

## ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ЦИФРОВЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПОДАЧИ С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМЫ ЧПУ SINUMERIK 840D

А.В. Пальцев, И.В. Сычев (ООО "МСЗ")

*Показано, что цифровые приводы позволяют подробно исследовать статические и динамические характеристики электромеханических систем без применения специальной аппаратуры. Рассмотрены методы оценки качества цифровых приводов подачи Simodrive 611D фирмы Сименс при работе в составе системы Sinumerik 840D. В качестве математического обеспечения при пуско-наладке используется программа Simo-Com U. Статья предназначена для инженерно-технического персонала, ведущего наладку этих приводов на станках.*

Система ЧПУ Синумерик 840D является наиболее универсальной и потому перспективной для решения разнообразных задач в станкостроении. Однако отсутствие в настоящее время подробной русскоязычной версии ряда разделов документации затрудняет ее применение в требуемом объеме. Попробуем частично решить эту задачу.

Помимо общеизвестных преимуществ цифровых приводов по сравнению с аналоговыми следует отметить возможность проведения исследований свойств цифрового привода без применения специальной аппаратуры. ПО позволяет исследовать приводы при большом разнообразии входных сигналов. С учетом технологических особенностей станка перечень исследований ограничен определением: логарифмических амплитудно-частотных (ЛАЧХ) и фазо-частотных характеристик (ФЧХ), реакции привода на скачок управляющего сигнала и его линейное нарастание, реакции на скачок нагрузки.

Эти и другие испытания проводились на одном из двух следящих приводов подачи шлифовального станка с ЧПУ СШ-204 производства Московского станкозавода "МСЗ – Салют".

Привод состоит из блока питания, двух силовых и одного управляющего модулей.

Мощность блока питания на оба привода выбрана равной 5/10 кВт, силовой блок каждого привода рассчитан на ток 15А, модуль управления – двухосевой с упрощенным регулятором серии "Стандарт 2", приводной двигатель типа 1FK 6060 с номинальным моментом  $M_n = 4,0$  Нм и номинальной скоростью  $n_n = 3000$  об/мин, номинальным током  $I_n = 3,1$ А, максимальным током  $I_{max} = 14$ А, граничным током  $I_{gp} = 13,5$ А и моментом инерции  $J = 8,6 \times 10^{-4}$  кгм<sup>2</sup>. В двигатель встроен инкрементный датчик sin-cos, имеющий 2048 сигналов на оборот. Платы управления содержат устройство, способное умножать сигналы датчика на 2048 (т.е. до  $4 \times 10^6$  импульсов), система ЧПУ имеет программу автоматической оптимизации параметров регуляторов приводов.

В качестве аппаратных средств применялся программатор PG740.

Все проведенные испытания можно условно разделить на два этапа: первый – испытания привода до установки двигателя на станок и управление от ЧПУ одной осью и второй – управление двумя осями на станке. Передача от двигателя на стол осуществляется шарико-винтовой парой.

Выбранная программа настройки привода позволяет в ручном режиме производить изменение параметров регуляторов и автоматически оптимизировать параметры регуляторов тока и скорости. Начнем с последнего варианта. Само понятие "оптимизация" в данном случае нуждается в уточнении. В зависимости от режима работы станочного привода критерии оптимизации могут существенно отличаться друг от друга: при позиционировании предпочтителен монотонный процесс торможения (подход с одной стороны) за минимальное время, при контурной обработке – высокое быстродействие по управлению, при силовом резании – по возмущению и т.д. Поэтому даже после автоматической оптимизации иногда целесообразна оценка качества привода с дальнейшей коррекцией параметров регуляторов в ручном режиме.

Первый этап испытаний при отсоединенном от станка двигателе с управлением по одной оси выбран неслучайно. Как показано в документации (Simodrive 611D/Sinumerik 840D/810D Antriebsfunktionen) время такта расчета регулятора скорости при двухосевом управлении превышает аналогичное при одноосевом в четыре раза, что, как будет показано далее, может существенно повлиять на динамические свойства привода в целом. Кроме того, минимальные маховые массы (только двигателя) позволяют при прочих равных условиях реализовать максимальное быстродействие (в том числе и в старт-стопных режимах).

Рассматриваемый привод представляет собой трехконтурную систему, включающую контур тока (ТК), контур скорости (СК) и контур пути (ПтК). Первые два контура содержат ПИ-регуляторы, а третий – П-регулятор. Привод, содержащий только ТК и СК, принято еще называть регулируемым. Каждый из перечисленных контуров ТК, СК и ПтК могут быть исследованы с помощью разнообразных входных сигналов. В табл. 1, 2 для каждого из контуров приведены виды входных сигналов и их параметры.

Рассмотрим реакцию ТК, СК и ПтК на входные воздействия различной формы.

Для ТК определим реакцию на входной скачкообразный сигнал и ЛАЧХ, ЛФХ. Как следует из табл. 1, входной сигнал – заданный ток  $I_s(t)$ , выходной – истинный ток  $I_a(t)$ . Для большинства производимых замеров есть набор стандартных параметров входных сигналов, которые, тем не менее, возможно изменять в достаточно широких пределах. Так, в нашем случае выбран стандартный набор.

Таблица 1

| Контур регулирования  |    | Токовый контур           |                          | Скоростной контур        |          |                         |                          |                        |      |
|-----------------------|----|--------------------------|--------------------------|--------------------------|----------|-------------------------|--------------------------|------------------------|------|
| Тип входного сигнала  |    | Скачок задающего сигнала | ЛАЧХ и ЛФХ по управлению | Скачок задающего сигнала |          | Скачок момента нагрузки | ЛАЧХ и ЛФХ по управлению | ЛАЧХ и ЛФХ по нагрузке |      |
| Вид входного сигнала  |    | $I_s(t)$                 | $I_s(t)$                 | $n_s(t)$                 | $n_s(t)$ | $M_s(t)$                | $n_s(t)$                 | $M_s(t)$               |      |
| Вид выходного сигнала |    | $I_u(t)$                 | $I_u(t)$                 | $n_u(t)$                 | $n_u(t)$ | $M_u(t)$                | $n_u(t)$                 | $n_u(t)$               |      |
| 1                     | A  | %                        | 5                        | 5                        | -        |                         | 5                        | -                      | 2    |
| 2                     | A  | мм/мин                   | -                        | -                        | 200      | 200                     | -                        | 20                     | -    |
| 3                     | Mz | мс                       | 10                       | -                        | 50       | 50                      | 100                      | -                      | -    |
| 4                     | E  | мс                       | 2                        | 10                       | 0,0      | 0,0                     | 10                       | 1000                   | 1000 |
| 5                     | Of | %                        | 5                        | -                        | -        |                         |                          |                        | -    |
| 6                     | Of | мм/мин                   | -                        | -                        | 0,0      | 0,0                     | 1000                     | 40                     | -    |
| 7                     | B  | Гц                       | -                        | 4000                     | -        |                         |                          | 4000                   | 2000 |
| 8                     | M  | -                        | 5                        | 20                       | -        |                         |                          | 20                     | 10   |

Обозначения: A (Amplitude) – амплитуда, Mz (Messzeit) – время измерений, E – (Einschwingzeit) – время достижения установившегося процесса (для скачкообразного сигнала его передний фронт будет иметь наклон, определяемый временем E), Of (Offset) – смещение или отклонение от некоторого уровня, B (Bandbreite) – диапазон частот, M (Mittelungen) – число замеров для усреднения результата, R (Rampenzeit) – время плавного разгона.

Таблица 2

| Контур регулирования  |    | Путевой контур           |          |                         |          |                          |                        |                             |          |      |
|-----------------------|----|--------------------------|----------|-------------------------|----------|--------------------------|------------------------|-----------------------------|----------|------|
| Тип входного сигнала  |    | Скачок задающего сигнала |          | Скачок момента нагрузки |          | ЛАЧХ и ЛФХ по управлению | ЛАЧХ и ЛФХ по нагрузке | Плавный разгон – торможение |          |      |
| Вид входного сигнала  |    | $S_s(t)$                 | $S_s(t)$ | $M_s(t)$                | $M_s(t)$ | $S_s(t)$                 | $M_s(t)$               | $S_s(t)$                    | $S_s(t)$ |      |
| Вид выходного сигнала |    | $S_u(t)$                 | $n_u(t)$ | $S_u(t)$                | $n_u(t)$ | $S_u(t)$                 | $S_u(t)$               | $S_u(t)$                    | $n_u(t)$ |      |
| 1                     | A  | мм                       | 1,0      | 1,0                     | -        |                          | 0,005                  | -                           | 10,0     | 10,0 |
| 2                     | A  | Нм                       | -        | -                       | 6,0      | 6,0                      | -                      | 2                           | -        |      |
| 3                     | Mz | мс                       | 100      | 100                     | 50       | 50                       | -                      | 500                         | 500      |      |
| 4                     | E  | мс                       | 5        | 5                       | 10       | 10                       | 1000                   | 10                          | 0        | 0    |
| 5                     | Of | мм/мин                   | 0,0      | 0,0                     | 0,0      | 0,0                      | 40                     | 40                          | 0,0      | 0,0  |
| 6                     | B  | Гц                       | -        |                         |          |                          | 125                    | 100                         | -        |      |
| 7                     | M  | -                        | -        |                         |          |                          | 2                      | 5                           | -        |      |
| 8                     | R  | мс                       | -        |                         |          |                          | -                      |                             | 200      | 200  |

Амплитуда входного синусоидального сигнала  $A = 5\%$  от номинального значения тока. Время установления  $E = 10$  мс, частотный диапазон входного сигнала  $B = 4000$  Гц, число замеров  $M = 20$ . Реакция на скачкообразный входной сигнал (рис. 1а), равно как ЛАЧХ и ЛФХ по управлению (рис. 1б), являются основными показателями, определяющими динамические свойства системы. По ЛАЧХ и ЛФХ определяется полоса пропускания, под которой понимают наименьший из диапазонов частот гармонического сигнала, при котором сдвиг по фазе первых гармоник входного и выходного сигналов не превышает 90 эл. градусов или ослабление выходного сигнала не превышает 6дБ (два раза). Точке А на ЛАЧХ соответствует ослабление сигнала на 6дБ при частоте 800 Гц, а точке В на ЛФХ – сдвиг по фазе на 90 эл. град. при

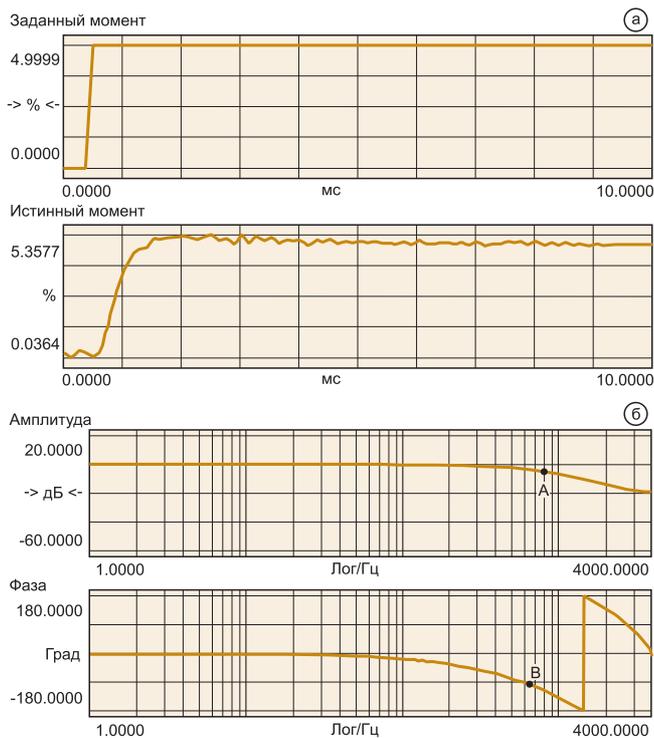


Рис. 1. Токовый контур

а) Реакция на скачок управляющего сигнала  
б) ЛАЧХ и ЛФХ по управлению

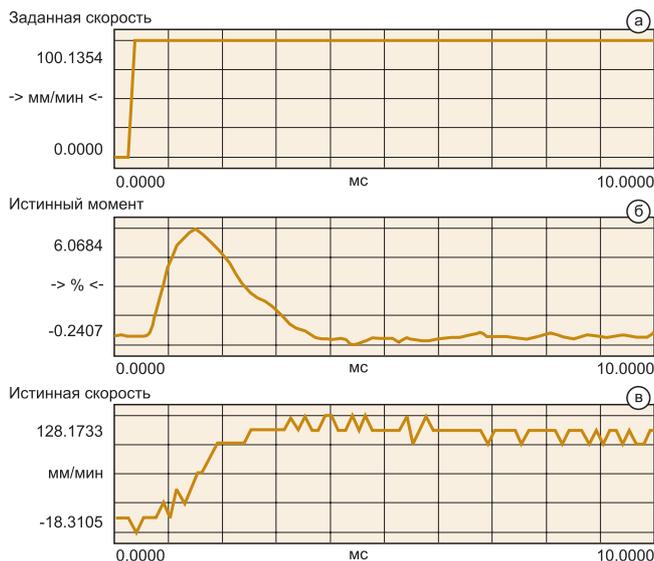


Рис. 2. Скоростной контур. Кривые задающего сигнала, тока и скорости при скачке задания 100 об/мин

частоте ~550 Гц. Таким образом, полоса пропускания ТК составляет 550 Гц. Несмотря на предварительно проведенную автоматическую оптимизацию привода и учитывая, что частота коммутации силовых транзисторов равна 4000 Гц, полученную полосу пропускания ТК следует оценить как невысокую, что, в конечном счете, будет ограничивать динамические свойства следящего привода в целом, так как полоса пропускания каждого внешнего контура выбирается всегда меньшей, чем внутреннего (СК по отношению к ТК; ПтК по отношению к СК).

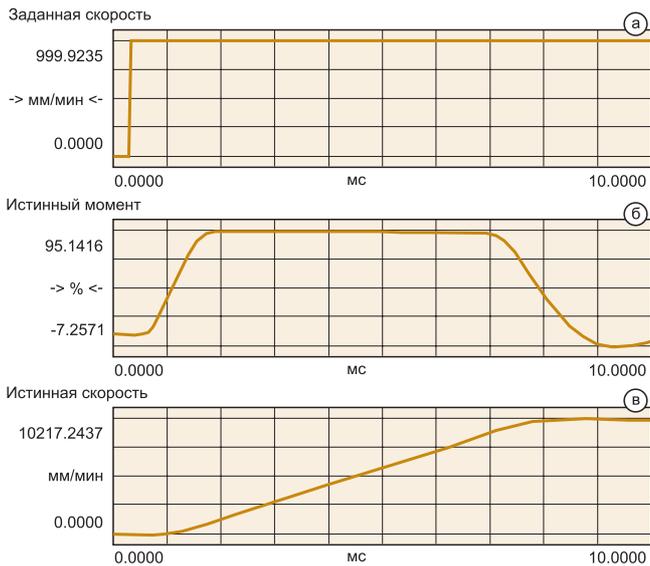


Рис. 3. Скоростной контур. Кривые задающего сигнала, тока и скорости при скачке задания 1000 об/мин

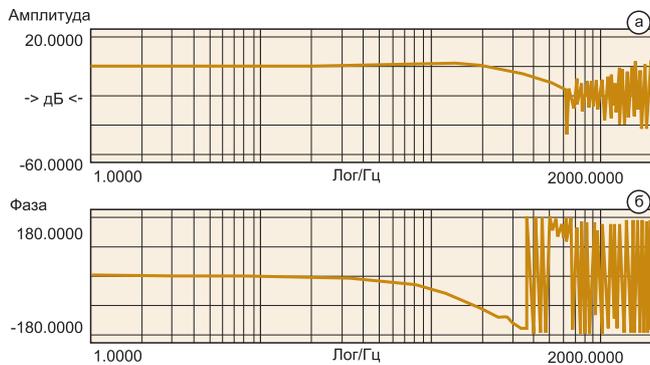


Рис. 4. Скоростной контур: ЛАЧХ и ЛФХ по управлению

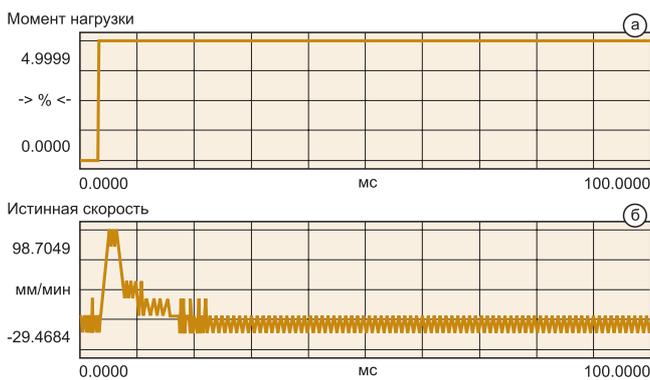


Рис. 5. Скоростной контур: реакция привода при возмущении по нагрузке. Кривые задания и скорости

Вид переходного процесса при скачкообразном входном сигнале малой величины (5% от  $I_{ном}$ ) хорошо согласуется с видом ЛАЧХ, которая имеет плавно снижающийся характер и полосу пропускания  $f_{np}$ . Это подтверждается монотонным переходным процессом с постоянной времени, примерно равной  $T_{mn} = 1,5-2/\omega_c$ , где  $T_{mn} = 0,6$  мс и  $\omega_c = 2\pi f_{np} = 2 \times 550 = 3454$  с<sup>-1</sup>.

Рассмотрим СК, так как именно он определяет динамические возможности следящего привода в целом.

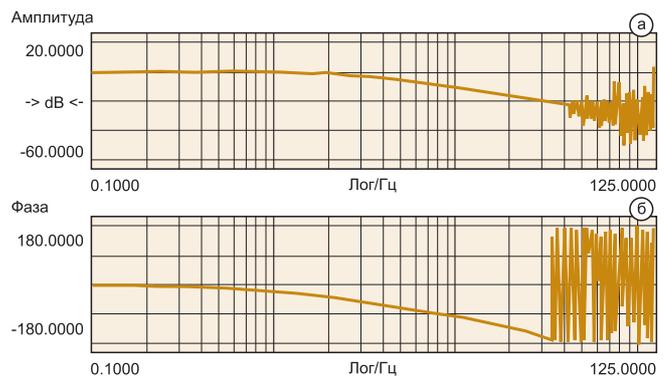


Рис. 6. Путьевой контур: ЛАЧХ и ФЧХ привода при величине добротности  $k_v = 16$  с<sup>-1</sup>

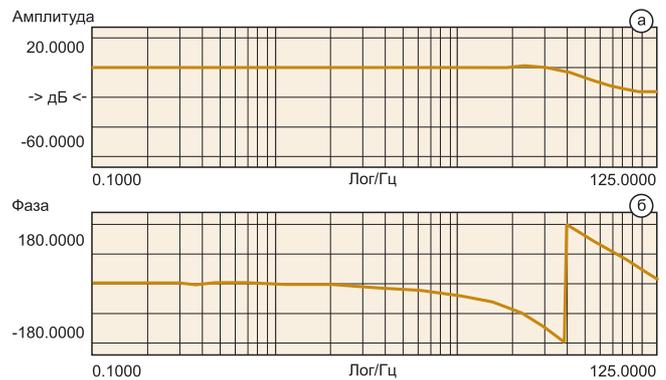


Рис. 7. Путьевой контур: ЛАЧХ и ФЧХ привода при величине добротности  $k_v = 96$  с<sup>-1</sup>

При малых входных сигналах в линейной системе возможен аналитический расчет динамических свойств привода, которые существенно меняются с увеличением уровня входного сигнала. Сказанное иллюстрируется осциллограммами пусков регулируемого привода на скорости 100 мм/мин (10 об/мин при шаге винта 10 мм) и 10000 мм/мин (1000 об/мин). На рис. 2 (а, б, в) представлены соответственно сигналы задания, тока и скорости при пуске на скорость 10 об/мин. Время переходного процесса составляет 3,5 мс и пусковой момент достигает 6,07% от граничного значения. На рис. 3 (а, б, в) представлены такие же сигналы при пуске на скорость 1000 об/мин. Во втором случае время составило примерно 8,5 мс и момент 95,06% соответственно, причем видно, что регулятор скорости в течение 6,5 мс находится на уровне насыщения ("полка" в кривой момента). Чем меньше уровень задающего сигнала, при котором появляется "полка", тем выше быстродействие привода. Благодаря возможности изменения параметров входных сигналов в широких пределах установлено, что "полка" появляется при ступени задания, равной 250 об/мин, что свидетельствует о сравнительно низком быстродействии привода. Представленные на рис. 4 (а и б) ЛАЧХ и ЛФХ регулируемого привода по управлению соответствуют виду переходного процесса при пуске на 10 об/мин, если считать, что полоса пропускания равна ~160 Гц.

Реакция регулируемого привода на возмущение по нагрузке, представлена на рис 5. Скачок нагрузки

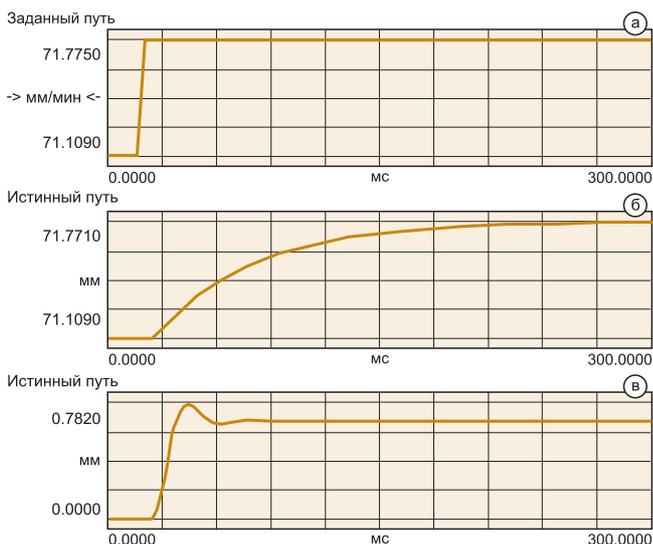


Рис. 8. Путьевой контур: реакция на скачок задающего сигнала по пути при различных величинах добротности  $K_v = 16 \text{ с}^{-1}$  и  $K_v = 96 \text{ с}^{-1}$

задан равным 5% (рис. 5а) от момента, соответствующего граничному току двигателя. Величина провала по скорости (рис. 5б) составила 128,17 мм/мин или = 25,6 об/мин при шаге винта 5 мм, время восстановления равно  $t_v = 10 \text{ мс}$ .

Теперь рассмотрим ПтК. Как известно, добротность следящего привода по скорости определяет статические и динамические свойства следящей системы в целом. На рис. 6 (а, б) и рис. 7 (а, б) представлены ЛАЧХ и ЛФХ для двух величин добротности  $K_v = 1 \text{ м/мин мм} = 16 \text{ с}^{-1}$  и  $K_v = 6 \text{ м/мин мм} = 96 \text{ с}^{-1}$  соответственно. Полоса пропускания для  $K_v = 16 \text{ с}^{-1}$  определяется амплитудной характеристикой и равна  $f_{пр} = 3 \text{ Гц}$ , ЛАЧХ имеет плавно убывающий характер. Для  $K_v = 96 \text{ с}^{-1}$  ЛАЧХ имеет "горб", что свидетельствует о перерегулировании в переходном процессе. Полоса пропускания во втором случае определяется по фазовой характеристике и составляет 20 Гц.

Показанная на рис. 8 (а, б, в) реакция на скачок задающего сигнала для двух этих же значений добротности имеет аperiodический характер с постоянной времени  $T = 50 \text{ мс}$  для  $K_v = 16 \text{ с}^{-1}$  и колебательный характер со временем первого достижения заданного значения  $T = 20 \text{ мс}$  для  $K_v = 96 \text{ с}^{-1}$ .

Второй этап тестирования проводился на станке при управлении от ЧПУ по двум координатам. Перед

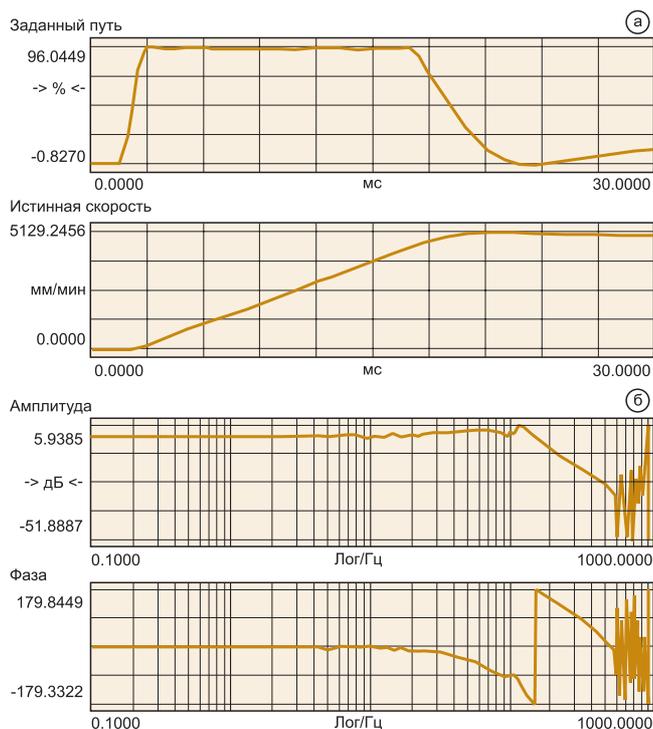


Рис. 9. Скоростной контур

а) Испытание на станке. Кривые тока и скорости  
б) ЛАЧХ и ЛФХ при испытании на станке при скачке задания скорости 1000 об/мин

испытаниями была проведена автоматическая оптимизация параметров регулятора скорости. Цикл расчета регулятора скорости в этом режиме увеличился с 125 мс до 500 мс, что ухудшило качество переходных процессов при малых входных сигналах. Переходный процесс пуска регулируемого привода на скорость 1000 об/мин (рис. 9а) отличается только масштабом по оси времени, что объясняется наличием дополнительных маховых масс в виде шарико-винтовой пары и стола. Полоса пропускания регулируемого привода по управлению, судя по ЛАЧХ и ЛФХ (рис. 9б), составила около 80 Гц, т.е. уменьшилась вдвое по сравнению с приведенной ранее.

Таким образом, цифровые приводы позволяют подробно исследовать статические и динамические характеристики electromechanical систем без применения специальной аппаратуры и вносить необходимые коррективы на стадии проектирования как в конструкцию, так и в привод.

*Пальцев Александр Владимирович — канд. техн. наук, инженер-конструктор,  
Сычев Илья Вячеславович — инженер-программист ООО "МСЗ".  
Контактный телефон (495) 369-83-72.*

22-23 мая 2007 г.

**Международная конференция по программированию ПЛК на языках стандарта МЭК 61131-3**

Главная тема конференции – обсуждение путей развития языков стандарта МЭК 61131-3 и концептуально нового комплекса программирования CoDeSys 3.0 компании 3S-Smart Software Solutions GmbH. Конференция включает презентации новинок промышленной автоматизации ведущих европейских и отечественных компаний.

Место проведения: г. Смоленск.

Контактные телефоны: (4812) 65-81-71, 38-29-31 [Http:// www.codesys.ru](http://www.codesys.ru)