



Бычков И.В.

Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины

## КОРРЕКТНАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ СЛОЖНОФАСОННЫХ ИЗДЕЛИЙ НА ОБОРУДОВАНИИ С ЧПУ

### Анотація

*Потреба аналізу технологічних можливостей виробництва адекватно реагувати на вимоги замовника привела до необхідності оцінки коректності постановки завдання формоутворення на устаткуванні з ЧПК*

### Abstract

*Necessity of analysis of technological manufacturabilities it is adequate to react on the requirements of customer resulted in the necessity of estimation of correctness of raising of task of shapformation on an equipment with CNC*

Обязательным условием серийного выпуска новой продукции самолетостроения сегодня является кардинальное сокращение ее производственного цикла. Кроме того, возросшая сложность авиационных конструкций требует увеличения точности обработки деталей, а экономическая ситуация диктует необходимость сокращения себестоимости продукции. Поиск рационального решения по такому количеству критериев – достаточно сложная задача, дающая неоднозначный ответ. Поэтому для анализа технологических возможностей производства адекватно реагировать на требования заказчика необходимо оценить корректность постановки самой задачи формообразования, т.е. выполнение условий существования решения задачи, причём единственного, с непрерывной зависимостью результата от входных данных. Задачи, в которых нарушено хотя бы одно из приведенных условий, называют некорректно поставленными. Решены они могут быть путем привлечения дополнительной эвристической информации для изменения их постановки [1].

Целью работы является анализ корректности постановки задач формообразования сложнофасонных изделий в условиях промышленного производства на оборудовании с ЧПУ.

Из многообразия технологических факторов, влияющих на постановку задачи формообразования для оборудования с ЧПУ, наиболее важными являются увеличение скоростей подачи и повышение точности формообразования, а именно:

- увеличение скоростей подач до 1000 мм/с;
- повышение точности интерполяции по контуру, что требует повышения точности позиционирования по управлению не менее 1d (или в пределах  $0.001 \div 0.0001$  мм);
- обеспечение постоянства контурной скорости (отклонение  $\pm 10\%$ );
- обеспечение выхода в конечную точку участка интерполяции без ошибки по положению (отклонение  $\pm 1d$ ) и плавно по скорости (отклонение  $\pm 10\%$ ).

Такая постановка задачи потребовала разработки новых алгоритмов линейной и круговой интерполяции, что принесло положительные результаты [2]. Однако объем моделей, описывающих формообразующие перемещения рабочих органов станка при изготовлении деталей со сложнофасонными поверхностями, существенно (на порядок) увеличивается по сравнению с объемами управляющих программ для изготовления объектов с классическими формами (цилиндр, конус, плоскость и т.п.). Основной причиной такого резкого увеличения объема разрабатываемых управляющих программ является способ представления сложнофасонных поверхностей. В большинстве эксплуатируемых CAD/CAM-систем сложная форма эквидистанты перемещения инструмента заменяется большим количеством коротких линейных и круговых кадров (с минимальной длиной в 10-20 дискрет). Логика управления формообразованием по такой управляющей программе вступает в противоречие с необходимыми условиями для реализации высокоскоростной обработки. Поэтому возникает необходимость изменения постановки задачи – реализовать описание движения зоны формообразования не линейными и круговыми участками, а сплайновыми кривыми, что, в свою очередь, потребует разработки и отладки алгоритмов перемещений с использованием сплайн-интерполяции [3].

В эксплуатируемых системах ЧПУ расчеты скорости и интерполяционных координат выполняются по линейным и круговым алгоритмам в реальном режиме времени перед их отработкой приводами. После получения значений скорости в каждом такте необходимо выполнить проверку на удовлетворение полученных параметров ограниче-

ниям, которые на них накладывают возможности самих приводов. При линейной или круговой интерполяции не вызывает сложностей проверка выполнения этих ограничений.

При сплайн-интерполяции ситуация иная. Поскольку на линейных и круговых участках кривизна не изменяется, то изменение ускорения обуславливается только его тангенциальной составляющей, которая описывается соответствующими законами изменения контурной скорости [4]. Во время перемещения по сплайновой кривой постоянно происходит изменение её кривизны. Поскольку одна из составляющих суммарного ускорения зависит от радиуса траектории перемещения зоны формообразования ( $V^2/R$ ), а вторая определяет изменение контурной скорости, то невозможно заранее определить точки траектории с максимальным значением ускорения по каждой координатной оси для проверки удовлетворения ограничений приводов. Результирующее ускорение по каждой координатной оси не должно превышать установленного ограничения. Без организации таких проверок нельзя гарантировать решения задачи формообразования.

Очевидным представляется подход, когда на каждом такте управления организуется расчет радиуса кривизны траектории, после чего могут быть получены значения радиальных составляющих ускорения. Проблема в том, что аналитическая зависимость радиуса кривизны от параметров траектории имеет очень сложный вид. Например, для упрощенного варианта лежащей в плоскости траектории эта зависимость может быть представлена следующим выражением:

$$R(U) = \frac{\sqrt{(X'(U))^2 + (Y'(U))^2}^3}{X'(U)Y''(U) - Y'(U)X''(U)}$$

Аналитические исследования не дают гарантированный результат на любом участке сплайновой траектории, поскольку могут присутствовать особые точки, когда радиус равен бесконечности (для прямолинейной траектории) и исследуемая функция имеет разрыв. Поэтому необходимо найти метод поиска точек на сплайновой кривой с максимальными значениями ускорений по каждой координатной оси.

С другой стороны, если соотношение тангенциальной и радиальной составляющих ускорения в какой-то точке траектории таково, что по одной из координат требуемое ускорение превосходит установленное ограничение, то необходимо уменьшить расчетное ускорение до значения его ограничения. В результате этого расчетная контурная скорость

не достигнет заданного значения на этом участке траектории, что означает нарушение условия её постоянства.

Для перехода к корректной постановки задачи формообразования необходимо выполнить следующее условие: управляющая программа, поступающая на выполнение, должна удовлетворять всем ограничениям, которые накладывает конкретная система «ЧПУ – привод – станок». А это означает, что следует выполнить предварительный анализ всей управляющей программы и сравнение расчетных значений ускорений с заданными по всем приводам. Выполнить это нужно до начала формообразующих движений по программе, иначе невозможно реализовать режим работы с постоянной скоростью съема материала.

Требование выполнения таких проверок приводит к необходимости вычисления большого количества параметров, что выражается в организации сложных расчетных исследований перед запуском управляющей программы. Положительным фактором в таком случае является возможность использования полученных значений параметров при выполнении формообразующих перемещений по управляющей программе в реальном режиме времени. В этом случае объем расчетов при отработке управляющей программы может быть значительно снижен, что позволит уменьшить расчетное время решения задачи движения в течение такта управления [3]. Поэтому требования к вычислительным мощностям при отработке управляющих программ могут быть существенно уменьшены без снижения гарантии получения решения задачи.

Для уменьшения динамических ошибок в режимах разгона и/или торможения приводов подач применяют различные законы управления скоростью. Наиболее просто реализуется линейный закон, при котором изменение скорости на всем участке остаётся постоянным. Практика ЧПУ показала, что при таком управлении динамические ошибки и колебательность системы значительны, что заставляет снижать рабочие скорости подач для получения заданного качества обработки. Требование обеспечения высокой контурной скорости привело к необходимости использования нелинейных режимов разгона и торможения и, как один из вариантов – S-образного закона [4]. Корректная постановка задачи формообразования при этом подразумевает наличие простого алгоритма нахождения всех основных характеристик такого движения при выполнении интерполяционных расчетов. Поскольку расчет характеристик движения не должен превышать 25% длительности времени цикла управления, использование

достаточно точной, но сложной расчетной модели, например сплайнового сглаживания переходов, недопустимо по причине нарушения рекомендуемой длительности временного интервала расчета. Это может привести к отрицательному результату решения задачи.

Реализации второго условия корректности постановки задачи формообразования требует обеспечения одинаковых величин времени и пути разгона (торможения) при использовании как линейного, так и  $S$ -образного законов. Это требование выполнимо при условии, что  $S$ -образная кривая должна быть симметричной относительно прямой, соединяющей начальную и конечную точки графика скорости (рис. 1).

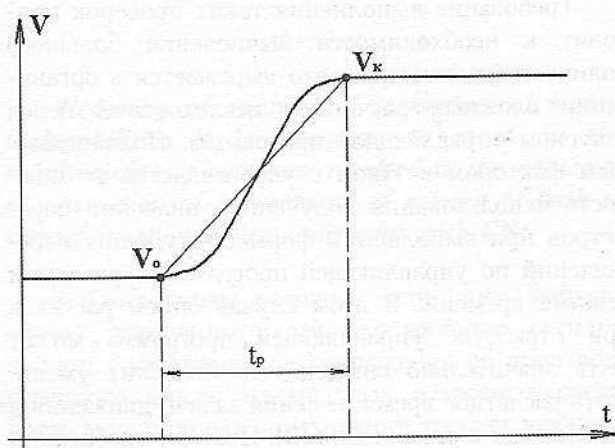


Рис. 1. График разгона по  $S$ -образному закону

Реализация описанного выше правила при известных значениях максимальной скорости, времени перехода от нулевой скорости к максимальной, начальном и допустимом ускорениях привода позволяет заранее рассчитывать участки нелинейного изменения скорости и сформировать таблицу потактовых переходов. В таком случае, с одной стороны, наглядно демонстрируется непрерывная зависимость решения задачи от входных данных в течение всего времени разгона-торможения, что является демонстрацией выполнения третьего условия корректной постановки задачи, а с другой стороны, такой подход приводит к значительному упрощению алгоритма управления скоростью и сокращает объем вычислений в реальном режиме времени при работе по управляющей программе, что гарантирует получение удовлетворительного решения задачи. Благодаря этому исключаются динамические удары в начале и конце участков изменения скорости и достаточно хорошо используются динамические свойства приводов подачи. Расчетное время программной

реализации предложенного алгоритма минимизировано, что позволяет повысить частоту управления в системе до 1500–2000 Гц без увеличения вычислительных мощностей контроллера.

Таким образом, появляется потребность иметь большие вычислительные мощности при предварительных расчетах скоростных и интерполяционных характеристик, но при отработке управляющей программы в реальном режиме времени потребность в вычислительной мощности может быть существенно снижена [4].

Корректная постановка задачи первичного формообразования указывает на необходимость информационного сопровождения этого процесса, что означает предоставление специалистам предприятия конкретных данных и возможностей, например:

- оператору станка с ЧПУ – набор управляющих программ для обработки заготовки и выполнения процедур контроля, технологический процесс, карту наладки, возможность оперативной отправки информации о ходе производственного процесса;
- наладчику для подготовки запуска детали в производство – набор управляющих программ и возможность визуализации её траектории, технологический процесс, карту наладки;
- наладчику по обслуживанию приводов и электронных систем – программное обеспечение диагностики элементов автоматизации и приводов, оперативный доступ к схемам и алгоритмам работы оборудования;
- технологу – доступ к средствам редактирования и визуализации управляющих программ, просмотр аналитического эталона изделия, деталей, оборудования, инструмента, результатов контрольных операций;
- конструктору – просмотр аналитических эталонов изделия, оснастки и деталей.

Из этого следует, что оборудование с ЧПУ становится одним из основных потребителей и источником информации, что приводит к необходимости изменения информационных потоков предприятий. Эффективность такого подхода во многом определяется оперативностью предоставления информации всем участникам производственного процесса. Сегодня основное внимание уделяется только разработке и передаче управляющих программ на соответствующее оборудование.

Таким образом, в условиях машиностроительного производства в процессе эксплуатации оборудования с ЧПУ сформировалось как основное звено информационной системы цеха. С одной стороны, оно оперативно поставляет объективную информацию о ходе производственного процесса (выполнении операций контроля, возникающих

сбоях, потребности в материалах и инструментах и т.д.), а с другой стороны, предоставляет возможность оперативно потреблять информацию в виде управляющих программ для реализации формообразующих процессов. Высокая оперативность подразумевает и возможность быстрого решения технических и организационных проблем, которые всегда сопровождают производственный процесс. Поэтому возможность оперативно предоставлять необходимую информации в требуемом виде перечисленным категориям её пользователей во многом определяет корректность постановки задач формообразования. Например, оператору, наладчику и технологу будет удобно пользоваться технологическим процессом, который сопровождается моделями оборудования, приспособлений, заготовок, инструмента и визуализацией его перемещения (рис. 2).

Корректная постановка некоторых обратных задач формообразования, когда координатно-позиционирующая система станка используется как координатно-измерительная для выполнения контрольных операций, диктует необходимость установки специальных датчиков. Наиболее широ-

кое использование получили тактильные щупы со сферической головкой. Они устанавливаются в шпиндель и перемещаются по управляющей программе контроля. Функционально щуп является прецизионным датчиком, выдающим сигнал в момент соприкосновения с деталью, который передается в СЧПУ.

С одной стороны, СЧПУ должна предоставить оператору всю необходимую информацию для выполнения поставленного ему задания, а также оперативно передать руководству объективную информацию о ходе производственного процесса, с другой стороны, СЧПУ управляет самим технологическим процессом и непосредственно участвует в нем. Функционально СЧПУ может быть разделено на два уровня: верхний и нижний (рис. 3). Нижний уровень решает только задачи управления движением и работой всех агрегатов станка. Верхний уровень реализует связь между оператором и СЧПУ, а также с информационной системой производственного подразделения.

Перечень и порядок преобразования информации для обеспечения формообразования на оборудовании с ЧПУ представлен на рис. 4.

№	Текст перехода	Точн.	Твсп.	Операция
1	Установить, выверить и закрепить			1001. Фрезерная с ЧПУ
2	Фрезеровать заготовку под механическую обработку панели на станке MA655T M1, в			1001. Фрезерная с ЧПУ
1	Установить, выверить и закрепить			1002. Фрезерная с ЧПУ
2	Фрезеровать карман глубиной 5.5 по программе 1.			1002. Фрезерная с ЧПУ
3	Фрезеровать отверстия 18 x 18 x 2.5. 9 шт. по программе 2.			1002. Фрезерная с ЧПУ
4	Фрезеровать отверстия D=40 x 2.5 по программе 3			1002. Фрезерная с ЧПУ
1	установить, выверить и закрепить			1003. Фрезерная с ЧПУ
2	сверлить отверстия D=4.4 6 шт по программе 4			1003. Фрезерная с ЧПУ
1	установить, выверить и закрепить			1004. Фрезерная с ЧПУ
2	заковка D=6.4 8шт по программе 5			1004. Фрезерная с ЧПУ
1	установить, выверить и закрепить			1005. Фрезерная с ЧПУ
2	сверлить D=3.2 8шт по программе 6			1005. Фрезерная с ЧПУ
1	установить, выверить и закрепить			1006. Фрезерная с ЧПУ
2	Заковка D=7.2 8шт по программе 7			1006. Фрезерная с ЧПУ

Рис. 2. Технологический процесс, поступающий на рабочее место оператора оборудования с ЧПУ



Рис. 3. Разделение функций СЧПУ на два уровня

Кроме того, на верхнем уровне необходимо предусмотреть выполнение следующих функций:

- внесение изменений в законы и расчет таблиц скоростей разгона/торможения;
- определение всех параметров и коэффициентов для сплайн-интерполяции с проверкой соответствующих ограничений;
- установка модулей информационной системы предприятия;
- просмотр аналитических эталонов изделия, деталей, оснастки и т.п.;
- просмотр результатов выполнения измерительных операций.

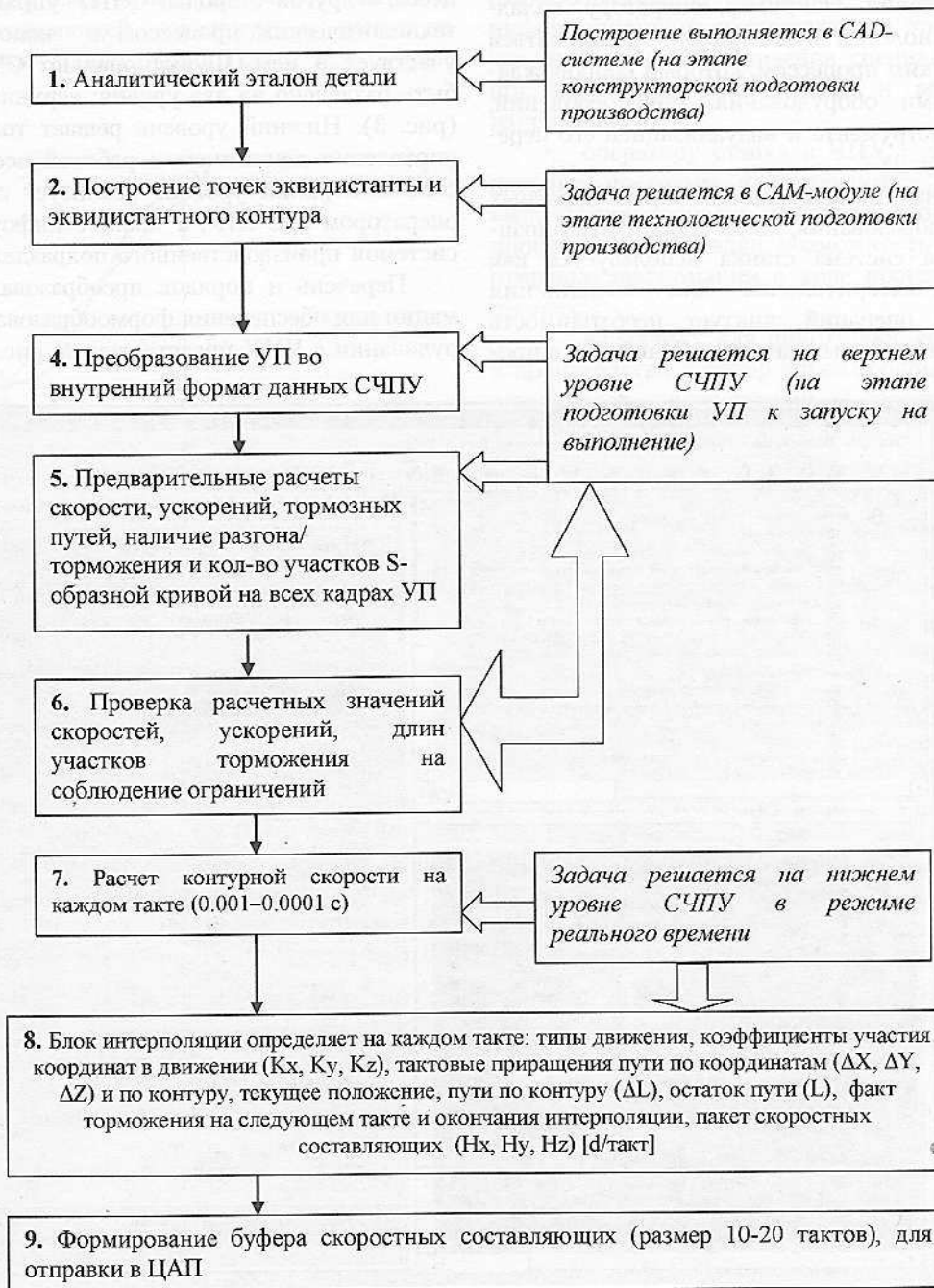


Рис. 4. Информационное обеспечение формообразующих перемещений оборудования с ЧПУ

На нижнем уровне также необходимы:

- расчеты в ПИД-регуляторе и передача сигналов на приводы подачи;
- обработка входных сигналов от элементов автоматики и пульта управления оборудованием.

Требования к операционной системе, приоритеты доступа к информации находятся в противоречии с требованиями к операционной системе нижнего уровня, которая выполняет свои задачи в режиме реального времени.

Решение этой проблемы предлагается в использовании на верхнем уровне РС-подсистемы, а на нижнем уровне – промышленного контроллера. В РС-подсистеме наиболее целесообразна операционная система Windows, а в контроллере нижнего уровня – операционная система реального времени – DOS или UNIX. Системы на основе Windows и UNIX (Linux) совместимы в том смысле, что поддерживают коммуникационные протоколы TCP/IP, и это позволяет построить коммуникационную среду, объединяющую подсистемы. Включение в эту среду прикладного уровня с функциями доступа к интерфейсам отдельных модулей создает виртуальную шину, оказывающую низкоуровневые услуги доступа. Объектная надстройка в шине формирует глобальный сервер, т.е. единую для обеих подсистем объектно-ориентированную магистраль.

Решение об использовании системы на основе Windows только на верхнем уровне обусловлены следующим:

- умением в ней работать большого количества пользователей;

- невозможность использования на нижнем уровне системы, которая не является системой реального времени и требует соответствующего расширения для дополнения его диспетчером потоков реального времени.

Все сказанное выше позволяет провозгласить следующие принципы построения системы ЧПУ:

- четкое разграничение между системными, прикладными и коммуникационными компонентами;
  - возможность независимого развития любого из этих компонентов как на основе оригинальных разработок, так и путем встраивания покупных программных систем;
  - клиент-серверная организация взаимодействия подсистем;
  - стандартизация интерфейсов и транзакций.
- Таким образом, принятый подход обеспечивает:
- интеграцию программного обеспечения верхнего уровня, нижнего уровня и БД в единую информационную среду;
  - публикацию API-функций интерфейса пользователя;
  - поддержку стандартных сетевых протоколов;
  - единую операционную среду и Intel-архитектуру процессора, стандартную PC платформу.

Приведенные здесь пункты являются основными признаками открытой системы ЧПУ. Функции API открывают доступ к библиотекам и инструментальным средствам, который позволяет расширить существующую систему. Поэтому существует возможность интегрировать в подсистему верхнего уровня пакеты ИС цеха и предприятия.

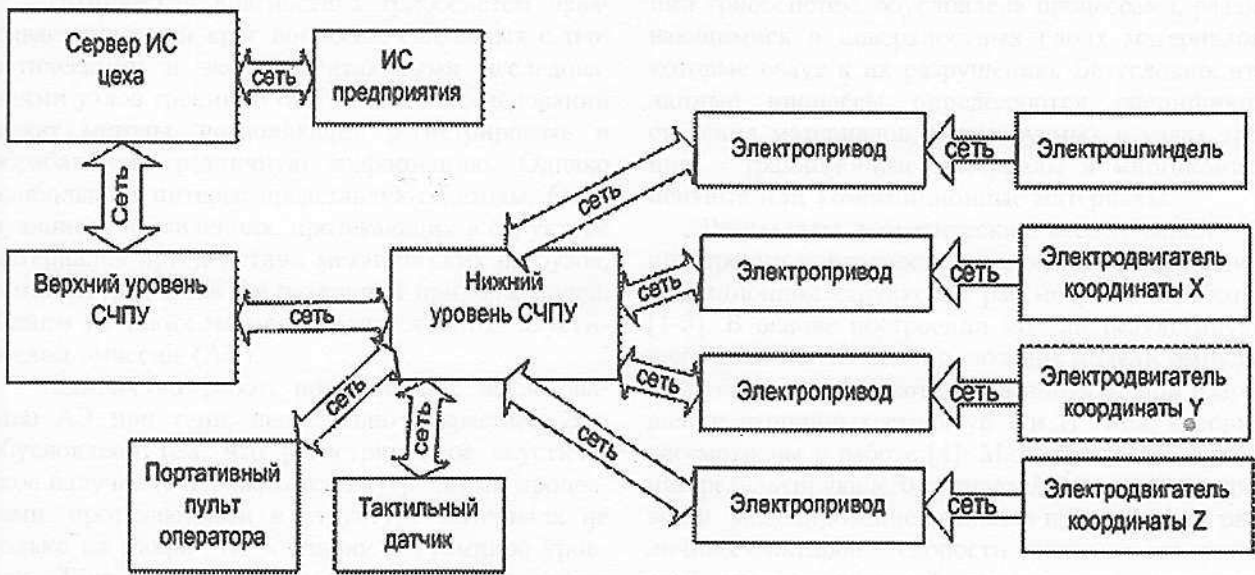


Рис. 5. Структура ИС комплекса «Предприятие – цех – СЧПУ – электропривод»



Локализация задач на каждом уровне решается с помощью соответствующих процессорных модулей. Обмен данными между уровнями осуществляется по сети. Двусторонняя организация сети между основными уровнями обеспечивает возможность передачи любой информации как на верхний уровень, так и на самый нижний, что даёт возможность организовать диагностику всей системы и настройку отдельных ее модулей с пульта оператора ЧПУ. Это позволяет любой контроллер оборудования с СЧПУ рассматривать как часть информационной системы цеха или предприятия.

Таким образом, открытая архитектура СЧПУ позволяет комплекс «Предприятие – цех – СЧПУ – электропривод» рассматривать как единую информационную систему (рис. 5).

Для построения такой системы в производственных условиях в перспективе необходимо координировать модернизацию оборудования с ЧПУ и его приобретение с построением компьютерной информационной системы предприятия.

Таким образом, приведенный в статье анализ корректности постановки задач формообразования позволил сформулировать требования к СЧПУ как к технологическому формообразующему оборудованию и как одному из элементов информационной системы предприятия.

### Литература

1. *Мялица, А.К.* Корректные и некорректные постановки задач формообразования [Текст] / А. К. Мялица, Е. Н. Буг, И.В. Бычков // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», 2008. – Вып. 39. – С. 6–13.
2. *Раисов, Ю.А.* Точный линейно-круговой интерполятор для систем формообразования в машиностроении [Текст] / Ю. А. Раисов, И. В. Бычков, В. В. Комбаров // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. – Х.:УкрДАЗТ.– 2007. – №1. – С. 12–18.
3. *Бычков, И.В.* В-сплайн интерполяция для двухуровневых систем ЧПУ [Текст] /Раисов Ю.А., Бычков И.В., Кулаков П.А. // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. – Х.: УкрДАЗТ.– 2008.–№5-6. – С. 71-74.
4. *Раисов, Ю.А.* Реализация S-образных законов управления скоростью подач в устройстве ЧПУ АВИ.04 [Текст] /Ю.А. Раисов, И.В. Бычков, Н.И. Бычков // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. – Х.:УкрДАЗТ.– 2010.–№1.– С. 8-11.
5. Sinumeric 840D/840Di/810D Руководство по программированию. Расширенное программирование (PGA). – SIEMENS.–2001. – Издание 09.01. – 650 с.