

УДК 621.9.06

Компьютерное исследование жесткости промышленного робота-манипулятора и ее влияния на траекторию инструмента при фрезерной обработке

Полещиков Евгений Викторович

*Аспирант 2 курса**кафедра «Металлорежущие станки»**Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана**Научный руководитель: В. М. Утенков**доктор технических наук, профессор кафедры «Металлорежущие станки»*

Для эффективного применения промышленных роботов-манипуляторов в задачах механообработки возникает необходимость вычисления изменения жесткости конструкции в процессе резания и связанного с этим расчетного искажения траектории инструмента [1]. Одним из наиболее универсальных методов является компьютерная симуляция, включающая в себя виртуальное моделирование в системах автоматизированной подготовки производства (САМ-системах) и расчеты в средах конечно-элементного анализа (FEA-программах) [2].

В рамках работы было проведено компьютерное исследование, включающее определение зависимости общей жесткости робота-манипулятора от положения его звеньев и нахождение конфигураций с наименьшей жесткостью, а также вычисление отклонения в ключевых точках траектории в процессе фрезеровки. Для исследования была выбрана САМ-система SprutCAM Robot и система автоматизированного проектирования SolidWorks 2022, включающая FEA-модуль Solidworks Simulation. Также используется ПО Matlab 2023a.

Для анализа была подобрана модель манипулятора KUKA KR 210 R3100 Ultra, поворотного стола KP1-V 1000, фрезерного шпинделя GDZ-23-1 и трехзаходной фрезы диаметром 10 мм и длиной 35 мм. Была выполнена симуляция фрезеровки кармана в детали из алюминиевого сплава. С помощью настроенного постпроцессора был записан массив точек, определяющих перемещения рабочего органа, и соответствующий ему массив обобщенных углов суставов манипулятора.

Для оценки относительной жесткости в различных точках траектории были использованы критерии манипулируемости – способности манипулятора перемещаться в любом направлении из заданной конфигурации, и числа обусловленности – показателя анизотропии жесткости в указанной точке, а также URDF (Unified Robot Description Format) данные робота, описывающие его геометрию [3].

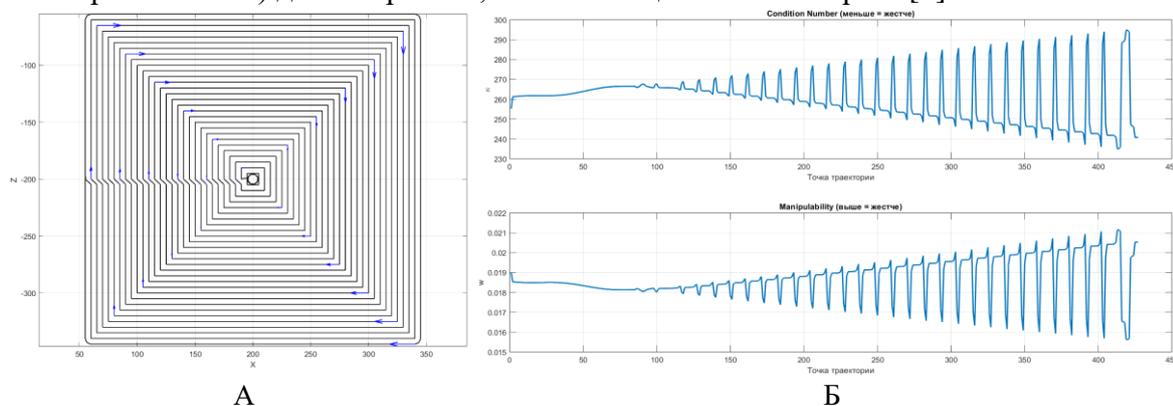


Рис. 1. - А) Траектория инструмента в плоскости X-Z в процессе обработки. Б) Графики числа обусловленности и манипулируемости в точках вдоль траектории.

Эти показатели связаны между собой и, определив точки с минимальной манипулируемостью и максимальным числом обусловленности, можно выделить конфигурации с наименьшей жесткостью среди рассмотренных. С помощью этого критерия были определены 8 точек траектории, соответствующих конфигурациям манипулятора, обладающих наименьшей жесткостью.

В дальнейшем исследовании рассматривается 4 ключевые точки – одна с наименьшим показателем общей жесткости и три другие из различных частей траектории, расположенные в порядке возрастания этого параметра.

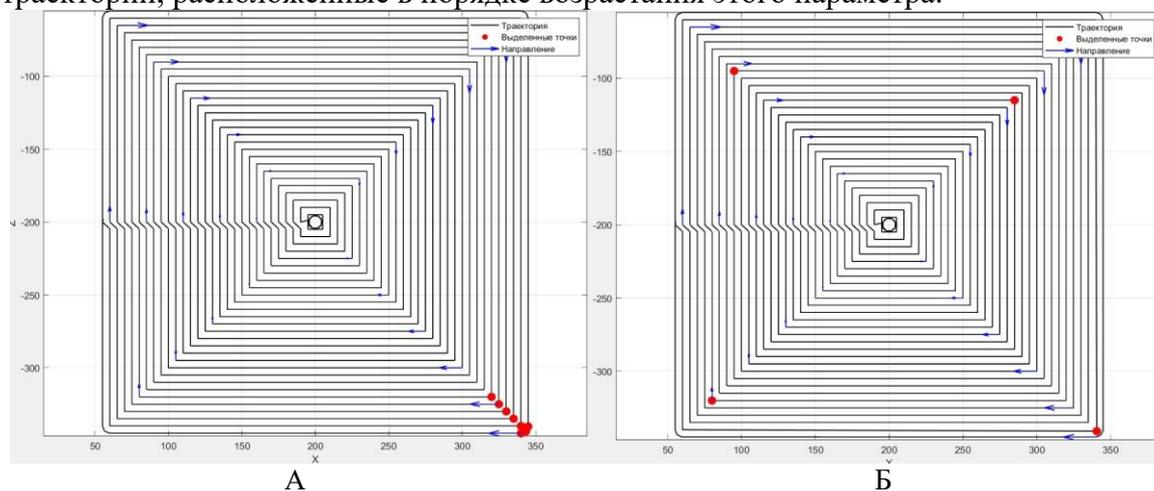


Рис. 2. - А) Точки траектории, соответствующие конфигурациям с наименьшей жесткостью.
Б) Ключевые точки траектории, выбранные для дальнейшего анализа.

Эти четыре конфигурации манипулятора были исследованы в FEA-программе на деформацию под воздействием статических сил, возникающих в процессе резания. По описанным в технической документации роботов серии KUKA данным можно приблизительно определить жесткости сочленений, равные 2.90×10^6 Н*м/рад, 3.28×10^6 Н*м/рад, 2.60×10^6 Н*м/рад, 2.14×10^6 Н*м/рад, 1.05×10^6 Н*м/рад и 0.67×10^6 Н*м/рад соответственно, а также материал звеньев – сплав алюминия 6061 [4].

Действующие на фрезу силы были приближенно определены в соответствии с параметрами фрезеровки, указанными в таблице 1.

Таблица 1. Значения параметров фрезерной обработки

| Параметр | Значение | Единицы измерения |
|----------------------------|----------|-------------------|
| Частота вращения шпинделя | 12500 | об/мин |
| Скорость резания | 392,5 | м/мин |
| Подача на зуб | 0,06 | мм/зуб |
| Подача | 2250 | мм/мин |
| Осевая глубина резания | 10 | мм |
| Радиальная глубина резания | 5 | мм |

Тангенциальная составляющая силы равна 340 Н, радиальная – 170 Н, а осевая – 102 Н [5]. При приложении этих сил были рассчитаны деформации конструкции и определены отклонения инструмента. Для наименее жесткой конфигурации общее смещение составляет 1,006 мм, смещение по оси X – 0,101 мм, по оси Y – 0,434 мм, по оси Z – 0,912 мм. Общие смещения во всех ключевых точках представлены в таблице 2.

Таблица 2. Рассчитанные общие смещения в ключевых точках

| Номер точки | Общее смещение, мм |
|-------------|--------------------|
| 1 | 1,006 |
| 2 | 0,996 |
| 3 | 0,914 |
| 4 | 0,795 |

Вычисленные данные позволяют построить деформированную траекторию в окрестности ключевых точек. На представленных на рисунке 3 графиках показано изначальное расположение ключевых точек, их рассчитанное положение при воздействии статических сил, а также неискаженная и искаженная траектории.

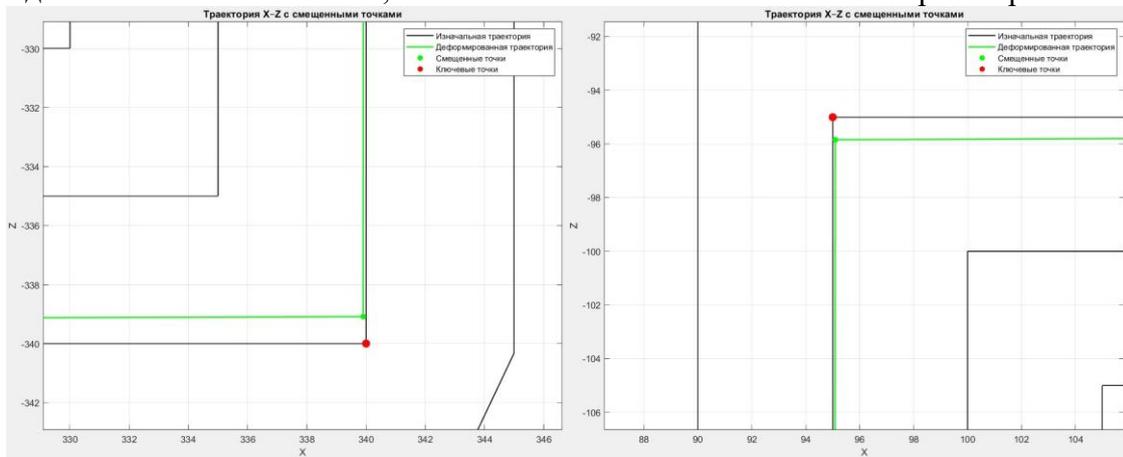


Рис. 3. Графики деформированной траектории в окрестности ключевых точек

Представленный алгоритм позволяет при исследовании большого числа точек и применении аппроксимации построить целиком модифицированную траекторию с учетом отклонений из-за действия статических сил. В дальнейшей работе планируется повышение точности метода, улучшение его автоматизации и учет динамических сил.

Литература

1. *Вылук В. П., Руднев С. К., Калаев А. С.* Проектирование и использование рычажных роботов-манипуляторов в рамках учебного процесса. // Будущее Машиностроения России. Сборник докладов XVII Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов. Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2025. – с. 7-10.
2. *Воробьев П. С.* Управление жесткостью промышленных роботов для механической обработки. // Столыпинский вестник. №7 – 2024.
3. *Miguel Díaz-Rodríguez., Pedro Araujo-Gómez.* Performance Index for Dimensional Synthesis of Robots for Specific Tasks. // Robotics – 2022. DOI:10.3390/robotics11020051
4. *Anthony Jubien, Gabriel Abba, Maxime Gautier.* Joint Stiffness Identification of a Heavy Kuka Robot with a Low-cost Clamped End-effector Procedure. // ICINCO 2014 - 11th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics – 2014. – pp. 585-591. DOI:10.5220/0005115805850591
5. *Грубый С. В.* Расчет сил и момента резания при фрезеровании концевыми фрезами. // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. №10 – 2020. – с. 26-37. DOI:10.18698/0536-1044-2020-10-26-37