

УДК 621.9.06-529:621.91

Е. В. КОМБАРОВА*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина***МЕТОД ПЛАНИРОВАНИЯ ПОДАЧ ДЛЯ СИСТЕМЫ ЧПУ С ПРИМЕНЕНИЕМ S-ОБРАЗНЫХ ЗАКОНОВ РАЗГОНА/ТОРМОЖЕНИЯ**

Рассмотрена задача планирования подачи (look-ahead) в системе ЧПУ механообрабатывающего оборудования. Проведен анализ существующих методов планирования подачи, которые выполняют просмотр траектории перемещения инструмента на несколько кадров вперед в реальном времени. Рассмотрено разделение задач управления подачей в двухуровневой системе ЧПУ. Рассмотрены параметрическая и функциональная модели задания плана изменения подачи в кадре управляющей программы. Разработан метод планирования подачи с использованием предварительного просмотра траектории с применением S-образного закона разгона/торможения. Проведено тестирование предложенного метода на примере обработки пояса стрингера. Полученные результаты подтверждают эффективность метода.

Ключевые слова: высокоскоростная обработка, система ЧПУ, look-ahead, планирование подачи, S-образный закон разгона/торможения.

Введение

В настоящее время перед авиационно-промышленным комплексом Украины стоит сложная и противоречивая задача повышения конкурентоспособности выпускаемой продукции в условиях дискретно-нестабильных производственных программ при крайней ограниченности экономических ресурсов.

Повышения конкурентоспособности невозможно достичь без повышения производительности механообработки в авиационном производстве. Применение технологии высокоскоростного фрезерования (ВСФ) на базе современного оборудования с ЧПУ является неотъемлемой составляющей повышения эффективности механообработки в авиационном производстве. Применение технологии высокоскоростного фрезерования возможно при проведении интенсивной модернизации существующего оборудования до современного уровня развития технологии машиностроения [1]. Наиболее актуальным в механообработке деталей планера самолета является повышение технологических подач до режимов высокоскоростной обработки при изготовлении элементов продольного силового набора, например, стрингера, пояса лонжеронов.

Современный станок представляет единое целое с системой числового программного управления (СЧПУ), которая может быть наделена различными функциями, обеспечивающими реализацию высокоскоростного фрезерования [2]. При перемещении с высокими подачами, из-за влияния сил инерции органы станка не могут моментально отреагировать на

изменения траектории перемещения инструмента на участках с изломами траектории. Для избежания инерционных забросов при смене направления движения современные системы ЧПУ используют интеллектуальные методы планирования подачи, реализуемые алгоритмами опережающего просмотра Look-ahead [3 - 5].

Вопрос планирования подач недостаточно освещен в литературных источниках. Ведущие производители систем ЧПУ не разглашают свои реализации, это коммерческая информация. Как правило, описание реализации метода сводится к нескольким фразам, при этом суть и применяемые для анализа ограничения не раскрываются.

Наиболее часто при планировании подач используется подход, при котором в режиме реального времени выполняется анализ траектории перемещения инструмента на несколько кадров вперед. Количество кадров, участвующих в анализе, зависит от характеристик системы. Один из ведущих разработчиков систем ЧПУ компания Fagor для версии 8055 имеет размер буфера предварительного просмотра до 200 кадров [4] и выполняет предварительный просмотр в режиме реального времени. В работе [5] рассматривается метод планирования подач с применением S-образных законов, в котором анализ траектории происходит в режиме реального времени при ограниченном количестве анализируемых кадров. Однако, в режиме реального времени, есть серьезные ограничения по времени обработки данных из-за ограничений времени цикла управления. Планирование в реальном времени может занять

большую часть времени цикла управления. Может возникнуть проблема голодания данных, когда система не успевает подготовить кадр на исполнение, а пропуски цикла могут привести к сбою работы всей системы. Помимо этого анализировать необходимо не количество кадров, а участок траектории определенной длины. Длина анализируемого наперед участка должна обеспечивать возможность замедления движения, вплоть до полной остановки, при обнаружении резких изменений направления траектории инструмента.

Альтернативой методам планирования подач в реальном времени является предварительное планирование подач до начала управления движением. Планирование подачи осуществляется для траектории движения инструмента заданного в управляющей программе и неизменяемой в процессе ее выполнения. Кинематические и динамические характеристики технологической системы, на которой выполняется обработка деталей по управляющей программе, не изменяются в процессе ее выполнения. Эти обстоятельства позволяют утверждать, что допустимую подачу движения в каждом кадре можно вычислить предварительно, до начала движения по управляющей программе. При предварительном планировании не возникает проблем связанных с ограничением времени выполнения вычислений. Это обстоятельство позволяет осуществлять планирование подачи с проведением анализа любого по количеству кадров участка траектории, вплоть до анализа всей траектории, заданной в управляющей программе. Отсутствие ограничений времени при выполнении планирования подачи позволяет использовать наиболее полный набор ограничений при вычислении допустимых подач движения в каждом кадре, применять S-образные законы разгона/торможения, обеспечивающие гладкость изменения дифференциальных кинематических характеристик высокого порядка [7].

Целью статьи является разработка метода планирования подачи с использованием предварительного просмотра траектории с применением S-образного закона разгона/торможения.

1. Разделение задач управления подачей в двухуровневой системе ЧПУ

Структурная схема, отражающая основные этапы обмена данными в технологической системе механообработки на базе двухуровневой системы ЧПУ, представлена на рис. 1.

Верхний уровень (ВУ) представляет собой персональный компьютер, функционирующий под операционной системой Windows. Он выполняет терминальную, коммуникационную и, частично, техно-

логическую задачи управления. Решение этих задач не требует режима реального времени.

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

На нижнем уровне решаются задачи в режиме реального времени. Это обстоятельство накладывает специфические ограничения на быстродействие алгоритмов вычисления подачи $F(t)$ для каждого такта управления. Вычисление подачи на нижнем уровне выполняется с применением таблично заданных [8] или аналитически представленных S-образных законов разгона/торможения [7]. Исходными данными для выполнения таких расчетов является план изменения подачи вдоль длины траектории $F(L)$, рассчитанный на верхнем уровне системы ЧПУ. Применение методов адаптивного управления подачей [6] позволяет осуществлять корректировку плана изменения подачи в процессе выполнения программы обработки деталей.

Среди задач ВУ в контексте управления подачей необходимо выделить блок «планирование подачи» - осуществляющий формирование программы изменения контурной скорости движения инструмента вдоль траектории обработки $F(L)$ с учетом

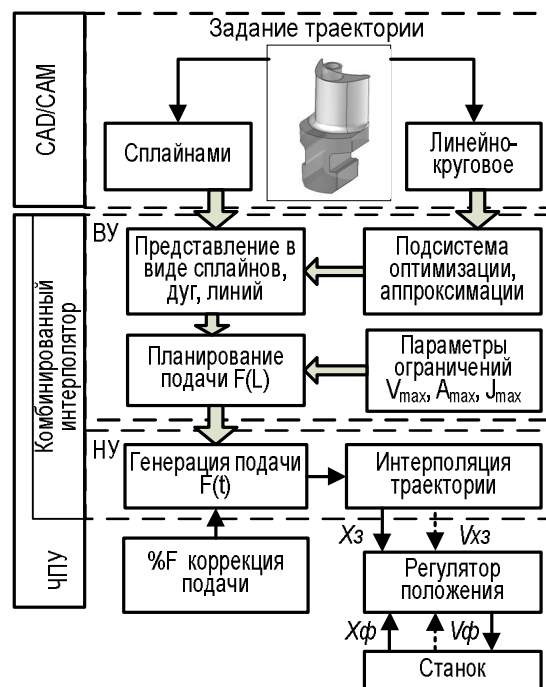


Рис. 1. Структурная схема двухуровневой системы ЧПУ

применяемых S-образных законов разгона/торможения, формы траектории и ограничений оборудования.

Реализация метода планирования подач для неограниченного участка траектории, вплоть до всей управляющей программы, применяемого перед началом выполнения технологической программы позволяет избежать ограничений по времени обработки данных и размеру буфера предварительного просмотра (look-ahead). Отсутствие ограничений по времени и объему обработки данных позволяет проводить анализ траектории движения инструмента любой сложности.

2. Методы задания изменения подачи в кадрах управляющей программы с применением гладких S-образных законов разгона/торможения

Контурная подача обработки программируется в тексте управляющей программы по адресу F для последовательности кадров или каждого кадра в отдельности. При этом технологическая программа не содержит в себе информации о способе и характере изменения подачи при переходе от кадра к кадру или изменения подачи на протяжении кадра. В процессе компиляции исходного текста управляющей программы осуществляется перевод текста программы представленного в виде G-кода во внутренний формат системы ЧПУ. На стадии формирования внутреннего представления управляющей программы на основе анализа формы траектории подсистема предварительного планирования подачи имеет возможность рассчитать для каждого кадра план изменения подачи $F(L)$. При этом осуществляется учет ограничения кинематических и динамических характеристик конкретного станка.

Метод задания изменения подачи в кадрах управляющей программы зависит от формы траектории заданной в кадре. Возможно применение *параметрической* модели [6] или *функциональной* модели [7] задания плана изменения подачи в кадре управляющей программы.

Кадры линейно-круговой траектории характеризуются постоянством геометрических характеристик вдоль длины кадра.

Это обстоятельство позволяет задавать перемещение в кадре с постоянной подачей, а диаграмму изменения подач в кадре задавать двумя параметрами: подачей начала ($F_{НКi}$) и конца ($F_{ККi}$) кадра. Участки изменения подачи в пределах кадра реализуются с применением гладких S-образных законов разгона/торможения.

На рис. 2 приведена типовая диаграмма изменения подачи в пределах кадра. Движение в кадре

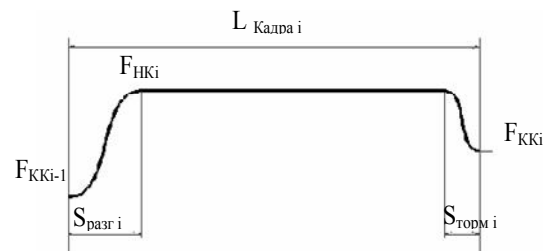


Рис. 2. Изменение подачи на длине кадра при параметрической модели задания плана подач

всегда начинается с подачи, достигнутой в предыдущем кадре ($F_{ККi-1}$). В начале кадра осуществляется разгон до подачи начала кадра ($F_{НКi}$). Движение на протяжении основной части кадра осуществляется на подаче начала текущего кадра $F_{НКi}$. В конце кадра осуществляется снижение подачи до подачи конца текущего кадра ($F_{ККi}$).

Длина участков разгона $S_{разг\ i}$ и торможения $S_{торм\ i}$ зависит от характеристик применяемого S-образного закона разгона/торможения и заданных перепадов подач. Для каждого кадра управляющей программы значения подач $F_{ККi-1}$, $F_{ККi}$, $F_{НКi}$ должны быть такими, чтобы длины кадра $L_{кадра}$ хватило для выполнения изменения подачи.

Кадры траектории обработки заданные эвольвентами [9], сплайнами [7] и другими кривыми характеризуются непрерывным изменением геометрических характеристик вдоль длины кадра. При задании криволинейных кадров можно сформировать участок траектории с несколькими экстремумами по кривизне, что требует формирования плана изменения подач с несколькими участками разгона/торможения в пределах одного кадра. Для такого кадра план изменения подач также может формироваться на основе применения параметрической модели. В этом случае параметры подачи начала $F_{НК}(L_i)$ и конца участка движения $F_{КК}(L_i)$ задаются для отдельных участков кадра вдоль длины перемещения (L_i) внутри кадра. В то время, как для линейно-круговых

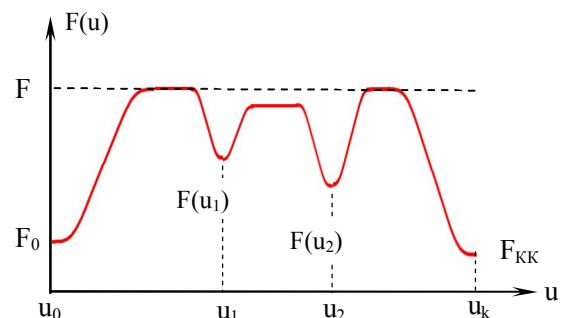


Рис. 3. Изменение подачи на длине криволинейного кадра при параметрической модели задания плана подач

кадров параметры задаются для границ кадра. На рис. 3 приведен пример задания плана изменения подачи для криволинейного кадра с применением параметрической модели.

Формирование плана изменения подачи с помощью непрерывной функции $F(u)$ на полной длине криволинейного кадра (рис. 4) реализуется с помощью функциональной модели плана изменения подачи [7]. В отличие от параметрической модели задания изменения подачи, формирующего симметричный закон разгона/торможения, применение функциональной модели позволяет учитывать неравномерность изменения кривизны траектории. Функциональная модель обеспечивает возможность вычисления контурной подачи для любой точки траектории с учетом локальной кривизны траектории и ограничений кинематических и динамических характеристик конкретного оборудования.

3. Метод предварительного планирования подачи

Разработан метод планирования на основе применения параметрической модели задания подачи в кадре управляющей программы. В соответствии с разделением задач управления подачей в двухуровневой системе формирование плана изменения подач $F(L)$ (см. рис. 1) осуществляется на верхнем уровне системы в процессе анализа участка траектории движения инструмента. Участок траектории при выполнении планирования выбирается из условия завершения движения. План изменения подачи строится последовательно для всех участков, в конце которых по условиям выполнения управляющей программы должна осуществляться остановка инструмента. Для анализируемого участка перемещения инструмента необходимо обеспечивать выполнение управляющей программы на заданной технологической подаче с учетом ограничений кинематических и динамических характеристик оборудования и осуществлять замедление подачи на неопределенном количестве кадров вплоть до полной его остановки в конце участка. Метод планирования подачи состоит из двух этапов.

На втором этапе решается задача замедления подачи в конце участка движения или в любом произвольном кадре рассматриваемого участка.

Заведомо неизвестно количество кадров, в которых необходимо произвести корректировку подачи для выполнения замедления подачи от заданной в программе ($F_{зад}$) до конечной подачи m -го кадра (рис. 5). Осуществляется последовательный перебор кадров от конца к началу программы. В каждом кадре вычисляется подача X_m , X_{m-1} от которой на длине кадра можно затормозиться до подачи, задан-

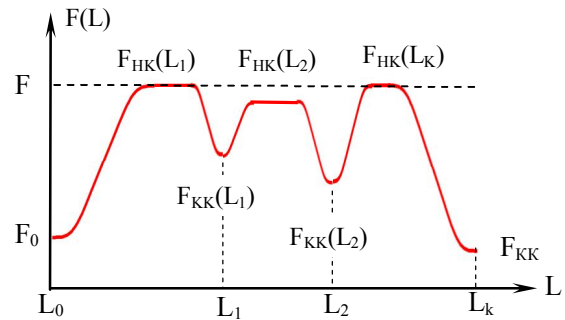


Рис. 4. Изменение подачи на длине криволинейного кадра при функциональной модели задания плана подач

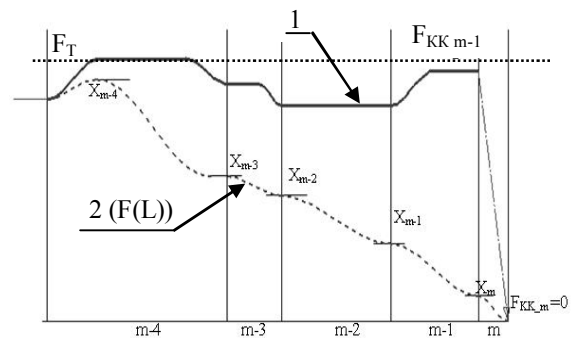


Рис. 5. Этапы построения плана изменения подачи вдоль траектории управляющей программы

ной в конце соответствующего кадра. Вычисленные значения X_m , X_{m-1} принимаются в качестве подачи начала текущего кадра (F_{HKi}) и подачи конца предыдущего кадра (F_{KKi-1}). Под предыдущим понимается кадр в прямом порядке, а не в порядке перебора кадров. В результате при уменьшении заданного перепада подач в кадре будет происходить уменьшение длин участков разгона/торможения, например, как в кадре $m-4$ (см. рис. 5).

При выполнении первого этапа планирования подачи начала и конца кадра выбираются с учетом возможности разгона в пределах кадра. Уменьшение величин и перепада заданных подач в кадре на втором этапе планирования приводит к уменьшению длин участков разгона/торможения. Это обстоятельство автоматически обеспечивает выполнение ранее наложенных ограничений на диаграмму изменения плана подач и выполнение дополнительных проверок не требуется. Результатом второго этапа планирования является скорректированный план изменения подачи, соответствующий линии 2 (см. рис. 5) и соответствует плану изменения подачи $F(L)$.

Рассмотрим второй этап планирования подач. При корректном задании плана изменения подачи, длины кадра должно хватать для выполнения изменения подачи от F_{KKi-1} до подачи текущего кадра F_{HKi} и торможения до подачи конца текущего кадра F_{KKi} (см. рис. 2.). Если длины кадра не хватает для

реализации разгона/торможения до подач, заданных в кадре, то необходимо, сохранив конечную подачу текущего кадра F_{kki} , уменьшить перепады подач заданных в кадре, для уменьшения длин участков разгона/торможения и приведения их в соответствие с длиной текущего кадра. При этом возможны два типа диаграмм изменения скорости, реализуемые при движении на длине кадра.

При торможении на протяжении всего кадра (кадры $m-3, m-2, m-1, m$ рис. 5) необходимо определить подачу начала кадра, от которой можно затормозиться до подачи конца кадра на длине кадра. Эта задача решается в блоке 9 рис. 6.

При ограниченном разгоне с последующим торможением (кадры $m-4$ рис. 5.) необходимо определить подачу, до которой можно разогнаться от подачи конца предыдущего кадра с последующим торможением до подачи текущего кадра на длине кадра. Эта задача решается в блоке 12 рис. 6.

4. Тестирование метода планирования

Разработанный метод предварительного планирования подач применен в двухуровневой высокоскоростной системе ЧПУ при модернизации специализированного длинномерного станка

ФП7СМН2, предназначенного для обработки поясов стрингеров и лонжеронов длиной до 8 м (рис. 7).

Функционирование метода продемонстрируем на примере обработки элемента конструкции пояса стрингера (рис. 8). Траектория обработки состоит из пяти кадров. Два линейных кадра $N1, N5$ соединены тремя дугами окружностей $N2, N3, N4$. Для всего участка обработки задана подача 5000 мм/мин. В конце кадра $N5$ осуществляется полная остановка инструмента.



Рис. 7. Модернизированный станок ФП7СМН2 с двухуровневой высокоскоростной системой ЧПУ

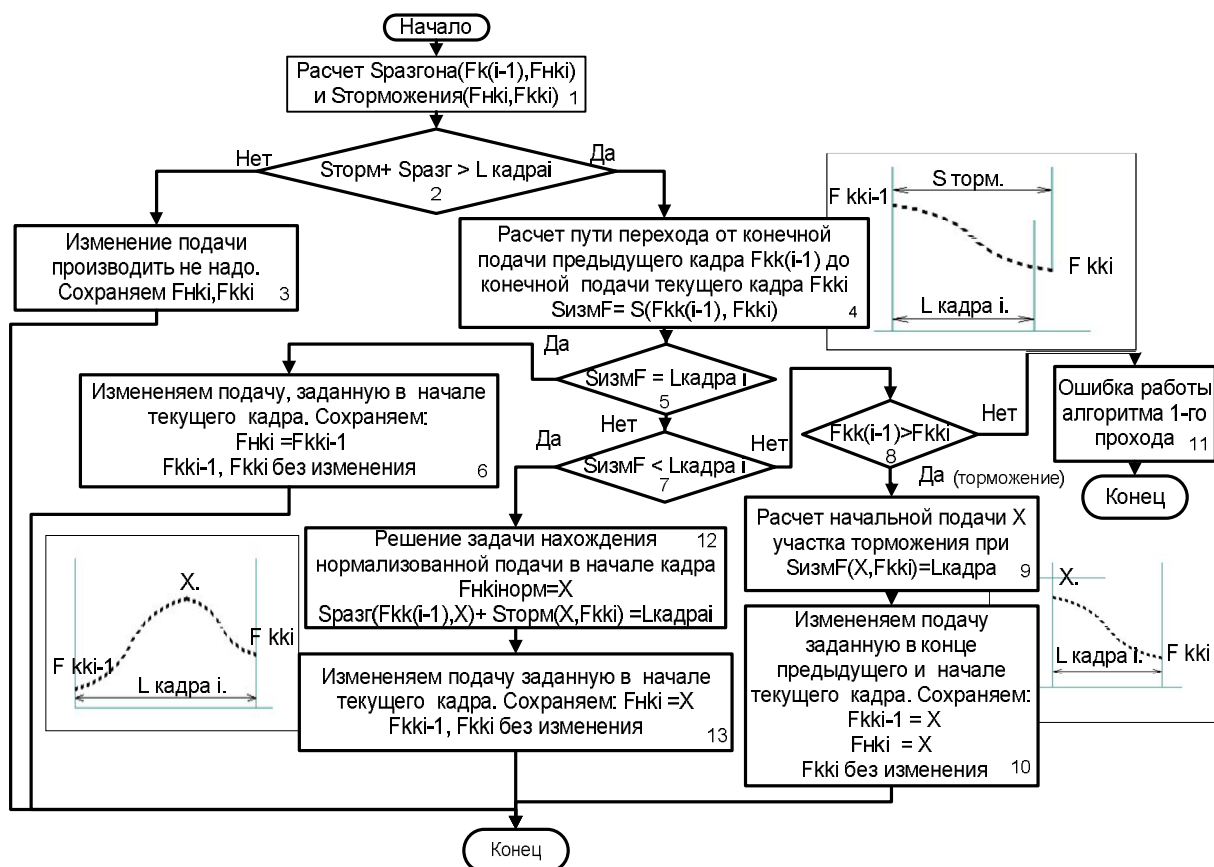


Рис. 6. Алгоритм второго этапа планирования подачи

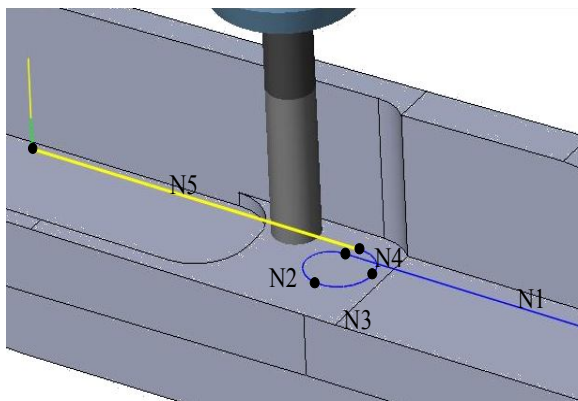


Рис. 8 Траектория обработки элемента конструкции полки стрингера

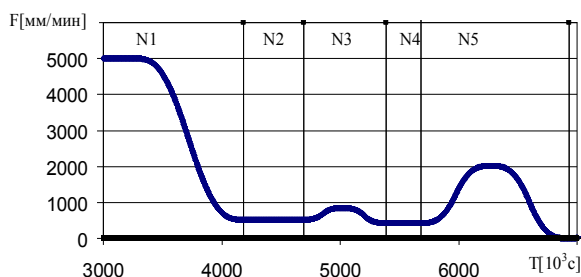


Рис. 9. Изменение подачи на участке обработки элемента конструкции стрингера

На рис. 9 приведен график изменения контурной подачи $F(t)$, рассчитанный нижним уровнем системы ЧПУ в процессе выполнения управляющей программы на модернизированном станке ФП7СМН2. Подсистема планирования подачи выполнила формирование плана изменения подачи $F(L)$, в соответствии с которым обработка кадров N2, N3, N4, N5 выполнена на подаче, которая меньше заданной в управляющей программе.

Снижение подачи в кадрах N2, N4 выполнено из-за ограничения допустимого рывка. В кадре N3 основным оказалось ограничение допустимого ускорения, а в кадре N5 ограничена подача по условию торможения до полного останова в конце кадра.

Применение метода предварительного планирования подач обеспечило возможность наиболее полного учета кинематических и динамических характеристик станка при выполнении обработки деталей продольного силового набора планера самолета.

Заключение

Повышение производительности обработки деталей продольного силового набора планера самолета обеспечивается при модернизации оборудования

путем повышения технологических подач до режимов соответствующих высокоскоростной обработке.

Для обеспечения точности перемещения инструмента на высоких подачах с учетом инерционных, кинематических и динамических характеристик механообрабатывающего станка разработан метод планирования подачи с использованием предварительного просмотра траектории с применением S-образного закона разгона/торможения.

Метод базируется на разделении задач управления подачей в двухуровневой системе ЧПУ и применении параметрической модели задания плана изменения подачи в кадрах управляющей программы. Что позволило выполнять планирование изменения подачи вдоль траектории обработки до начала движения и уменьшить вычислительную нагрузку на нижний уровень системы ЧПУ, функционирующий в режиме реального времени.

Предложенный метод планирования подачи состоит из двух этапов. При выполнении первого этапа планирования подачи начала и конца кадра выбираются с учетом возможности разгона в пределах кадра и возможности движения в кадре с учетом ограничений кинематических и динамических характеристик оборудования. На втором этапе решается задача замедления подачи в конце участка движения или в любом произвольном кадре рассматриваемого участка.

Разработанный метод предварительного планирования подач применен в двухуровневой высокоскоростной системе ЧПУ при модернизации специализированного длинномерного станка ФП7СМН2. Проведено тестирование предложенного метода на примере обработки пояса стрингера. Результаты обработки стрингера подтверждают эффективность метода.

Литература

1. Стратегия модернизации основных производственных фондов предприятий авиационной промышленности [Текст] / А. К. Мялица, Ю. А. Раисов, В. Ф. Сорокин, В. В. Комбаров // Технологические системы. – 2013. – № 62. – С. 32-41.
2. Программно-аппаратный комплекс для исследования алгоритмов и процессов в станках с ЧПУ [Текст] / В. С. Кривцов, Е. В. Комбарова, Р. В. Варнас, Е. А. Аксенов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2011. – № 4(81). – С. 5 – 11.
3. Мартинов, Г. М. Алгоритм опережающего просмотра Look-ahead в современных системах ЧПУ и параметры его настройки [Текст] / Г. М. Мартинов // Стружка. – 2007. – № 18. – С. 52-54.

4. Документация ЧПУ Fagor 8055 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cncsystem.com/site/2/uploads/o/2012/06/8b47d6e7fd060d7ac07161263f92a15c.pdf>. – 1.06.2015.

5. Look-ahead algorithm with whole S-curve acceleration and deceleration [Text] / Y. H. Chen, J. Xudong, T. Yong, W. Hongxing. – Access mode: <http://ade.sagepub.com/content/5/974152>. – 1.06.2015.

6. Комбарова, Е. В. Адаптивное управление скоростью обработки в системе ЧПУ с предварительным планированием подачи на основе гладких S-образных законов разгона-торможения [Текст] / Е. В. Комбарова, В. Ф. Сорокин, В. В. Комбаров // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2013. – № 4(101). – С. 21 – 27.

7. Кривцов, В. С. Проблемы сплайновой интерполяции с гладкоограниченными кинематическими параметрами движения в задачах числового программного управления высокоскоростным оборудованием [Текст] / В. С. Кривцов, В. В. Комбаров, В. Ф. Сорокин // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2012. – № 9 (96). – С. 11 – 19.

8. Раисов, Ю. А. Управление скоростью приводов подачи по S-образным законам для систем CNC [Текст] / Ю. А. Раисов, И. В. Бычков, В. В. Комбаров // *Інформаційно-керувачі системи на залізничному транспорті*. – 2006. – № 1 (57). – С. 24 – 28.

9. Сорокин, В. Ф. Синтез эвольвентных траекторий высокоскоростной расфрезеровки отверстий [Текст] / В. Ф. Сорокин, Т. П. Бут, В. В. Комбаров // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2013. – № 7. – С. 33-38.

Поступила в редакцию 1.06.2015, рассмотрена на редколлегии 23.06.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проректор по НИР А. В. Гайдачук, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

МЕТОД ПЛАНУВАННЯ ПОДАЧ ДЛЯ СИСТЕМИ ЧПК З ВИКОРИСТАННЯМ S-ПОДІБНИХ ЗАКОНІВ РОЗГІНУ/ГАЛЬМУВАННЯ

О. В. Комбарова

Розглянуто задачу планування подачі (look-ahead) у системі ЧПК механообробного обладнання. Проведено аналіз існуючих методів планування подачі, які виконують перегляд траєкторії переміщення інструменту на кілька кадрів вперед в реальному часі. Розглянуто поділ завдань управління подачею у дворівневій системі ЧПК. Розглянуто параметрична і функціональна моделі завдання плану зміни подачі в кадрі керуючої програми. Розроблено метод планування подачі з використанням попереднього перегляду траєкторії із застосуванням S-подібного закону розгону/гальмування. Проведено тестування запропонованого методу на прикладі обробки пояса стрингера. Отримані результати підтверджують ефективність методу.

Ключові слова: високошвидкісна обробка, система ЧПК, look-ahead, S-подібні закони розгону/гальмування.

FEEDRATES PLANNING METHOD FOR CNC SYSTEM WITH USING S-SHAPED ACCELERATION/DECELERATION LAWS

E. V. Kombarova

Feedrate planning (look-ahead) task in the CNC machining equipment is considered. The analysis of existing feedrate planning methods that performs tool-path view a few blocks forward in real time is carried out. The dividing of feedrate control tasks into two-level CNC system is considered. The parametric and functional feedrate profile models into block are considered. The feedrate planning method with using trajectory prior view with S-shaped acceleration/deceleration laws is developed. Testing of the proposed method on example of stringer belt machining is carried out. The results confirms method effectiveness.

Key words: high-speed milling, CNC system, look-ahead, feedrate planning, S-shaped acceleration/deceleration laws.

Комбарова Елена Владимировна – аспирант каф. технологии производства летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: kombarova.helen@mail.ru.