

## СРАВНИТЕЛЬНОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

### 1. Введение

Широкое внедрение алгоритмов управления электрическими двигателями, которые базируются на современных методах теории управления, ставит задачу их экспериментального тестирования и сравнения. Учитывая нелинейный характер и высокую размерность дифференциальных уравнений, описывающих динамическое поведение таких систем, аналитический анализ и сравнение различных вариантов, в отличие от линейных систем, оказывается затруднительным. Математическое моделирование с использованием современных программных средств позволяет достаточно просто получить первичную оценку качества разработанной системы и ее сравнение с другими решениями. Однако при моделировании трудно в полном объеме учесть всю совокупность факторов, которыми при синтезе алгоритма обычно пренебрегают. К ним в первую очередь относятся эффекты квантования по уровню и времени при цифровой реализации, неидеальности силовых преобразователей и измерительных устройств, шумы измерения, неидеальности моделей электрических машин, и т.д. С другой стороны экспериментальная проверка требует значительных капитальных вложений и привлечения специалистов разных областей науки: силовой электроники, управления, цифровой обработки сигналов, – что не всегда является доступным.

Для решения этой проблемы в конце 80-х годов была сформирована концепция, так называемого, быстрого прототипного тестирования (rapid prototyping) [1]. В основе этой идеи лежит создание мощного специализированного вычислительного устройства для реализации алгоритмов управления в реальном времени и программной платформы, позволяющей приблизить по времени процесс программирования реального цифрового контроллера к затрачиваемому при моделировании. Один из вариантов станций быстрого прототипного тестирования алгоритмов управления различными электрическими машинами создан на кафедре электропривода и автоматизации промышленных установок НТУУ «КПИ» [2], [3].

В настоящей статье приведены некоторые результаты сравнительного тестирования алгоритмов векторного управления асинхронным двигателем (АД). Экспериментальное сравнение более десяти различных алгоритмов управления АД выполнялось по программе принятого в мировой практике стандартного теста (bench mark test) для электроприводов с высокими требованиями к динамическим показателям качества, предполагающего исследование идентичных динамических и статических режимов. Исследования выполнялись с использованием единой конфигурации системы, содержащей одни и те же составляющие части: АД, датчики, преобразователь, нагрузочный агрегат. В качестве базового был принят классический алгоритм косвенного векторного управления (не использующий наблюдатель магнитного потока) [4 стр. 242], являющийся в настоящее промышленным стандартом. Из исследованных вариантов для сравнения был выбран грубый алгоритм косвенного векторного управления [5], который по результатам тестов демонстрирует более высокие динамические показатели по сравнению с другими исследованными вариантами и обладает грубостью в отношении параметрических возмущений роторной цепи. Оба алгоритма имеют сходную базовую структуру, содержащую внутренние контуры регулирования токов, представленных в системе координат асимптотически ориентированной по вектору потока сцепления ротора, а также внешний контур регулирования скорости. В отличие от стандартного алгоритма векторного управления, в котором подсистема потока лишь локально асимптотически устойчива, алгоритм [5] обеспечивает глобальную экспоненциальную асимптотическую отработку модуля и углового положения вектора потока сцепления ротора, что и гарантирует свойство грубости в отношении параметрических возмущений.

### 2. Экспериментальная установка и методика проведения экспериментов

При выполнении исследований использовался стандартный тест, включающий отработку заданной траектории изменения угловой скорости с последующим набросом и сбросом ступенчатого момента нагрузки при движении с постоянной угловой скоростью. Исследование энергетических показателей АД производилось в установившемся режиме при постоянном значении нагрузки и вариациях значения активного сопротивления ротора, используемого в алгоритме управления.

Оба алгоритма управления исследовались при одних и тех же настройках регуляторов тока и угловой скорости для АД с номинальным моментом 2,5 Нм. Использовались следующие настройки алгоритмов векторного управления: коэффициенты пропорциональной и интегральной составляющих регулятора скорости  $k_{\omega} = 150$ ,  $k_{\omega i} = 11250$ ; коэффициенты пропорциональной и интегральной составляющих регуляторов тока  $k_i = 700$ ,  $k_{ii} = 122000$ , обеспечивающие полосу пропускания контура регулирования скорости 120 рад/с и 380 рад/с для

контуров регулирования тока. Корректирующий коэффициент подсистемы потока в [5] принят равным  $\lambda\beta = 3.5$ .

При исследовании использовалась последовательность операций управления представленная на Рис.1:

- 1) во время начального интервала времени  $0 \rightarrow 0.25$ с машина возбуждается, траектория заданного потока начинается с  $\Psi^*(0) = 0.02$  Вб и достигает номинального значения 0.9 Вб с первой и второй производными равными 3.52 Вб/с и 50 Вб/с<sup>2</sup> соответственно;
- 2) начиная с  $t = 0.6$ с двигатель без нагрузки разгоняется по заданной траектории скорости, которая имеет нулевое начальное значение и достигает 50 рад/с с первой и второй производными равными 714 рад/с<sup>2</sup> и 23810 рад/с<sup>3</sup> соответственно;
- 3) в момент времени  $t = 1$ с прикладывается постоянный момент нагрузки равным 120% номинального значения, а в момент времени  $t = 1.5$ с момент нагрузки снимается.

Заданная траектория скорости сформирована таким образом, что при ее отработке динамический момент соответствует номинальному моменту двигателя. Заданные траектории для потока и скорости представлены на Рис.1 сплошными линиями, а пунктирной линией показан график момента нагрузки.

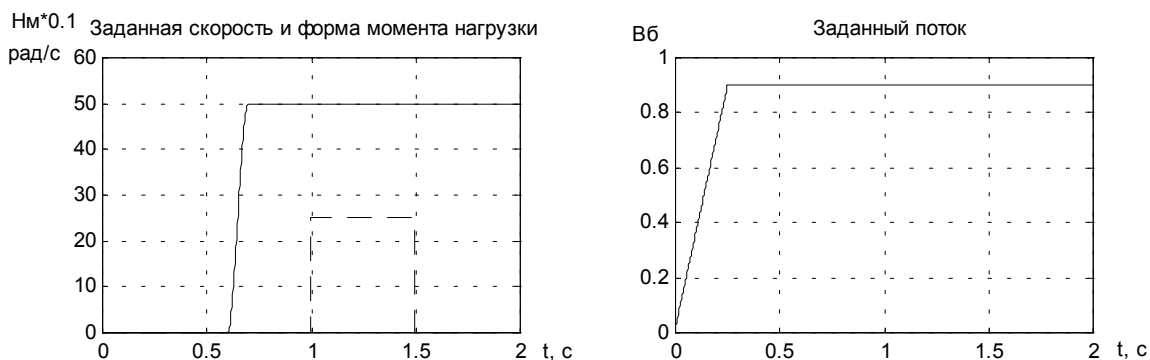


Рис.1. Заданные траектории угловой скорости и потока.

Экспериментальные исследования проводились на станции быстрого прототипного тестирования алгоритмов управления различными электрическими машинами, функциональная схема которой изображена на Рис.2. В состав станции входят:

- специализированный контроллер на основе DSP (Digital Signal Processor) TMS 320C32. Плата контроллера подключена непосредственно к шине ПК и используется для ввода данных (восемь каналов АЦП 12-бит плюс два канала для импульсных датчиков положения), реализации алгоритма управления с отображением и записью выбранных переменных в реальном масштабе времени, генерирования сигналов ШИМ (два симметричных 3-фазных ШИМ модулятора с программируемым интервалом мертвого времени);
- трехфазный ШИМ инвертор 20А/380В, с частотой модуляции 10кГц;
- АД параметры которого приведены в Приложении;
- двигатель постоянного тока с токовым управлением в качестве нагрузочной машины;
- персональный компьютер, который используется для программирования, отладки и загрузки программ, визуального наблюдения и записи переходных процессов во время экспериментов;

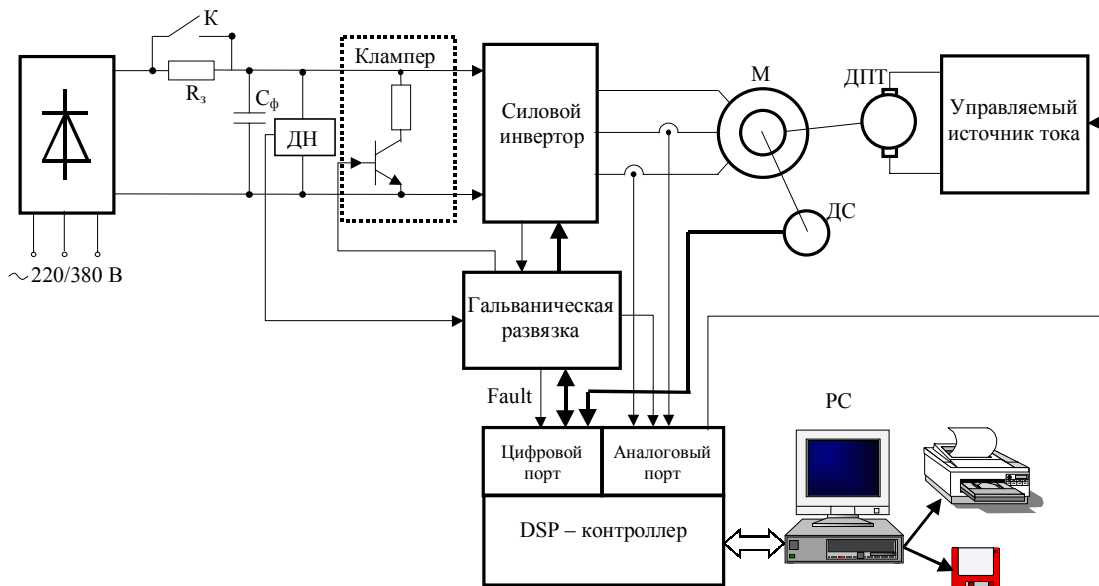


Рис.2. Функциональная схема станции быстрого прототипного тестирования алгоритмов управления.

Измерение токов производилось двумя датчиками тока (LEM), принцип работы которых основан на эффекте Холла. Скорость измерялась импульсным датчиком положения, имеющим 1000 импульсов на оборот. Период квантования по времени при цифровой реализации алгоритмов управления равнялся 250 мкс. Для интегрирования использовался стандартный метод Эйлера. С целью получения более высокой точности обработки выходного напряжения инвертора использовалась компенсация мертвого времени (1.5мкс).

### 3. Исследование динамических характеристик

Для сравнения динамических характеристик исследуемых алгоритмов были выполнены тесты, результаты которых представлены на Рис.3 и Рис.4. Результаты экспериментов представленные на Рис.3, показывают качество отработки заданной траектории скорости при использовании стандартного алгоритма векторного управления. Как видно из графиков, максимальная динамическая ошибка обработки составила около 2 рад/с и около 4 рад/с при набросе-сбросе постоянного момента нагрузки. На рисунках индексы d и q используются для обозначения компонент вектора тока статора в системе координат (d-q), асимптотически ориентированной по вектору потокосцепления ротора.

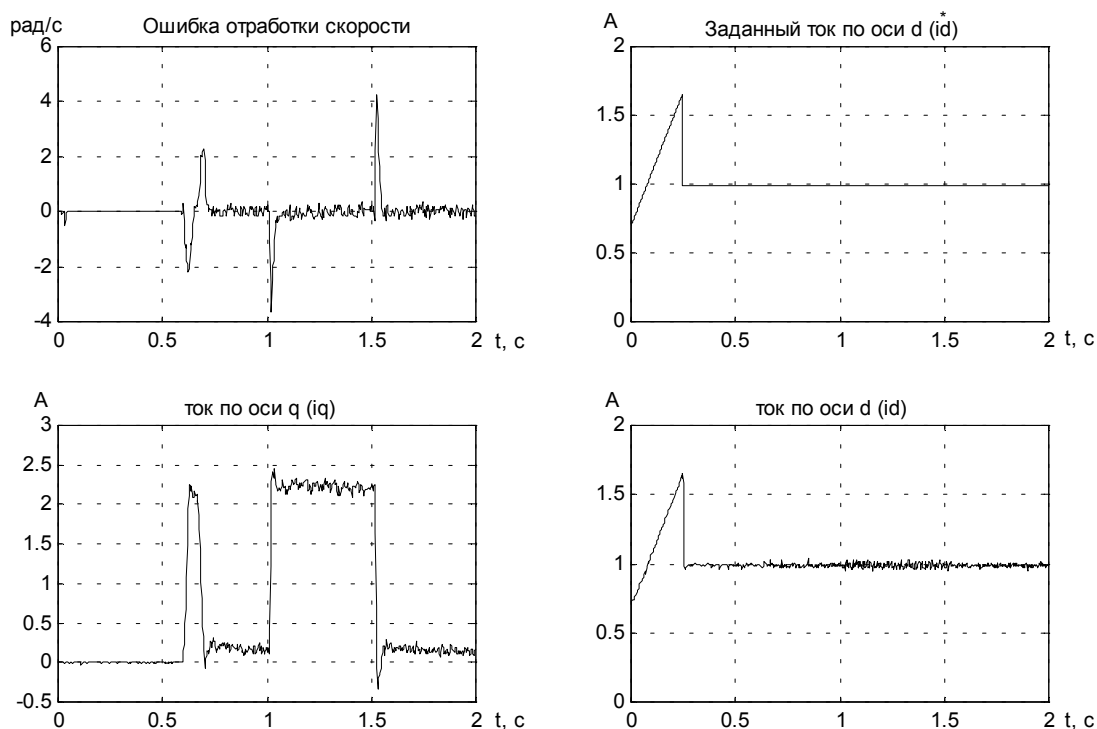


Рис.3. Результаты экспериментального исследования динамических характеристик для стандартного алгоритма управления.

Результаты эксперимента, представленные на Рис.4, характеризуют динамические показатели грубого алгоритма [5] при использовании тех же настроек, что и для стандартного алгоритма. Нетрудно заметить существенное улучшение точности отработки угловой скорости и тока по оси q. Отработка заданной траектории скорости почти на порядок лучше по сравнению со стандартным алгоритмом, так как ошибка отработки приблизительно равна 0.3 рад/с. Вдобавок грубый алгоритм позволяет снизить перерегулирование в токе  $i_q$ . При компенсации момента нагрузки переходные процессы для обоих алгоритмов идентичны.

Вторая часть эксперимента проводилась для сравнения динамических характеристик исследуемых алгоритмов при использовании в алгоритме управления параметра  $\hat{\alpha} = \frac{\hat{R}_r}{\hat{L}_r}$  (величины обратной к постоянной времени роторной цепи), который отличается от реального. Рис.5.a и Рис.5.b демонстрируют переходные процессы, полученные при использовании в стандартном алгоритме  $\hat{\alpha} = 10$  1/с ( $1.7\alpha_n$ ) и  $\hat{\alpha} = 2.9$  1/с ( $0.5\alpha_n$ ). При проведении этого теста момент нагрузки (120% от номинального) прикладывался в момент времени  $t = 1$  с и поддерживался постоянным на протяжении всего эксперимента. Как видно из Рис.5.a, при использовании в алгоритме параметра  $\hat{\alpha}$ , который больше номинального значения, возникает значительное ухудшение динамических показателей, а также увеличение установившегося тока  $i_q$  на 60% по сравнению со случаем номинальных параметров. При использовании  $\hat{\alpha} = 2.9$  1/с, значительных отличий по сравнению с переходными процессами при номинальном значении параметра  $\hat{\alpha}$  не наблюдается, за исключением небольшого увеличения моментной со-

ставляющей тока для получения того же момента. Как показано в [5], неправильное значение сопротивления ротора  $\hat{\alpha} > \alpha_H$  приводит к уменьшению модуля магнитного потока, в то время как при использовании  $\hat{\alpha} < \alpha_H$  электромагнитная система АД насыщается, что приводит к увеличению модуля тока статора. Из-за эффекта насыщения АД работает почти с постоянным модулем магнитного потока, но с нарушением условий асимптотической ориентации по вектору потокосцепления ротора.

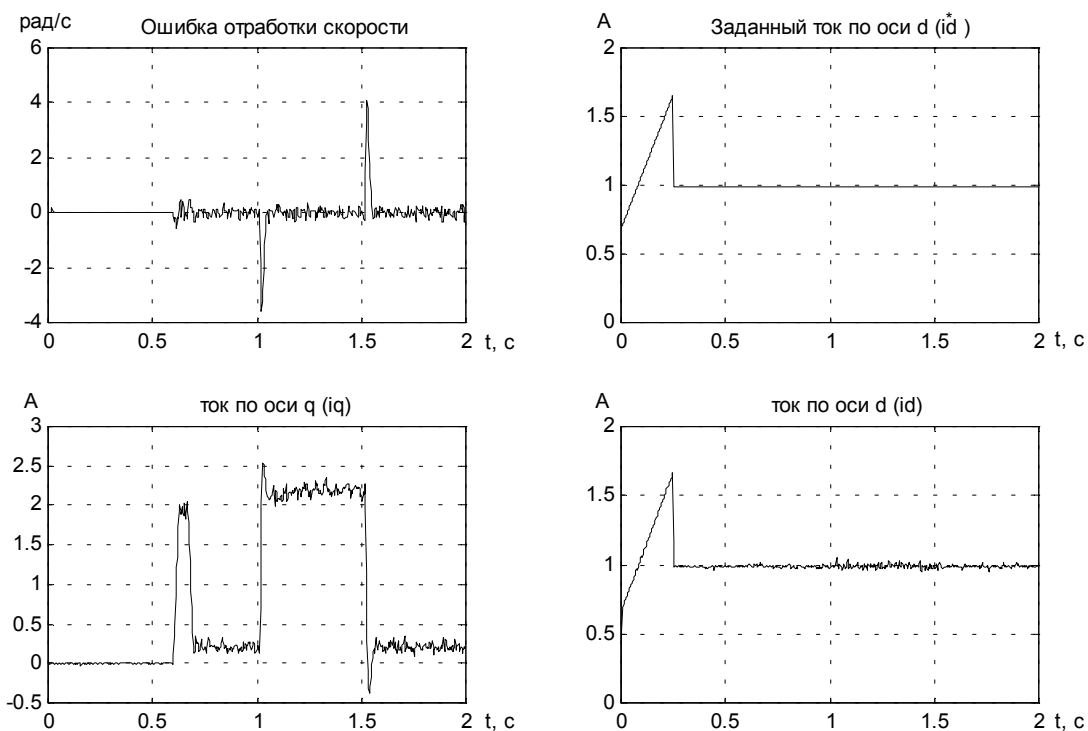


Рис.4. Результаты экспериментального исследования динамических характеристик для грубого алгоритма управления.

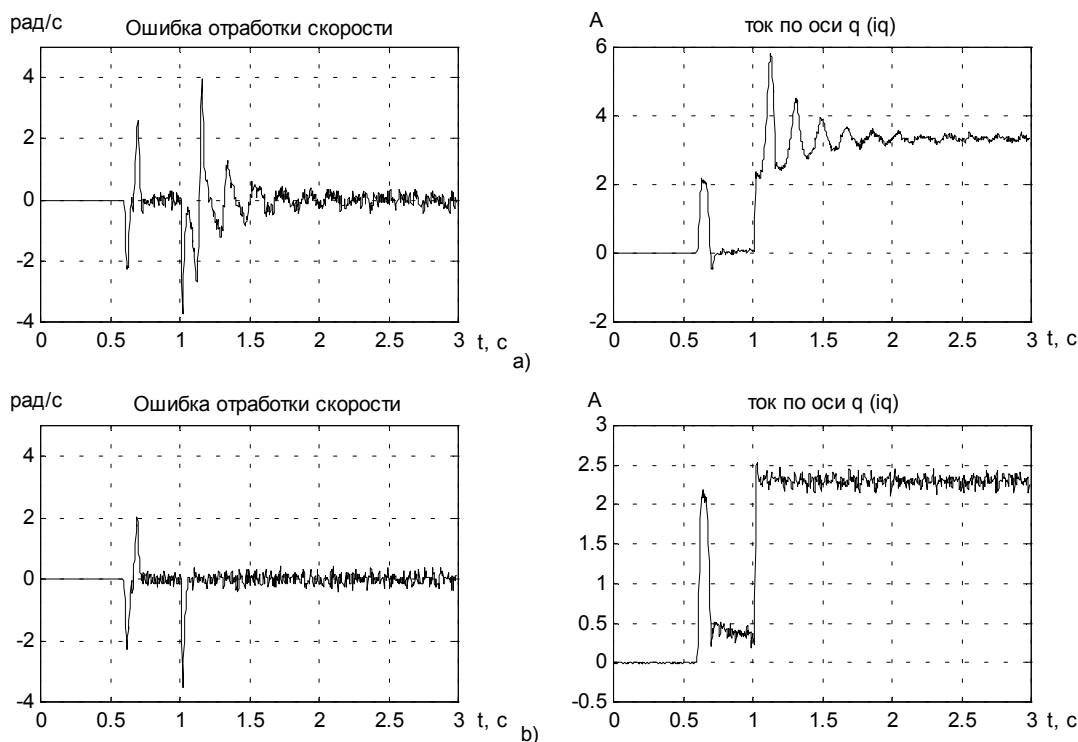


Рис.5. Результаты экспериментального исследования динамических характеристик для стандартного алгоритма при  $\hat{\alpha} = 10$  1/с и  $\hat{\alpha} = 2.9$  1/с .

Результаты теста, полученные при тех же условиях, для грубого алгоритма управления представлены на Рис.6. При сравнении графиков изображенных на Рис.4 и Рис.6 видно, что как динамические показатели качества, так и значения тока АД не изменились при исследованных возмущениях.

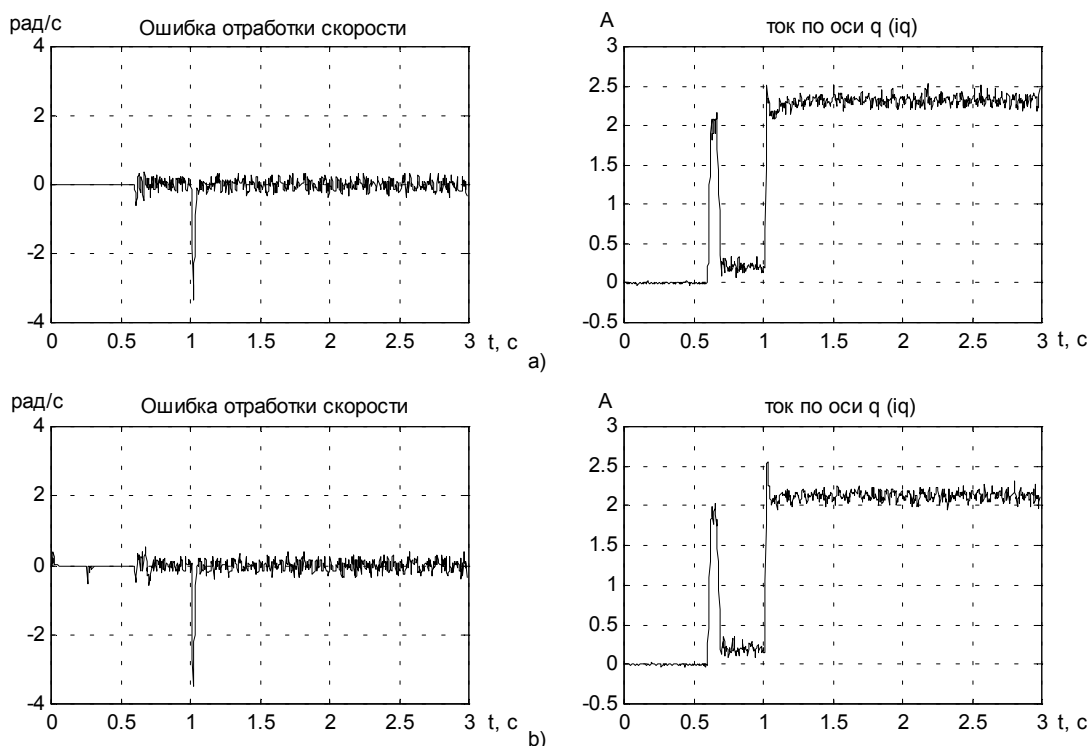


Рис.6. Результаты экспериментального исследования динамических характеристик для грубого алгоритма при  $\hat{\alpha} = 10$  1/с и  $\hat{\alpha} = 2.9$  1/с .

#### 4. Исследование энергетических характеристик

Для сравнения энергетической эффективности процессов электромеханического преобразования энергии в установившемся режиме работы АД была проведена третья серия тестов, в которой сравнивались установившиеся режимы работы электропривода при использовании двух алгоритмов управления. Результаты экспериментов приведены на Рис.7. При проведении этих тестов прикладывался постоянный момент нагрузки равный 120% номинального момента, что соответствует механической мощности 150 Вт. При варьировании значения  $\hat{\alpha}$  для каждого  $\hat{\alpha}$  записывались установившиеся значения тока  $i_q$  и выходной активной мощности инвертора

$\left( P_a = \frac{3}{2}(u_a i_a + u_b i_b) \right)$ . На Рис.7 ток  $i_q$  и активная мощность  $P_a$ , полученные при стандартном алгоритме управления

представлены пунктирной линией, а при грубом алгоритме – непрерывной. Нижняя прямая на Рис.7.б. показывает механическую мощность на валу АД. Из приведенных графиков видно, что использование грубого алгоритма управления даже при больших отклонениях параметра  $\hat{\alpha}$  от номинального, позволяет поддерживать моментную составляющую  $i_q$  тока статора на постоянном уровне, в то время как при использовании стандартного алгоритма управления эта компонента значительно возрастает при большой разности между используемым  $\hat{\alpha}$  и реальным параметром  $\alpha$ . Следовательно, по сравнению со стандартным алгоритмом, грубый алгоритм управления гарантирует более грубую стабилизацию вектора магнитного потока ротора (модуль и угловое положение) при вариации постоянной времени роторной цепи. В результате этого в большинстве режимов работы для компенсации постоянного момента нагрузки необходим меньший ток, а значит, значительно возрастает энергетическая эффективность процесса электромеханического преобразования энергии в АД. Как видно из Рис.7.б потери мощности в АД увеличиваются почти вдвое при использовании первого алгоритма, когда  $\hat{\alpha} = 1.7\alpha_n$ , в то время как при использовании второго алгоритма управления энергетическая эффективность практически сохраняется на номинальном уровне.

Выполненные экспериментальные исследования, как и результаты моделирования, приведенные в [5], подтвердили, что применение грубого алгоритма управления АД позволяет значительно улучшить как динамиче-

ские показатели при обработке траектории потока и скорости, так и энергетическую эффективность по сравнению со стандартным решением, которое используется в промышленных электроприводах.

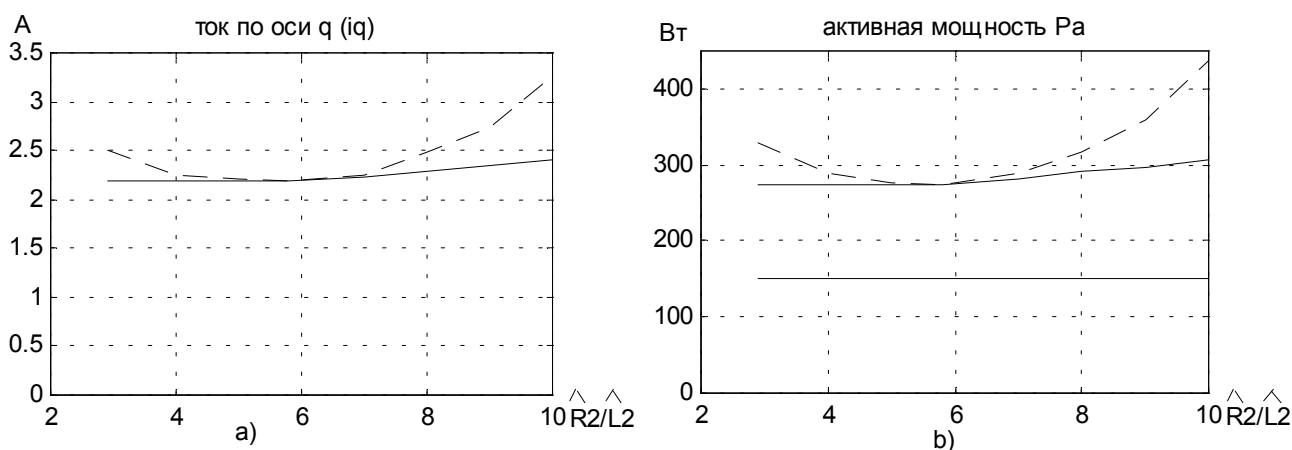


Рис.7. Результаты сравнения энергетической эффективности при варьировании  $\hat{\alpha}$ .

## 5. Заключение

Представлены результаты сравнительных тестов двух алгоритмов косвенного векторного управления АД: стандартного и грубого в отношении вариаций параметров роторной цепи, – выполненные на станции быстрого прототипного тестирования алгоритмов управления электрическими машинами в условиях стандартного теста для электроприводов с высокими требованиями к динамическим показателям качества.

Представлена методика и даны результаты исследования показателей грубости векторно-управляемых АД, как с позиций динамических показателей качества, так и энергетической эффективности.

## Приложение

Номинальные параметры используемого в эксперименте АД.

Мощность	750 Вт	Сопротивление статора	$R_s = 11 \text{ Ом}$
Момент	2.5 Нм	Сопротивление ротора	$R_r = 5.6 \text{ Ом}$
Частота	50 Гц	Индуктивность намагничивающего контура	$L_m = 0.91 \text{ Гн}$
Кол-во полюсов	2	Индуктивность статора	$L_s = 0.95 \text{ Гн}$
Ток возбуждения	1 А	Индуктивность ротора	$L_r = 0.95 \text{ Гн}$
Номинальный ток	2.4 А	Момент инерции двигатель+нагрузка	$J = 0.005 \text{ кгм}^2$

## Литература

- [1] R. Morici, C. Rossi, A. Tonielli "Fast prototyping of nonlinear controllers for electric motors drives", *IFAC 12<sup>th</sup> World Congress*, Sydney, Australia, 1993.
- [2] С. Пересада, С. Ковбаса, А. Тониэлли. Станция быстрого моделирования алгоритмов управления электроприводом // Вестник Харьковского государственного политехнического университета, «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика». Выпуск 61, 1999, с. 190 – 193.
- [3] Интернет сайт: [www.edrive ldc.net](http://www.edrive ldc.net).
- [4] D. W. Novotny and T. A. Lipo, *Vector Control and Dynamics of AC Drives*. Clarendon Press. Oxford, 1996, 439p.
- [5] S. Peresada, A. Tonielli "High performance robust speed-flux tracking controller for induction motor" *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, Vol 14, no. 2-3, 2000, pp. 177 – 200.