

УДК 621.01

Ю. В. Турыгин, доктор технических наук, профессор, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Ю. В. Зубкова, аспирант, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

ДИНАМИЧЕСКАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ ПОГРЕШНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ВЫХОДНОГО ЗВЕНА МЕХАТРОННОГО КОМПЛЕКСА

Изложена динамическая модель процесса позиционирования выходного звена мехатронного модуля движения при выполнении им рабочей функции с учетом его динамических характеристик. Разработанная математическая модель позволит получить более полную картину процесса позиционирования выходного звена мехатронного комплекса АТК с учетом инерционных сил и тем самым повысить его точность при обработке пространственной траектории произвольной формы.

Ключевые слова: позиционирование, автоматизация, мехатронный модуль, погрешность, динамическая модель.

Развитие современного производства требует постоянного повышения качества ответственных изделий, получаемых при помощи таких процессов, как сварка, резка, наплавка, покраска. Все большее внимание уделяется выполнению манипулятором рабочей функции, например, обработка рабочим органом манипулятора некоторой траектории с заданной точностью позиционирования. При этом должна быть соблюдена установленная степень точности.

В настоящее время к точности позиционирования выходного звена мехатронной системы предъявляются повышенные требования, что связано с развитием технологий и достижением за счет точности высокой надежности и производительности. Мехатронная система компонуется на базе двух и более мехатронных модулей автоматизированного технологического комплекса (АТК) и представлена совокупностью мехатронных модулей движения (ММД).

Обработка траектории исполнительным устройством мехатронной системы может осуществляться по заранее заданной программе без каких-либо корректирующих воздействий. Тем самым достигнуть необходимой точности не всегда удается. Автоматическое слежение за траекторией было введено в промышленную эксплуатацию после многолетних исследований, что объяснялось трудностью достижения надежности функционирования подобных систем, а также трудностью аппаратурной реализации этого способа.

Применение системы контроля за положением выходного звена [1] является обязательным при существенных термических или иных деформациях изделия (например, в процессе сварки) или когда требуется получить высокую точность позиционирования. Контроль за положением производится либо с помощью оптической системы, либо с помощью систем, принцип работы которых основывается на использовании датчиков положения различного типа (ферромагнитные, вторично-эмиссионные, рентгеновские датчики положения и т. д.).

Однако следует отметить, что применение современных контролирующих систем не всегда позволя-

ет осуществлять процесс позиционирования выходного звена мехатронной системы с заданной степенью точности и в реальном масштабе времени. При большой массе рабочего органа ММД и/или при больших динамических нагрузках выходного звена (высоких скоростях и ускорениях) возникают значительные силы и моменты, что приводит к отклонению рабочего органа от желаемой траектории. Вследствие разного рода погрешностей система управления позиционированием «не успевает» обрабатывать сигналы рассогласования и осуществлять соответствующие воздействия для коррекции положения рабочего органа.

В связи с этим предложена модель процесса позиционирования выходного звена при обработке заданной траектории с целью сократить время реакции системы позиционирования с учетом инерционных характеристик ММД в составе АТК. Предлагается определять величину компенсации по положению при позиционировании рабочего органа ММД при обработке траектории на основании определения величины динамической составляющей погрешности ММД [2]. Под динамическими погрешностями $\Delta_{\text{дин}}$ понимаются погрешности, возникающие от действующих в ММД скоростей, ускорений, сил и моментов.

Динамическая модель мехатронного комплекса

Динамическая модель исполнительного устройства может быть построена на основе использования известных законов ньютоновской или лагранжевой механики. Однако использование данных методов обладает низкой вычислительной эффективностью, поэтому для анализа динамических характеристик мехатронных модулей удобно использовать тензорное исчисление. Тензорный анализ основан на исследовании инвариантов – объектов, остающихся неизменными при преобразованиях координат. Инвариант можно описать уравнением в некоторой координатной системе. При изменении координатного базиса уравнение изменит свою форму, но сам инвариант останется неизменным. То есть тензорный анализ является эффективным методом создания аналитических зависимостей, при этом решается проблема

трансформации координат при переходе от одного базиса к другому.

При перемещении рабочих органов ММД в процессе отработки траектории необходимо учитывать динамические характеристики как каждого ММД, так и всей мехатронной системы АТК в целом. Действующие в ММД скорости, ускорения, силы и моменты оказывают влияние на точность позиционирования выходного звена при прохождении траектории. Рассчитываемые в реальном масштабе времени параметры динамики системы, а именно значение соответствующего инварианта, позволяют корректировать положение рабочего органа в соответствии с геометрией траектории и с требованиями точности ее отработки.

Динамическая модель исполнительных устройств ММД

Под воздействием динамических нагрузок происходит некоторая деформация преобразователей движения исполнительных устройств ММД и, как следствие, смещение действительного положения выходного звена ММД относительно заданной позиции. Под динамическими силами понимают инерционные силы при разгоне рабочего органа, силы, обусловленные технологическим процессом (если имеются), и силы трения в направляющих. Обычно величиной сил трения пренебрегают ввиду их незначительного воздействия на положение рабочего органа [3].

При построении динамической модели динамическим инвариантом I_D является полная кинетическая энергия многосвязного механизма T . Выбор I_D в качестве инварианта обусловлен тем, что кинетическая энергия является скалярной величиной, исследование и анализ которой лежат в основе ряда динамических моделей [3].

В общем случае для n -звенного устройства удвоенная кинетическая энергия в обобщенных координатах определяется в виде

$$T = I_D = f\left(\frac{d\bar{q}}{dt}, I\right), \quad (1)$$

где I – тензор инерции ($n \times n$) многосвязного механизма.

Полная кинетическая энергия рассматриваемой мехатронической системы состоит из суммы кинетических энергий манипуляционного механизма и нагрузки.

Динамический инвариант I_D можно представить как симметричную квадратную форму обобщенных скоростей:

$$I_D = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n I_{ij} \frac{d\bar{q}_i}{dt} \frac{d\bar{q}_j}{dt}, \quad (2)$$

где I_{ij} – элементы тензора инерции I ($n \times n$) мехатронического устройства.

Характеристическая поверхность, соответствующая матрице (14), представляет собой эллипсоид динамики, уравнение которого для n -степенного ММД имеет вид [3]

$$U^{-T} I \bar{U} = 1. \quad (3)$$

Эллипсоид динамики описывает инерционные свойства механического устройства в данной точке рабочей зоны и в заданном направлении движения (рис. 1). При этом большая ось эллипсоида указывает направление, в котором ММД имеет минимальный момент инерции. Именно это направление наиболее выгодно с динамической точки зрения.

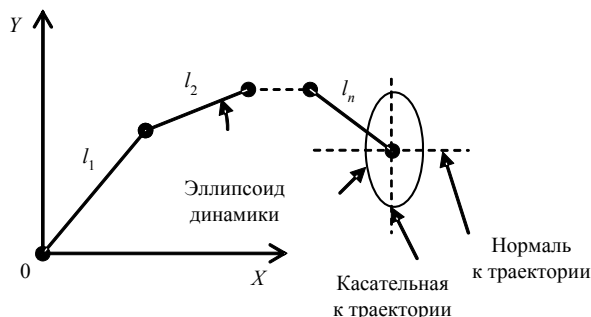


Рис. 1. Эллипсоид динамики мехатронного модуля

Использование такого подхода позволяет определить динамическую составляющую погрешности движения ММД на основании значения динамического инварианта, который отражает инерционные характеристики исполнительных устройств ММД в составе АТК.

Анализ полученной динамической модели системы позволяет определять возникающие отклонения конечных точек рабочих органов от заданного положения при позиционировании выходных звеньев мехатронной системы с учетом действующих сил, скоростей и ускорений.

Учитывая, что в состав АТК могут входить два и более мехатронных модулей движения, динамические составляющие погрешности отработки траектории выходными звеньями ММД определяются на основании трехмерного моделирования мехатронной системы.

Определение точности позиционирования выходного звена ММД с учетом динамики

Рассмотрим определение точности позиционирования выходного звена согласно предложенной модели на примере n -звенного манипулятора с k степенями свободы. Кинематическая схема манипулятора приведена на рис. 2.

Математически задача сводится к следующему. Необходимо обеспечить совмещение единичного вектора \bar{N} , направленного по оси схвата и приложенного в центре рабочего органа (точки M), находящегося в подвижной системе координат $X_n Y_n Z_n$ n -звенного манипулятора с заданной в неподвижной системе координат $X_0 Y_0 Z_0$ единичного вектора \bar{N}_0 , направленного по оси нагрузки и приложенного в точке M (рис. 2, а). Вместе с тем предполагается, что программное обеспечение вектора \bar{N}_0 обобщенных координат полностью известно.

Однако, учитывая наличие случайных погрешностей, действительные значения вектора обобщенных

координат неизвестны. В результате этих погрешностей возникают: линейные погрешности ($\Delta x \Delta y \Delta z$) смещения точки M вдоль соответствующих осей;

угловая погрешность (α) обработки программного значения вектора обобщенных координат, угла между векторами \bar{N} и \bar{N}_0 (рис. 2, а).

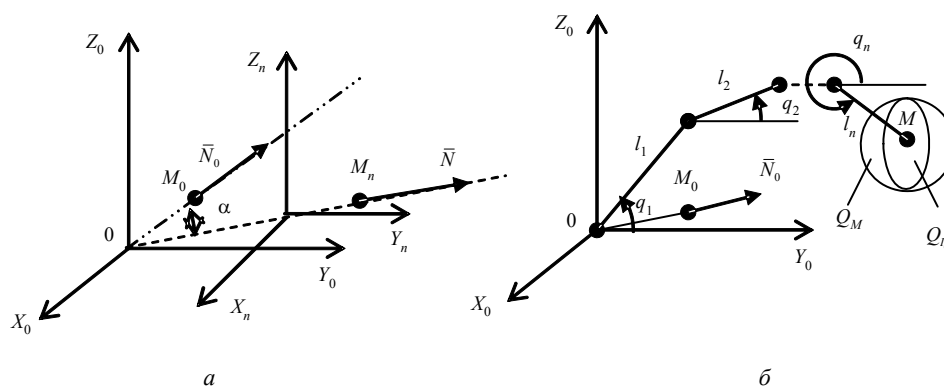


Рис. 2. Кинематическая схема n -звенного манипулятора

Рассмотрим n -звенный манипулятор (рис. 2, б). При позиционировании выходного звена по траектории введем область несовпадения векторов \bar{N} и \bar{N}_0 , которую обозначим Q_m . Геометрическое представление динамического инварианта обозначим $Q_{дл}$.

Критерием точности манипулятора в данном случае является

$$P_M = \int_{Q_M} f(\bar{q}) d\bar{q} - \sum_{K=-\infty}^{\infty} P_K - \sum_{I=-\infty}^{\infty} P_I, \quad (4)$$

где P_K, P_I – вероятность попадания случайной величины q в области Q_m и в область $Q_{дл}$ соответственно.

Таким образом, граница проекции области Q_m на множество векторов \bar{p} является сферой с центром в точке M и радиусом E (рис. 2, б), граница области $Q_{дл}$ имеет форму эллипсоида. Попадание концевой точки M выходного звена внутрь эллипсоида обеспечивает заданную точность позиционирования, то есть выполняется условие

$$Q_1, Q_2, \dots, Q_n; Q_{дл} \in Q_S, \quad (5)$$

где Q_1, Q_2, \dots, Q_n – множества положений концевых точек выходных звеньев ММД, где $n = 1 \dots k$ – число ММД в составе АТК; Q_S – множество точек заданной траектории.

При «непопадании» концевых точек выходных звеньев всех ММД в заданную область, форма и размер которой определяются геометрией траектории, производится корректировка положения выходного звена с учетом величины динамической составляющей погрешности мехатронного комплекса.

При электронно-лучевой сварке масса обрабатываемой заготовки может составлять до 200 кг, а масса рабочего органа – электронно-лучевой пушки – десятки кг, тогда величина динамической погрешности позиционирования ММД составит до 10 % от величины полной погрешности мехатронного комплекса.

Выводы

1. В результате анализа современных систем контроля за положением выходного звена выявлены факторы, не учитываемые при позиционировании выходного звена при обработке траектории в режиме реального времени, а именно динамические характеристики мехатронных модулей движения, входящих в состав АТК.

2. Установлено, что на положение концевых точек мехатронных модулей движения при обработке траектории, влияет величина динамической составляющей полной погрешности мехатронных модулей АТК. Определение данной погрешности и ее учет в качестве корректирующей величины при управлении позиционированием обеспечивает более точную обработку траектории выходным звеном ММД.

3. Разработана математическая модель процесса позиционирования выходного звена при обработке траектории в режиме реального времени, учитывающая динамическую погрешность мехатронной системы АТК и включающая в себя обеспечение критериев позиционирования. Предложенная модель позволяет получить более полную картину всего процесса позиционирования выходного звена ММД при заданных режимах с учетом факторов, влияющих на положение концевой точки выходного звена. Это повысит точность позиционирования рабочих органов ММД и, как следствие, качество изделий.

Библиографические ссылки

1. Зубкова Ю. В. Исследование влияния полной погрешности при позиционировании электронного луча в АЭЛТК. Актуальные проблемы машиностроения : Материалы Всерос. молодежной интернет-конф. 26–28 апреля 2011 г., Владимир. – 2011. – С. 8–13.
2. Turygin G. V., Smirnov V. N., Zubkova J. V. The total error of mechatronic module in control model of electron beam positioning process during electron-beam welding // Proceedings of 14th International Conference on Mechatronics. June 1–3, 2011. – Trencianske Teplice, Slovakia.
3. Егоров О. Д., Подураев Ю. В. Конструирование мехатронных модулей: – М. : ИЦ МГТУ «Станкин», 2004. – 360 с.

Yu. V. Turygin, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University
J. V. Zubkova, Post-graduate, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

Positioning Error Dynamic Component of Mechatronic Complex Output Element

The paper describes a dynamic model of the positioning process of mechatronic motion module output element during work function execution with account of its dynamic characteristics. The developed mathematical model will allow obtaining an ultimate pattern of the positioning process of mechatronic complex output element taking into account inertial forces. Its accuracy is thereby increased when following three dimensional arbitrary trajectory.

Key words: positioning, automation, mechatronic module, error, dynamic model.

УДК 621.941.01

С. В. Жилиев, кандидат технических наук, доцент, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

С. Д. Кугультинов, доктор технических наук, профессор, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

И. В. Попов, ОАО «Воткинский завод»

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗАДАННОЙ СТОЙКОСТИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ РАСТАЧИВАНИИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6

Приведены результаты исследований по обеспечению заданной стойкости режущего инструмента при растачивании крупногабаритных деталей из титанового сплава ВТ6.

Ключевые слова: титановые сплавы, режимы резания, стойкость режущего инструмента, экспериментальные исследования.

Механическая обработка титановых сплавов сопряжена с рядом проблем, к которым можно отнести их склонность к налипанию и задирам и низкую теплопроводность. Кроме того следует отметить их высокую химическую активность, приводящую к активному взаимодействию с кислородом, азотом, водородом и углеродом, в результате чего образуются твердые растворы, резко снижающие пластичность титанового сплава [1, 2].

Особенно большие проблемы возникают при обработке крупногабаритных деталей, когда продолжительность обработки только одной поверхности может достигать десяти и более часов. При растачивании таких отверстий стойкости режущего инструмента недостаточно для обработки всей поверхности, что ведет к увеличению трудоемкости обработки. Кроме того в местах остановки процесса резания для замены резца наблюдается неровность высотой 0,2...0,5 мм. Наличие такого дефекта на обработанной поверхности недопустимо и поэтому требуется дополнительная обработка для его устранения, что влечет за собой еще большее увеличение трудоемкости.

Это вынуждает назначать режимы резания с большим запасом в сторону уменьшения, зачастую наугад, так как проводить экспериментальные исследования при обработке реальных деталей в условиях производства не представляется возможным, что существенно снижает эффективность механической

обработки крупногабаритных деталей из титановых сплавов.

Для совершенствования технологии обработки резанием крупногабаритных деталей из титанового сплава ВТ6 большое значение имеет назначение рациональных режимов резания, позволяющих производить обработку всей поверхности детали за период стойкости режущего инструмента с обеспечением требуемых точности и качества. При этом назначение режимов резания, как показывает производственная практика, сводится к выбору рациональной скорости резания, так как глубина резания обычно равна припуску на обработку, а подача определяется исходя из требуемой шероховатости обработанной поверхности и жесткости системы СПИД. Кроме того глубина резания, как и подача, может ограничиваться мощностью привода главного движения.

Для выбора рациональной скорости резания, позволяющей обеспечить заданную стойкость режущего инструмента, были проведены экспериментальные исследования для получения зависимости стойкости от скорости резания. Проводить такие исследования в реальных производственных условиях путем растачивания крупногабаритных деталей на токарно-карусельных станках не представлялось возможным из-за значительной стоимости заготовки и нормированных сроков изготовления деталей. Было принято решение о проведении экспериментальных исследований в лабораторных условиях. Получение необхо-