

УДК 681.5:62-83

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ СИСТЕМ БЕЗДАТЧИКОВОГО УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

С. М. Пересада, С. Н. Ковбаса, А. Б. Воронко, Д. Л. Приступа

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»
просп. Перемоги, 37, г. Київ, 03056, Україна. E-mail: skovbasa@ukr.net

Представлены результаты экспериментального тестирования систем бездатчикового векторного управления, построенных на основе серийных преобразователей частоты, а также теоретически обоснованного алгоритма бездатчикового векторного управления, разработанного авторами. Показано, что разработанный алгоритм гарантирует устойчивую работу во всем диапазоне регулирования угловой скорости с показателями качества, которые не уступают существующим у зарубежных производителей.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, бездатчиковое векторное управление, преобразователь частоты.

ПОРІВНЯЛЬНЕ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ТЕСТУВАННЯ СИСТЕМ БЕЗДАВАЧЕВОГО КЕРУВАННЯ АСИНХРОННИМИ ДВИГУНАМИ

С. М. Пересада, С. М. Ковбаса, А. Б. Воронко, Д. Л. Приступа

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»
просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна. E-mail: skovbasa@ukr.net

Надано результати експериментального тестування систем бездавачевого векторного керування, побудованих на основі серійних перетворювачів частоти, а також теоретично обґрунтованого алгоритму бездавачевого векторного керування, розробленого авторами. Показано, що розроблений алгоритм гарантує стійку роботу у всьому діапазоні регулювання кутової швидкості з показниками якості, які не поступаються існуючим у закордонних виробників.

Ключові слова: асинхронний двигун, бездавачеве векторне керування, перетворювач частоти.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Алгоритмы векторного управления асинхронными двигателями (АД) без измерения механических координат, которые общепринято называть «бездатчиковыми», реализованы в большинстве современных преобразователей частоты зарубежного производства и находят широкое распространение в механизмах со средним уровнем требований к диапазону и точности регулирования угловой скорости [1]. Вместе с тем, конечным потребителям, как и представителям академической среды, достаточно сложно оценить реальный уровень достигаемых показателей качества, поскольку используемые в серийной продукции алгоритмы управления и результаты их полномасштабных лабораторных исследований, которые проводятся многими производителями, являются закрытой информацией.

С другой стороны, известно, что значительное количество бездатчиковых алгоритмов практической направленности, в том числе реализованных в коммерческих изделиях мировых производителей, не имеют строгого теоретического обоснования или могут лишь условно называться такими, поскольку они базируются на существенных упрощениях, таких, как линеаризация, рассмотрение только установленных режимов, или содержат операции, которые не могут быть надежно реализованы на практике (разомкнутое интегрирование, идеальное дифференцирование). Как результат такого подхода, существующие системы могут не обеспечивать асимптотического регулирования угловой скорости и модуля вектора потокосцепления, имеют ограниченный диапазон регулирования, могут терять устойчивость при работе на низких скоростях, а также в генераторном режиме, имеют высокую чувствительность к вариациям параметров электрической машины. Перечисленные факторы в комплексе определяют качество систем бездатчикового векторного управления (СБВУ) АД, однако, в большинстве

случаев, в технических характеристиках своих изделий производители о них умалчивают, ограничиваясь указанием только статического диапазона регулирования угловой скорости.

Поэтому сравнительное экспериментальное тестирование СБВУ, построенных с использованием серийных преобразователей частоты, а также на основе теоретически обоснованных решений [2, 3], с целью анализа достигаемых в них показателей качества регулирования угловой скорости является актуальным и определяет цель настоящей работы.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Сравнительное экспериментальное тестирование СБВУ производилось с использованием экспериментальной установки, которая включает в себя (рис. 1):

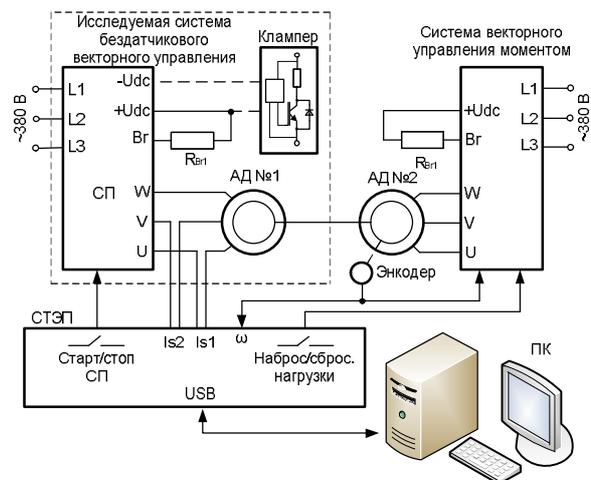


Рисунок 1 – Функциональная схема экспериментальной установки

– два общепромышленных АД типа АИР90L4У2, валы которых соединены жесткой муфтой, с параметрами: номинальная мощность – 2,2 кВт,

номинальная скорость – 148 рад/с, номинальный ток – 5 А, активное сопротивление ротора – 3,8 Ом, активное сопротивление статора – 2,1 Ом, индуктивность статора и ротора – 0,2655 Гн, индуктивность намагничивающего контура – 0,257 Гн, суммарный момент инерции – 0,0165 кгм²;

- тестируемую СБВУ на основе серийного преобразователя (СП), к которому подключен АД № 1;
- нагрузочный агрегат, обеспечивающий векторное управление моментом АД № 2;
- фото-импульсный датчик скорости (энкодер) с разрешающей способностью 1024 импульсов на оборот;

– персональный компьютер для визуального наблюдения и записи переходных процессов во время экспериментов;

– систему тестирования электроприводов (СТЭП), которая обеспечивает функции визуализации и автоматизации экспериментов [4].

Для тестирования промышленных СБВУ выбрано пять преобразователей разных зарубежных производителей, которые свободно доступны на рынке Украины и представляют среднюю и высокую ценовую категорию. Далее по тексту системы, построенные на их основе, обозначены СБВУ 1 – СБВУ 5.

Экспериментальное тестирование СБВУ на основе серийных преобразователей осуществлялось в следующем порядке. Вначале активируется режим самонастройки и осуществляется идентификационный прогон для определения параметров АД. Далее производится ручная настройка регуляторов для получения показателей качества регулирования угловой скорости, близких к характеристикам модульного оптимума. После этого выполняется серия стандартных тестов, в процессе которых двигатель на холостом ходу разгоняется до значений заданной скорости 50, 15, 7,5, 0 рад/с. При работе двигателя с установившейся скоростью к его валу на время, равное 1 с, прикладывается номинальный момент нагрузки. При этом осциллографируется угловая скорость ротора и фазный ток статора.

Результаты экспериментального тестирования серийных СБВУ. В ходе выполнения тестирования пяти СБВУ установлено, что при работе АД на скоростях в диапазоне 15–100 % от номинальной все они обеспечивают примерно одинаковое качество регулирования угловой скорости как в двигательном (рис. 2), так и в генераторном (рис. 3) режимах работы (за исключением СБВУ 4, которая не обеспечивает работу с генераторным моментом при скоростях, менее 75 рад/с). На рисунках ошибка обработки угловой скорости обозначена как $\tilde{\omega} = \omega - \omega^*$, где ω – угловая скорость ротора; ω^* – задание скорости.

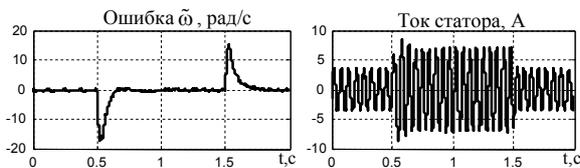


Рисунок 2 – Переходные процессы в СБВУ 1 при $\omega^* = 50$ рад/с и двигательном моменте нагрузки

При работе в указанном диапазоне скоростей максимальная статическая ошибка при действии номинального момента нагрузки не превышает 1–2 рад/с.

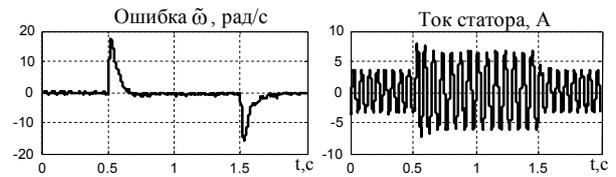


Рисунок 3 – Переходные процессы в СБВУ 1 при $\omega^* = 50$ рад/с и генераторном моменте нагрузки

При снижении заданной скорости двигателя до значений, меньших 10 % от номинальной скорости (примерно, когда $\omega^* < 15$ рад/с), динамическое поведение тестируемых СБВУ становится отличным друг от друга (рис. 4–12).

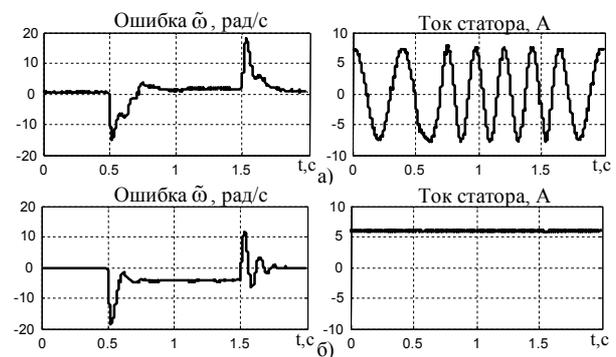


Рисунок 4 – Переходные процессы в СБВУ 1 при двигательном моменте нагрузки: а) $\omega^* = 7,5$ рад/с; б) $\omega^* = 0$ рад/с

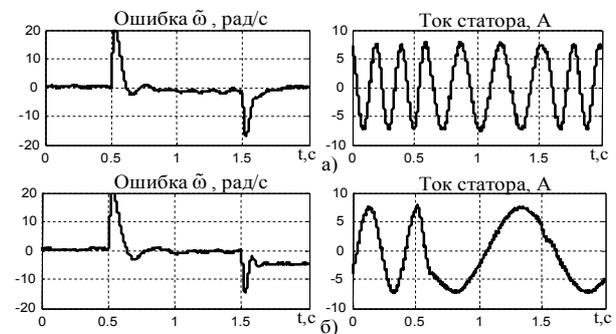


Рисунок 5 – Переходные процессы в СБВУ 1 при генераторном моменте нагрузки: а) $\omega^* = 15$ рад/с; б) $\omega^* = 7,5$ рад/с

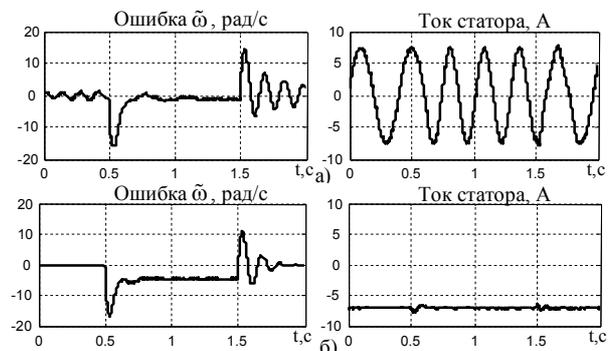


Рисунок 6 – Переходные процессы в СБВУ 2 при двигательном моменте нагрузки: а) $\omega^* = 7,5$ рад/с; б) $\omega^* = 0$ рад/с

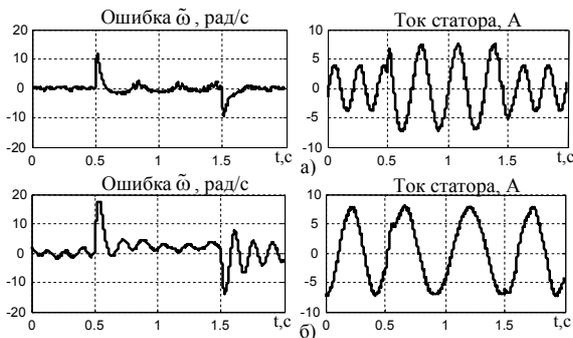


Рисунок 7 – Переходные процессы в СБВУ 2 при генераторном моменте нагрузки: а) $\omega^*=15$ рад/с; б) $\omega^*=7,5$ рад/с

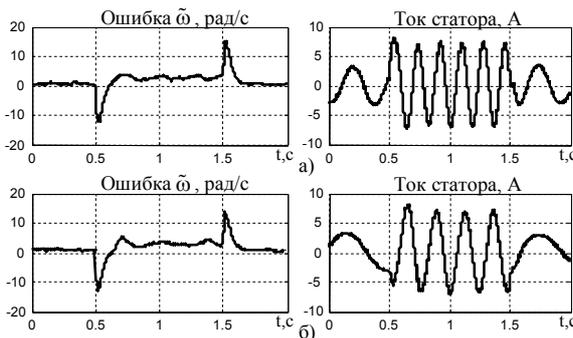


Рисунок 8 – Переходные процессы в СБВУ 3 при двигательном моменте нагрузки: а) $\omega^*=7,5$ рад/с; б) $\omega^*=3$ рад/с

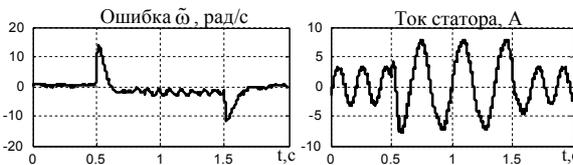


Рисунок 9 – Переходные процессы в СБВУ 3 при $\omega^* = 15$ рад/с и генераторном моменте нагрузки

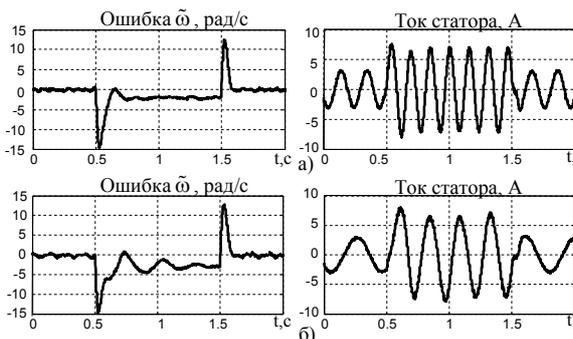


Рисунок 10 – Переходные процессы в СБВУ 4 при двигательном моменте нагрузки: а) $\omega^*=15$ рад/с; б) $\omega^*=7,5$ рад/с

Как видно из рис. 4–7, в диапазоне низких скоростей СБВУ 1 и СБВУ 2 переходят в режим стабилизации тока с завышенным возбуждением АД. Об этом свидетельствует поддержание в двигателе тока на уровне его номинального значения при работе на холостом ходу и под нагрузкой. В режиме работы с нулевой заданной скоростью на холостом ходу и под нагрузкой двигатель питается постоянным током, что соответствует его работе в режиме

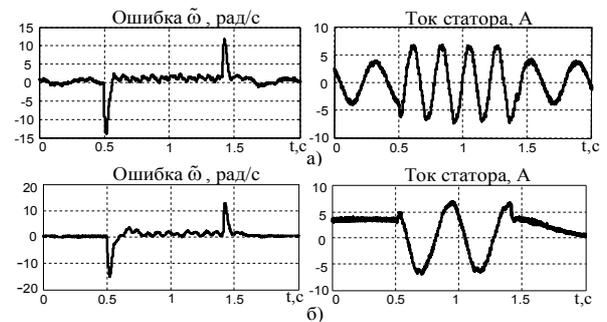


Рисунок 11 – Переходные процессы в СБВУ 5 при двигательном моменте нагрузки: б) $\omega^*=7,5$ рад/с; в) $\omega^*=0$ рад/с

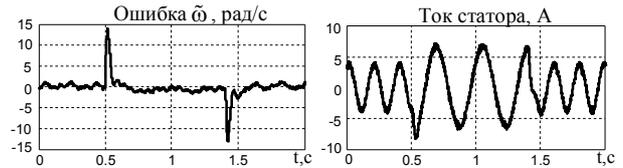


Рисунок 12 – Переходные процессы в СБВУ 5 при $\omega^* = 15$ рад/с и генераторном моменте нагрузки

динамического торможения. При этом система ведет себя как разомкнутая по скорости, поскольку после приложения нагрузки частота тока статора не меняется. Необходимо отметить, что в СБВУ 1 после снятия генераторного момента нагрузки на скорости 7,5 рад/с на холостом ходу возникает ошибка обработки на уровне 5 рад/с (рис. 5,б), что указывает на отсутствие наблюдаемости угловой скорости в этом режиме. Работа на низких скоростях СБВУ 2 характеризуется повышенной колебательностью переходных процессов, особенно при отработке генераторного момента нагрузки (рис. 6, 7).

На рис. 8, 9 показаны графики переходных процессов, полученные в СБВУ 3. При тестировании установлено, что СБВУ 3 не обеспечивает режим работы на нулевой скорости, а минимальная скорость, при которой обрабатывается скачкообразный двигательный момент нагрузки, составляет примерно 3 рад/с. Устойчивая работа в генераторном режиме наблюдается только на скоростях, выше 10–15 рад/с (рис. 9).

Переходные процессы в СБВУ 4 показаны на рис. 10. По результатам тестирования установлено, что СБВУ 4 обеспечивает регулирование угловой скорости в двигательном режиме в диапазоне примерно 1:20, а максимальная статическая ошибка составляет около 3 рад/с при работе на низких скоростях. Устойчивая работа в генераторном режиме при использовании СБВУ 4 достигается на скоростях, выше 75 рад/с.

Среди протестированных систем наиболее высокие показатели качества регулирования угловой скорости демонстрирует СБВУ 5 (рис. 11, 12). Из рис. 11, 12 видно, что в данном случае обеспечивается регулирование угловой скорости со статической ошибкой примерно 1,5 рад/с во всем диапазоне скоростей, вплоть до нулевой. Необходимо отметить, что величина статической ошибки практически не зависит от значения угловой скорости как в двигательном, так и в генераторном режимах. При действии генераторного момента нагрузки устойчивая работа наблюдается во всем диапазоне скоростей, за

исключением узкой зоны, когда $\omega^* \approx 7,5$ рад/с.

Из результатов тестирования преобразователей СБВУ 3–СБВУ 5, в которых управляющее воздействие формируется с использованием алгоритмов векторного бездатчикового управления, видны две основные проблемы бездатчикового управления, которые присутствуют в некоторых изделиях: неустойчивость работы в зоне нулевых скоростей, а также в генераторных режимах на низких скоростях. Наличие первой проблемы в значительной степени обуславливается эффектами немоделируемой динамики и неидеальностями инвертора, которые необходимо компенсировать. Вторая проблема имеет математическое объяснение, которое следует из теории адаптивных систем и состоит в том, что при действии генераторных моментов нагрузки на низких скоростях нарушаются условия персистентности возбуждения [2, 5] и угловая скорость АД становится ненаблюдаемой. Параметры математической модели АД, который используется в экспериментальной установке, таковы, что одним из режимов, когда условия персистентности возбуждения нарушаются, является работа с заданной скоростью, близкой к 7,5 рад/с при действии номинального генераторного момента нагрузки. Поэтому ни один из протестированных преобразователей, работающих в режиме полноценного бездатчикового управления во всем диапазоне скоростей, не обеспечивает устойчивой работы в генераторных режимах при нарушении условий персистентности возбуждения. СБВУ, которые переходят в режим стабилизации тока статора (СБВУ 1, СБВУ 2), в тех же условиях остаются устойчивыми, однако имеют худшие энергетические характеристики и могут приводить к перегреву АД при длительной работе на малых скоростях.

Результаты экспериментального тестирования алгоритма бездатчикового управления [3]. Экспериментальное тестирование выполнено на станции быстрого прототипного тестирования [5] с использованием той же пары электрических машин и нагрузочного агрегата. Параметры АД, использованные при практической реализации алгоритма бездатчикового управления, были определены заранее.

При исследовании использовалась последовательность операций управления (рис. 13):

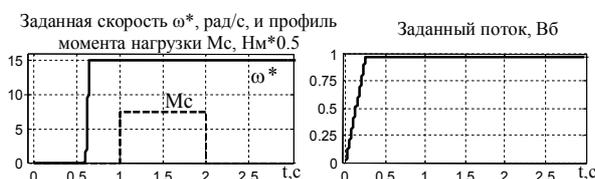


Рисунок 13 – Заданные траектории угловой скорости и потока

– во время начального интервала времени 0–0,25 с машина возбуждается, траектория заданного потока начинается с $\Psi^*(0) = 0,02$ Вб и достигает номинального значения 0,96 Вб с первой производной, равной 3,76 Вб/с;

– начиная с $t = 0,6$ с двигатель без нагрузки разгоняется по заданной траектории скорости, которая имеет нулевое начальное значение и достигает 15 или 7,5 рад/с;

– в момент времени $t = 1$ с к валу двигателя

прикладывается постоянный момент нагрузки, равный 100 % номинального значения, а в момент времени $t = 2$ с момент нагрузки снимается.

Настроечные параметры алгоритма управления приведены в [3] и были выбраны таким образом, чтобы обеспечить устойчивую работу системы при максимально возможном быстродействии в контуре скорости.

Графики переходных процессов алгоритма бездатчикового управления [3] в зоне низких скоростей показаны на рис. 14, 15. Как следует из сравнения рис. 2–12 с рис. 14, 15, алгоритм [3] обеспечивает высокие показатели качества регулирования угловой скорости, которые не уступают существующим у зарубежных производителей, а в некоторых случаях превосходят их. Статическая ошибка обработки угловой скорости при действии двигательного момента нагрузки находится на нулевом уровне, а при действии генераторного момента равна примерно 2 рад/с. Благодаря поддержанию условий персистентности возбуждения за счет использования алгоритма формирования заданного потокосцепления, представленного в [6], алгоритм [3] дополнительно обеспечивает устойчивую работу при обработке генераторного момента на скорости 7,5 рад/с, в то время как алгоритмы бездатчикового векторного управления серийных преобразователей в этом режиме теряют устойчивость.

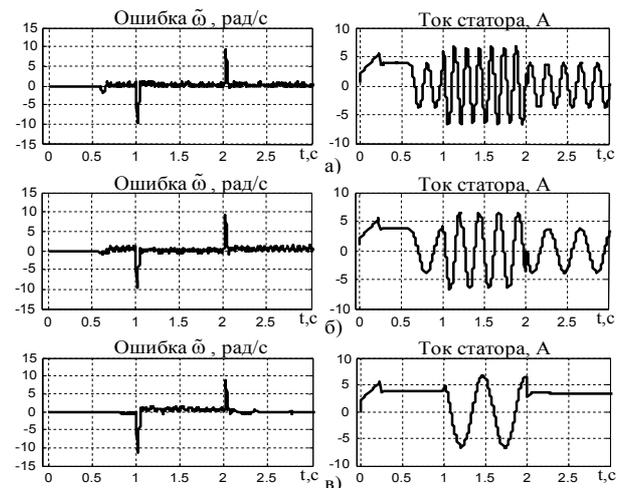


Рисунок 14 – Переходные процессы в СБВУ с использованием алгоритма [3] при двигательном моменте нагрузки: а) $\omega^* = 15$ рад/с; б) $\omega^* = 7,5$ рад/с; в) $\omega^* = 0$ рад/с

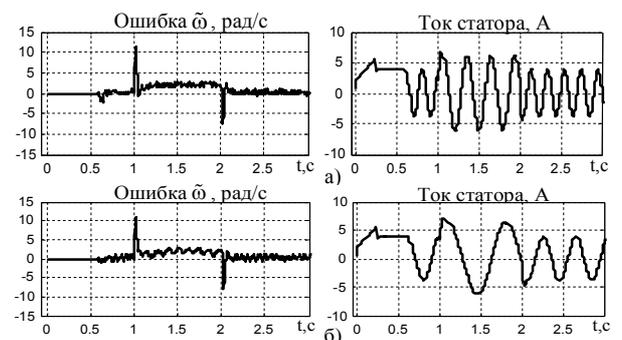


Рисунок 15 – Переходные процессы в СБВУ с использованием алгоритма [3] при генераторном моменте нагрузки: а) $\omega^* = 15$ рад/с; б) $\omega^* = 7,5$ рад/с

На рис. 16 показана ошибка обработки угловой скорости в системе улучшенного косвенного векторного управления с измерением угловой скорости [6] при тех же настройках регулятора скорости. Сравним рис. 16 и 14, устанавливаем, что динамические и статические показатели качества регулирования угловой скорости, которые достигаются с использованием алгоритма бездатчикового управления [3], приближаются к тем, которые существуют в системах с измерением угловой скорости.

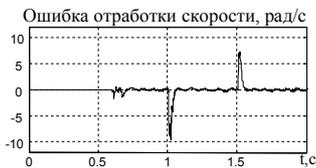


Рисунок 16 – Переходные процессы в системе с измерением угловой скорости

ВЫВОДЫ. Из анализа результатов сравнительного экспериментального тестирования систем бездатчикового управления АД, построенных с использованием серийных преобразователей частоты, установлено, что в верхней части диапазона регулирования угловой скорости большинство из них обеспечивает удовлетворительные показатели качества, приемлемые для многих технологических применений со средним уровнем требований к статической и динамической точности регулирования угловой скорости.

Работа в нижнем диапазоне скоростей сопряжена с ухудшением показателей качества регулирования, возможной потерей устойчивости при отработке нулевых скоростей в двигательном режиме, а также неустойчивостью при отработке генераторных моментов нагрузки.

COMPARATIVE EXPERIMENTAL TESTING OF INDUCTION MOTOR SENSORLESS CONTROL SYSTEMS

S. Peresada, S. Kovbasa, A. Voronko, D. Prystupa

National Technical University of Ukraine "Kiev politechnical institute"
prosp. Pobedy, 37, Kiev, 03056, Ukraine. E-mail: skovbasa@ukr.net

The results of experimental testing of induction motor sensorless control systems are presented. The tested systems are based on serial frequency converters and theoretically proved sensorless vector control algorithm, developed by authors. It is shown, that developed control algorithm provides stable operation in the full speed range with performances that corresponds or better existing in foreign manufacturers.

Key words: induction motor, sensorless vector control, frequency converter.

REFERENCES

1. M. Pacas. Sensorless drives in industrial applications // *IEEE Industrial Electronics Magazine*. – June 2011. – Iss. 5 (3). – PP. 16–23.

2. Montanary M., Peresada S. and Tilli A. A speed-sensorless indirect field-oriented control for induction motors based on high gain speed estimation // *Automatica*. – 2006. – Iss. 42. – PP. 1637–1650.

3. Peresada S.M., Kovbasa S.N., Dymko S.S. Robust sensorless vector control of induction motor based on a reduced-order adaptive observer // *Tekhnichna Elektrodynamika*. – 2012. – № 2 – PP. 81–82. [in Russian]

4. www.el-drives.com

5. Peresada S.M., Kovbasa S.N., Tonielli A. Rapid prototyping station of electrical drive control algorithms // *Bulletin of the Kharkov State Polytechnic University*

Экспериментально показано, что в тех же условиях, разработанный авторами, алгоритм бездатчикового векторного управления обеспечивает показатели качества регулирования угловой скорости, которые не уступают существующим в серийных изделиях. При этом устойчивая работа обеспечивается во всем диапазоне скоростей при действии как двигательного, так и генераторного момента нагрузки.

ЛИТЕРАТУРА

1. M. Pacas. Sensorless drives in industrial applications // *IEEE Industrial Electronics Magazine*. – June 2011. – Iss. 5. – №. 3. – PP. 16–23.

2. Montanary M., Peresada S., Tilli A. A speed-sensorless indirect field-oriented control for induction motors based on high gain speed estimation // *Automatica*. – 2006. – Iss. 42. – PP. 1637–1650.

3. Пересада С.М., Ковбаса С.Н., Дымко С.С. Робастифицированное бездатчиковое векторное управление асинхронным двигателем на основе адаптивного наблюдателя пониженного порядка // *Техническая электродинамика*. – 2012. – № 2. – С. 81–82.

4. www.el-drives.com

5. Пересада С.М., Ковбаса С.Н., Тониэлли А. Станция быстрого моделирования алгоритмов управления электроприводом // *Вестник Харьковского государственного политехнического университета «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика»*. – 1999. – Вып. 61. – С. 190–193.

6. Peresada S., Montanari M., Rossi C., Tilli A. Speed sensorless control of induction motors based on a reduced-order adaptive observer // *IEEE Trans. Control Systems Techn.* – 2007. – Iss. 15 (5). – PP. 1049–1064.

7. Peresada S., Tonielli A. High-performance robust speed-flux tracking controller for induction motor // *Int. Journal of Adaptive Control and Signal Processing*. – 2000. – Iss. 14. – PP. 177–200.

"Problems of automated electrical drive. Theory and practice". – 1999. – Iss. 61. – PP. 190–193. [in Russian]

6. Peresada S., Montanari M., Rossi C., Tilli A. Speed sensorless control of induction motors based on a reduced-order adaptive observer // *IEEE Trans. Control Systems Techn.* – 2007. – Iss. 15(5). – PP. 1049–1064.

7. Peresada S., Tonielli A. High-performance robust speed-flux tracking controller for induction motor // *Int. Journal of Adaptive Control and Signal Processing*. – 2000. – Iss. 14. – PP. 177–200.

Статья надійшла 17.07.2012.

Рекомендовано до друку
д.т.н., проф. Чорним О.П.