

УДК 629.735.33.002: 621.9.06-529: 004.421

В.С. КРИВЦОВ, Е.В. КОМБАРОВА, Р.В. ВАРНАС, Е.А. АКСЕНОВ

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АЛГОРИТМОВ И ПРОЦЕССОВ В СТАНКАХ С ЧПУ

Повышение эффективности механообработки в авиастроении во многом зависит от применения технологии высокоскоростного фрезерования. Необходимость проведения исследования алгоритмов и процессов в станках с ЧПУ на реальном оборудовании обусловлена зависимостью эффективности процесса высокоскоростной обработки от параметров отдельных единиц оборудования. Разработан программно-аппаратный комплекс, интегрированный с системой ЧПУ на базе персонального компьютера, позволяющий регистрировать данные о процессах в технологическом оборудовании и внутренних переменных системы ЧПУ с частотой управляющего цикла системы ЧПУ. Показано применение комплекса при разработке алгоритма управления оборудованием при пошаговом перемещении от пультa оператора, алгоритма прогнозирования подачи, оптимизации программно реализованного регулятора, исследовании энергопотребления и вибраций при высокоскоростном фрезеровании.

Ключевые слова: высокоскоростное фрезерование, система ЧПУ, точность позиционирования, ошибка по положению.

Введение

Обработка металлов со снятием стружки является на сегодняшний день важнейшим способом формообразования деталей в машиностроении. Повышение точности, надежности и производительности лезвийной обработки резанием является одной из наиболее актуальных задач в авиастроении. Из-за постоянного повышения требований к качеству обработанных поверхностей процесс совершенствования станочного оборудования является перманентным.

Необходимо подчеркнуть, что современный станок представляет единое целое с системой ЧПУ (СЧПУ), которая может быть наделена различными функциями. Станок в современных условиях должен быть снабжен гибкой и интеллектуальной системой управления, связанной с системой управления производством. Сложность программного обеспечения не является регламентирующим показателем. В СЧПУ могут быть использованы достаточно сложные алгоритмы управления, учитывающие динамические процессы, происходящие в системах станка. Основной тенденцией в развитии СЧПУ для современного механообрабатывающего оборудования является создание систем на базе персонального компьютера (ПК) [1, 2], что позволяет использовать весь арсенал вычислительных и коммуникационных возможностей современной техники.

Повышение сложности металлорежущего оборудования, применение высокоскоростных технологий обработки, необходимость учета динамических

процессов, происходящих в системах станка, обуславливает необходимость проведения исследований этих процессов как вообще, так и на конкретных экземплярах оборудования.

Создание специализированных стендов для исследования алгоритмов и процессов управления оборудованием [2] применимо для исследования ограниченного ряда проблем. При решении задач оптимизации процессов высокоскоростной обработки результаты могут существенно отличаться для различных экземпляров оборудования одного типа [3]. Это обстоятельство определяет необходимость разработки программно-аппаратного комплекса (ПАК) для исследования алгоритмов и процессов в станках с ЧПУ, обеспечивающего проведение исследований непосредственно на технологическом оборудовании.

С целью обеспечения анализа алгоритмов управления, процессов в системах станка и процессов механической обработки на металлорежущих станках в центре САПР и ИТ ХАИ разработан ПАК, интегрированный с СЧПУ. Комплекс эксплуатируется в составе оборудования различных типов, таких как, токарный станок 16К20Ф3, вертикально фрезерные станки 6Р13ГН1 и МА655СМ30А.

1. Требования к программно-аппаратному комплексу

Для достижения поставленной цели определены следующие задачи и требования к программно-аппаратному комплексу.

Для проведения исследований на реальном оборудовании наиболее рациональным является использование СЧПУ в качестве основы создаваемого ПАК. Среди основных архитектурных вариантов современных СЧПУ, представленных на рынке, преобладают системы на базе ПК [1, 2], обеспечивающие гибкий интерфейс оператора и использование коммуникационных возможностей подключения в локальные и глобальные сети. Наиболее перспективным является *создание ПАК исследования алгоритмов и процессов на основе интеграции дополнительного аппаратного и программного обеспечения в СЧПУ на базе ПК.*

Реализация технологических процессов высокоскоростной обработки требует высоких значений подач рабочих органов станка. Возможность реализации процесса обработки зависит от точности поддержания контурной скорости и точности позиционирования в процессе обработки. В работе [4] показано, что для обеспечения точности задания траектории не хуже $1 \cdot 10^{-3}$ мм, при подачах порядка 5000 мм/мин необходимо применять СЧПУ с частотой цикла не менее 1000 Гц. В современных СЧПУ, обеспечивающих управление на подачах до 60000 мм/мин, реализуется цикл управления с частотой до 2500 Гц. Технические решения по организации архитектуры СЧПУ и системы исследования алгоритмов и процессов должны *обеспечивать высокую частоту управляющего цикла при управлении оборудованием.*

Архитектура СЧПУ на прикладном уровне определяется количеством и составом прикладных разделов, называемых задачами управления [5]. В число подобных задач входят: геометрическая (ориентируется на управление следящими приводами); логическая (организует управление электроавтоматикой); технологическая (гарантирует поддержание или оптимизацию параметров технологического процесса); диспетчеризация (обеспечивает управление другими задачами на прикладном уровне); терминальная (поддерживает диалог с оператором, отображение состояний системы, редактирование и верификацию управляющих программ); коммуникационная (обеспечивает обмен информацией с системой управления предприятием). Программно-аппаратные средства системы должны *обеспечивать получение и сохранение информации о выполнении алгоритмов всех вышеперечисленных задач.*

При построении СЧПУ на базе ПК необходимо учитывать особенность реализации режима реального времени. Под понятием реального времени подразумевают, что поведение вычислительной системы предсказуемо и время, затраченное на определенную процедуру, не превышает заранее установ-

ленного ограничения [5]. Это означает, что на выполнение одного и того же действия вычислительная система может затрачивать время, длительность которого зависит от различных обстоятельств, но находится в определенных пределах. ПАК для исследования алгоритмов и процессов должен *обеспечивать возможность измерения реальной длительности процессов, происходящих в СЧПУ.* Внутренний таймер вычислительной системы не позволяет решить эту задачу, а значит, не может быть использован.

СЧПУ осуществляет контроль большого количества параметров, но для анализа технологического процесса либо других процессов, происходящих в оборудовании, может понадобиться регистрация различных сигналов и данных внешней регистрирующей аппаратурой. Для облегчения анализа данных необходимо иметь возможность *управлять регистрацией данных внешними измерительными устройствами синхронно с регистрацией данных внутри системы.*

Процесс сбора и регистрации данных осуществляется параллельно с процессом управления оборудованием и не должен влиять на него. По этой причине процесс сбора данных должен выполнять только запись данных. Обработку и анализ необходимо *осуществлять после завершения эксперимента с использованием специализированных программных средств и пакетов, например, excel, mathcad.*

2. Аппаратная часть комплекса

Аппаратная часть комплекса создана на базе двухуровневой СЧПУ, в которой задачи управления разделены между двумя ПК, объединенными в локальную сеть (рис. 1). Верхний уровень (ВУ) представляет собой ПК, функционирующий под операционной системой Windows XP. Он выполняет терминальную, коммуникационную и, частично, технологическую задачи управления.

Нижний уровень (НУ) СЧПУ представляет собой ПК, в системную магистраль которого подключены специализированные устройства сопряжения: модули ввода-вывода дискретных сигналов, интерфейсы следящих приводов, интерфейсы датчиков обратной связи (ДОС). Нижний уровень функционирует под операционной системой реального времени и обеспечивает выполнение диспетчеризации, геометрической, логической и технологической задач.

Разделение задач между уровнями СЧПУ позволяет обеспечить максимальную эффективность и частоту цикла управления порядка 1000 ... 2500 Гц.

Применение в качестве НУ ПК типа celeron 1,2 GHz с оперативной памятью 512...1024 МВ по-

звolyет параллельно с управлением по восьми осям осуществлять регистрацию необходимого количества параметров и обрабатывать данные дополнительных устройств комплекса.

Магистральная организация обмена данными между устройствами сопряжения и процессорным модулем обеспечивает наибольшую производительность и высокую надежность обмена данными, что наилучшим образом подходит для организации системы регистрации большого количества данных с устройств сопряжения и внутренних переменных программного обеспечения (ПО) СЧПУ.

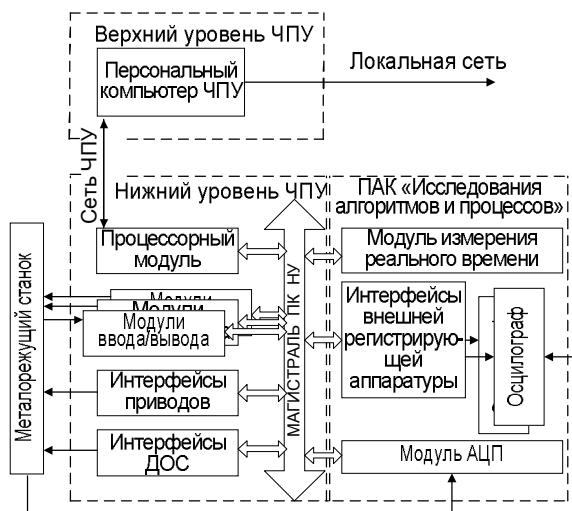


Рис. 1. Структура аппаратного обеспечения СЧПУ и ПАК для исследования алгоритмов и процессов

Аппаратное обеспечение разработанного комплекса полностью включает в себя аппаратное обеспечение СЧПУ с дополнительным подключением в системную магистраль специальных модулей: измерения реального времени, аналогово-цифрового преобразования (АЦП) и управления внешней регистрирующей аппаратурой, например, цифровым запоминающим осциллографом.

Таким образом, любой станок или технологическое оборудование, оснащенное СЧПУ с расширением аппаратной части до состава комплекса, можно рассматривать как исследовательский стенд. Проведение же технологического эксперимента на реальном станке, а не на его стендовой имитации позволяет получать наиболее достоверные и ценные результаты.

3. Программная часть комплекса

За основу организации программного обеспечения комплекса принята структура ПО СЧПУ. ПО ВУ разработано в Microsoft visual C++. ПО ВУ состоит из двух подсистем: подсистемы управления

процессом регистрации данных и подсистемы обработки данных. Управление процессом регистрации унифицировано с управлением технологическим оборудованием и осуществляется с помощью команд, передаваемых по локальной сети СЧПУ на машину НУ.

Подсистема обработки данных позволяет визуализировать любой набор зарегистрированных данных одного или нескольких экспериментов, провести преобразования данных, вычислить амплитудно-частотную характеристику и выполнить экспорт данных в excel, mathcad и другие пакеты.

Структура ПО НУ соответствует структуре ПО СЧПУ (рис. 2).

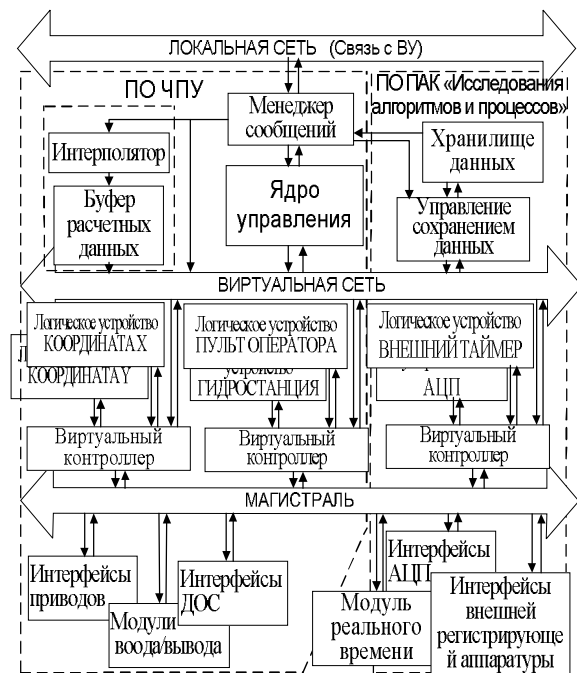


Рис. 2. Структура программного обеспечения СЧПУ и ПАК для исследования алгоритмов и процессов

Управление отдельными устройствами станка осуществляется программно реализованными автоматами логических устройств. Логические устройства сгруппированы по виртуальным контроллерам. Ядро управления обеспечивает взаимодействие устройств через рассылку команд и сообщений контроллерам по внутренней виртуальной сети. Обмен данными с физическими интерфейсами осуществляется с преобразованием к адресному пространству виртуальных контроллеров. Добавление в систему специальных интерфейсов комплекса не нарушает общей структуры ПО. Обмен данными с дополнительными интерфейсами осуществляется аналогично обмену данными с интерфейсами СЧПУ.

Специально для комплекса разработан модуль управления сохранением данных. Модуль обеспечи-

вает сбор и сохранение в оперативной памяти данных о процессах, происходящих на программном уровне в СЧПУ и данных о физических процессах, происходящих в технологическом оборудовании. Модуль управляется ядром и получает данные от логических устройств.

Модуль управления сохранением данных обеспечивает два режима: режим «Регистрация параметров» и режим «Аварийное сохранение параметров».

В режиме «регистрации параметров» инициализация и завершение сохранения данных выполняется по команде, передаваемой с ВУ на НУ. Регистрация данных выполняется на каждом такте работы системы. Время непрерывной регистрации составляет не менее 60 секунд. Для каждой управляемой координаты может регистрироваться до 300 переменных. Набор данных определяется при конфигурировании системы. Конфигурация данных, сохраненных в конкретном файле эксперимента, описывается в заголовке файла, что позволяет производить последующую обработку для оборудования различной конфигурации. Режим используется для проведения исследования алгоритмов и различных процессов в технологическом оборудовании.

Режим «аварийного сохранения параметров» активизирует сохранение данных при сбое в работе систем станка. При возникновении аварийных ситуаций, таких как отказ приводов подачи, шпинделя, гидростанции или других критичных систем, происходит выключение питания станка и сохранение данных о работе системы за время не менее 40 секунд, предшествующих отказу. Режим используется для отладки алгоритмов управления устройствами и диагностики отказов.

4. Исследование алгоритмов и процессов

Разработанный комплекс выполнен как программно-аппаратное расширение двухуровневой СЧПУ на базе ПК. ПАК позволяет получить информацию о любых данных в СЧПУ и проводить регистрацию данных о технологических процессах и процессах в системах станка. Комплекс позволяет проводить исследования и оптимизацию алгоритмов СЧПУ по всем задачам управления.

Рассмотрим несколько примеров применения комплекса.

При согласовании СЧПУ со станком выполняется разработка и отладка алгоритмов взаимодействия различных частей программно-аппаратного обеспечения (рис. 2). Это взаимодействие можно показать на примере тестирования алгоритма пошагового перемещения при управлении с пульта оператора (рис. 3). Сигнал нажатия кнопки «X+» посту-

пает через модуль ввода дискретных сигналов и обрабатывается алгоритмом логического устройства «Пульт Оператора». Шаговое перемещение на заданную величину выполняется при определенном положении переключателей режимов на пульте оператора, что задает необходимое состояние логического устройства. По запросу логического устройства ядро управления инициирует режим перемещения на величину заданного шага (переменная PP, рис. 3).

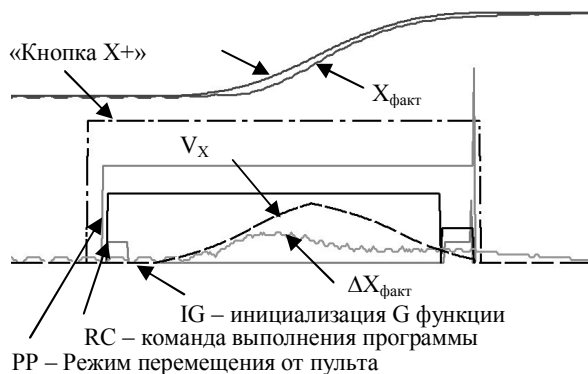


Рис. 3. Взаимодействие устройств при выполнении шагового перемещения при задании с пульта оператора

Модуль интерполяции по команде ядра (переменная RC) инициирует выполнение программы перемещения на заданное расстояние (переменная IG). Интерполяционные данные о заданной скорости (V_X) и положении ($X_{\text{зад}}$) поступают в логическое устройство «Координата X». Управление координатой осуществляется через интерфейс следящего привода. Информация о фактическом положении ($X_{\text{факт}}$) поступает в систему от устройства сопряжения «ДЭС». Соответствие заданного и фактического положения контролируется программно реализованным регулятором в логическом устройстве «Координата X».

Подсистема регистрации параметров позволяет в каждом такте управления для рассмотренного цикла фиксировать до 300 переменных, что позволяет проводить анализ и оптимизацию алгоритмов любой из частей системы.

Выполнение высокоскоростной обработки невозможно без реализации в СЧПУ алгоритмов прогнозирования и оптимизации скорости перемещения рабочих органов. Управляющая программа задает траекторию перемещения инструмента. Подача в программе задается технологом исходя из условий обеспечения режимов резания, а возможность обеспечения заданного скоростного режима возлагается на СЧПУ.

На рис. 4 приведен результат тестирования алгоритма оптимизации подачи при использовании S-образного закона разгона/торможения. При оптимизации скорости учитываются ограничения величин максимально допустимых подач по координатам, ограничение величин мгновенных ускорений по координатам на изломе кадров, ограничение перегрузки при движении по криволинейной траектории, возможность достижения заданной подачи на длине кадра и ограничение скорости в кадре по длине тормозного пути с учетом условий движения в последующих кадрах. Используемый алгоритм оптимизации не имеет ограничения по количеству анализируемых кадров. Условия движения в последнем кадре программы могут влиять на скорости движения в первом кадре.

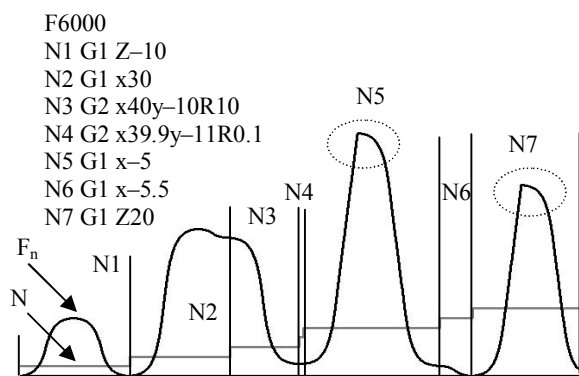


Рис. 4. Результат тестирования алгоритма оптимизации подачи

В приведенном примере в тексте программы задана подача (F) 6000 мм/мин, что превышает динамические возможности тестируемого станка. При выполнении программы с применением алгоритма прогнозирования подачи зафиксирована диаграмма изменения контурной скорости (F_n) по длине кадра. Ошибка алгоритма, приводящая к появлению излома в диаграмме подачи в кадре N5, N7, устранена.

Применение программно-реализованного регулятора в контуре управления следящими приводами позволяет проводить исследования различных типов регуляторов. Возможность сохранения информации о процессе управления следящим приводом позволяет осуществлять настройку коэффициентов регулятора по формализованной методике, а не по субъективным ощущениям наладчика. Работа регулятора напрямую определяет величины динамических погрешностей позиционирования, возникающих при движении рабочих органов по программе. На рис. 5 приведен график изменения ошибки позиционирования шпиндельной бабки станка МА655СМ30А, полученный при перемещении на подаче 5500

мм/мин. Для управления координатой применен пропорциональный регулятор с предварительным заданием по скорости. В установившемся режиме движения получена ошибка позиционирования +2... -16 мкм, максимальная ошибка на участке разгона составила +20... -25 мкм, а на участке торможения - 44 мкм.

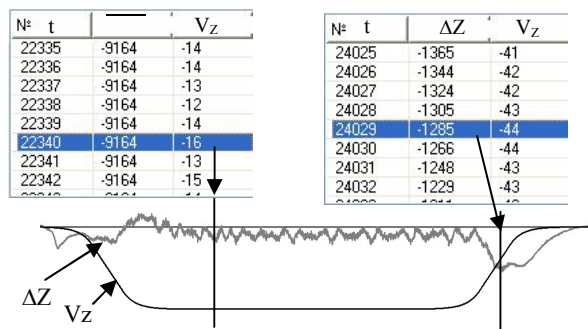


Рис. 5. Исследование точности позиционирования

Энергоёмкость процесса резания является одним из важных критериев оценки эффективности технологического процесса. Определение мощности резания по электрическим параметрам шпинделя в процессе обработки деталей (рис. 6, а) позволяет по данным серии экспериментов осуществлять оценку энергоёмкости снятия материала в зависимости от различных параметров технологического процесса (рис. 6, б). Данные, регистрируемые ПАК, пригодны для проведения технологических экспериментов. Разработка алгоритмов управления оборудованием с учетом энергетических характеристик технологического процесса является отдельной задачей, решение которой возможно с применением ПАК.

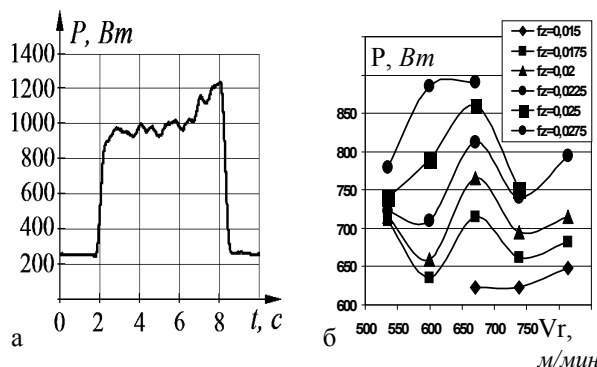


Рис. 6. Измерение мощности резания:
 а – мощность (P) при обработке образца;
 б – мощность (P) от скорости резания (V_r);
 f_z – подача на зуб

Колебания в металлорежущих станках влияют на точность и качество обрабатываемых поверх-

ностей, долговечность инструмента и элементов конструкции станка (направляющих, подшипников), определяющих точность обработки.

Одним из методов исследования вибраций является анализ акустического проявления колебаний в виде шума [3]. Акустическое излучение при механической обработке содержит в себе сигналы процесса резания, работающего двигателя, вращающегося шпинделя и т.п. Каждый процесс вызывает колебания в узкой полосе частот, амплитуда которого характеризует процесс. Совпадение частот этих колебаний с собственными частотами колебаний системы приведёт к резонансу.

Исследования акустических колебаний в процессе фрезерования образцов из Д16Т, проведены на станке МА655СМ30 с использованием скоростного шпинделя на базе коллекторного двигателя мощностью 1,8 кВт.

Шпиндель обеспечивает регулирование оборотов в диапазоне от 2500 до 23000 об/мин.

Проведенные исследования позволили определить резонансную характеристику системы и составляющие спектра колебаний в различных режимах работы для конкретного станка (рис. 7).

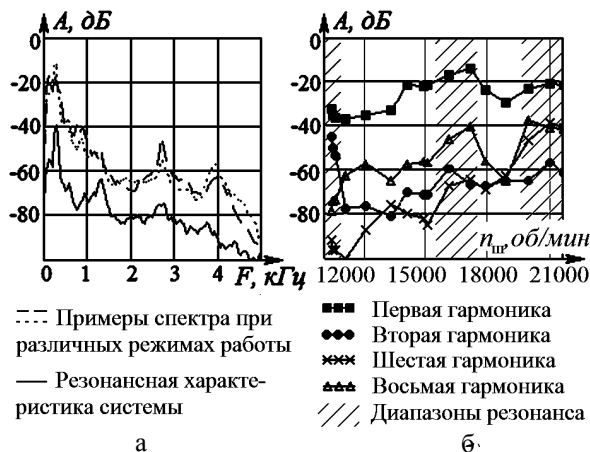


Рис. 7. Спектральные характеристики системы (а) и поведение гармоник спектра при различных частотах вращения шпинделя (б)

На резонансной характеристике заметны проявления собственных колебаний в нескольких диапазонах частот. По мере увеличения частоты вращения шпинделя ($n_{шп}$) та или иная гармоника совпадает с собственными частотами.

Анализ спектра колебаний показал, что наиболее чувствительны к резонансу 1, 2, 6 и 8 гармоники. Так, при $n_{шп} = 9000 \dots 10000$ об/мин наблюдается усиление колебаний на второй гармонике, при $n_{шп} = 15500 \dots 17500$ об/мин увеличиваются колебания на основной частоте и восьмой гармонике, при $n_{шп} > 20000$ об/мин в диапазоне резонанса оказыва-

ются шестая и восьмая гармоники. Указанные частоты вращения шпинделя являются нежелательными для использования в процессе обработки.

Резонансная характеристика для каждого металлорежущего станка уникальна, зависит от многих параметров и может меняться со временем (в результате износа элементов конструкции), такое исследование желательно проводить в рабочем порядке в процессе подготовки к изготовлению партии деталей.

Разработка методик и алгоритмов учета вибраций в процессе обработки представляет интерес для практического применения в производстве и требует дальнейших исследований.

Заключение

Разработан ПАК, интегрированный с СЧПУ на базе ПК. Комплекс позволяет проводить регистрацию данных о процессе механической обработки, процессах в системах технологического оборудования и внутренних переменных СЧПУ с частотой управляющего цикла. Регистрация данных внешней измерительной аппаратурой управляется комплексом и синхронизируется с циклом управления. Показано применение комплекса при разработке алгоритма управления оборудованием при пошаговом перемещении от пульта оператора, алгоритма прогнозирования подачи, оптимизации программно реализованного регулятора и исследовании энергопотребления и вибраций при высокоскоростном фрезеровании. Определена перспективность применения ПАК при проведении исследований и разработки методик и алгоритмов учета энергопотребления и вибраций в процессе обработки.

Литература

1. Сосонкин, В.Л. Концепция числового программного управления мехатронными системами: методологические аспекты построения открытых систем ЧПУ [Текст] / В.Л. Сосонкин, Г.М. Мартинюк // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2002. – № 2. – С. 2-11.
2. Букреев, В.Г. Программно-аппаратный комплекс для исследования алгоритмов интерполяции траекторий движения многокоординатных электроприводов [Текст] / В.Г. Букреев, Н.В. Гусев, М.В. Коваленко // Современные технологии автоматизации. – 2007. – № 1. – С. 46-54.
3. Потапов, В.А. Проблемы вибраций при высокоскоростном фрезеровании алюминия в авиакосмической промышленности и способы их решения [Электронный ресурс] / В.А. Потапов. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.stankoinform.ru>. – 31.05.2011 г.
4. Комбаров, В.В. Исследование влияния час-

тоты цикла управления системы ЧПУ на точность обработки [Текст] / В.В. Комбаров, Е.В. Комбарова, Е.А. Аксёнов // Вестник двигателестроения. – 2009. – № 3. – С. 144-148.

5. Сосонкин, В.Л. Системы числового программного управления [Текст]: учеб. пособие / В.Л. Сосонкин, Г.М. Мартынов. – Х., 2005. – 296 с.

Поступила в редакцию 31.05.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.В. Елифанов, Национальный аэрокосмический университет им Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

ПРОГРАМНО-АПАРАТНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ АЛГОРИТМІВ І ПРОЦЕСІВ У ВЕРСТАТАХ З ЧПК

В.С. Кривцов, О.В. Комбарова, Р.В. Варнас, Є.О. Аксёнов

Підвищення ефективності механічної обробки в авіабудуванні багато в чому залежить від застосування технології високошвидкісного фрезерування. Необхідність проведення дослідження алгоритмів і процесів у верстатах з ЧПК на реальному обладнанні обумовлена залежністю ефективності процесу високошвидкісної обробки від параметрів окремих одиниць устаткування. Розроблено програмно-апаратний комплекс, інтегрований з системою ЧПК на базі персонального комп'ютера, що дозволяє реєструвати дані про процеси в технологічному обладнанні та внутрішніх змінних системі ЧПК з частотою керуючого циклу системі ЧПК. Показано застосування комплексу при розробці алгоритму керування обладнанням при покроковому переміщенні від пульта оператора, алгоритму прогнозування подачі, оптимізації програмно-реалізованого регулятора, дослідженні енергоспоживання і вібрації при високошвидкісного фрезерування.

Ключові слова: високошвидкісне фрезерування, система ЧПК, точність позиціонування, помилка за положенням.

HARDWARE-SOFTWARE COMPLEX FOR INVESTIGATION OF ALGORITHMS AND PROCESSES IN CNC MACHINES

V.S. Krivtsov, O.V. Kombarova, R.V. Varnas, E.A. Aksenov

Improvement of machining efficiency in aviation greatly depends on high-speed milling technology application. Necessity to carry out investigations of algorithms and processes in CNC machines on real equipment is stipulated by dependence of high-speed processing efficiency from parameters of certain equipment. Hardware-software complex integrated with CNC system based on personal computer for recording the parameters in processing equipment and internal CNC variables with CNC control loop frequency is developed. Applications of the system for designing an equipment control algorithm by step motion from operator console, feed prediction algorithm, software regulator optimization, investigations of energy and vibrations at high-speed milling are shown.

Key words: high-speed milling, CNC, positioning accuracy of machine organs, positioning error.

Кривцов Владимир Станиславович – д-р техн. наук, проф., заведуючий кафедрой технологии производства летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

Комбарова Елена Владимировна – мл. науч. сотр. кафедры технологии производства летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: kombarenok@mail.ru

Варнас Радуга Владо – мл. науч. сотр. кафедры технологии производства летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: varnasradu@mail.ru.

Аксёнов Евгений Александрович – аспирант кафедры проектирования радиоэлектронных систем ЛА Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: aks-ev@mail.ru.