

мосома) имеет поле площадью, пропорциональной значению функции пригодности. Колесо вращалось столько раз, сколько вариантов необходимо для следующей генерации (поколения), всякий раз останавливаясь напротив конкретного варианта.

К отобранным таким образом хромосомам далее применяли генетический оператор кроссовера (скрещивания). В простейшем случае для случайно выбранной пары назначается случайное число  $k \in \{1, 2, \dots, n-1\}$ , называемое местом (сайтом) кроссовера, после которого участки этих двух хромосом с вероятностью  $P_{\text{кр}}$  меняются местами. Кроссовер отвечает за смешивание информации, его вероятность обычно принимается  $P_{\text{кр}} = 0,6$ . Процесс повторялся для всех остальных хромосом текущей популяции  $S(t)$ , пока она не оказывалась пустой.

После кроссовера к хромосомам-вариантам применялся генетический оператор мутации, состоящий в случайном изменении (на противоположное) значение каждого бита с вероятностью  $P_{\text{мут}}$ . Таким образом, цель оператора мутации заключается в повышении разнообразия поиска за счет введения новых хромосом в популяцию, поскольку число членов популяции  $M$  намного меньше общего числа возможных хромосом ( $2^n$ ) в пространстве поиска  $\Omega$ . Применение мутаций обычно осуществляется с вероятностью  $0,001 \leq P_{\text{мут}} \leq 0,01$ , т.к. слишком частое применение мутации приводит к разрушению хромосом с высокими значениями функции пригодности, что ухудшает сходимость результата.

Применение рассмотренного генетического алгоритма позволяет компьютеризировать формирование производственной программы – завершающую процедуру макроструктурирования КПС. Тот же генетический алгоритм используется и на второй стадии проектирования КПС для оптимизационного синтеза структуры обобщенного технологического процесса и реализующего его станочного парка.

На последней стадии создания КПС во время всего ее срока службы происходит адаптивная структурная настройка – реструктурирование адаптивного компонента комплекса технологического оборудования. При трансформации адаптера имеют место рассмотренные ранее задачи классификации и комбинаторной оптимизации, автоматизированная поддержка решения которых основана на нейросетевой технологии и генетическом программировании.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Попов М.Е., Попов А.М. Динамическая самоорганизация производственной системы, взаимодействующей с конкурентной средой // Вестник машиностроения, 2006, № 3, С. 62.
2. Свирский Д.Н. Компактная производственная система как объект автоматизированного проектирования. – Мн.: ОИПИ НАН Беларуси, 2000. – 48с.
3. Уоссермен Ф. Нейрокомпьютерная техника: Теория и практика. – М: Мир, 1992. – 164 с.
4. Курейчик В.М. Генетические алгоритмы. Состояние. Проблемы. Перспективы. // Известия РАН. Теория и системы управления, 1999, № 1, С. 144-160.

УДК 621.9.044+621.06-52

*Романюк С.И., Якимович А.М.*

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ СРЕДСТВАМИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь*

*Определение понятия "высокоскоростное фрезерование"*

Попытка определения понятия "высокоскоростное фрезерование" наталкивается на несколько различных подходов к трактованию этого способа обработки. Прежде всего, нет его однозначного общепринятого названия: в литературе встречается несколько – HSM (High

Speed Machining – высокоскоростная обработка), HSC (High Speed Cutting – высокоскоростное резание), "высокоскоростное фрезерование", "сверхскоростное резание" и т.д. Из них наиболее употребима аббревиатура HSM. Кроме того, нет общепринятого объяснения самого явления "высокоскоростное фрезерование". Что принимать за основу: увеличенную скорость подачи или высокую частоту вращения шпинделя? С другой стороны, некоторые исследователи полагают, что определяющим является скорость резания, при которой обрабатываемая деталь остается холодной. С некоторых пор стали учитывать фактор, который определяет эффективность HSM, а именно – большой объем стружки, удаляемой в минуту.

Основным фактором, определяющим физику явлений при высокоскоростной обработке, является именно скорость резания. Поэтому HSM следует определить как способ обработки, основанный на применении высоких скоростей резания, при которых количество тепла, выделяемого при обработке, уменьшается. Как известно, в традиционном диапазоне скоростей резания (примерно до 300 м/мин) при ее увеличении возрастает нагрев детали, стружки и инструмента. Однако рост температуры отстает от роста скорости резания и, начиная с некоторого критического значения скорости резания, происходит снижение температуры.

Причина этого заключается в том, что скорость обработки превышает скорость теплопроводности обрабатываемого основного материала. Фреза как бы "опережает" распространение тепла, образующегося в зоне контакта, в основной металл детали и инструмента. Основная доля тепла от резания отводится со стружкой. За счет этого значительно увеличивается стойкость инструмента [1]. Другое объяснение базируется на положении физики твердого тела, согласно которому при увеличении скорости пластической деформации металла область последней уменьшается и металл становится более хрупким. Т.е. начиная с критических значений скорости резания, отделение срезаемого слоя происходит в результате не пластического, а хрупкого разрушения. Вследствие этого уменьшается относительная работа пластической деформации, а, следовательно, температура в зоне резания [2].

При более высокой скорости резания равнодействующая сила резания уменьшается. Благодаря большой скорости резания можно значительно увеличить объем резания, т.е. достигнуть большей производительности, и улучшить качество поверхности, т.е. уменьшить остаточную шероховатость и улучшить точность формы. Поверхность после HSM часто полностью исключает необходимость в дополнительном ручном полировании.

При высокоскоростном фрезеровании сталей скорость резания составляет от 700 до 1500 м/мин, алюминиевых сплавов – 2000-5000 м/мин. Высокая скорость резания комбинируется с высокими скоростями подачи, находящимися в диапазоне от 2 до 20 м/мин (при традиционных рабочих подачах 80-100 мм/мин) [1]. Для обеспечения таких скоростей резания необходимы соответствующие скорости вращения шпинделя – 10000-50000 об/мин и более. Например, фрезу диаметром 6 мм при высокоскоростной обработке необходимо вращать со скоростью примерно 40000 об/мин.

Такой вид обработки деталей возможен лишь благодаря новым концепциям станков, инструментов и систем управления. Станки для HSM должны иметь более жесткие конструкции, особенно конструкции приводов, а также высокий коэффициент усиления, обеспечивающие достижение необходимых ускорения и точности. В режущих инструментах необходимо применять современные твердосплавные материалы и покрытия, обеспечивающие более высокую стойкость. Используются специальные конструкции патронов для крепления фрез.

HSM-станки имеют три-пять одновременно управляемых NC-осей и автоматическую смену инструмента. Это обеспечивает широкий диапазон применения этих станков и одновременно диктует определенные требования к системе управления.

#### *Проблемы HSM при линейно-кусочной аппроксимации*

Традиционно для аппроксимации сложных пространственных кривых использовались короткие прямые линии (так называемая линейно-кусочная аппроксимация) или в лучшем случае дуги окружностей. Следствием линейной аппроксимации является ломаная линия с углами между прямолинейными участками. Такая аппроксимация сложной траектории вызывает ряд проблем в процессе высокоскоростной обработки [3-5]:

1) динамические погрешности, или так называемый "заброс" инструмента, т.е. отклонение от заданной траектории вследствие люфтов и ограниченных динамических характеристик станка при прохождении на высоких скоростях узловых точек ломаной траектории. Отклонения от траектории зависят как от угла излома траектории, так и от величины подачи. Для исключения динамических погрешностей при сохранении заданной подачи углы между сопрягаемыми отрезками траектории должны приближаться к 180°. Такие значения углов могут быть достигнуты за счет уменьшения длин линейных участков траектории;

2) скачки ускорения. Наличие изломов требует введения торможения при их прохождении. В результате эффективная подача может заметно снижаться по сравнению с расчетной. Для поддержания усредненной подачи на приемлемом уровне требуется высокое осевое ускорение. Теоретически возникает необходимость в бесконечно большом ускорении. Однако система управления должна ограничивать динамику отдельных осей, чтобы не превышать максимально допустимое ускорение. Это удастся только при определенном уменьшении пиковой скорости на узлах, что снижает производительность обработки;

3) колебания. Скачки ускорения при использовании систем регулирования без слежения приводят к колебаниям станка и экстремальной нагрузке на приводы подачи;

4) время отработки кадра. Система ЧПУ является тактовой системой. Время цикла кадра обычно от 1 до 10 мс. Между средним отрезком траектории  $L$  (в мм), временем  $T$  (в мс) и максимально возможной подачей  $F_{\max}$  (в м/мин) существует зависимость [3]:

$$F_{\max} = \frac{L}{T} * 60.$$

Например, при  $L = 10$  мкм и  $T = 2$  мс максимальная подача ограничивается до  $F_{\max} = 0,3$  м/мин. Поэтому короткие линейные участки траектории приводят к ограничению максимально возможной подачи, что противоречит необходимой подаче при HSM;

5) объем управляющей программы (УП). Сокращение длины прямолинейных участков траектории неминуемо приводит к увеличению объема УП. Объем УП может достигать 20-30 Мбайт, в то время как объем памяти современных УЧПУ составляет 0,25-6 Мбайт. В связи с большим объемом УП возникают две существенные проблемы:

- сегментирование УП, т.е. деление программы на части (до нескольких десятков);
- время ввода УП в устройство ЧПУ и ее "электронная" обработка при формировании управляющих сигналов для приводов станка. Электронная обработка программы при большом ее объеме будет фактически отставать от реальной обработки детали, а, следовательно, будет тормозить ее.

#### *Управление HSM-станками*

Чтобы отвечать специальным потребностям HSM-станков, системы ЧПУ должны обладать достаточной вычислительной мощностью и удовлетворять нескольким важным требованиям:

- короткий цикл кадра управляющей программы не более 1 мс и соответственно скорость обработки приблизительно 100 кадров в секунду. При высоких скоростях подачи, используемых в HSM-станках, кадры должны обрабатываться быстро, оставляя очень короткое время для их считывания и подготовки;

- функция "look ahead" ("просмотр вперед"), т.е. предварительный просмотр траектории инструмента, позволяющий заранее обнаружить углы и кромки, автоматически на время снизить скорость до допустимого уровня и предотвратить отклонения в контуре. Одновременно должна соответствующим образом регулироваться скорость вращения шпинделя;

- интерполяция сложных поверхностей посредством сплайнов. Сплайн-интерполяция включает аппроксимацию сложных поверхностей посредством многих тысяч небольших линейных траекторий и решает ряд проблем HSM, связанных с качеством и производительностью обработки, динамикой перемещения рабочих органов, длиной управляющей программы и временем ее обработки;

- по возможности, "нулевое рассогласование с контуром". Несмотря на высокие скорости подачи, движение по оси не должно иметь никакой ошибки рассогласования, чтобы достичь высокой степени точности контура;

- ограничение темпа ускорения по направлению траектории и по направлению оси для защиты станка;

- компенсация статических, динамических и температурных ошибок станка. При этом можно достигнуть точности обработки, которая раньше достигалась только при больших затратах на механические компоненты.

Для реализации режима "look ahead" в устройстве ЧПУ используется специальный блок, который выполняет комплекс расчетов: 1) определение продолжительности отработки кадра УП в постоянных циклах интерполяции; 2) вычисление вектора контурной скорости в начале и в конце кадра; 3) определение пути инструмента в системе координат станка; 4) расчет радиуса кривизны траектории движения. В результате определяется скорость в конце кадра и новое значение контурной скорости подачи.

Следует учитывать, что необходимое для HSM незначительное ускорение одновременно с большой подачей и короткими перемещениями могут увеличить необходимую дистанцию предпросмотра до 1000 кадров. Если существует небольшой буфер просмотра вперед, то подачу траектории необходимо ограничить так, чтобы можно было регулировать торможение в любом месте программы.

Все станки, реализующие HSM, оснащаются блоком (одним или несколькими) сплайн-интерполяции. Опыт показывает, что одна запись сплайнов может заменить от 5 до 10 линейных кадров при одинаковой точности [3].

Растущее использование CAD/CAM-систем требует новых подходов к формированию данных для системы ЧПУ и их обработке. Программирование посредством кусочно-ломаной аппроксимации заменяется либо на передачу сплайнов непосредственно из системы CAM в систему ЧПУ, либо на геометрическое преобразование (компрессию) линейных кадров внутри ЧПУ. По существу, формируемые системой CAD геометрические данные о сложных поверхностях представляют собой неравномерный рациональный базовый сплайн, или NURBS (non-uniform rational b-spline). Данные могут прямо приниматься и обрабатываться непосредственно системой ЧПУ. В таком случае отпадает необходимость в постпроцессоре, преобразующем программную информацию в команды ЧПУ. Это обеспечивает гораздо более ровную динамику станка, несмотря на высокие ускорения и скорости, что в свою очередь положительно влияет на качество обработанной поверхности.

#### *Цифровые приводы*

Одной из важнейших функций ЧПУ для высокоскоростной обработки является точное управление приводами подачи и шпинделями. Традиционное аналоговое соединение ЧПУ с аналоговыми приводами заменяется цифровыми приводами, которые подключаются к ЧПУ посредством цифровой высокоскоростной шины. Для регулирования положения, частоты вращения и момента двигателя используются технологии цифрового управления. При этом измерительные системы очень точно определяют фактическое положение осей. В рамках регулирования посредством цифрового привода существуют следующие функции [3]:

- цифровая регистрация частоты вращения и траектории;
- алгоритмы регулирования высокого порядка, особенно компенсация ошибок вычисления траектории благодаря предварительной установке частоты вращения и момента;
- разнообразные виды анализа, например, измерение частотных характеристик;
- автоматическое круговое тестирование с самооптимизацией реверсивных ошибок, возникающих на мертвых точках осей (квадрантные ошибки), посредством нейронной сети;
- подключение непосредственных приводов, например линейных двигателей;
- двухканальная реализация функций защиты станка посредством процессора ЧПУ и привода.

Многочисленные структуры управления для сокращения ошибок вычисления траектории и проблем жесткости станка, такие как ограничение темпа ускорения, предварительная установка частоты вращения и момента, повышают производительность обработки и точность деталей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Высокоскоростное фрезерование (HSC). По материалам проработок фирмы Hermle // Galika AG [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: [http://www.galika.ru/article\\_8.htm](http://www.galika.ru/article_8.htm). 2. Ящерицын П.И., Фельдштейн Е.Э., Корниевич М.А. Теория резания. – Мн.: Новое знание, 2005. – 512 с. 3. Высокоскоростное фрезерование. Информационные материалы департамента "Автоматизация и приводы" фирмы Siemens. [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: [http://www.automation-drives.ru/mc/archive/press/hsc\\_ito.pdf](http://www.automation-drives.ru/mc/archive/press/hsc_ito.pdf). 4. Аркадов А.Ю., Николаев П.М. Программирование обработки сложных поверхностей с повышенными точностью и производительностью // Информационные технологии в проектировании и производстве (ИТПП). – М.: 2000, №1. – С.54-57. 5. В.И.Шпорт, В.Ф.Кузьмин, С.Б.Марьин. Высокоскоростное фрезерование криволинейных поверхностей // Теория и практика машиностроения. – Мн.: 2003, №1. – С.53-56.

УДК 621.313.84

*Литвинов Е.А., Карпович С.Е., Агранович А.А.*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПЛАТФОРМЫ МАНИПУЛЯЦИОННОГО МЕХАНИЗМА С ШЕСТЬЮ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ СРЕДСТВАМИ MATLAB/SIMULINK

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Минск, Беларусь*

### ВВЕДЕНИЕ

Механизм, представленный на рис. 1, относится к классу параллельных манипуляционных механизмов с шестью степенями свободы. Данный класс исполнительных робототехнических устройств нашёл широкое применение в промышленных роботах, станках с ЧПУ, системах тестирования и контроля параметров объекта [1]. Манипуляционные механизмы с шестью степенями свободы позволяют создавать управляемые электромеханические системы, реализующие любые перемещения исполнительного элемента в пространстве, задаваемые шестью независимыми законами движения, например, тремя линейными координатами и тремя угловыми координатами, характеризующими пространственное, плоскопараллельное и угловое перемещение при переходе исполнительного элемента из одного положения в другое [2].

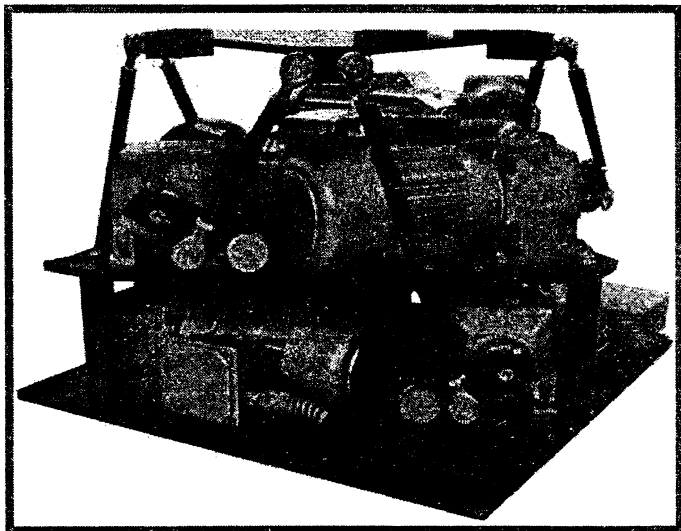


Рисунок 1 - Манипуляционный механизм с шестью степенями свободы

### АНАЛИЗ ДВИЖЕНИЙ ПЛАТФОРМЫ МАНИПУЛЯЦИОННОГО МЕХАНИЗМА

Рассматриваемый механизм, в соответствии с его схемой (рис. 2), состоит из подвижной площадки  $P$ , звеньев 1, 2, ..., 6, жёстко связанных с вращающимися элементами