

УДК 621.313

## Исследование электропривода подачи для станков с ЧПУ

Бурков А.П., Красильникьянц Е.В., кандидаты техн. наук, Смирнов А.А., асп.,  
Салахутдинов Н.В., инж.

**Рассмотрены результаты испытаний опытного образца электропривода подачи для станков с ЧПУ, разработанного в НТЦ «ИНЭЛСИ». Произведена оценка качества работы электропривода с регулятором положения и регулятором скорости и особенностей его эксплуатации.**

*Ключевые слова:* электропривод, испытания, станкостроение, дискретизация.

## Research of Electric Drive Supply for Machine-tools with Numerical Program Control

A.P. Burkov, E.V. Krasilnikyants, Candidates of Engineering, A.A. Smirnov, Post Graduate Student,  
N.V. Salakhutdinov, Engineer

**The article is devoted to the test results of the experimental model of electric drive supply for machine-tools with numerical program control. Electric drive was made by specialists of STC «INELSI». The authors assess the operation quality of the with location regulator and velocity loop and usage peculiarities.**

*Keywords:* electric drive, tests, machine-tool construction, digitization.

В настоящее время в металлорежущем оборудовании применяется широкий спектр электроприводов – от устаревших приводов постоянного тока с аналоговым управлением до современных приводов переменного тока с цифровым управлением. Принципиальные отличия в возможных типах различных типов приводов вызывают трудности при сравнении их характеристик и оценке качества работы в составе системы управления станка с ЧПУ.

С одной стороны, отечественные приводы, выпускавшиеся 20–30 лет назад, проходили цикл испытаний согласно требованиям стандарта [1] и были ориентированы на управление скоростью. С другой стороны, в настоящее время на отечественном рынке появилось большое количество новых электроприводов с цифровой системой управления. Для данной группы приводов характерно получение сигнала управления в аналоговом виде с его последующим преобразованием в цифровую форму. Во многих случаях такие электроприводы позиционируются как станочные, однако полного цикла испытаний по существующему стандарту [1] они, как правило, не проходили, и потому оценить качество их работы без непосредственной проверки на станке невозможно.

В то же время уже достаточно давно за рубежом развивается серия специализированных приводов, предназначенных для точного воспроизведения движения. Данные приводы ориентированы на работу с цифровыми сигналами, как обратной связи, так и задания. Рассматриваемые электроприводы ориентированы на собственную группу качественных и количественных показателей, не связанную с отечественным стандартом. К основным показателям качества, в частности, относится обеспечение минимальной ошибки слежения за сигналом задания в составе координатной оси станка. Как правило, электроприводы для воспроизведения движения являются систе-

мами управления положением. Применение в данной группе приводов упреждающих связей по сигналу задания, в дополнение к каналу управления по рассогласованию, обеспечивает ряд преимуществ. В частности, становится возможным поддержание малой ошибки регулирования не только в статических, но и динамических режимах. Другим важным преимуществом специализированных приводов является переход к полностью цифровой форме передачи и обработки сигналов. Данное решение позволяет существенно повысить помехозащищенность привода и допустимую жесткость настройки регулятора по отношению к аналоговым и цифроаналоговым системам.

Проблема выбора и оценки характеристик специализированных приводов состоит в том, что существующий стандарт [1] ориентирован на качественные и количественные характеристики привода как самостоятельного продукта, без учета конкретных требований к системе управления станка в целом.

В качестве выхода из сложившейся ситуации может быть проведение сравнительных испытаний различных приводов на станке. Однако данное решение реализуемо только для крупных станкостроительных заводов, оснащенных необходимым оборудованием и имеющих достаточные финансовые ресурсы.

Альтернативой может служить подход, предложенный в [2]. Суть решения состоит в дополнении существующего стандарта рядом тестовых воздействий и количественных характеристик. Дополнительные тестовые сигналы позволят более полно оценить возможности приводов, ориентированных преимущественно на управление положением в режимах, максимально приближенных к условиям работы электропривода подачи ме-

таллорезущего станка. Воспроизведение предлагаемых задающих воздействий позволит получить оценку таких конечных показателей качества работы, как точность позиционирования, динамическая точность, повторяемость, динамическая жесткость.

В результате анализа современных требований к электроприводам станков с ЧПУ и исследований, проведенных в НТЦ «ИНЭЛСИ», был разработан опытный образец цифрового станочного электропривода подачи на базе асинхронного двигателя. Опытный образец электропривода состоит из асинхронного двигателя АИР100L4У3 общепромышленного исполнения мощностью 4 кВт, фотоэлектрического измерителя перемещения ЛИР-158 ( $z = 10000$  с аппаратным учетверением), силового модуля IntDrive-05 и разработанной системы управления. Система управления построена по подчиненному принципу и состоит из двух контуров. Внутренний контур векторного управления моментом асинхронного двигателя непосредственно формирует цифровые сигналы управления силовым преобразователем. Внешний контур управления по выбору пользователя может быть либо контуром скорости, либо контуром положения. Структуры регуляторов приведены на рис. 1.

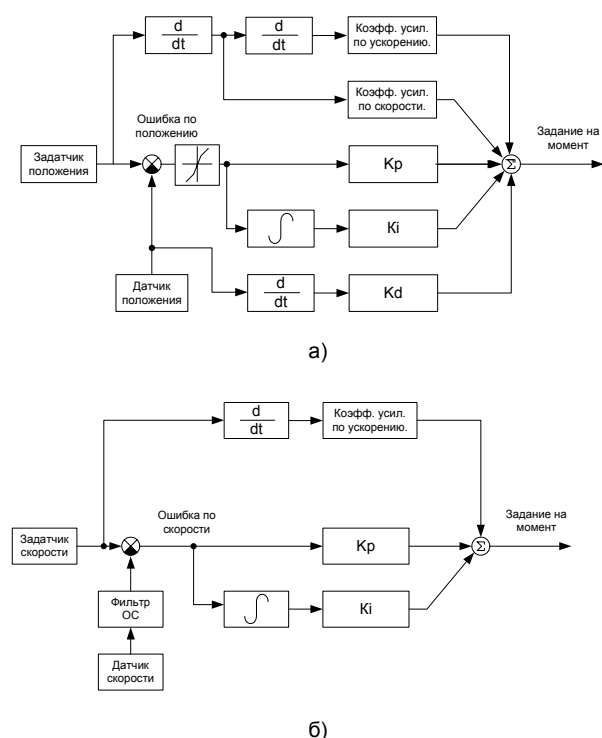


Рис. 1. Структура регуляторов опытного образца электропривода: а – положения; б – скорости

Структурно синтезированные регуляторы можно разделить на две части. Первая отвечает за компенсацию ошибок, вызванных внешними возмущающими факторами: нелинейностями двигателя и механической передачи, внешними момен-

тами нагрузки со стороны рабочего органа и периодическими моментами от различных несоосностей валов и т.д. Вторая часть регулятора, включающая упреждающие связи, предназначена компенсировать ошибки, вызванные изменением скорости и ускорения сигнала задания во времени. Анализ работы регуляторов показал, что значительную долю в суммарном сигнале управления составляют упреждающие связи. Пример соотношения долей каналов регулятора положения без нагрузки по S-кривой до номинальной скорости приведен на рис. 2.

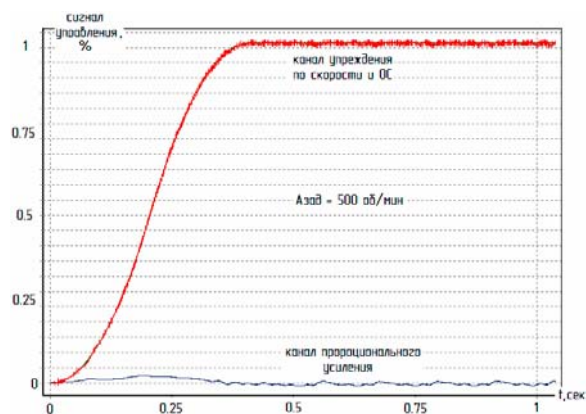


Рис. 2. Соотношение долей каналов регулятора положения

В состав регулятора положения также входит звено нелинейной коррекции ошибки в области малых значений (рис. 1,а). Данное звено позволяет повысить жесткость электропривода в указанной области за счет увеличения коэффициентов пропорционального и интегрального усиления. При настройке данного узла регулятора было определено, что значение коэффициента дополнительного усиления в зоне малых ошибок рационально выбирать не более 4–6, а саму ширину зоны нелинейного усиления на 20–30 % больше, чем диапазон допустимой ошибки слежения.

Для качественной и количественной оценки возможностей разработанного привода была проведена серия испытаний, рекомендованных в [2]. Первым тестовым воздействием для электропривода было ступенчатое изменение сигнала управления. Испытания по отработке ступенчатого сигнала проводились для системы с регулятором положения при наличии и отсутствии упреждающих связей. Параметры регулятора положения ( $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ ) настраивались при сигнале задания, равном 1/80 оборота вала. При испытаниях вариации подвергалась амплитуда задающего сигнала. Примеры переходных процессов для системы с регулятором положения приведены на рис. 3.

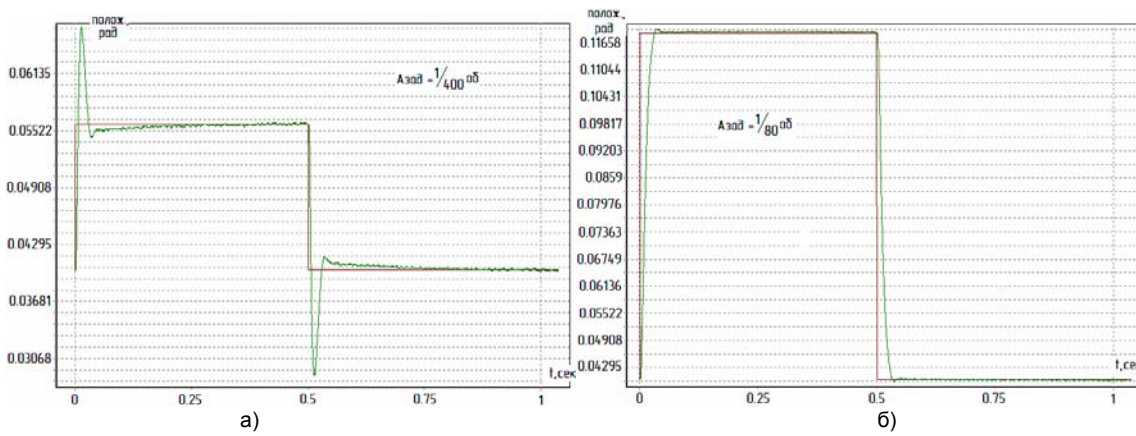


Рис. 3. Варианты переходных процессов для электропривода с регулятором положения при ступенчатом сигнале задания: а – Азад = 1/400 об.; б – Азад = 1/80 об.

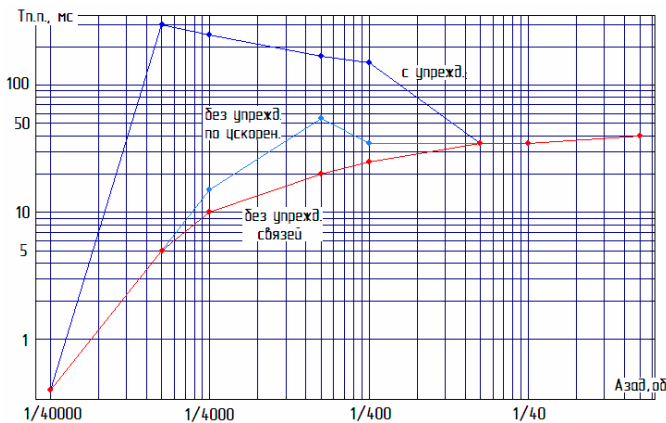


Рис. 4. Зависимость времени переходного процесса от амплитуды управляющего сигнала при ступенчатом воздействии

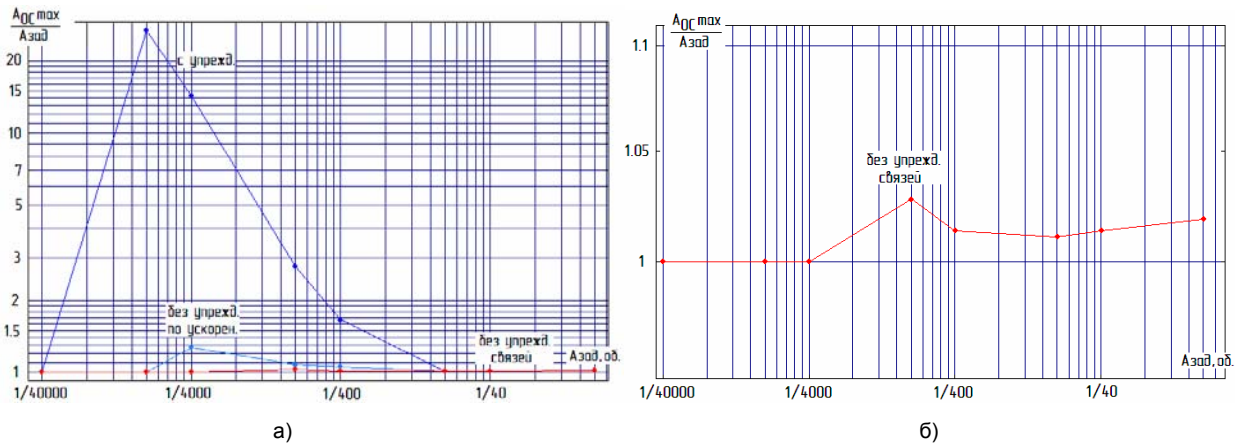


Рис. 5. Зависимость перерегулирования от амплитуды управляющего сигнала при ступенчатом воздействии: а – система с упреждающими связями и без упреждающей связи по ускорению; б – для системы без упреждающих связей

Как показали исследования, использование звена нелинейной коррекции позволило существенно уменьшить время переходного процесса в области малых сигналов задания. Перемещение на одну дискрету измерителя система выполняла за один такт работы регулятора положения – 0,4 мс. С ростом амплитуды задания время переходного процесса возрастало и достигало 40 мс на границе линейной зоны работы (рис. 4, кривая «без упрежд. связей»). Независимо от амплитуды сигнала задания характер переходного процесса для системы без упреж-

дающих связей был аperiodическим (рис. 5,б). При этих условиях ширина линейной зоны для регулятора положения составила примерно 1/8 оборота вала двигателя. Полученные результаты удовлетворяют требованиям к воспроизведению заданного тестового сигнала, указанным в [2].

Испытательный сигнал в виде ступенчатого воздействия, кроме функции настройки регулятора, позволяет наглядно продемонстрировать важность корректного ограничения величины ускорения сигнала задания. Произ-

водные такого сигнала имеют вид импульса большой амплитуды продолжительностью в один сервоцикл и кратковременно переводят систему в ограничение. Таким образом, уже при относительно небольших воздействиях возникает значительное перерегулирование по положению (рис. 5,а). В результате характер переходного процесса при реакции на ступенчатый сигнал задания для системы с упреждающими связями в значительной степени зависит от его амплитуды. Важно отметить необходимость правильного формирования управляющих позиционных воздействий в системе ЧПУ, имеющих неразрывный характер сигнала и его производных, типа S-образных кривых. При этом особое внимание следует уделить выбору динамических параметров S-образных кривых, завышение которых вызывает появление описанных перерегулирований.

Для определения максимально допустимых темпов ускорения и торможения во всем скоростном диапазоне была проведена серия испытаний тестовыми сигналами в форме S-кривых. При испытаниях системы с регулятором положения проводились: разгон, реверс и торможение на номинальную скорость. Результаты испытаний приведены в табл. 1, графики реверса привода с регулятором положения приведены на рис. 6.

Анализ результатов показывает, что для темпа S-кривой, равного 409 мс, ошибка слежения во всех точках составляла  $\pm 4$  дискреты измерителя, что в пересчете на линейное пере-

мещение составляет  $\pm 1,5$  мкм. Минимальное время выхода на номинальную скорость составило 102 мс. При приближении к максимальным темпам ускорения динамическая ошибка возрастала в связи с недостаточно малым уровнем дискретизации по каналу упреждения ускорения. Однако рассогласование оставалось малым и не превышало 52 дискреты измерителя перемещения.

Введение упреждающих связей по производным задающего сигнала является эффективным способом снижения контурной ошибки. В связи с этим для определения динамических ошибок привода была проведена серия испытаний тестовыми воздействиями, имитирующими контурные перемещения. В данном качестве использовались синусоидальный сигнал и косинусоидальный сигнал со смещением. Их отличие состоит в том, что синусоидальный сигнал имеет разрыв первой и второй производных в начальный и конечный моменты времени, в то время как косинусоидальный сигнал непрерывен как по скорости, так и по ускорению. В соответствии с рекомендациями, предложенными в [2], при испытаниях вариации подвергались частота и амплитуда гармонического сигнала. Для системы с регулятором положения результаты экспериментов сведены в табл. 2, 3. Для тестовых сигналов частотой 1 Гц графики представлены на рис. 7, 8.

Таблица 1. Разгон, реверс и торможение системы с регулятором положения

Тип движения	Начальная скорость, об/мин	Конечная скорость, об/мин	Время изменения скорости, мс	Установленная ошибка, дискр.	Максимальная ошибка, дискр.
Разгон	0	1000	409,4	$\pm 1,5$	4
Реверс	-1000	1000	204,8	$\pm 2$	39
Торможение	1500	0	102,4	$\pm 1$	52

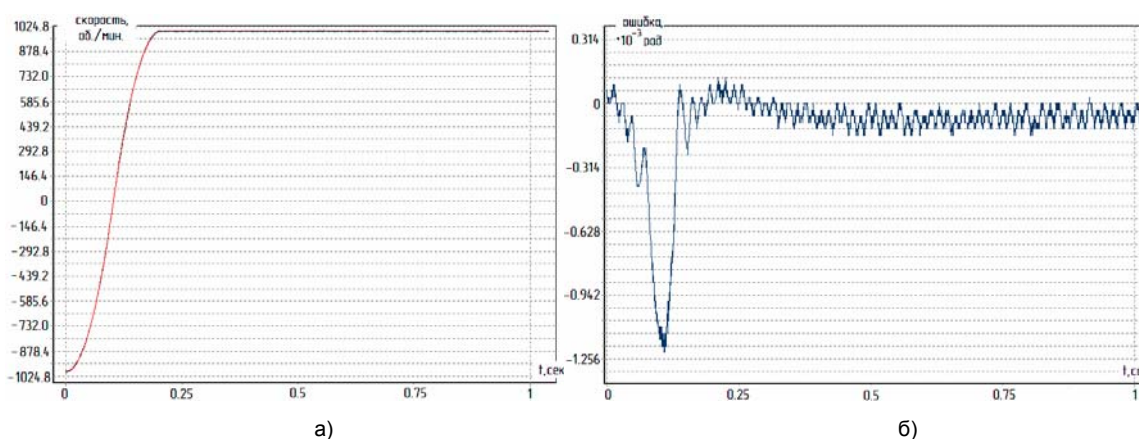


Рис. 6. Реверс электропривода с регулятором положения по S-кривой: а – сигнал задания и обратной связи; б – ошибка слежения

Таблица 2. Результаты испытаний синусоидальным сигналом системы с регулятором положения

Амплитуда, дискр.	Частота, Гц	Максимальная ошибка, дискр.	Коридор установленной ошибки, дискр.	Время установления, мс
10000	0,5	80	$\pm 8$	20
10000	1	240	$\pm 8$	40
2000	5	350	$\pm 8$	50
1000	10	235	$\pm 10$	40



Таблица 3. Результаты испытаний косинусоидальным сигналом системы с регулятором положения

Амплитуда, дискр.	Частота, Гц	Максимальная ошибка, дискр.	Коридор установленной ошибки, дискр.	Время установления, мс
2000	1	4	$\pm 4$	0
20000	1	6	$\pm 6$	0
200000	1	10	$\pm 10$	0

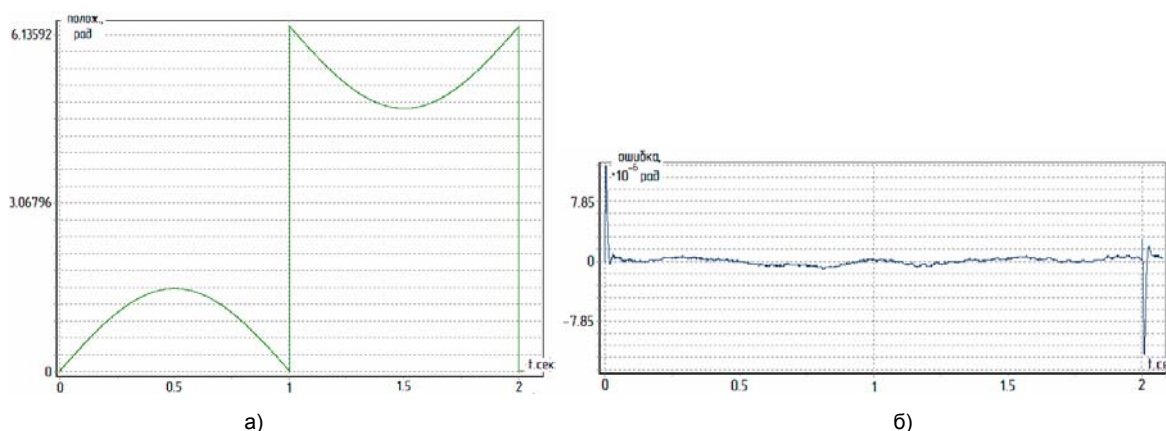


Рис. 7. Воспроизведение синусоидального сигнала электроприводом с регулятором положения: а – сигнал задания и обратной связи; б – ошибка управления

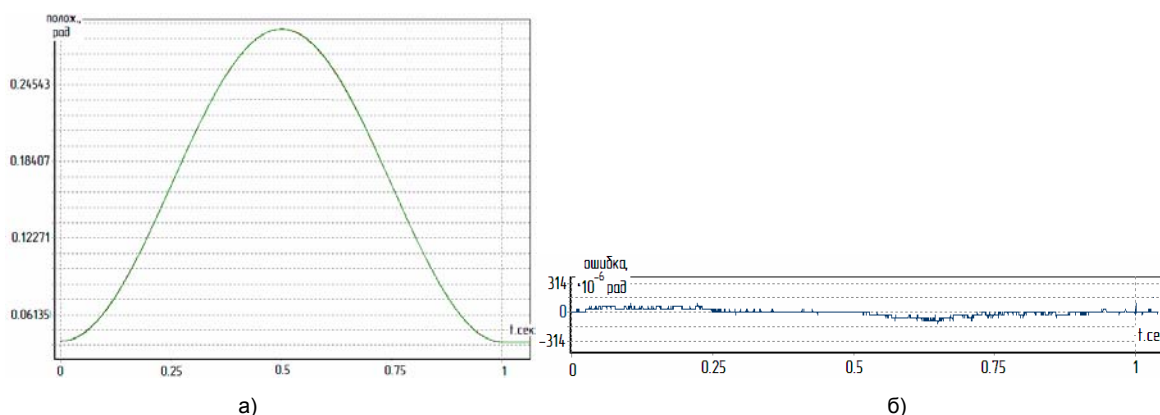


Рис. 8. Воспроизведение косинусоидального сигнала электроприводом с регулятором положения: а – сигнал задания и обратной связи; б – ошибка управления

Анализ полученных результатов показывает, что при изменении амплитуды сигнала задания в 100 раз, а частоты в 20 раз обеспечивается малая ошибка регулирования. Для регулятора положения, согласно результатам испытаний (табл. 2), ошибка колеблется в диапазоне  $\pm 10$  дискрет измерителя перемещения, что в пересчете в линейное перемещение при использовании стандартного ШВП с шагом 10 мм составляет  $\pm 2,5$  мкм.

Сравнение синусоидального и косинусоидального сигналов задания показывает, что разработанная система способна обеспечивать более качественное воспроизведение сигналов с непрерывностью не только самого сигнала управления, но и его первой и второй производных. При выполнении указанного условия разработанный регулятор положения способен поддерживать ошибку регулирования в коридоре  $\pm 10$  дискрет измерителя перемещения (рис. 8,б и табл. 3). Следует отметить, что в линейной зоне работы регулятора положения с ростом скорости происходит незначительное нараста-

ние динамической ошибки. Как следует из табл. 3, при возрастании максимальной скорости в 100 раз ошибка возрастает только в 2,5 раза.

При использовании непрерывного сигнала с разрывными производными, в частности синусоидального, в начале и в конце движения возникает ошибка регулирования, значительно превосходящая указанный коридор малых ошибок. Для рассматриваемого привода максимальная ошибка, в самом общем случае, согласно результатам испытаний (табл. 3), обусловлена как частотой задающего воздействия, так и его амплитудой. Время возвращения к интервалу малых ошибок находится в пределах 20–50 мс и возрастает приблизительно на 10 мс с ростом рассогласования на каждые 80 дискрет измерителя перемещения.

Параллельно с испытаниями электропривода с регулятором положения проводились исследования качества работы системы с регулятором скорости. В качественном от-

ношении полученные результаты совпадали с результатами, описанными выше для регулятора положения, но количественные характеристики отличались. Так, ширина линейной зоны работы регулятора скорости составила 580 об/мин, время переходного процесса в линейной зоне было постоянным (20 мс). Ошибка слежения за сигналом скорости, изменяющимся по гармоническому закону, в линейной зоне составляла не более  $\pm 5$  об/мин независимо от характеристик сигнала задания. Следует отметить, что более низкий порядок системы и отсутствие второй производной снижают негативное влияние разрывов производных на динамическую ошибку слежения.

Для определения полосы пропускания по каналу управления для системы с регулятором положения и регулятором скорости были экспериментально получены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ). Результаты испытаний для обоих регуляторов приведены на рис. 9, 10.

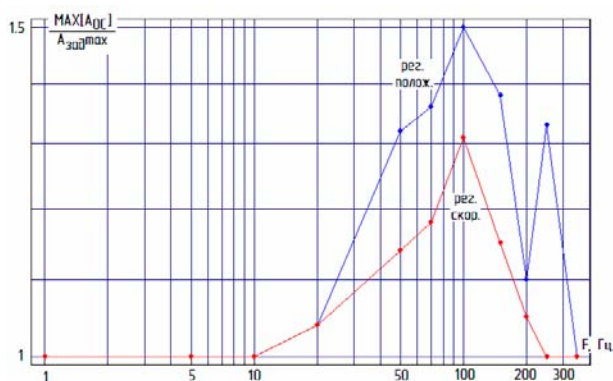


Рис. 9. ЛАЧХ регуляторов положения и скорости

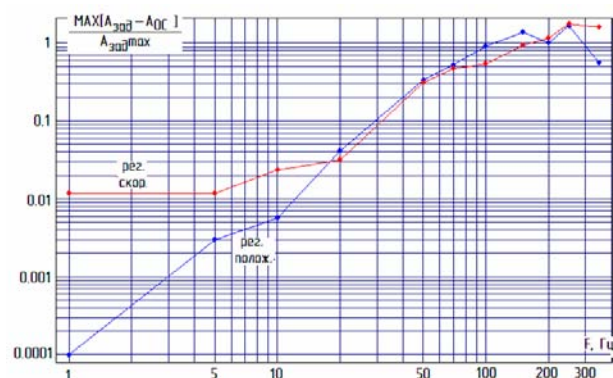


Рис. 10. Отношение максимальной ошибки регулирования к амплитуде сигнала задания

Анализ приведенных кривых показывает, что в области высоких частот АЧХ обоих регуляторов имеет подъем, обусловленный частотной коррекцией по производным сигнала задания. Подъем АЧХ для регулятора положения больше, чем для регулятора скорости. До частот порядка 50–70 Гц в обоих регуляторах фазовый сдвиг между сигналами практически отсутствует. На больших частотах фазовый сдвиг начинает проявляться все значительнее. В результате на

частоте около 150–200 Гц величина ошибки регулирования составляет 100 % от амплитуды сигнала управления (рис. 10), хотя коэффициент передачи системы, как следует из графика, приближается к единице. Следует отметить, что на частотах, больших 100 Гц, начинает сказываться дискретизация по уровню и по времени, так как по энергетическим характеристикам электропривода амплитуда задающих сигналов снижается до 4–10 дискрет измерителя. Таким образом, на указанных частотах сам сигнал управления теряет характер гармонического и приближается к меандру или треугольнику. В результате эффективность действия упреждающих связей снижается, что приводит к некоторому подъему АЧХ в области верхних частот (рис. 9).

В целом, полученные зависимости позволяют заключить, что требования стандарта по полосе пропускания контуров управления скоростью и положением привода выполняются с запасом. Для системы с регулятором положения гарантированно обеспечивается полоса пропускания 50 Гц, для системы с регулятором скорости гарантированная полоса пропускания составляет 200 Гц.

В результате проведенных испытаний по методике, предложенной в [2], можно заключить, что разработанный привод отвечает заданным критериям качества, предъявляемым к современным приводам, предназначенным для высокоточного управления движением: быстрдействию, точности, требуемой полосе пропускания. Время реакции на ступенчатое изменение сигнала задания по положению – 40 мс, ширина линейной зоны – 1/8 оборота вала, полоса пропускания системы с регулятором положения – не менее 50 Гц.

Достигнутые характеристики показывают, что разработанный привод может быть использован для металлорежущих станков в качестве приводов подачи и главного движения. Наиболее эффективно привод работает с непрерывными сигналами задания по положению, имеющими ограниченные значения производных: скорости и ускорения. При этих условиях привод в линейной зоне способен обеспечить малую ошибку слежения в виде белого шума в диапазоне не более  $\pm 2,5$  дискрет измерителя независимо от параметров задающего воздействия.

#### Список литературы

1. ГОСТ 27803-91. Электроприводы, регулируемые для металлообрабатывающего оборудования и промышленных роботов.
2. Современные требования к электроприводам станков с ЧПУ / А.П. Бурков, Е.В. Красильникьянц, А.А. Смирнов, Н.В. Салахутдинов // Вестник ИГЭУ. – 2010. – Вып. 4.

*Данная работа проводилась в рамках Государственного Контракта № 02.740.11.0521 «Комплексная разработка цифровой системы ЧПУ и асинхронного электропривода для металлорежущих станков с применением перспективных технологий обработки».*

*Бурков Александр Павлович,*  
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры электроники и микропроцессорных систем,  
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, ауд. А-122а  
телефон (4932) 26-97-52,  
e-mail: burkov@eims.ispu.ru

*Красильникьянц Евгений Валерьевич,*  
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры электроники и микропроцессорных систем,  
телефон (4932) 26-97-52,  
e-mail: krev@eims.ispu.ru

*Смирнов Александр Андреевич,*  
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
аспирант кафедры электроники и микропроцессорных систем,  
телефон (4932) 26-97-52,  
e-mail: smirnov@eims.ispu.ru

*Салахутдинов Наиль Васимович,*  
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
ведущий электроник кафедры электроники и микропроцессорных систем,  
телефон (4932) 26-97-52,  
e-mail: nail@eims.ispu.ru