

УДК 62-83-52+621.313.33
DOI: 10.25206/1813-8225-2019-167-39-45

В. Л. КОДКИН
А. С. АНИКИН
А. А. БАЛДЕНКОВ

Южно-Уральский
государственный университет,
г. Челябинск

СПЕКТРАЛЬНЫЙ СОСТАВ ТОКА РОТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ — ПОКАЗАТЕЛЬ ЕГО ЭФФЕКТИВНОСТИ

В статье обоснована эффективность анализа токов ротора асинхронных электроприводов с частотным управлением. Предлагается использовать спектральный анализ этих токов, их основной гармоники как наиболее точное «отображение» скольжения в асинхронном двигателе — в качестве метода оценки качества генерации крутящего момента двигателя. Моделирование и эксперименты подтверждают предложенные теоретические положения. Эти эксперименты, демонстрирующие работу привода при низких нагрузках, соответствующих скольжению 3%, при нагрузке, близкой к номинальной, соответствующему скольжению 8–10%, убедительно продемонстрировали, что реализованный в стандартных преобразователях частоты (например, ATV, *Schneider Electric*) алгоритм формирования крутящего момента является не самым эффективным, в то же время было предложено конструктивное решение, которое улучшает динамику привода почти в два раза, делая его близким к динамике двигателей с постоянными магнитами. Это решение позволит использовать асинхронные электроприводы в точных технологиях.

Ключевые слова: асинхронный привод, ток ротора, спектральный анализ, формирование крутящего момента.

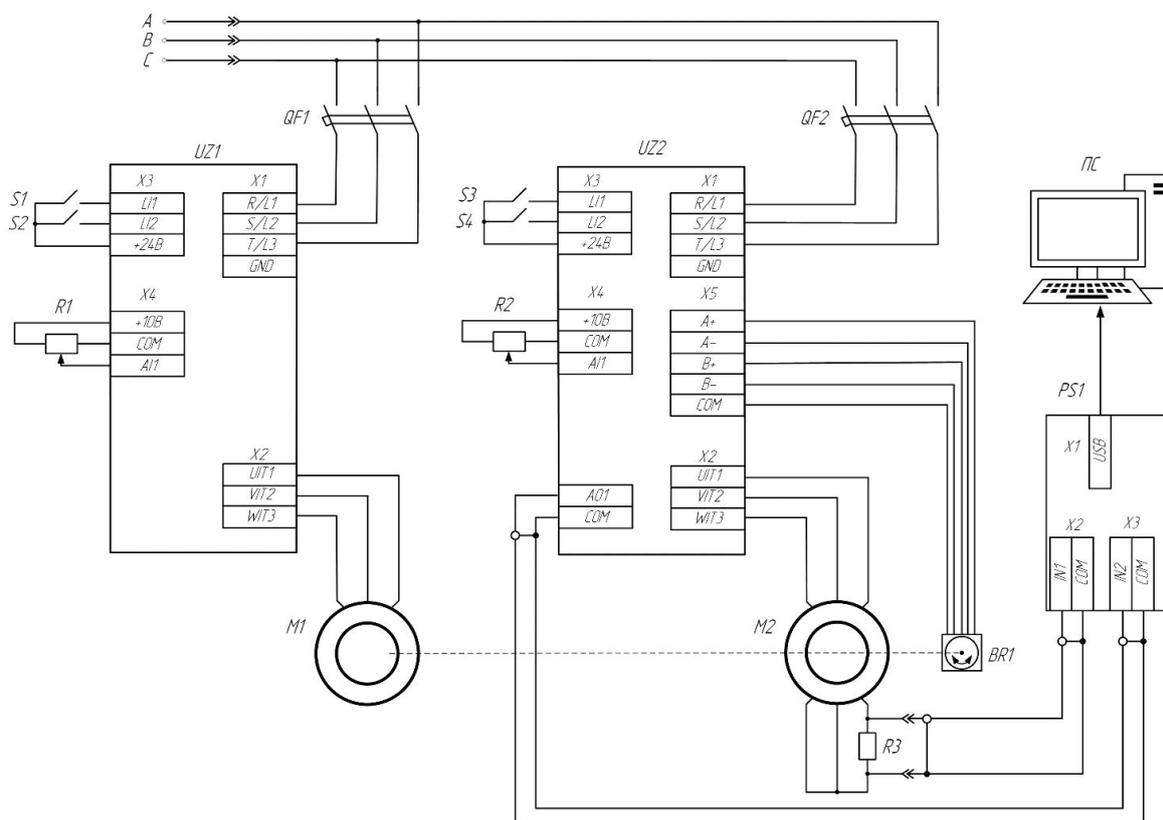
Введение. Одним из важных допущений, на которых основаны методы описания и анализа электродвигателей переменного тока, — это допущение о синусоидальности токов ротора и статора [1–5]. Это допущение делается при выводе формулы Клосса, построении векторных диаграмм, выводе законов векторного управления и технологии DTC (Direct Torque Control — прямое управление моментом) [6–8]. О несинусоидальности этих токов вспоминают лишь при анализе помех, создаваемых электроприводами.

Однако в реальности несинусоидальность токов очень существенно снижает эффективность асинхронных электроприводов, снижая эффективный вращающий момент. Это препятствует созданию динамичных и недорогих асинхронных электроприводов для высокотехнологичных механизмов, в частности, электроприводов промышленных роботов. Оценить влияние несинусоидальности токов

двигателя на механический момент можно только анализируя спектральный состав этих токов.

Известны примеры использования частотных преобразователей *Schneider Electric* в механизмах поворота башенных кранов. Операторы, чтобы скомпенсировать раскачивание груза при порывах ветра, пытаются запускать привод поворота в противоположные стороны 3–4 раза в секунду. При этом большинство операторов отмечали, что частотно управляемый привод с векторным управлением «не успевает» отработать этот режим, хотя «старые» приводы с релейно-контакторным управлением выполняли такие задачи. Чаще всего это пытаются объяснить неопытностью операторов, однако в связи с результатами проведенных исследований [9, 10] эти выводы следует пересмотреть.

Постановка задачи. Оценить спектральный состав статорных токов, наиболее доступных в асинхронных электроприводах, достаточно сложно, по-



UZ1, UZ2 — преобразователи частоты *Schneider Electric* ATV32; **M1** — АДКЗ;
M2 — АДФР; **PS1** — USB осциллограф *Hantek DSO-2090*;
ПС — персональный компьютер; **BR1** — энкодер

Рис. 1. Принципиальная схема стенда

скольку в них преобладание основной (несущей) частоты очень значительно [11–13]. Короткозамкнутый ротор недоступен для проведения измерений в нем токов, поэтому для идентификации процессов в асинхронном двигателе был создан стенд, на котором в качестве исследуемого использовался двигатель с фазным ротором (АДФР), в роторные цепи которого были установлены датчики тока, а в качестве нагрузочного — короткозамкнутый асинхронный двигатель (АДКЗ). Двигатели управлялись преобразователями частоты *Schneider Electric* (ATV32), выходные сигналы фиксировались цифровым USB-осциллографом (*Hantek*) и передавались для обработки на персональный компьютер. На рис. 1 представлена принципиальная электрическая схема стенда, а на рис. 2 электромашинный агрегат с двумя двигателями различных типов.

Стенд позволяет регистрировать синхронные диаграммы скорости вращения и токов ротора в статических и переходных процессах, на холостом ходу и под нагрузкой, а программное обеспечение цифрового USB-осциллографа *PS1* (*Hantek DSO-2090*), установленное на персональный компьютер *ПС*, позволяет выполнять спектральный анализ сигналов, включая токи ротора [14, 15]. Следует отметить, что частота тока ротора очень жестко связана со скольжением в двигателе — с рассогласованием между скоростью вращения электромагнитного поля статора и механической скоростью вращения ротора. Это рассогласование в асинхронном двигателе определяет развиваемый механический момент, следовательно, по величине скольжения, или по частоте тока ротора можно оценивать эффективность формирования механического момента



Рис. 2. Электромашинный агрегат с АДКЗ и АДФР

при том или ином способе управления. Оценивать реальное скольжение в приводе с преобразователем частоты весьма сложно. Дело в том, что при векторном управлении и при скорректированном скалярном частота статорного напряжения изменяется. Поэтому, даже если скорость вращения точно соответствует заданной, реальное скольжение, т.е. рассогласование между скоростью вращения электромагнитного поля статора и механической скоростью ротора, может принимать любые значения, и эффективность метода формирования момента тем выше, чем меньше для данного момента требуется скольжение. И лучше всего реальное скольжение оценивается по частоте роторного тока.

Моделирование процессов в асинхронном приводе. Моделирование проводилось в программе

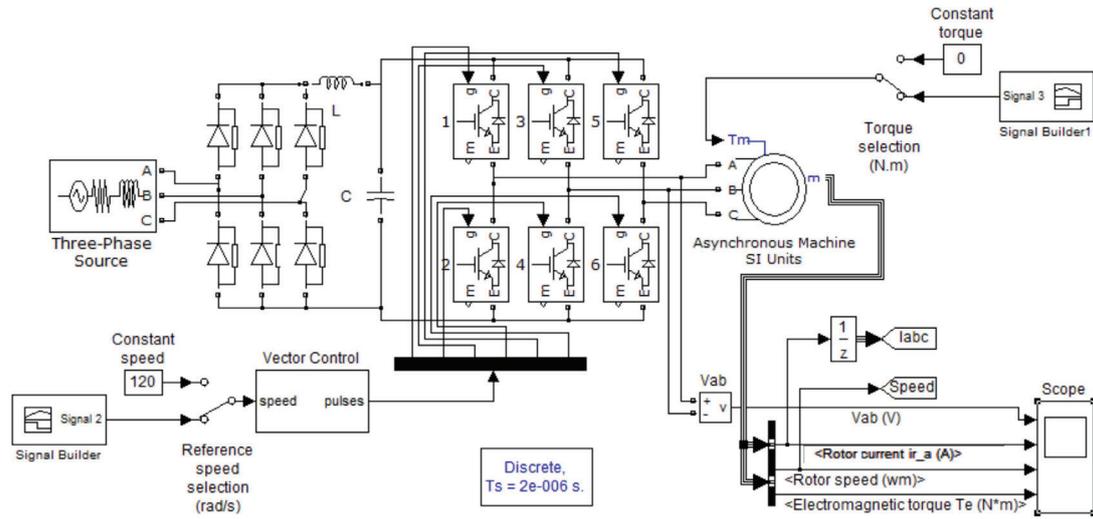


Рис. 3. Модель векторного управления

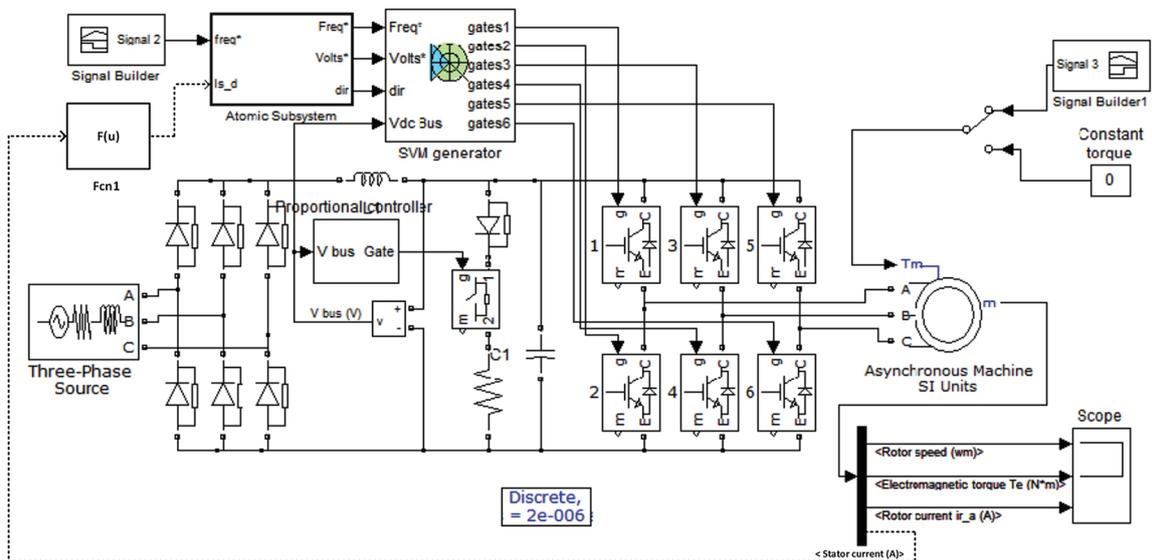


Рис. 4. Модель скалярного управления

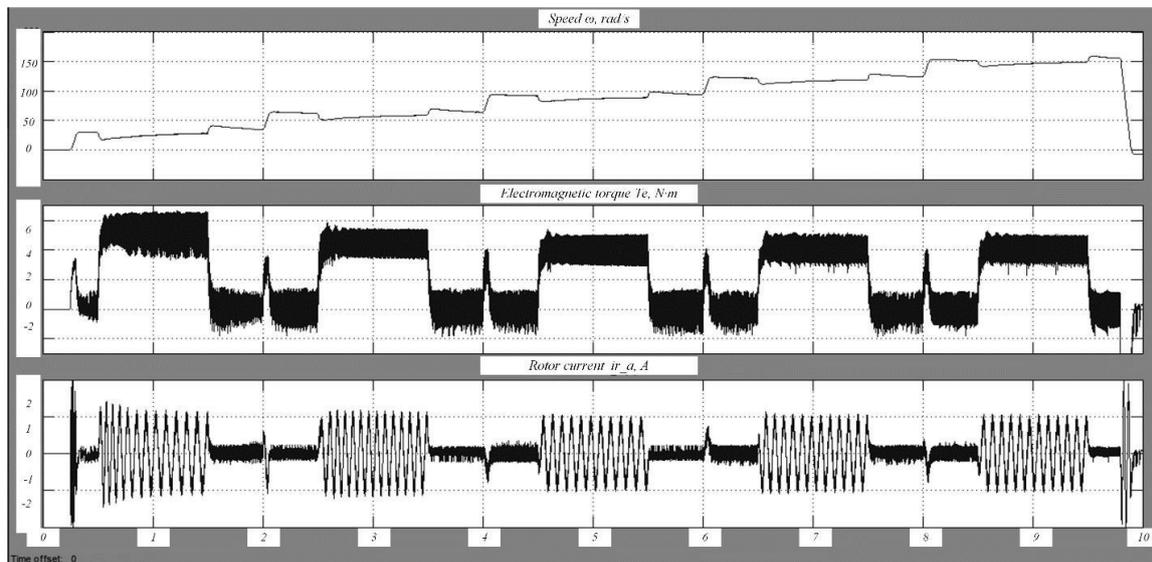


Рис. 5. Моделирование системы с векторным управлением

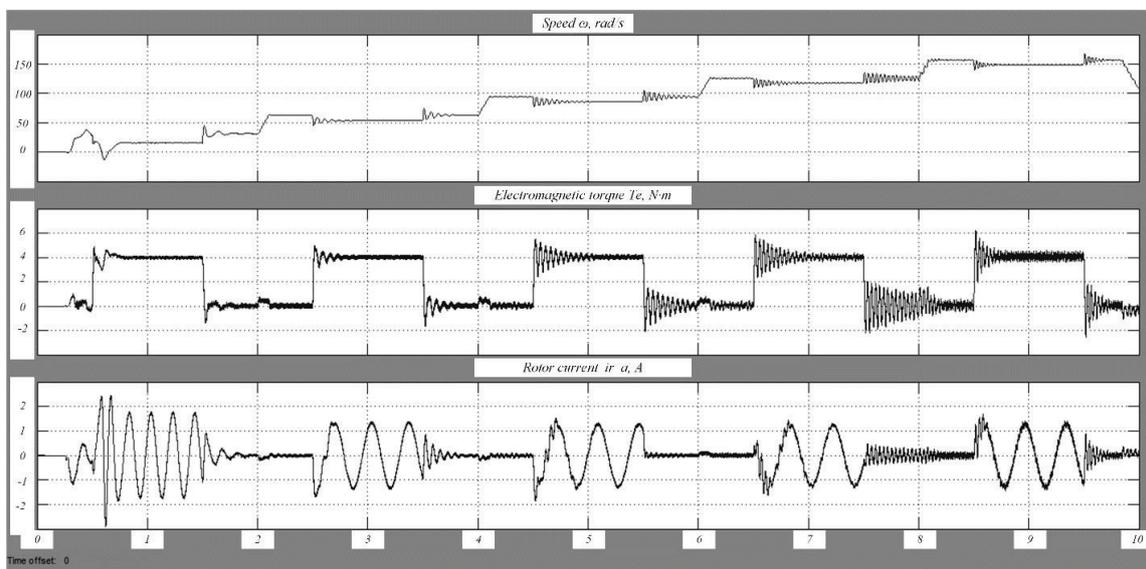


Рис. 6. Моделирование системы со скалярным управлением без обратной связи

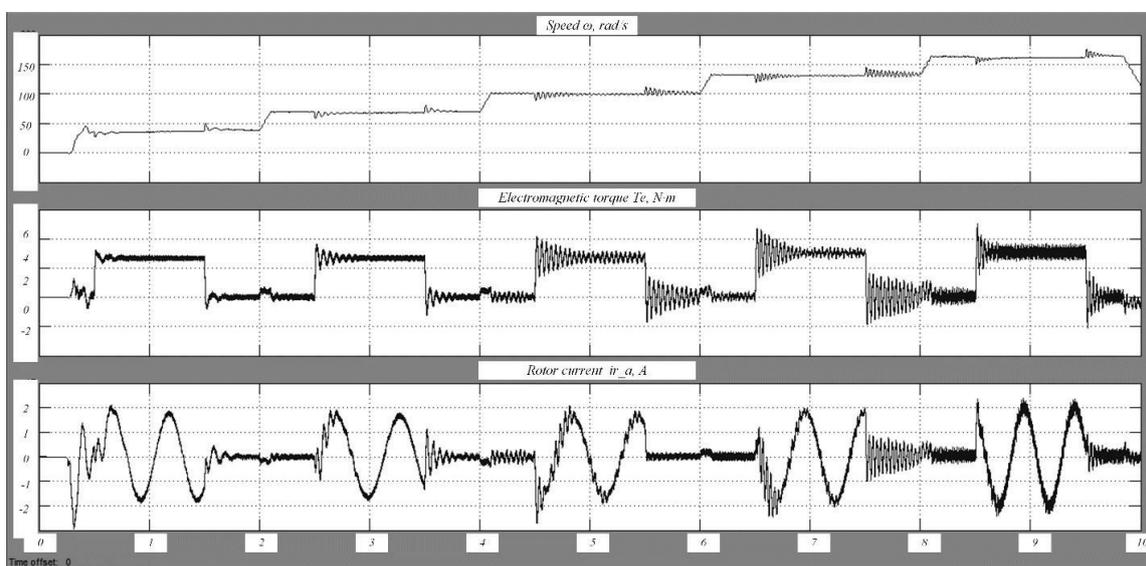


Рис. 7. Моделирование системы со скалярным управлением с обратной связью по току статора

Matlab (Simulink) с применением стандартных и модернизированных моделей скалярного и векторного управления. Пример модели векторного управления приведен на рис. 3, пример модели скалярного управления показан на рис. 4 (положительная обратная связь выделена пунктиром).

Моделировались процессы разгона до скоростей, соответствующих частоте питающего напряжения 10, 20, 30, 40, 50 Гц, и набросы нагрузки близкой к номинальной на этих скоростях. Результаты моделирования приведены на рис. 5–7.

На рис. 5 приведены результаты моделирования разгонов и набросов нагрузки на различных скоростях вращения при векторном управлении, на рис. 6 — при скалярном без обратной связи, 7 — при скалярном управлении с положительной обратной связью по току статора.

Значения основной частоты роторных токов при моделировании всех алгоритмов управления получены прямым вычислением по измеренным периодам изменений этих токов. Учитывались только значения частоты основной гармоники, как наиболее значимый показатель эффективности формирова-

ния момента. Частота роторного тока под нагрузкой (на скорости 90 c^{-1}) при векторном управлении составляет 10,6 Гц, скалярном без обратной связи — 2,75 Гц, скалярном с обратной связью по току статора — 1,74 Гц. Очевидно, что частота тока ротора является самой низкой в модели системы с положительной обратной связью по току статора, что указывает на более эффективный алгоритм формирования механического момента. При этом, по сравнению со скалярным управлением, в электроприводе с положительной обратной связью по току статора, работа на низких скоростях стабилизируется, и практически, отсутствуют провалы скорости при набросах нагрузки, а по сравнению с векторным — существенно меньшие частоты тока ротора и, соответственно, меньшее реальное скольжение [9, 10, 16].

Аналитическим способом объяснить и тем более предсказать эту ситуацию практически невозможно, поэтому был проведен ряд экспериментов.

Экспериментальные исследования. Аналогичные результаты получены при экспериментальных исследованиях на лабораторном стенде. Ниже при-

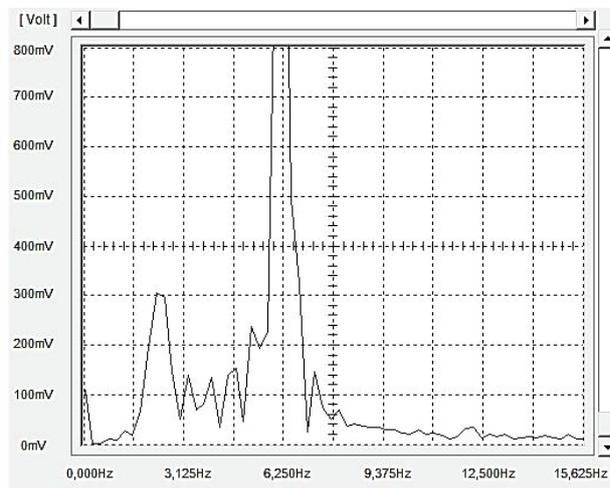
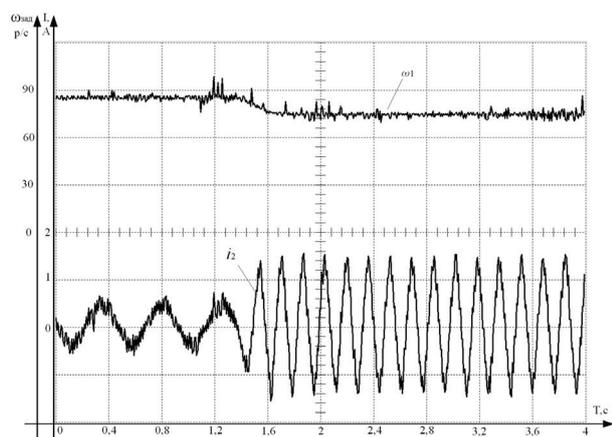


Рис. 8. Диаграмма скорости и тока ротора АД с бездатчиковым векторным управлением. Спектр сигнала тока ротора

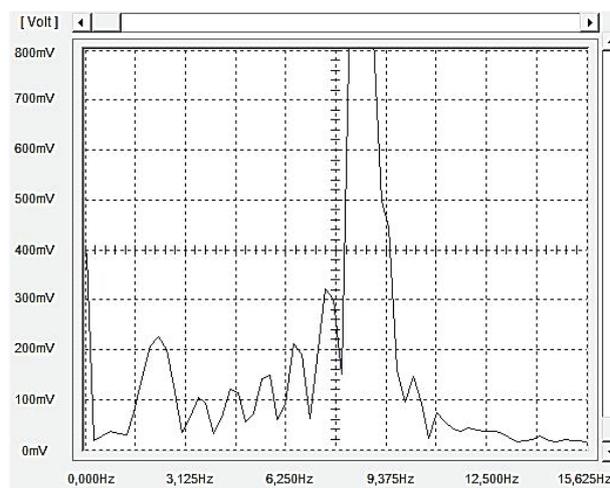
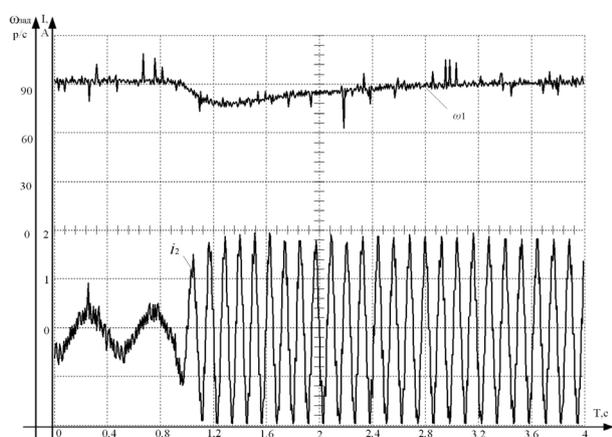


Рис. 9. Диаграмма скорости и тока ротора АД с векторным управлением, замкнутым по скорости. Спектр сигнала тока ротора

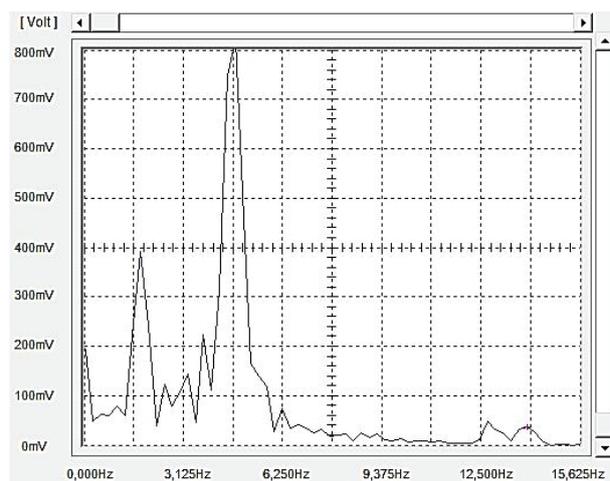
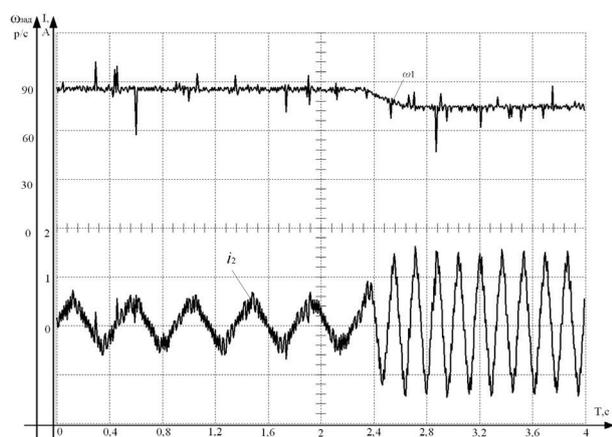


Рис. 10. Диаграмма скорости и тока ротора АД со скалярным управлением. Спектр сигнала тока ротора

ведены результаты экспериментов по спектральному анализу токов ротора для скорости, соответствующей частоте питающего напряжения 30 Гц. На рис. 8–11 приведены временные диаграммы скорости и роторных токов на холостом ходу и под одинаковой нагрузкой, близкой к номиналь-

ной, а также спектры, указывающие основные частоты роторных токов.

Анализ спектра токов ротора убедительно показывает, что формирование необходимого крутящего момента в электроприводе с векторным управлением, даже с замкнутым контуром скорости,

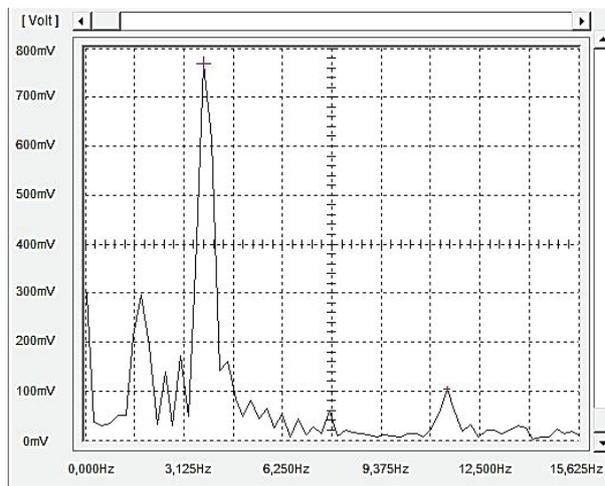
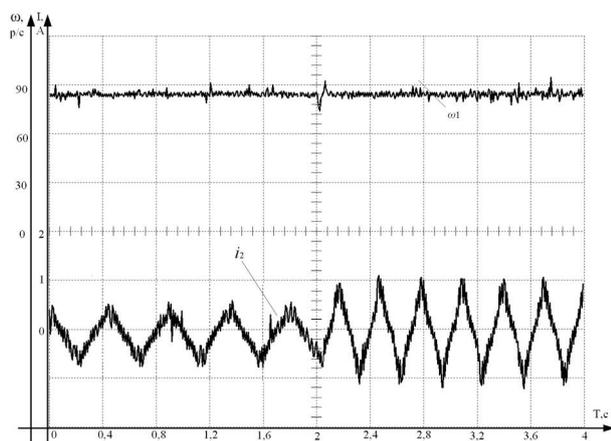


Рис. 11. Диаграмма скорости и тока ротора АД со скалярным управлением с обратной связью по току статора. Спектр сигнала тока ротора

Таблица 1

Значения основных частот роторных токов и реального скольжения на холостом ходу и под нагрузкой

	На холостом ходу		Под нагрузкой, близкой к номинальной	
	Частота, Гц	Скольжение, %	Частота, Гц	Скольжение, %
Векторное управление	2,1	7	6,25	20,8
Векторное управление обратной связью по скорости	2,1	7	8,75	29,2
Скалярное управление без ОС	1,69	5,6	4,75	15,8
Скалярное управление с обратной связью по току статора	1,75	5,8	3,5	11,7

не является наиболее эффективным, причиной этого, вероятно, является наличие значительных гармоник при частотах от 3 до 8 Гц (рис. 8, 9).

Следует обратить внимание на рис. 9, где показаны диаграмма тока ротора и его спектр при векторном управлении с обратной связью по скорости вращения двигателя, после наброса нагрузки и провала скорости, регулятор «вытягивает» скорость до заданного значения, но частота тока ротора не изменяется, что свидетельствует не об эффективности алгоритма формирования крутящего момента при векторном управлении, а об увеличении частоты статорного напряжения. Именно такая структура реализована в схеме управления приводом поворота башенного крана, о чем упоминалось во введении. Исключительно «затянутый» процесс парирования нагрузки связан с недостаточным крутящим моментом и не допускает «быстрых» режимов запуска поворотного привода, необходимого для парирования порывов ветра.

Значения основных частот спектра токов ротора и значения реального скольжения на холостом ходу и под нагрузкой представлены в табл. 1.

Объяснить эти результаты, основываясь на допущениях, сделанных в начале статьи о синусоидальности тока ротора и статора асинхронного электродвигателя при частотном управлении, очень сложно. Рассмотрев спектры токов ротора, можно

сделать предположение о наличии гораздо большего спектрального состава токов ротора (и, следовательно, токов статора) при векторном управлении (рис. 8, 9), чем в случае скалярного (рис. 10). Очень сложно оценить влияние на крутящий момент этих «вредных» гармоник прямым спектральным анализом. Но, оценивая основную гармонику тока ротора, который соответствует реальному скольжению (см. табл. 1), то есть рассогласование скорости вращения поля статора и механического вращения ротора, можно сделать вывод об эффективности формирования крутящего момента для каждого из рассмотренных методов управления асинхронным двигателем (векторный, скалярный и скалярный с динамической положительной обратной связью по току статора (рис. 11)).

Результаты экспериментов, приведенные на рис. 7–11, в целом совпадают с результатами проведенного моделирования (рис. 5–7).

Заключение.

1. Проведенные эксперименты и моделирование показали, что при широко применяемых алгоритмах частотного управления асинхронными двигателями (скалярном и векторном) токи ротора асинхронного двигателя содержат существенные составляющие различных частот. Это приводит к снижению эффективности привода, которое проявляется в увеличении скольжения при па-

рировании нагрузки. Наибольших значений это скольжение достигает при векторном управлении, поскольку оно принципиально учитывает только одну гармонику (21 % и 29 % при набросе нагрузки, табл. 1).

2. Спектральный анализ роторных токов асинхронного показал, что наиболее эффективным способом формирования момента будет частотное управление с положительной обратной связью по току статора (скольжение при той же нагрузке 11–12 %, см. табл. 1), при этом управлении преобладает ярко выраженные гармонические составляющие, что свидетельствует о близости этой структуры к линейной и существенно лучшей управляемости приводов, что делает перспективным их применение в высокотехнологичных механизмах.

Библиографический список

1. Усольцев А. А., Воробьев Н. В., Фешин Б. Н. Методика анализа электромагнитных процессов в подсистемах автоматизированного электропривода // Автоматика и информатика. 2014. Т. 2 (35). С. 50–53.

2. Усольцев А. А. Определение параметров модели асинхронного двигателя по справочным данным // Известия вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 10. С. 35–41.

3. Ильина А. Г., Усольцев А. А. Оптимальное управление движением при позиционировании и его моделирование в среде MathLab/Simulink // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 6. С. 63–68.

4. Поздеев А. Д. Электромагнитные и электромеханические процессы в частотно-регулируемых асинхронных электроприводах. Чебоксары: Изд-во Чувашского ун-та, 1998. 172 с.

5. Соколовский Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: АКАДЕМИА, 2006. 267 с.

6. Kodkin V. L., Anikin A. S. Frequency control of asynchronous electric drives in transport // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON 2015). Proceedings. 2015. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7146978.

7. Kodkin V. L., Anikin A. S., Shmarin Ya. A. Effective Frequency Control for Induction Electric Drives Under Overloading // Russian Electrical Engineering. 2014. Vol. 85. P. 641–644. DOI: 10.3103/S1068371214100101.

8. Park R., Robertson B. The reactance of synchronous machines // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. 1928. Vol. 47, Issue 2. P. 514–535. DOI: 10.1109/T-AIEE.1928.5055010.

9. Kodkin V. L., Anikin A. S., Baldenkov A. A. Experimental Research of Asynchronous Electric Drive with Positive Dynamic Feedback on Stator Current // III International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017. Proceedings. 2017. P. 1–5. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076179.

10. Kodkin V. L., Baldenkov A. A. Methods of optimizing the speed and accuracy of optical complex guidance systems based on equivalence of automatic control system domain of attraction and unconditional stability of their equivalent circuits // Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control & Radioelectronics. 2016. Vol. 17. P. 23–33. DOI: 10.14529/ctcr170103.

11. Воробьев Н. Н. Теория рядов. 4-е изд. М.: Наука, 1979. 408 с.

12. Mejlbro L. Fourier Series and Systems of Differential Equations and Eigenvalue Problems: Guidelines for Solutions of Problems. Leif Mejlbro & Ventus Publishing Aps, 2007. 125 p. ISBN 978-87-7681-242-3.

13. Loday-Richaud M. Divergent Series, Summability and Resurgence II. Simple and Multiple Summability. Springer International Publishing, 2016. 272 p. ISBN 978-3-319-29075-1.

14. Kodkin V. L., Anikin A. S., Baldenkov A. A. Spectral Analysis of Rotor Currents in Frequency-controlled Electric Drives // 2nd International Conference on Automation, Mechanical and Electrical Engineering, AMEE 2017. Proceedings. 2017. DOI: 10.2991/amee-17.2017.26.

15. Kodkin V. L., Anikin A. S., Baldenkov A. A. The analysis of the quality of the frequency control of induction motor carried out on the basis of the processes in the rotor circuit // IOP Conf. Series. Journal of Physics Conference Series. 2017. Vol. 944 (1). 012052. DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012052.

16. Kodkin V. L., Anikin A. S., Baldenkov A. A. Analysis of stability of electric drives as non-linear systems according to Popov criterion adjusted to amplitude and phase frequency characteristics of its elements // DEStech Transactions on Engineering and Technology Research. 2017. DOI: 10.12783/dtetr/amsm2017/14810.

КОДКИН Владимир Львович, доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизированный электропривод».

Адрес для переписки: kodkina2@mail.ru

SPIN-код: 1872-2435

ORCID: 0000-0003-4554-1153

AuthorID (SCOPUS): 56459057400

ResearcherID: Y-8281-2018

АНИКИН Александр Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретические основы электротехники».

Адрес для переписки: anikinas@susu.ru

SPIN-код: 3449-0353

ORCID: 0000-0003-3203-4910

AuthorID (SCOPUS): 16512495400

ResearcherID: A-9929-2014

БАЛДЕНКОВ Александр Александрович, аспирант кафедры «Автоматизированный электропривод», Южно-Уральский государственный университет; инженер, ООО «КОСТЕС», г. Челябинск.

Адрес для переписки: baloo@mail.ru

ORCID: 0000-0001-7751-5334

AuthorID (SCOPUS): 57200150858

Для цитирования

Кодкин В. Л., Аникин А. С., Балденков А. А. Спектральный состав тока ротора асинхронного двигателя — показатель его эффективности // Омский научный вестник. 2019. № 5 (167). С. 39–45. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-167-39-45.

Статья поступила в редакцию 26.09.2019 г.

© В. Л. Кодкин, А. С. Аникин, А. А. Балденков