

МАШИНОСТРОЕНИЕ

MECHANICAL ENGINEERING

Шпилев А.М., Биленко С.В.

05.02.08

A.M.Shpilev, S.V.Bilenko

ФОРМИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ ТРАЕКТОРИЙ ДВИЖЕНИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

DEFINING EFFECTIVE CUTTING-TOOL TRAJECTORIES FOR OPERATIONS OF HIGH-SPEED MACHINING



Шпилев Анатолий Михайлович — доктор технических наук, профессор, ректор Ком-сомольского-на-Амуре государственного технического университета. E-mail: rector@knastu.ru
Anatoly M. Shpilev — Doctor in Engineering, Professor, Rector of the Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). rector@knastu.ru



Биленко Сергей Владимирович — доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. E-mail: s.bilenko@knastu.ru
Sergey V. Bilenko — Doctor in Engineering, Associate Professor,

Head of the Department of Mechanical Engineering Technology of the Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). s.bilenko@knastu.ru

Аннотация: Показано, что эффективные гладкие и динамически устойчивые траектории режущего инструмента для операций высокоскоростного фрезерования можно получать путем решения краевых задач поля с помощью клеточных нейронных сетей. Описан программный модуль для САМ-системы Unigraphics, позволяющий формировать три типа гладких спиральных траекторий движения режущего инструмента, оптимальных с точки зрения высокоскоростного фрезерования карманов деталей авиационной промышленности.

Summary: The paper proves that effective smooth and dynamically steady trajectories of cutting tools for operations of high-speed milling can be received by solution of field boundary value problems by means of cellular neural networks. A program unit for the Unigraphics CAM-system is described, that allows to form three types of smooth spiral trajectories of movement of the cutting tool that are optimal for high-speed pocketing of parts/components in the aviation industry.

Ключевые слова: высокоскоростное фрезерование, траектория, ЧПУ, клеточная нейронная сеть, САМ, авиационная промышленность.

Keywords: high-speed milling, trajectory, CNC, cellular neural network, CAM, aviation industry.

В настоящее время оборудование, позволяющее вести высокоскоростную металлообработку, завоевывает все большую популярность. Для оптимального использования преимуществ этого оборудования необходимо соответствующее программное обеспечение, позволяющее в полной мере реализовать его возможности.

Одним из наиболее известных и мощных программных продуктов, позволяющих применять технологию ВСО в производстве, является программный пакет Manufacturing Bundle, входящий в состав САМ-системы Unigraphics. Данный пакет служит для разработки, проверки и визуализации управляющих программ для станков с ЧПУ и позволяет разрабатывать управляющие программы для обработки деталей любой сложности.

В программу Manufacturing Bundle изначально за-

Поступила в редколлегию 16.02.2010

ФОРМИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ ТРАЕКТОРИЙ ДВИЖЕНИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

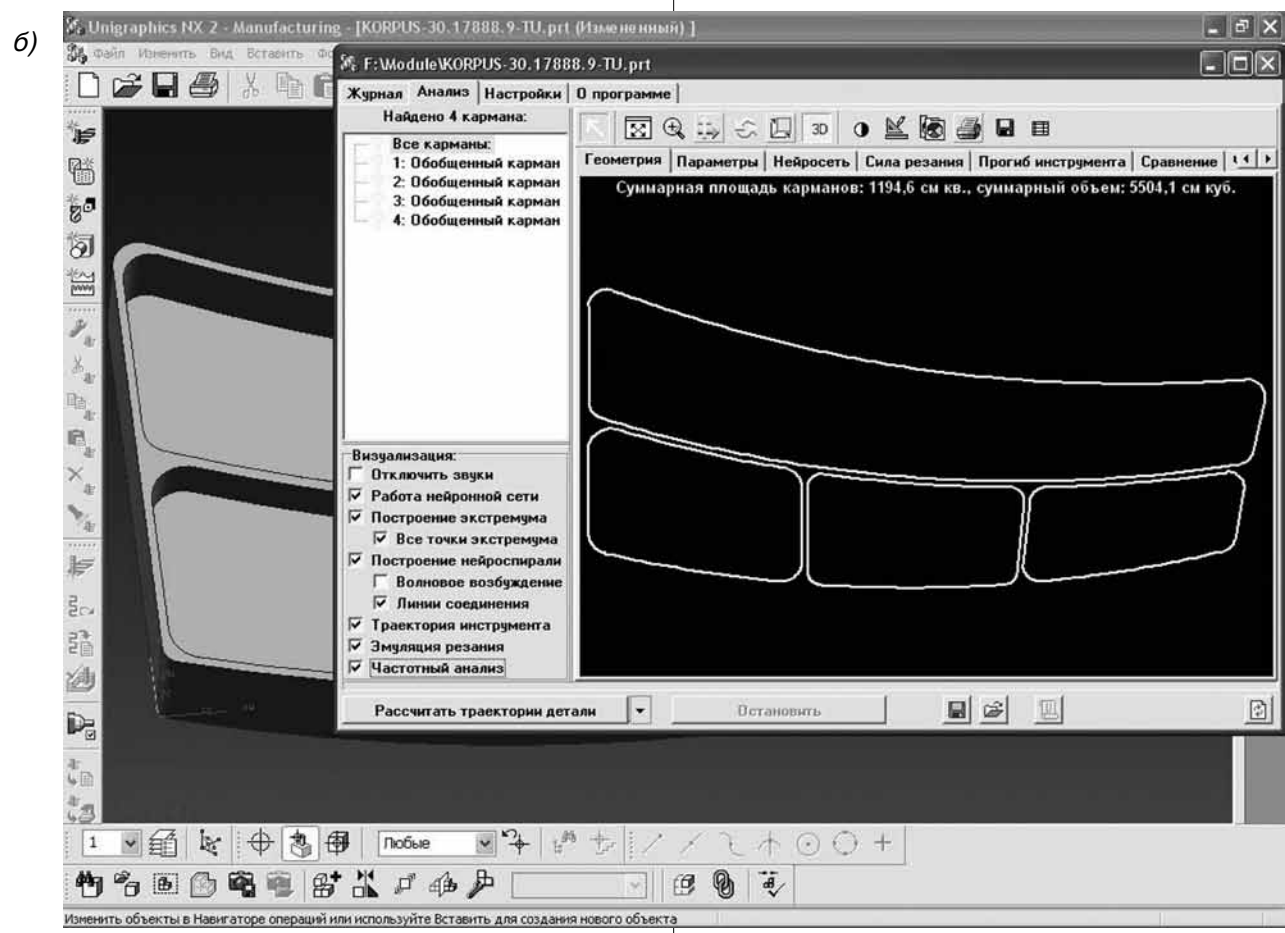
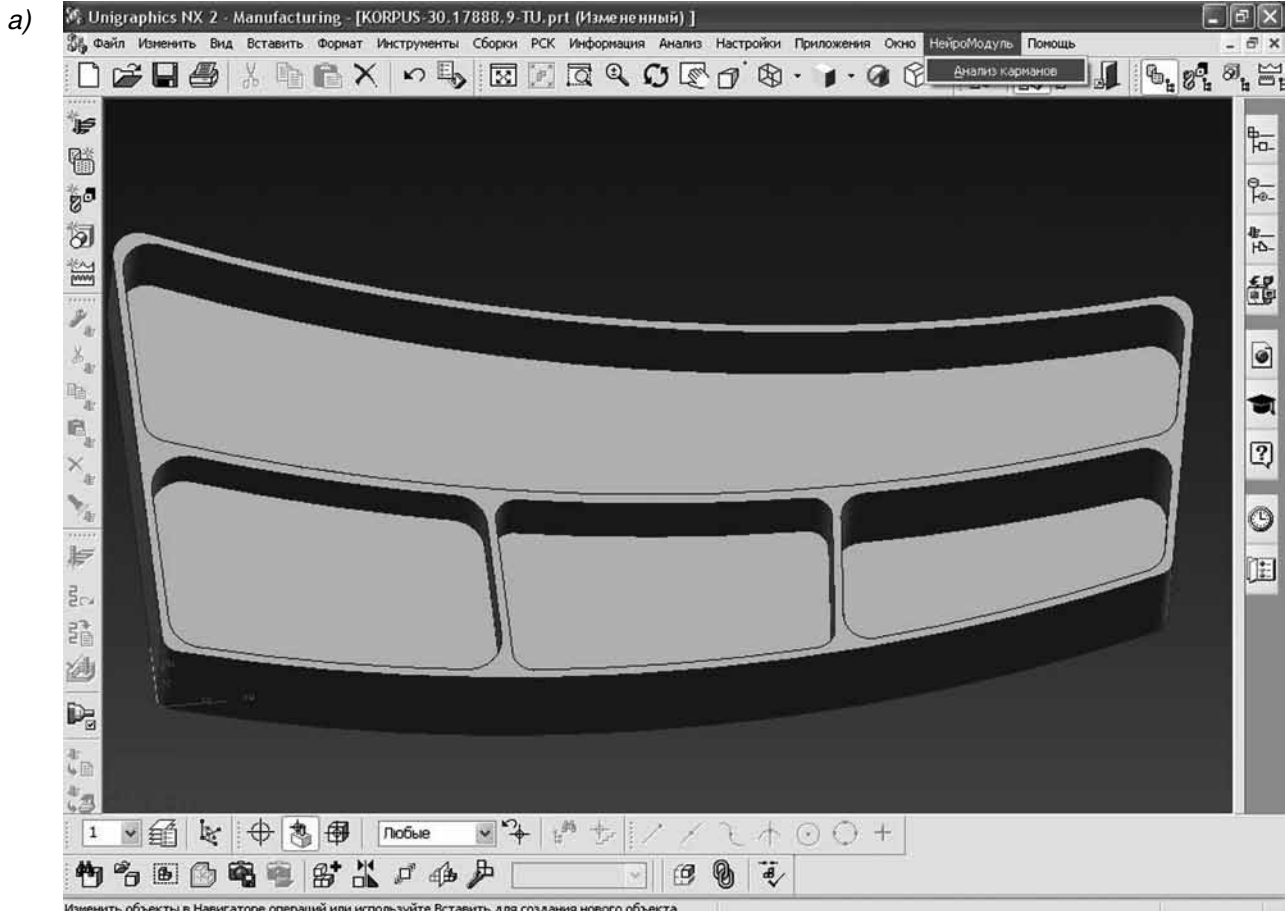


Рис. 1. Исследуемая деталь в окне Unigraphics (а) и в окне предварительного анализа программного модуля «NeuroModule UG» (б)

ложены некоторые штатные функции, ориентированные на высокоскоростную обработку. Генератор высокоскоростной обработки имеет возможности кругового и спирального подхода к детали, спиральную траекторию шаблона обработки, замедление в углах, сплайн интерполяции выходной траектории. Но, как показывает практика, все эти функции лишь позволяют немного адаптировать к условиям ВСО традиционные, разработанные для невысокоскоростных металлорежущих станков, технологические приемы. Полноценно задачу повышения эффективности высокоскоростной обработки они не решают.

Поэтому на основе нейронносетового подхода, описанного в [1], для CAD/CAM-системы Unigraphics был создан дополнительный программный модуль NeuroModule UG (рис. 1). Модуль разработан с помощью механизма UG Open API и позволяет дополнить штатные возможности CAM-системы Unigraphics процедурой автоматизированного формирования траекторий движения инструмента для высокоскоростного фрезерования широкого класса деталей авиационной промышленности, таких как шпангоут, лонжерон, нервюра, содержащих большое количество технологических элементов типа карман.

Расчет каждого кармана происходит в два этапа. Вначале, путем решения задачи теплопроводности, с помощью клеточной нейронной сети анализируется форма кармана и строится линия его симметрии равновесия (рис. 2, а). Затем на основе полученных результатов производится построение гладких спиральных траекторий специальной формы, такой, чтобы расстояние между витками спирали оставалось максимально стабильным на всех ее участках или менялось плавным образом. В центре каждой траектории располагается максимально короткий (для данной формы кармана) участок трохойдального движения.

При расчете траекторий используются следующие методы, различающихся набором критериев оптимальности:

1. Метод «Нейроспираль с постоянным линейным шагом» (рис. 2, б) обеспечивает максимально стабильные условия резания и максимальную производительность при некотором снижении допуска на минимальное количество резких смен направления движения. Дает наилучшие результаты для карманов с выпуклыми скругленными границами без островов.

2. Метод «Нейроспираль с нелинейным шагом» (рис. 2, в) обеспечивает максимально плавное изменение условий резания и минимальное количество резких смен направления движения при снижении допуска на максимальную производительность процесса фрезерования. Дает наилучшие результаты для карманов сложной формы без островов.

3. Метод «Нейросмещение» (рис. 2, г) обеспечивает максимальную производительность при снижении допуска на максимально стабильные условия резания и минимальное количество резких смен направления движения. Дает наилучшие результаты

для карманов сложной формы с островами.

Наряду с функцией генерации различных траекторий обработки программный модуль выполняет процедуру сравнительного анализа полученных траекторий. После формирования какой-либо траектории запускается процедура эмуляции фрезерования и расчета силы резания. Процесс эмуляции визуализируется в виде 2D-анимации, позволяющей определить недообработанные области кармана или нерациональные холостые перемещения (для ускорения вычислений режим 2D-анимации может быть отключен). Результаты расчетов сил резания отображаются в виде графиков.

Графики изменения силы резания позволяют судить о наличии перегрузок инструмента или шпинделя, а также о степени стационарности процесса резания.

Во время обработки материала, особенно при черновой обработке, режущий инструмент испытывает переменную нагрузку. Причем нагрузки на инструмент могут меняться многократно. Соответственно происходит интенсивный износ, как режущего инструмента, так и станка. Причина этого — заложенная в управляющей программе обработки постоянная скорость резания. Процедура эмуляции процесса резания в программе «NeuroModule UG» реализована таким образом, что в процессе обработки постоянно анализируется площадь контакта режущего инструмента и обрабатываемого материала. На основе анализа объема снимаемого материала и идет корректировка скорости резания в конкретной точке обработки.

Целью данной корректировки является исключение случаев превышения силы резания $F_{рез}$ максимально допустимого значения $F_{инстр}$ для данного типа инструмента (перегрузка инструмента) и случаев превышения мощности резания $P_{рез}$ максимально допустимого значения $P_{шпindel}$ для данного типа привода главного движения станка (перегрузка шпинделя).

Следует отметить, что корректировка скорости подачи в случае угрозы перегрузки является вынужденной мерой, позволяющей добиться непрерывного процесса обработки без поломок инструмента и заклинивания шпинделя в случае неправильно рассчитанной траектории, и не является хорошим решением. Дело в том, что сила резания $F_{рез}$ нелинейно зависит от скорости подачи $V_{под}$. По данным компании Sandvik Coromant для алюминиевых сплавов наблюдается зависимость $F_{рез} \sim (V_{под})^{0,75}$ [2]. То есть, для того чтобы снизить нагрузку на инструмент в 4 раза в моменты врезаний при межстрочных переходах траектории «Зиг-заг», нужно уменьшить скорость подачи в 6,35 раз. Что сильно сказывается на общей производительности обработки.

Например, несмотря на то, что траектория «Зиг-заг» имеет меньшую длину, чем траектория «Нейроспираль с линейным шагом»: 22,7 м и 36,9 м соответственно, общее время фрезерования по траектории «Зиг-заг» получается больше, чем при использо-

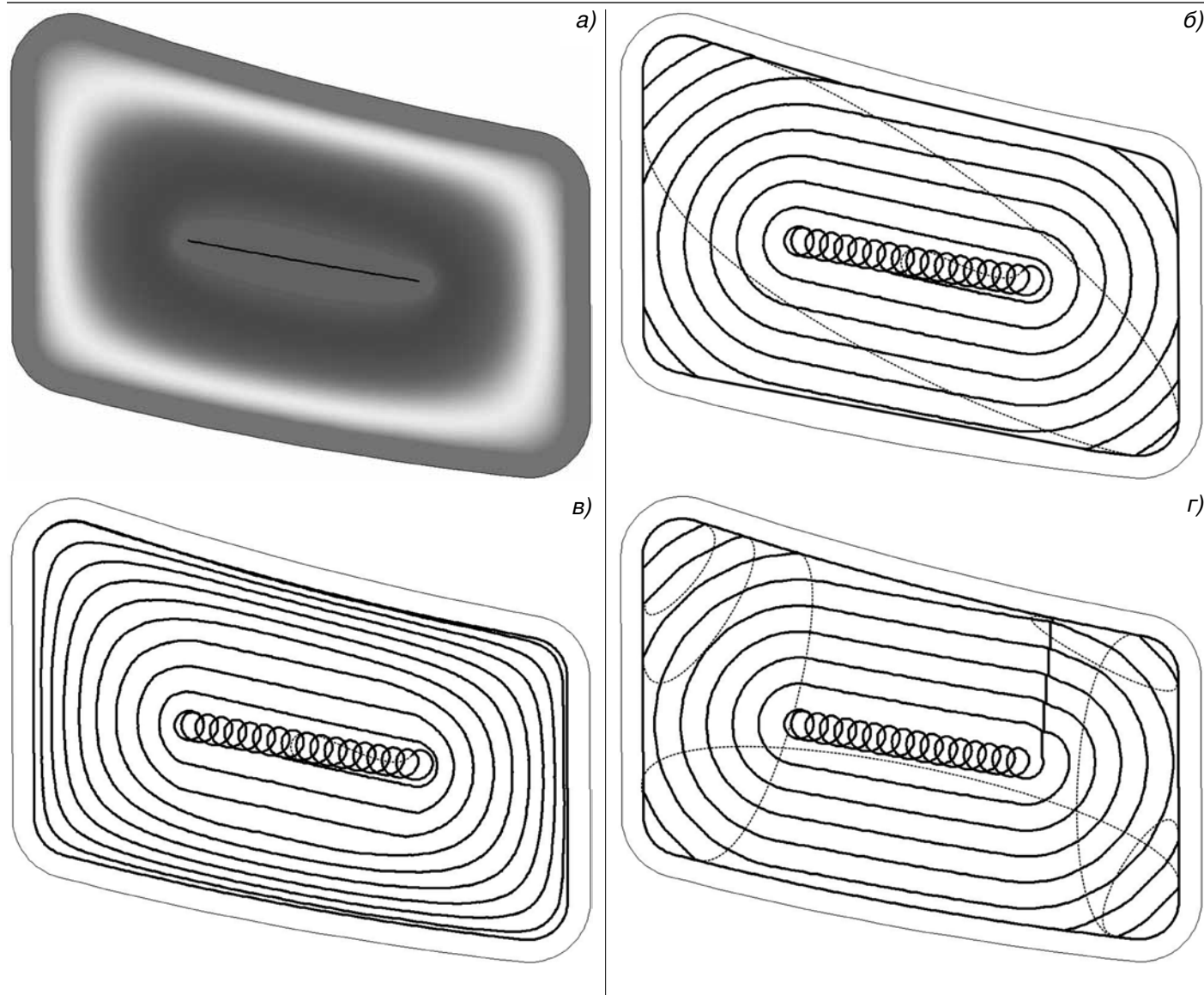


Рис. 2. Траектории режущего инструмента для высокоскоростного фрезерования кармана, полученные с помощью клеточной нейронной сети: линия симметрии равновесия кармана (а); траектории, полученные методами «Нейроспираль с постоянным линейным шагом» (б), «Нейроспираль с нелинейным шагом» (в) и «Нейросмещение» (г). Сплошная линия—рабочий ход, пунктир—ускоренные перемещения

вании траектории «Нейроспираль с линейным шагом» — 15,7 минут против 11,6 (из-за вынужденного снижения подачи в зонах перегрузки инструмента при фрезеровании «Зиг-загом»).

Помимо расчета сил резания программный модуль производит анализ динамических нагрузок на инструмент и расчет прогиба инструмента.

Достоинство данной процедуры динамического анализа состоит в том, что при расчете учитываются резонансные явления упругой системы станка—резонанс инструмента и заготовки. Резонансные частоты и коэффициенты затухания задаются на основании обстукивания узлов станка измерительным молотком. На основании процедуры динамического анализа строится расчет прогиба инструмента и связанных с этим погрешностей формы изготавливаемой детали.

После выполнения всех расчетов строится сводная диаграмма для всех траекторий кармана (рис. 3). В верхней половине диаграммы показывается сравнительный график траекторий по производительности (объем кармана, поделенный на время фрезерования). А в нижней половине приводится сравнительная гистограмма по точности обработки. За критерий точности берется десятичный логарифм максимального значения прогиба инструмента для данной траектории, взятый со знаком минус.

Далее, согласно диаграмме, из полученных траекторий выбирается наилучшая с позиций ВСО, позволяющая наиболее полно раскрыть преимущества высокоскоростного фрезерования для данной формы кармана. Например, из рис. 3 видно, что наилучшим выбором для кармана 4 изготавливаемой детали будет стратегия «Нейросмещение». Применение этой стра-

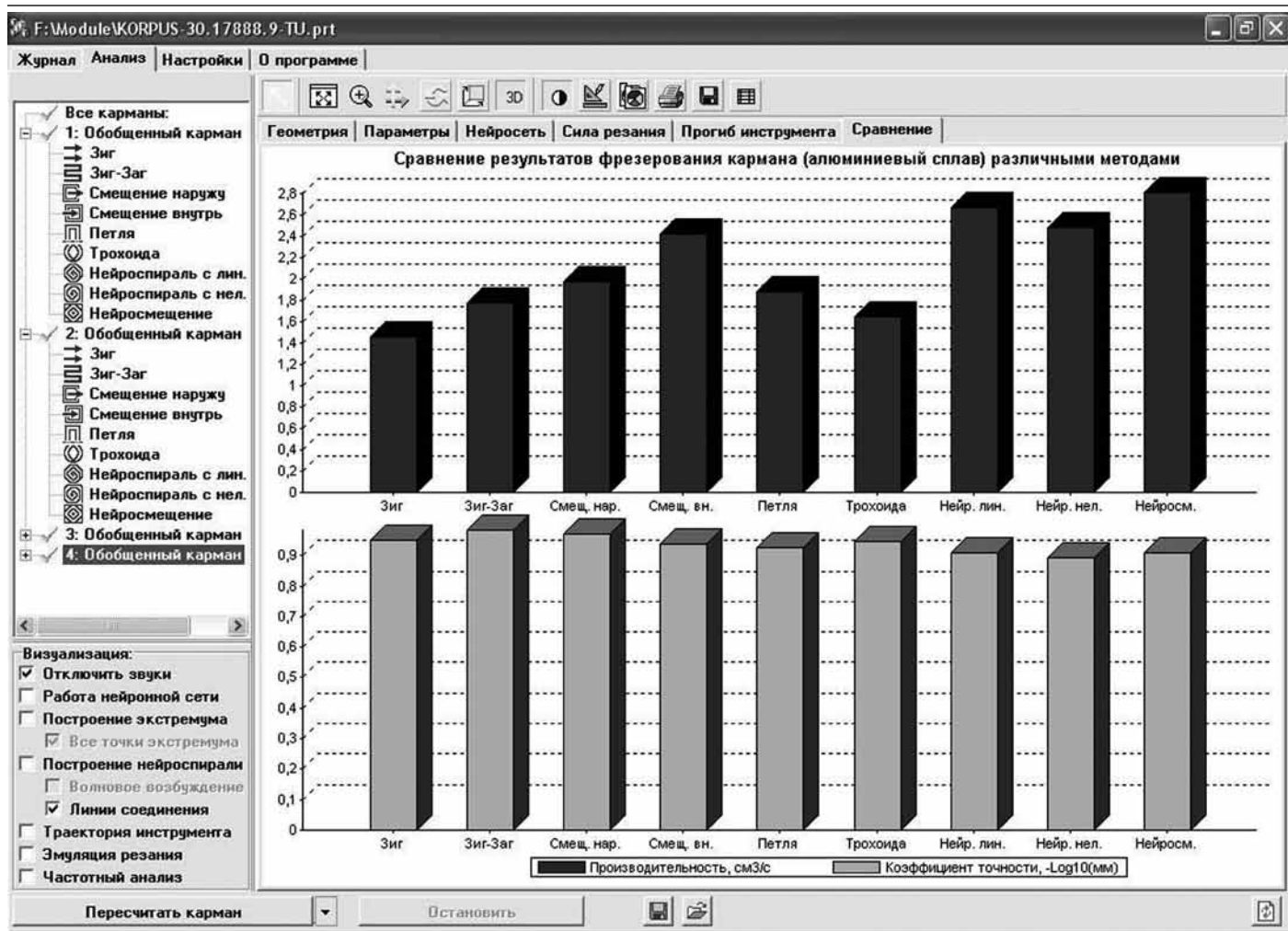


Рис. 3. Диаграмма сравнения траекторий для кармана 4

тегии сочетает в себе высокую производительность и хорошую точность обработки.

Для экспериментальной проверки результатов, получаемых программным модулем NeuroModule UG, была спроектирована тестовая деталь, содержащая 6 идентичных карманов в виде сегментов круга (рис. 4).

С помощью САМ-системы Unigraphics и программы NeuroModule UG была разработана управляющая программа для фрезерного станка с ЧПУ. Причем для каждого кармана детали использовалась своя стратегия обработки:

- «Зиг-заг», сформированный САМ-системой Unigraphics;
- «Петля вдоль периферии», сформированная Unigraphics;
- «Трохоидальная обработка», сформированная Unigraphics;
- «Нейроспираль с постоянным линейным шагом», сформированная программным модулем NeuroModule UG;
- «Нейроспираль с нелинейным шагом», сформированная NeuroModule UG;
- «Нейросмещение», сформированная NeuroModule UG;

Траектория движения режущего инструмента при обработке всех карманов показана на рис. 4б.

После изготовления детали были произведены измерения шероховатости поверхностей дна полученных карманов. Результаты измерений приведены в таблице 1. Из данной таблицы видно, что наилучшее качество обработанной поверхности дает траектория «Нейроспираль с нелинейным шагом».

В модуле используется программная реализация клеточной нейронной сети. Для уменьшения времени вычислений без потери точности формирования траектории клеточная нейронная сеть выполнена двухслойной. На расчет траектории высокоскоростной обработки одного кармана площадью 100 см² с точностью позиционирования инструмента 0,05 мм затрачивается около 118 минут для процессора класса Pentium Core Duo—3,0 ГГц. Увеличение точности в 2 раза влечет за собой увеличение времени расчета в среднем в 5-8 раз в зависимости от формы кармана.

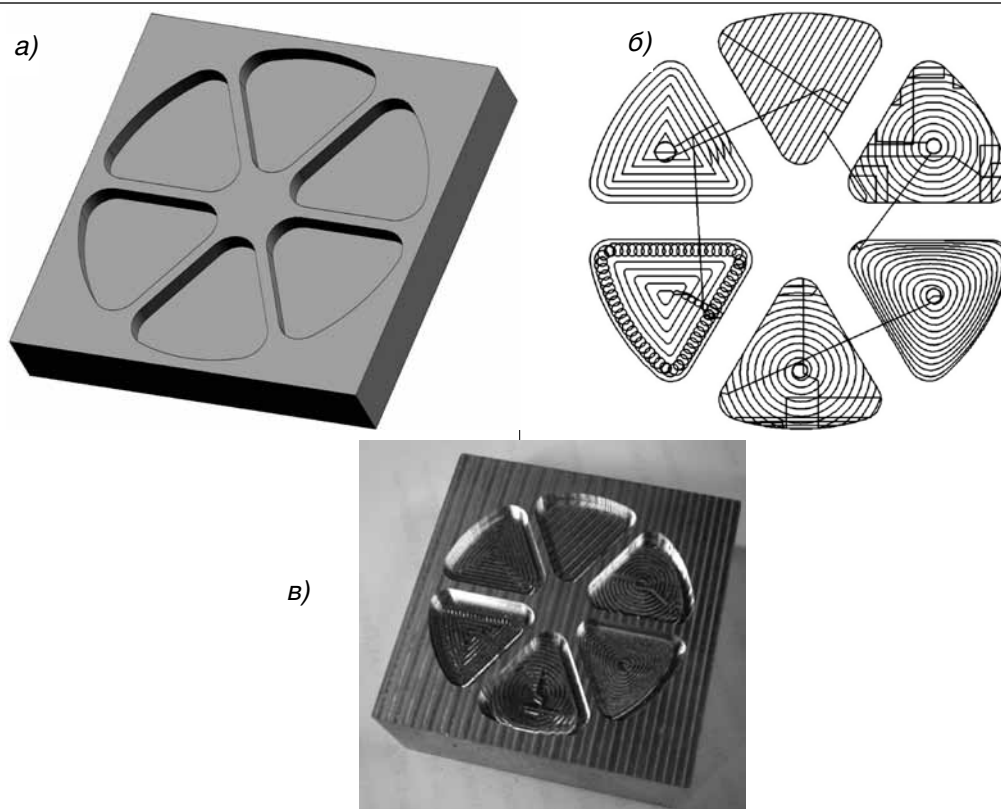


Рис. 4. Тестовая деталь: электронная модель (а); траектория движения режущего инструмента при обработке всех карманов (б); внешний вид детали после обработки (в)

Зависимость шероховатости полученной поверхности от стратегии обработки

Траектория обработки	Шероховатость, Ra
«Зиг-заг»	1,38
«Петля вдоль периферии»	1,11
«Трохоидальная обработка»	0,93
«Нейроспираль с постоянным линейным шагом»	0,87
«Нейроспираль с нелинейным шагом»	0,71
«Нейросмещение»	1,06

Время вычисления можно существенно уменьшить, используя не программную, а аппаратную реализацию нейронной сети. Именно аппаратная реализация клеточных нейронных сетей позволит добиться распараллеливания вычислений и снизить продолжительность формирования траектории на несколько порядков.

В качестве основы для аппаратной реализации клеточных нейронных сетей может быть использован отечественный нейропроцессор NeuroMatrix (NM6403) [3]. Процессор NM6403 представляет собой синтезируемую модель высокопроизводительного DSP-процессора с архитектурой VLIM/SIMD. Его ядро состоит из двух базовых блоков: 32-раз-

рядного RISC-процессора и 64-разрядного векторного процессора, обеспечивающего выполнение векторных операций над данными переменной разрядности.

Таким образом, применение клеточных нейронных сетей является перспективным методом расчета траекторий обработки для ВСО. И среди всего многообразия реализаций клеточных нейронных сетей наиболее эффективными являются нейронной сети в аппаратном исполнении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кабалдин Ю. Г. Применение клеточных нейронных сетей для формирования эффективных траекторий движения режущего инструмента при HSM-обработке (плeнарный доклад)/Кабалдин Ю. Г., Биленко С. В. // Современные проблемы машиноведения и высоких технологий: Материалы Международной научно-технической конференции (г. Ростов-на-Дону, 6-7 октября 2005 г.). — Ростов-на-Дону: ИЦ ДГТУ, 2005. — С. 8-13.
2. Материалы компании «Sandvik Coromant». — Адрес в Интернет: <http://www.coromant.sandvik.com>
3. Нейропроцессор NM6403. Материалы компании ЗАО НТЦ «Модуль». Адрес в Интернет: <http://www.module.ru>