

$D_b(X_b, Y_b, Z_b, O_b, A_b, T_b)$ – базовая, запрограммированная точка, где X_b, Y_b, Z_b – координаты рабочей точки инструмента в базовой системе робота; O_b, A_b, T_b – углы положения инструмента в базовой системе робота. Соответственно координаты точки рассчитываются по формуле:

$$D_i = (X_b + X_i, Y_b + Y_i, Z_b + Z_i, O_b, A_b + Y_i, Y_b). \quad (10)$$

Выводы

Разработанная математическая модель управлением процесса обработки торцов пружин позволит исключить операцию по ручному программированию робота, обеспечит постоянное положение рабочей точки режущего инструмента относительно поверхности обрабатываемого металла и регулирование тока реза в режиме реального времени в процессе обработки торца пружины. Это позволит исключить возникновение дефектов «неперпендикулярность», «неплоскостность», «бугорок» и, возможно, исключить дефект «ожог».

* * *

S. A. Platov, Head of process control, SPC “Spring”, Izhevsk

Yu. V. Turygin, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

Machining of wagon boggy spring ends using plasma cutting

The process of machining the spring ends by plasma cutting is investigated. Defects appearing at this process and methods of their elimination are identified. The mathematical model of plasma cutting process control is developed.

Keywords: robotic system, spring, plasma cutting

Получено: 31.10.13

УДК 621.791.7

Ю. В. Турыгин, доктор технических наук, профессор;

Ю. В. Зубкова, старший преподаватель

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ НА ТОЧНОСТЬ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ВЫХОДНОГО ЗВЕНА МЕХАТРОННОГО КОМПЛЕКСА

Приведены результаты экспериментального исследования процесса позиционирования выходного звена мехатронной системы с целью проверки разработанной математической модели, учитывающей кинематические характеристики системы. Экспериментально подтверждена зависимость между влиянием кинематических характеристик робота и отклонением рабочего органа от заданного положения при обработке траектории.

Ключевые слова: погрешность, точность позиционирования, мехатронная система

Введение

В настоящее время значительное внимание уделяется требованиям к качеству ответственных и высоконагружаемых изделий. Для получения таких изделий необходимы установки, представляющие собой сложный комплекс. Автоматизированный технологический комплекс (АТК) включает в себя электромеханическое оборудование, центральное место в котором занимает робот-манипулятор. При выполнении манипулятором рабочей функции, например, обработка выходным звеном некоторой траектории, должна быть

Библиографические ссылки

1. Васильков Ю. В., Василькова Н. Н. Компьютерные технологии вычислений в математическом моделировании : учеб. пособие. – М. : Финансы и статистика, 2002. – 256 с.
2. Платов С. А., Турыгин Ю. В. Исследование и повышение эффективности РТК подрезки торцов пружин // Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке : сб. тр. II Всерос. науч.-техн. конф. аспирантов, магистрантов и молодых ученых с междунар. участием, 23–25 апр. 2013 г. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2013. – С. 381–384. – URL: <http://sconf.istu.ru/docs/sbornik.pdf> (дата обращения: 25.11.2013).
3. Плазменная резка металла и плазменный раскрой в Петербурге (Спб).. – URL: <http://www.metalbak.ru/plasmacutting.html> (дата обращения: 10.09.2013).
4. Kawasaki robot. – URL: http://www.kawasakirobot.dk/Files/Billeder/kawasaki/brochure/Kawasaki_F-Series.pdf (дата обращения: 25.11.2013).
5. MG-RAST Technical report and manual for version 3.3.6 – rev. 1. – URL: ftp://ftp.metagenomics.anl.gov/data/manual/mg-rast-tech-report-v3_r1.pdf (дата обращения: 25.11.2013).

соблюдена заданная степень точности. В связи с развитием технологий и достижением за счет точности высокой надежности и производительности к точности позиционирования мехатронной системы (МС), к которой можно отнести робот-манипулятор, предъявляются повышенные требования.

При обработке траектории выходным звеном (МС) по заданной программе за счет отсутствия каких-либо корректирующих воздействий достигнуть требуемой точности позиционирования не всегда удастся. Применение современных контролируемых

систем также не всегда позволяет осуществлять процесс позиционирования выходного звена МС с заданной степенью точности и в реальном масштабе времени, что объясняется особенностями технологических процессов [6].

При большой массе рабочего органа манипулятора и/или при больших динамических нагрузках выходного звена возникают значительные силы и моменты, что приводит к отклонению рабочего органа от требуемой траектории. Вследствие разного рода погрешностей система управления позиционированием «не успевает» обрабатывать сигналы рассогласования и осуществлять соответствующие воздействия для коррекции положения рабочего органа.

Для обеспечения требуемой точности в процессе позиционирования рабочего органа манипулятора с целью сократить время реакции системы управления позиционированием предложена обобщенная математическая модель [4, 5], учитывающая кинематические и инерционные характеристики робота.

Математическая модель процесса обеспечения точности позиционирования выходного звена робота с учетом кинематической погрешности

С целью получения модели обеспечения точности позиционирования выходного звена робота проведен анализ факторов, влияющих на точность положения концевой точки рабочего органа при отработке траектории. Было установлено, что полная погрешность Δr выходного звена мехатронного модуля определяется как сумма погрешности системы управления и двигателя, кинематической погрешности преобразователя движения, величины мертвого хода преобразователя движения, погрешности, вызванной податливостью преобразователя движения, и динамической погрешности. Кроме этого, факторами являются скорость выходного звена, масса рабочего органа робота и число звеньев, участвующих в движении.

На основании проведенного анализа вышеперечисленных факторов, влияющих на точность отработки траектории выходным звеном робота [4], была предложена обобщенная математическая модель [5], представленная в виде (1):

$$F_{\Delta} = \left\{ \frac{\Delta r(\Delta q, \delta_{\Sigma}, J_{\Sigma}, \Delta q', \Delta_D, I_K, I_Y, I_D, v, m, n)}{f_T} \right\}, \quad (1)$$

где Δr – полная погрешность мехатронной системы АТК; Δq – погрешность системы управления и двигателя; δ_{Σ} и J_{Σ} – кинематическая погрешность и мертвый ход преобразователя движения соответственно; $\Delta q'$ – погрешность, вызванная податливостью механизма; I_K – кинематический инвариант; I_Y – инвариант жесткости; I_D – динамический инвариант; v – скорость выходного звена МС; m – масса рабочего органа МС; n – число звеньев, участвующих в движении; $f_{T,П}$ – параметры технологического процесса.

Степень влияния этих факторов на точность позиционирования выходного звена различна и зависит от характеристик оборудования, режимов его работы и параметров технологического процесса.

В данной статье проводится экспериментальная проверка влияния кинематической погрешности как фактора, влияющего на обеспечение точности позиционирования. Поэтому в качестве допущений в предложенной модели принимаем, что остальные факторы являются в модели постоянными величинами.

Для получения уравнений описания процесса позиционирования необходимо провести анализ преобразователей движения на основе кинематической схемы робота и определить величину суммарной кинематической погрешности, приведенной к выходному звену робота [4]. Расчет величины кинематической погрешности δ_{Σ} проведен для звеньев 4, 5 и 6 робота, кинематическая схема которого изображена на рис. 1.

Для обеспечения заданной точности позиционирования робота сформулировано условие (2), при невыполнении которого производится корректировка положения выходного звена на величину $(z^{act}_i \pm \Delta z)$, где z^{act}_i – текущая (собственная) координата точки, мм; Δz – величина отклонения по координате z , мм, полученная от внешнего измерительного устройства:

$$z^{act}_i < \pm \Delta z_{задан}, \quad (2)$$

где $\Delta z_{задан}$ – заданная величина отклонения по координате z , обеспечивающая точность позиционирования, которая является составляющей радиус-вектора $\Delta r_{задан}$, определяющего погрешность позиционирования.

В данной работе входными параметрами модели являются следующие факторы: число звеньев, участвующих в движении, и виды движений. Выходным параметром модели является величина перемещения выходного звена по одной или нескольким координатам. В данном эксперименте проводится исследование точности позиционирования по координате z .

Особенностью предложенной модели является анализ процесса позиционирования выходного звена при его движении по некоторой пространственной траектории с учетом кинематических свойств системы и выбор соответствующего корректирующего воздействия.

Методика и проведение экспериментального исследования

Для проверки разработанной модели проведено экспериментальное исследование процесса позиционирования выходного звена робота с учетом кинематической составляющей полной погрешности МС. При проведении экспериментов исследовали влияние кинематической погрешности МС, остальные факторы не учитывали, считая их детерминированными. Объектом исследования являлось положение выходного звена робота.

Цель исследования: экспериментальная оценка влияния кинематической погрешности АТК на точность отработки траектории выходным звеном робота.

Задачи исследования: построить кинематическую модель робота, провести планирование эксперимента, экспериментальное исследование точности позиционирования выходного звена с ис-

пользованием разработанной модели и анализ полученных от внешнего измерительного устройства данных, определив погрешность положения выходного звена.

В качестве основного оборудования для проведения натурального эксперимента выбран шестизвеновый

робот – манипулятор компании KUKA Roboter GmbH с напольным креплением. Кинематическая схема робота приведена на рис. 1. В качестве внешнего измерительного устройства выбран электронный штангенциркуль (ШЦЦ-1) CALIPRO 150 с точностью измерений 0,01 мм.

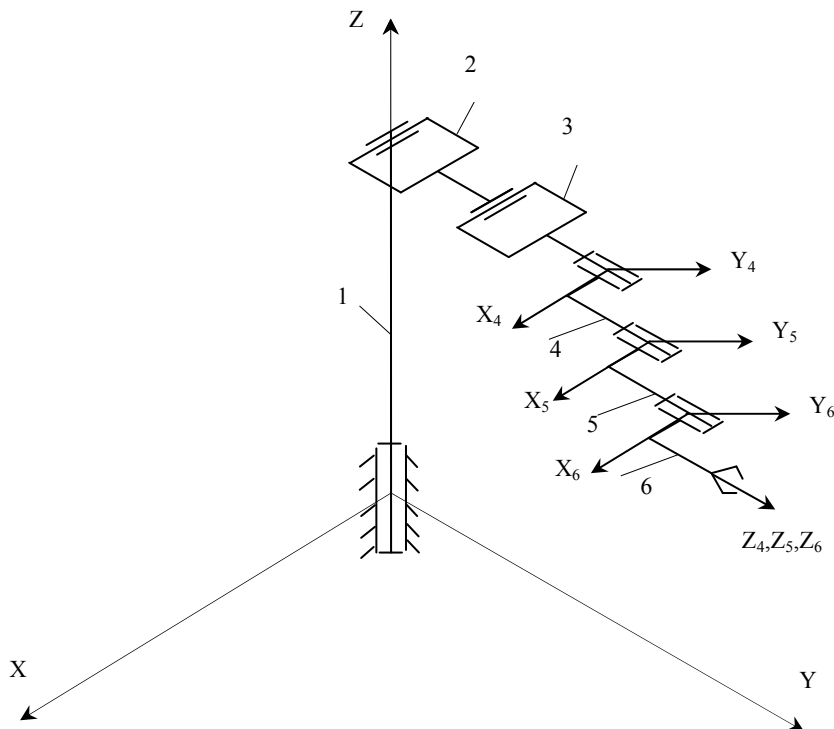


Рис. 1. Кинематическая схема робота

Учитывая, что конструкция робота известна и траектория движения выходного звена строго детерминирована, была построена кинематическая модель системы. Анализ полученной модели позволил определить ошибку позиционирования выходного звена робота [2, 4]. Величина ошибки позиционирования выходного звена в точке определялась численным методом на основании методики вычисления полной погрешности [1] с учетом кинематической схемы робота. Для данной конструкции робота расчетная величина кинематической погрешности робота δ_{Σ} (4, 5, 6 звенья) составила 50 мкм.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 2. На монтажной площадке 1 выходного звена робота закреплен датчик положения 2, определяющий отклонения положения выходного звена от идеального положения на контактной площадке 3 исследуемой поверхности 4. При проведении данного эксперимента ось выходного звена робота $z_{\text{вых}}$ является осью вращения звеньев 4, 5, 6 (рис. 1) и направлена перпендикулярно исследуемой поверхности, как изображено на рис. 2.

Для оценки возникающих отклонений от заданного положения в измерительную цепь включен блок сравнения и вычислений 5, входящий в состав персонального компьютера 6 (рис. 2). Для преобразования и усиления аналоговых сигналов, поступающих от датчика, в цифровые сигналы для обработки на

ЭВМ используется блок усилителей сигналов и аналого-цифровой преобразователь (АЦП) 7.

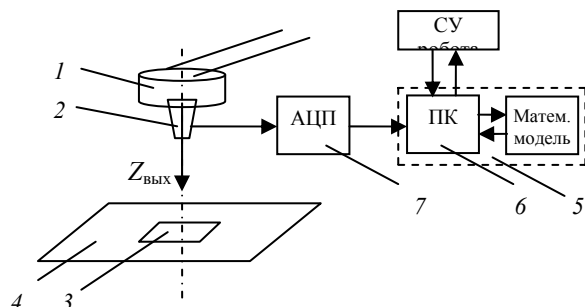


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для исследования точности позиционирования выходного звена робота

Модель идеальной траектории задается в глобальных координатах роботу с помощью программатора. Начиная с первой заданной точки, робот начинает движение по траектории в режиме *test* (тестовый) с номинальной скоростью для всех звеньев, причем текущие координаты i -й точки $(x_i^{\text{act}}, y_i^{\text{act}}, z_i^{\text{act}})$ определяются собственной информационной системой робота. Перемещение в следующую $(i + 1)$ -ю точку траектории осуществляется согласно алгоритму:

1. С учетом полученной величины кинематической погрешности определяются координаты сле-

дующей точки как $(x^{act}_i, y^{act}_i, z^{act}_i \pm \delta_\Sigma)$. 2. Выходное звено робота по программе движения перемещается в эту точку. 3. При достижении точки определяются актуальные координаты точки $(x^{act}_i, y^{act}_i, z^{act}_i)$ с помощью информационной системы робота, и одновременно происходит измерение отклонения по положению Δz датчиком действительного положения выходного звена. 4. Проводится анализ полученных данных и при выполнении условия (2) делается вывод об обеспечении заданной точности позиционирования робота. 5. При получении данных, когда условие обеспечения точности (2) ложно, делается вывод о необходимости корректировки положения для следующей точки с учетом показаний датчика в зависимости от знака величины отклонения Δz от идеального положения.

Следует отметить, что датчиком положения проводился только внешний контроль за действительным положением выходного звена робота. Обеспечение заданной точности позиционирования выходного звена робота осуществляется на основании предложенной модели процесса позиционирования.

Результаты экспериментального исследования процесса позиционирования

Проведены две серии натурных экспериментов. Перед проведением экспериментов были заданы контрольные точки с координаты точек по оси z . В первой серии экспериментов определены текущие положения выходного звена робота в каждой исследуемой точке. Текущие координаты по оси z были получены как $(\Delta z + z^{act}_i)$ на основании сравнения координаты z , полученной с помощью собственной информационной системы робота с величиной от внешнего измерителя.

Во второй серии экспериментов была использована модель, учитывающая кинематические характеристики робота. В каждой серии было проведено по два эксперимента для двух точек траектории. На рис. 3 представлены результаты однофакторного эксперимента в виде графиков, отражающих отклонения выходного звена робота от идеального положения без использования предложенной модели (а) и с ее применением (б).

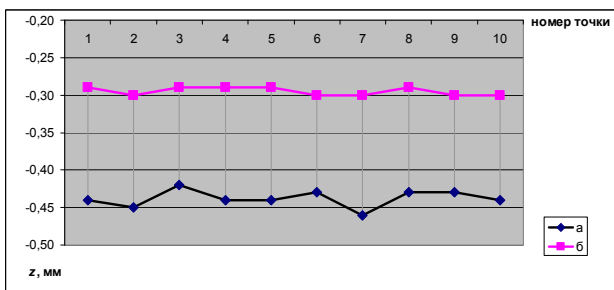


Рис. 3. Исследование точности позиционирования выходного звена: а – без применения модели; б – с применением модели

При обработке результатов экспериментов использовались методы математической статистики и регрессионного анализа. Получена полиномиальная модель для описания результатов экспериментов без учета кинематических характеристик робота (3):

$$y = -0,0000006x^6 - 0,0003x^5 + 0,0045x^4 - 0,033x^3 + 0,1187x^2 - 0,1874x - 0,3433, \quad (3)$$

где x – номер измерения, [1;10]; y – величина координаты z , мм.

С учетом кинематических характеристик робота получаем (3):

$$y = -0,05x^6 - 0,0005x^5 + 0,007x^4 - 0,047x^3 + 0,16x^2 - 0,2517x - 0,1577. \quad (4)$$

На основе статистического анализа экспериментальных данных определено среднее значение отклонения от номинального значения положения, которое составило для эксперимента 1 (график а) – 0,43 мм, для эксперимента 2 (график б) – 0,29 мм. Таким образом, среднее значение отклонения для эксперимента 2 уменьшилось с –0,43 мм до –0,29 мм, т. е. на 0,14 мм, что является положительным эффектом от использования модели. Кроме того, было определено среднее квадратическое отклонение величины для двадцати измерений. Для эксперимента 1 оно составило 0,0675 мм, для эксперимента 2, соответственно, 0,0075 мм. В результате применения разработанной модели улучшилась стабильность процесса позиционирования выходного звена, о чем свидетельствует уменьшение величины среднего квадратического отклонения с 0,0675 мм до 0,0075 мм, что доказывает эффективность предложенного подхода.

Проведенный натурный эксперимент позволил выполнить проверку разработанной математической модели, в которой основным фактором является кинематическая погрешность оборудования.

Выводы

1. В результате проведенного экспериментального исследования точности позиционирования выходного звена МС было установлено, что применение предложенной модели при обработке траектории является эффективным средством повышения точности позиционирования мехатронного комплекса.

2. Полученные в результате применения методов математической статистики данные, с одной стороны, показывают уменьшение величины среднего квадратического отклонения, что свидетельствует об уменьшении разброса значений и, следовательно, об улучшении стабильности процесса позиционирования. С другой стороны, полученное среднее значение отклонения от номинального значения положения также уменьшилось, что подтверждает работоспособность модели.

Библиографические ссылки

- Егоров О. Д., Подураев Ю. В. Конструирование мехатронных модулей : учеб. – М. : Станкин, 2004. – 360 с.
- Подураев Ю. В. Мехатроника: основы, методы, применение. – 2-е изд., стер. – М. : Машиностроение, 2007. – 256 с.
- Турыгин Ю. В., Зубкова Ю. В. Динамическая составляющая погрешности позиционирования выходного звена мехатронного комплекса // Вестн. Ижев. гос. техн. ун-та. – 2012. – № 2. – С. 43–46.

4. Turygin, Y. V.; Zubkova, J. V.; Maga, D. Investigation of Kinematic Error in Transfer Mechanisms of Mechatronic System // Proceedings of 15th Mechatronika 2012. – Praha : Czech Technical University in Prague, 2012. – Pp. 351-353. – ISBN 978-80-01-04985-3.

5. Турыгин Ю. В., Зубкова Ю. В. Исследование точности позиционирования выходного звена мехатронной системы // Управление в технических, эргатических, организационных и сетевых системах – УТЭОСС-2012 : материалы конф. (Санкт-Петербург, 9–11 окт. 2012 г.) : в рамках

5-й рос. мультikonф. по проблемам управления / ГНЦ РФ ОАО «Концерн „ЦНИИ „Электроприбор“» [и др.]. – СПб., 2012. – С. 814–817.

6. Pintér, T.; Božek, P. Industrial Robot Control using Inertial Navigation System // Advanced Materials Research Vol. 605-607 : 2nd International Conference on Materials and Products Manufacturing Technology, ICMPT 2012, Guangzhou, 22-23 Sept. 2012. – Pp. 1600-1604. – ISBN 978-303785544-7.

* * *

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

Experimental investigation of kinematic error influence on positioning accuracy of output element of mechatronic complex

The paper describes the results of experimental researching the positioning process of the output element of a mechatronic system in order to check the developed mathematical model taking into account the system characteristics. The relationship between kinematic characteristics of a manipulator and the actuator deviation from the assigned position in track following is experimentally confirmed.

Keywords: positioning accuracy, mechatronic system, error

Получено: 07.06.13

УДК 678; 67.02; 62-1/-9

Ф. А. Уразбахтин, доктор технических наук, профессор;
Ю. Ю. Харинова, аспирант
Воткинский филиал

Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОПИТКИ ПРЕПРЕГА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВОЛОКНИСТЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ*

Предлагается математическая модель процесса пропитки стекловолоконного препрега, позволяющая определить возникновение предельных состояний, а также количественно оценить качество выполнения процесса пропитки препрега волокнистых конструктивных композитных материалов.

Ключевые слова: пропитка, математическая модель, предельное состояние, показатель критичности

При создании композиционных материалов, состоящих из связующего и наполнителя в виде стекловолоконной ткани для деталей и узлов ракет, выполняется технологическая операция пропитки. Операция является определяющей при создании полуфабриката (препрега).

Необходимые механические характеристики таких препрегов возникают при выборе наполнителя и связующего, физико-механических и технологических параметров, а также качественном выполнении самого процесса пропитки. Сам процесс сводится к целенаправленному взаимодействию между связующим и тканым стекловолоконным наполнителем. Он состоит из двух последовательных действий – нанесения связующего, находящегося в жидкой консистенции, на поверхность наполнителя и проникновения его внутрь волокнистой структуры наполнителя.

Нанесение связующего на поверхность проводится на вертикально или горизонтально движущуюся стекловолоконную ткань наполнителя. На практике широкое применение находит вариант, при котором рулонная стекловолоконная ткань

пропускается через ванну, заполненную связующим, находящимся в жидкой консистенции. Именно для этого способа осуществляется построение математической модели.



Технологическая система процесса пропитки