

УДК 621.9.06-529:621.91

**Е.В. КОМБАРОВА, В.Ф. СОРОКИН, В.В. КОМБАРОВ***Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СКОРОСТЬЮ ОБРАБОТКИ В СИСТЕМЕ ЧПУ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ ПЛАНИРОВАНИЕМ ПОДАЧИ НА ОСНОВЕ ГЛАДКИХ S-ОБРАЗНЫХ ЗАКОНОВ РАЗГОНА/ТОРМОЖЕНИЯ**

*Рассмотрены задачи адаптивного управления контурной подачей при необходимости оперативной коррекции технологических режимов в процессе обработки. Для обработки с числовым программным управлением (ЧПУ) в последнее десятилетие стало важным применение алгоритмов S-образного разгона/торможения, реализующих плавность перемещений режущего инструмента, что обеспечивает качество и сокращение времени обработки. Рассмотрены особенности управления подачей в кадрах линейно-кругового интерполятора в системе ЧПУ с предварительным планированием подачи. Метод адаптивного управления подачей основан на использовании масштабирования законов разгона/торможения. Разработаны методы гладкого изменения подачи и оперативной коррекции диаграммы контурной подачи кадра в зависимости от заданных технологических режимов при оперативном изменении процента подачи. Разработан метод адаптивного управления контурной подачей с учетом ограничений максимальных скоростей осей. Предложенные методы обеспечивают максимальное приближение скоростей механической обработки к технологически заданным режимам, что способствует повышению производительности обработки.*

**Ключевые слова:** высокоскоростное фрезерование, система ЧПУ, S – образный разгон/торможение, подача, процент подачи.

**Введение**

Чрезвычайная актуальность повышения эффективности механообработки в современном авиационном производстве за счет применения технологии высокоскоростного фрезерования (ВСФ) обуславливает необходимость исследований алгоритмов и процессов, происходящих в оборудовании с ЧПУ.

Противоречия между высокими скоростями и инерционными характеристиками элементов станка требуют корректного управления скоростью перемещения рабочих органов. Алгоритмы планирования подачи (look-ahead) являются ключевыми в реализации ВСФ. Различают алгоритмы оперативного планирования подачи [5], осуществляющие планирование в реальном времени при управлении движением рабочих органов и алгоритмы предварительного планирования подачи [1, 2, 6, 7], осуществляющие планирование до начала управления движением.

Преимущество предварительного планирования подачи состоит в том, что существует возможность заранее просмотреть всю траекторию движения инструмента и подкорректировать заданные значения подач для отдельных участков траектории в соответствии с ограничениями параметров станка. Анализ траектории не ограничен жесткими требованиями к времени его выполнения, что позволяет

использовать наиболее полные модели ограничений [2]. Однако жесткое планирование графика изменения подачи вдоль траектории затрудняет реализацию оперативного вмешательства в процесс выполнения управляющей программы.

Оперативное изменение графика запланированной подачи вдоль траектории обеспечивается алгоритмами адаптивного управления подачей в системе ЧПУ. Адаптивное управление подачей необходимо при решении следующих задач:

- выполнение оперативного изменения технологических режимов обработки заданием процента подачи %F;
- недопущение превышения ограничений осевых характеристик станка, например, превышение максимально допустимой осевой подачи при выполнении управляющей программы при завышенном проценте подачи;
- реагирование на предельные состояния смежных агрегатов, например снижение подачи при превышении нагрузки шпинделя.

Необходимость гладкости изменения кинематических характеристик движения при ВСФ [4] требует высокой точности выхода по скорости в конец интерполяционного кадра. К примеру, запаздывание по выполнению торможения в конце кадра может привести к сбою в управлении электроприводом, что чревато получением брака при обработке

детали. Преждевременное торможение приводит к значительному по времени «простою» в конце кадра, что приводит к повышенному износу инструмента.

Применение S-образных законов разгона/торможения [2, 3] обеспечивает плавность изменения контурной подачи, но значительно усложняет выполнение точного по скорости выхода в конец кадра. При адаптивном управлении подачей в системе ЧПУ с предварительным планированием на основе гладких S-образных законов разгона/торможения необходимо обеспечить точный по скорости выход в конец кадра. Максимальное приближение контурной подачи к заданной определяет возможность обеспечения скорости обработки при программировании ее с технологически обоснованными режимами.

Целью статьи является разработка метода адаптивного управления контурной подачей в системе ЧПУ с предварительным планированием подачи на основе гладких S-образных законов разгона/торможения.

### 1. Управление подачей в кадрах линейно-кругового интерполятора с применением гладких S-образных законов разгона/торможения

Представление траектории инструмента в виде набора кадров линейно-круговых перемещений широко распространено в практике применения оборудования с ЧПУ. 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 ( $F_{ККи}$ ) кадра. Участки изменения подачи в пределах кадра реализуются с применением гладких S-образных законов разгона/торможения.

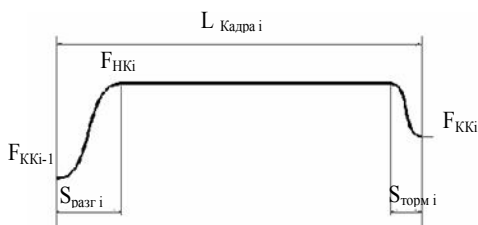


Рис. 1. Диаграмма изменения подачи на длине кадра

На рис. 1 приведена типовая диаграмма изменения подачи в пределах кадра. Движение в кадре всегда начинается с подачи, достигнутой в предыдущем кадре ( $F_{ККи-1}$ ). 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 ( $F_{ККи}$ ).

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 задаваемых подач  $F_{ККи-1}$ ,  $F_{ККи}$ ,  $F_{НКi}$  должны быть такими, чтобы длины кадра  $L_{кадра}$  хватило для выполнения изменения подачи.

Система предварительного планирования подачи осуществляет обработку исходного текста управляющей программы в G-кодах и формирует исполняемый код программы, в котором для каждого кадра задаются параметры диаграммы изменения подачи. Подача начала кадра  $F_{НКi}$  задается таким образом, чтобы в начале кадра осуществлялось движение с постоянной скоростью (рис. 2,а) или разгон от скорости, достигнутой в конце предыдущего кадра  $F_{ККи-1}$  до скорости, заданной в начале текущего кадра  $F_{НКi}$  (рис. 2,б). Задание подачи начала кадра  $F_{НКi}$  меньше подачи конца предыдущего кадра  $F_{ККи-1}$ , приводящее к торможению в начале кадра категорически не допускается (рис. 2,в), так как это может приводить к поломке инструмента.

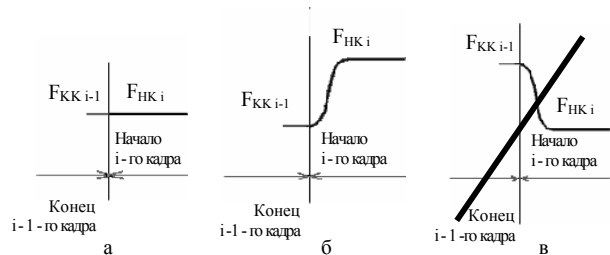


Рис. 2. Задание подачи в начале кадра

Подача в конце кадра  $F_{ККи}$  должна задаваться таким образом, чтобы в конце кадра осуществлялось движение с подачей, достигнутой в текущем кадре (рис. 3,а) или осуществлялось торможение (рис. 3,б). Задание разгона в конце кадра (рис. 3,в) категорически не допускается.



Рис. 3. Задание подачи в конце кадра

Необходимо подчеркнуть, что переход из кадра в кадр должен выполняться плавно, без резких скачков по подаче. Для выполнения этих условий на скорости  $F_{ККи}$ ,  $F_{НКi}$  накладывается ряд ограничений.

В качестве подачи начала кадра ( $F_{HKi}$ ) выбирается наименьшая из перечисленных:

- подача, заданная в кадре исходного текста текущего кадра ( $F_i$ );
- подача, ограниченная максимально допустимым центробежным ускорением, при движении по дуге окружности в текущем кадре ( $F_{Ri}$ );
- подача, допустимая из условия ограничения подачи по осям ( $F_{маxi}$ );
- подача, достижимая при постоянном разгоне от подачи конца предыдущего кадра  $F_{KKi-1}$  на длине кадра.

В качестве подачи конца кадра ( $F_{KKi}$ ) выбирается наименьшая из перечисленных:

- подача, принятая в качестве подачи начала кадра ( $F_{HKi}$ );
- подача, допустимая из условия перехода от текущего к следующему кадру при изменении направления вектора подачи ( $F_{\Delta ai-1,i}$ ) с учетом ограничения мгновенных ускорений и рывков по каждой оси управления;
- подача, заданная в кадре исходного текста управляющей программы текущего кадра ( $F_i$ );
- подача, ограниченная максимально допустимым центробежным ускорением и осевыми рывками при движении по дуге окружности в текущем кадре ( $F_{Ri}$ );
- подача, допустимая из условия ограничения подачи по осям ( $F_{маxi}$ ).

Расчет подачи по заданной диаграмме осуществляется системой ЧПУ в режиме реального времени при выполнении обработки изделия. Пройденный путь по траектории при изменении подачи в соответствии с заданной диаграммой определяется выражением [2]

$$L = \int_0^T F_{тек}(t) dt \neq L_{кадра}, \quad (1)$$

где  $F_{тек}(t)$  – потактовое изменение подачи (заданная диаграмма изменения подачи в кадре);

$T$  – время обработки кадра.

Время ( $T$ ) обработки кадра дискретно в связи с дискретностью цикла управления и определяется выражением:

$$T = m \cdot \tau, \quad (2)$$

где  $\tau$  – время одного такта СЧПУ (например, 0.001 сек);

$m$  – количество тактов (целое положительное число).

В общем случае пройденный путь по диаграмме не равен длине кадра из-за дискретности времени обработки кадра (1). Для компенсации этой погрешности в системе расчета подачи применяется линейный коэффициент масштабирования диаграммы подач  $kl$ , обеспечивающий точный выход по скоро-

сти в конец кадра при кратности времени выполнения кадра по тактам цикла. Коэффициент рассчитывается по выражению:

$$kl = L_{кадра} / \left( \int_0^T F_{тек}(t) dt \right). \quad (3)$$

Таким образом, при сохранении времени обработки кадра, контурная подача в каждом такте интерполяции определяется выражением

$$F_{конт} = F_{тек} \cdot kl. \quad (4)$$

Опыт эксплуатации систем ЧПУ [1, 3] подтверждает эффективность линейного масштабирования заданной диаграммы изменения подачи в кадре для линейно-круговой траектории.

## 2. Управление подачей при оперативном изменении процента подачи

В процессе обработки деталей по управляющей программе возникает необходимость коррекции технологических режимов обработки. Изменение скорости резания выполняется с помощью изменения  $\%S$ , что приводит к изменению скорости вращения шпинделя. Изменение нагрузки на инструмент достигается изменением процента подачи  $\%F$ , задаваемым с пульта оператора, что приводит к изменению скорости перемещения рабочих органов (рис. 4).

При использовании процента подачи осуществляется масштабирование диаграммы изменения подачи на соответствующий коэффициент  $\%Fz$ . В этом случае выражение для вычисления контурной подачи для каждого такта интерполяции приводится к виду:

$$F_{конт\_ \%} = F_{тек} \cdot kl \cdot \%Fz, \quad (5)$$

где  $\%Fz$  – действующий коэффициент процента подачи (безразмерная величина в интервале 0 ... 1,2).

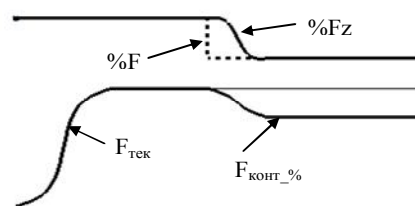


Рис. 4. Диаграмма подачи при изменении  $\%F$

При изменении процента подачи для получения плавного изменения контурной подачи  $F_{конт\_ \%}$  необходимо обеспечить плавность изменения коэффициента действующего процента подачи  $\%Fz$ . Применение гладких S-образных функций обеспечивает плавное изменение действующего процента подачи от текущего значения до заданного.

Изменение действующего процента подачи  $\%Fz$

выполняется в процессе управления в реальном времени в соответствии со следующими правилами:

- расчет и изменение  $\%Fz$  выполняется, если нет запрета на его изменение;
- $\%Fz$  не меняется при торможении в кадре;
- для каждого такта управления расчет  $\%Fz$  выполняется в начале интерполяционного цикла до выполнения расчета скорости текущего такта  $F_{\text{тек}}$ ;
- параметры S-образной функции изменения  $\%Fz$  определяются с учетом величины допустимого ускорения и рывка для выполняемого кадра.

Запрет на изменение  $\%Fz$  устанавливается системой ЧПУ при выполнении некоторых функций, например, при нарезании резьбы резцом или метчиком.

Изменение  $\%Fz$  не допускается на участках торможения. Для выполняемого кадра торможение осуществляется с параметрами максимально допустимых значений ускорения и рывка. При уменьшении  $\%F$  выполнение масштабирования диаграммы изменения подач приводит к дополнительному увеличению значений ускорения и рывка и соответствующему ухудшению точности позиционирования. Помимо этого, увеличение интенсивности торможения приводит к преждевременному выходу на подачу конца кадра, что может приводить к длительному выходу в конечную точку кадра на подаче конца кадра, что недопустимо по технологическим причинам. При увеличении  $\%F$  выполнение масштабирования диаграммы изменения подач приводит к увеличению необходимых тормозных путей и, соответственно, невозможности выхода в конце кадра на заданную подачу. По этой причине целесообразно завершить торможение в конце кадра в соответствии с заданной диаграммой изменения подачи в кадре и изменение  $\%Fz$  выполнить при обработке следующего кадра.

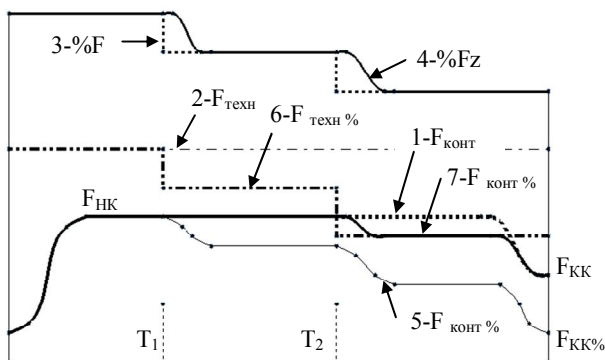


Рис. 5. Варианты изменения подачи в кадре в зависимости от изменения  $\%F$

Прямое применение выражения (5) для расчета контурной подачи по базовой диаграмме реализует простейший метод управления подачей при оперативном изменении процента подачи. Метод заключается в пропорциональном изменении всех задан-

ных подач в кадре. Достоинством метода является простота реализации. Недостатком является значительное увеличение времени обработки по программе при значениях  $\%Fz$  меньше 100%. На рис. 5 приведен пример изменения текущей подачи в кадре при изменении  $\%Fz$ , характерный для этого способа. В приведенном примере на стадии предварительного планирования подачи сформирована диаграмма изменения подачи (кривая 1 рис.5) со значением подачи в кадре  $F_{\text{НК}i}$  меньше технологической подачи  $F_{\text{техн}}$ , заданной в исходном тексте управляющей программы (кривая 2 рис.5). Ступенчатое изменение заданного  $\%F$  (кривая 3 рис.5) приводит к плавному изменению действующего процента подачи  $\%Fz$  (кривая 4 рис.5). Итоговая диаграмма контурной подачи (кривая 5 рис.5) задает значения подачи значительно меньше технологических подач с учетом процента  $\%F$  (кривая 6 рис.5). Это означает, что на протяжении всего кадра обработка будет осуществляться на режимах меньших заданных технологическим. Снижение подачи в конце кадра, как правило, определяется условиями сопряжения кадров и осуществляется в ущерб технологическим требованиям. Дополнительное снижение подачи в конце кадра до  $F_{\text{КК}i\%}$  приводит к уменьшению производительности обработки и ухудшению условий работы режущего инструмента при уменьшении толщины срезаемой стружки.

В работе [2] предложена постановка задачи разработки рационального метода управления подачей при изменении  $\%F$ . При возникновении необходимости оперативной коррекции рабочей подачи система ЧПУ должна в реальном масштабе времени корректировать параметры диаграммы изменения контурной подачи кадра с учетом заданной технологической подачи.

Предложенный подход реализован в линейно-круговом интерполяторе с применением гладких S-образных законов разгона/торможения. При изменении  $\%Fz$  выполняется коррекция параметров диаграммы, таких как, подача в кадре  $F_{\text{НК}i}$  и подача в конце кадра  $F_{\text{КК}i}$  с учетом технологической подачи  $F_{\text{техн}\%}$ , скорректированной на величину действующего процента подачи

$$F_{\text{техн}\%} = F_{\text{техн}} \cdot \%Fz. \quad (6)$$

Подача начала текущего кадра  $F_{\text{НК}i\%}$  и подача конца кадра  $F_{\text{КК}i\%}$  для скорректированной диаграммы выбирается в соответствии с выражениями (7) и (8). При коррекции подачи конца кадра учитываются технологические подачи и параметры диаграмм текущего и последующего кадров.

$$F_{\text{НК}i\%} = \min \{ F_{\text{НК}i}, F_{\text{техн}\%_i} \}, \quad (7)$$

$$F_{\text{КК}i\%} = \min \{ F_{\text{КК}i\%}, F_{\text{техн}\%_i}, F_{\text{техн}\%_{i+1}}, F_{\text{НК}i+1} \}. \quad (8)$$

Скорректированная диаграмма изменения подачи при изменении %Fz для ранее рассмотренного примера обеспечивает наибольшее приближение к заданному технологическому режиму обработки (кривая 7 рис.5). При изменении %Fz в момент времени T1 технологическая подача с учетом процента подачи остается выше допустимой подачи движения в кадре, поэтому изменение подачи не выполняется. Изменение %Fz в момент времени T2 приводит к формированию технологической подачи по величине меньше подачи исходной диаграммы, поэтому осуществляется уменьшение подачи. Технологическая подача на момент конца текущего кадра задана выше подачи конца кадра исходной диаграммы и, соответственно, подача конца кадра в итоговой диаграмме остается неизменной. Сформированная диаграмма обеспечивает более высокий уровень подач при одновременном удовлетворении технологическим требованиям.

Предложенный метод обеспечивает адаптивное управление подачей при изменении процента подачи. Метод пересчета параметров диаграммы в реальном масштабе времени позволяет осуществлять ограничение контурной подачи, в соответствии с изменением %F на участках со значениями подач, превышающими технологически заданную подачу  $F_{техн\%_j}$ , и не трогать участки, на которых подача ниже технологической. Это приводит к увеличению средней подачи движения и повышению скорости и производительности обработки.

### 3. Управление подачей при превышении ограничений осевых характеристик станка

В системе ЧПУ траектория движения инструмента задается в  $p$ -мерном Римановом пространстве, где  $p \geq 2$  – количество осей обработки. В процессе управления происходит проецирование заданной контурной подачи  $F_{конт\%}$  на оси перемещения рабочих органов. Таким образом, формируется скорость перемещения оси  $F_{инт\_j}$ , где  $j$  – номер интерполируемой оси ( $j=1,2,\dots,p$ ) (рис. 6). Система предварительного планирования подачи обеспечивает корректное планирование для режима исполнения управляющей программы на 100% подачи, так, что скорости интерполяционных перемещений осей не превышают максимально допустимых.

$$F_{инт\_j} \leq F_{max\_j}. \quad (9)$$

Однако, при выполнении управляющей программы с процентом подачи выше 100% возможно задание режима движения с превышением осевых ограничений параметров станка, например, максимально допустимой скорости перемещения оси. В случае такого превышения необходимо уменьшать

контурную подачу  $F_{конт\%}$  до величины  $F_{конт\_MF}$ , при которой соответствующая интерполируемая ось будет перемещаться со скоростью  $F_{инт\_MF}$ , соответствующей максимальной (рис. 6).

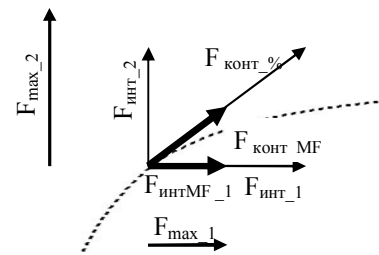


Рис. 6. Формирование подач интерполируемых осей

Реализован метод коррекции контурной подачи, обеспечивающий недопущение превышения ограничений осевых характеристик станка по характеристике максимально допустимой скорости оси. Осуществляется масштабирование диаграммы изменения подачи на величину  $K_{max\_F}$ , необходимую для удовлетворения ограничения.

По данным текущего такта управления рассчитывается долевой коэффициент ( $K_{F\_j}$ ), определяющий степень превышения скорости для каждой интерполируемой оси:

$$K_{F\_j} = \begin{cases} (F_{инт\_j}) / (F_{max\_j}), & F_{инт\_j} > F_{max\_j}; \\ 1, & F_{инт\_j} \leq F_{max\_j}, \end{cases} \quad (10)$$

где  $F_{инт\_j}$  – текущая интерполяционная скорость оси;

$F_{max\_j}$  – максимально допустимая скорость оси.

Общий коэффициент ограничения контурной подачи по максимальным скоростям осей  $K_{max\_F}$  определяется как наименьшая величина долевого коэффициента для всех интерполируемых осей:

$$K_{max\_F} = \min_{1 \leq j \leq p} (K_{F\_j}). \quad (11)$$

Коэффициент ограничения подачи  $K_{max\_F}$  вычисляется после завершения интерполяции и используется при расчетах в следующем цикле управления (рис. 7)

Контурная подача с учетом ограничения максимальных скоростей интерполируемых осей вычисляется по выражению

$$F_{конт\_MF} = F_{конт\%} \cdot K_{max\_F} = F_{тек} \cdot kl \cdot \%Fz \cdot K_{max\_F}. \quad (12)$$

Приведенные выше соотношения реализуют пороговое ограничение интерполируемой подачи. На рис. 8 график интерполируемой подачи  $F_{инт\_MF(1)}$  резко изменяется и остается на уровне ограничения  $F_{max\_1}$ , что приводит к скачку ускорения и рывка в момент ограничения подачи.

Плавный выход на ограничение реализуется модификацией предложенного метода. Для каждой оси задается три диапазона скоростей (рис. 8).

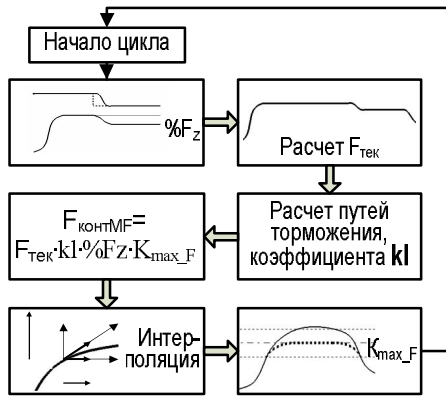


Рис. 7. Расчет коэффициента ограничения  $K_{max\_F}$

Границы диапазонов определяются скоростями  $F_1$ ,  $F_2$

$$F_1 = F_{max\_j} - \delta_j, \quad (13)$$

$$F_2 = F_{max\_j} + \delta_j, \quad (14)$$

где  $\delta_j$  – величина интервала, допустимого приближения к максимальной скорости оси.

Верхняя граница диапазона №1 соответствует скорости  $F_1$ . В этом диапазоне скорость далека от максимальной, и нет необходимости выполнения коррекции контурной подачи.

В диапазоне №2 на интервале скоростей от  $F_1$  до  $F_2$  интерполяционная скорость оси близка, либо незначительно превышает максимально допустимую скорость. В этом диапазоне выполняется плавное ограничение контурной подачи.

В диапазоне №3 при превышении границы  $F_2$  интерполяционная скорость оси значительно превышает максимально допустимую. В этом диапазоне контурная подача ограничивается по уровню максимальной скорости оси.

Метод реализуется при применении соотношений (15) и (16). Величина  $\Delta F_j$  определяет превышение интерполяционной подачи над нижней границей интервала ограничения ( $F_1$ ). Коэффициент  $K(\Delta F_j)$  обеспечивает плавное изменение подачи в интервале ограничения. Коэффициент  $K(\Delta F_j)$  принимает значения в интервале от 0 до 0,5 при изменении  $\Delta F_j$  от 0 до  $2 \cdot \delta$  по гладкой S-образной функции.

$$\Delta F_j = F_{инт\_j} - F_{max\_j} + \delta. \quad (15)$$

$$K_{F\_j} = \begin{cases} 1, & \Delta F_j \leq 0; \\ \frac{F_{max\_j} - \delta + (1 - K(\Delta F_j)) \cdot \Delta F_j}{F_{инт\_j}}, & \delta < \Delta F_j < 2 \cdot \delta; \\ \frac{F_{max\_j}}{F_{инт\_j}}, & \Delta F_j \geq 2 \cdot \delta. \end{cases} \quad (16)$$

Общий коэффициент ограничения контурной подачи по максимальным скоростям осей  $K_{max\_F}$  определяется аналогично ранее рассмотренному мето-

ду, по выражению (11).

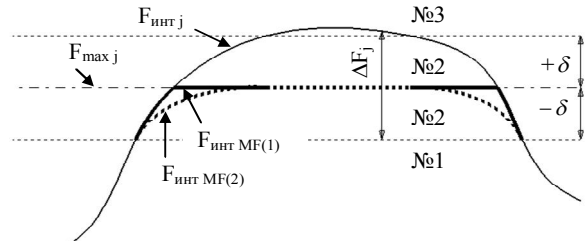


Рис. 8. Ограничение подачи интерполируемой оси

На рис.8 приведен результат расчета интерполяционного перемещения при выполнении управляющей программы на завышенном проценте подачи. Диаграмма изменения интерполяционной скорости движения оси  $F_{интMF(2)}$  имеет гладкий участок выхода на ограничение. Таким образом, предложенный метод коррекции контурной подачи, позволяет осуществлять в режиме реального времени адаптивное управление с учетом ограничений максимальных осевых подач и реализует гладкое S-образное приближение к уровню ограничения подачи.

### Заключение

Разработан метод адаптивного управления подачей в системе ЧПУ с предварительным планированием подачи на основе гладких S-образных законов разгона/торможения.

Возможность масштабирования S-образных законов разгона/торможения положена в основу метода адаптивного управления подачей в ситуациях, требующих такого управления. Введение в алгоритм вычисления контурной подачи коэффициентов, вычисляемых с учетом кинематических и технологических ограничений, позволяет осуществлять различные задачи адаптации контурной подачи.

Разработаны:

- метод гладкого изменения подачи при выполнении изменения  $\%F$ ;

- метод коррекции в реальном масштабе времени диаграммы контурной подачи кадра с учетом заданной технологической подачи при выполнении изменения  $\%F$ ;

- метод коррекции в оперативном режиме контурной подачи, обеспечивающий гладкое адаптивное управление контурной подачей с учетом ограничений максимальных осевых подач. Ограничение подачи по величине максимальной скорости оси.

Реализация разработанных методов адаптивного управления контурной подачей обеспечивает точный выход по скорости в конец кадра при кратности времени выполнения кадра по тактам цикла. Разработанные методы обеспечивают максимальное приближение скоростей обработки к технологически заданным режимам, что способствует повышению производительности обработки.

## Литература

1. 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.
2. 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.
3. Варнас, Р.В. Применение технологии высокоскоростного фрезерования на модернизированном оборудовании с ЧПУ [Текст] / Р.В. Варнас, В.В. Комбаров // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2009. – № 9 (66). – С. 26–31
4. Сорокин, В.Ф. Влияние математических параметров гладких траекторий высокоскоростной

обработки на кинематические параметры движения рабочих органов оборудования [Текст] / В.Ф. Сорокин, В.В. Комбаров // *Прогрессивные технологии и системы машиностроения: междунар. сб. научных работ*. – Донецк: ДонНТУ, 2012. – № 1,2 (44). – С. 231–237.

5. Beudaert, X. Feedrate interpolation with axis jerk constraints on 5-axis NURBS and G1 tool path [Text] / X. Beudaert, S. Lavernhe, C. Tournier // *International J. of Machine Tools & Manuf.* – 2012. – Vol. 57. – P. 73–82.

6. Heng, M. Design of a NURBS Interpolator with minimal feed fluctuations and continuous feed modulation capability [Text] / M. Heng, K. Erkorkmaz // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2010. – Vol. 50(3). – P. 281–293.

7. Chang, Y.F. Design and implementation of look-ahead linear jerk filter for a computerized numerical controlled machine [Text] / Y.F. Chang, T.G. Nguyen, C.P. Wang // *Control Engineering Practice*. – 2010. – Vol.18. – P. 1399–1405.

Поступила в редакцию 31.05.2013, рассмотрена на редколлегии 29.06.2013

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

### АДАПТИВНЕ УПРАВЛІННЯ ШВИДКІСТЮ ОБРОБКИ В СИСТЕМІ ЧПУ З ПОПЕРЕДНІМ ПЛАНУВАННЯМ ПОДАЧІ НА ОСНОВІ ГЛАДКИХ S-ПОДІБНИХ ЗАКОНІВ РОЗГОНУ ГАЛЬМУВАННЯ

*О.В. Комбарова, В.Ф. Сорокин, В.В. Комбаров*

Розглянуто завдання адаптивного управління контурною подачею при необхідності оперативної корекції технологічних режимів у процесі обробки. Для обробки з числовим програмним управлінням (ЧПУ) в останнє десятиріччя стало важливим використання алгоритмів S-подібного розгону/гальмування, які реалізують плавність переміщень ріжучого інструменту, забезпечують якість та скорочення часу обробки. Розглянуто особливості управління подачею в кадрах лінійно-колового інтерполлятора в системі ЧПУ з попереднім плануванням подачі. Метод адаптивного управління подачею заснований на використанні масштабування законів розгону/гальмування. Розроблено методи гладкої зміни подачі та оперативної корекції діаграми контурної подачі кадру в залежності від заданих технологічних режимів при оперативній зміні відсотка подачі. Розроблено метод адаптивного управління контурною подачею з врахуванням обмежень максимальних вісьових швидкостей. Запропоновані методи забезпечують максимальне наближення швидкостей механічної обробки до технологічно заданих режимів, що сприяє підвищенню продуктивності обробки.

**Ключові слова:** ВШФ, система ЧПК, S-подібний розгін / гальмування, подача, відсоток подачі.

### ADAPTIVE CONTROL OF SPEED MACHINING IN CNC SYSTEM WITH PRIOR PLANNING FEEDRATE BASED ON SMOOTH S-CURVE LAWS OF ACCELERATION AND DECELERATION

*O.V. Kombarova, V.F. Sorokin, V.V. Kombarov*

Adaptive control feedrate tasks when need of technological mode operational correction in machining process are considered. Using of S-curve acceleration and deceleration algorithms has become important for computer numerical control (CNC) machining in recent decades because it provides smoother feedrate motions for cutting tools, can thus maintain the machining quality and shorten the machining time. Feed control features in blocks of linearly circular interpolator in a CNC system with prior planning feedrates are considered. Adaptive control feedrate method is based on scaling of the acceleration/deceleration laws. Methods for smooth changing feedrates and operational correction diagram of block feedrate depending on given technological modes at operational changing feedrate percentage are developed. Method of adaptive control contour feed with maximal axis feed limits is developed. Proposed methods provide maximal approach of machining speed to technologically given modes that enables increasing machining productivity.

**Key words:** HSC, CNC system, S-curve acceleration and deceleration (ACC/DEC), feed percentage.

**Комбарова Елена Владимировна** – аспирант кафедры технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: kombarenok@mail.ru.

**Сорокин Владимир Федорович** – д-р техн. наук, доцент кафедры технологии производства авиационных двигателей, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: sovladf@ukr.net.

**Комбаров Владимир Викторович** – науч. сотр. кафедры технологии производства летательных аппаратов, руководитель центра САПР и ИТ, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: kombarov1@mail.ru.