern. conf. of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM). 2014. P. 359–361. DOI: 10.1109/EDM.2014.6882547.

4. Синявский И. В., Жирков А. И., Курочка А. А. Стенд для испытаний асинхронных тяговых электродвигателей // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения. 2014. № 1 (67). С. 3–12.

5. Пат. 2433419 Российская Федерация, МПК G 01 R 31/34. Способ испытания асинхронных электродвигателей методом их взаимной нагрузки / Авилов В. Д., Володин А. И., Данковцев В. Т., Лукьянченко В. В., Панькин Е. В. № 2010124307/28; заявл. 15.06.10; опубл. 10.11.11, Бюл. № 31.

6. Steimel A. Power-electronic grid supply of AC railway systems // Proc. of the 13th Intern. Conf. on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), May 24–26, 2012. Brasov. 2012. P. 16–25. DOI: 10.1109/OPTIM.2012.6231844.

7. Bulucea C. A., Nicola D. A., Rosen M. A. [et al.]. Operation analysis of AC traction motors in terms of electromagnetic torque capability on sustainable railway vehicles // Proc. of the MATEC Web conf. 2016. Vol. 76. DOI: 10.1051/mateconf/20167602005.

8. Struhariňanský Ľ., Vittek J., Makyš P. [et al.]. Vector control techniques for traction drive with induction machines — comparison // Procedia Engineering. 2017. Vol. 192. P. 851–856. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.06.147.

9. Пат. 2691778 Российская Федерация, МПК G 01 R 31/34. Стенд для испытания асинхронных машин и способ их нагружения / Попов Д. И. № 2018126436; заявл. 17.07.18; опубл. 18.06.19, Бюл. № 17.

10. Пат. 163996 Российская Федерация, МПК G 01 R 31/34. Схема испытания асинхронных электродвигателей методом их взаимной нагрузки / Харламов В. В., Попов Д. И., Руменко С. О., Стретенцев А. И. № 2016113850/28; заявл. 11.04.16; опубл. 20.08.16, Бюл. № 23.

11. Hurst K. D., Habetler T. G. A comparison of spectrum estimation techniques for sensorless speed detection in induction machines // IEEE Transactions on Industrial Applications. 1997. Vol. 33, no. 4. P. 898–905. DOI: 10.1109/28.605730.

12. Барков А. В., Баркова Н. А., Борисов А. А. [и др.]. Методика диагностирования механизмов с электроприводом по потребляемому току. СПб.: Спектр, 2012. 67 с. ISBN 978-5-914-98-028-0.

13. Скляр А. В., Чижма С. Н., Елизаров Д. А. Алгоритм выделения пазовых гармоник по спектру сигнала тока статора асинхронного двигателя // Омский научный вестник. 2016. № 4 (148). С. 70–75.

14. Харламов В. В., Скляр А. В., Попов Д. И., Ерошенко А. В. Математическая модель асинхронного двигателя с учетом пазовых гармоник в индукции магнитного поля и неисправно-

стей различного типа // Омский научный вестник. 2018. № 4 (160). С. 55–58.

15. Харламов В. В., Попов Д. И., Литвинов А. В. Совершенствование технологии испытаний асинхронных тяговых двигателей локомотивов: моногр. Омск, 2016. 160 с. ISBN 978-5-949-41144-5.

16. Фираго Б. И., Павлячик Л. Б. Регулируемые электроприводы переменного тока. Мн.: Техноперспектива, 2006. 363 с. ISBN 985-6591-37-6.

ХАРЛАМОВ Виктор Васильевич, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Электрические машины и общая электротехника».

SPIN-код: 5093-8463

AuthorID (РИНЦ): 465264

ORCID: 0000-0003-3621-3377

AuthorID (SCOPUS): 7006332004

Адрес для переписки: емое@omgups.ru

ПОПОВ Денис Игоревич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электрические машины и общая электротехника».

SPIN-код: 8506-9250

AuthorID (РИНЦ): 657177

ORCID: 0000-0001-9519-1062

AuthorID (SCOPUS): 57200090858

Адрес для переписки: popovomsk@yandex.ru

Для цитирования

Харламов В. В., Попов Д. И. Анализ учета зубцовых гармоник ЭДС статора при математическом моделировании процесса испытания асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки // Омский научный вестник. 2020. № 2 (170). С. 37–41. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-170-37-41.

Статья поступила в редакцию 23.01.2020 г.

© В. В. Харламов, Д. И. Попов