Сведения об авторах

Тугашова Лариса Геннадьевна, ст. преподаватель кафедры автоматизации и информационных технологий, Альметьевский государственный нефтяной институт, г. Альметьевск, тел: 8(8553)310151, e-mail: tugashova@yandex.ru

Булатов Ринат Булатович, к. т. н., доцент кафедры автоматизации и информационных технологий, Альметьевский государственный нефтяной институт, г. Альметьевск, тел: 8(8553)310151, e-mail: rinat1938@mail.ru.

Information about the authors

Tugashova L. G., Senior Teacher at the Department of Automation and Information Technologies, Almeteyevsk State Petroleum Institute, phone: 8(8553)310151, e-mail: tugashova@yandex.ru

Bulatov R. B., Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of Automation and Information Technologies, Almeteyevsk State Petroleum Institute, phone: 8(8553)310151, e-mail: rinat1938@mail.ru.

УДК 621.9.06

**РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И ВВОД КОРРЕКЦИЙ
В РАБОТУ ОБОРУДОВАНИЯ С ЧПУ**

**MATHEMATICAL MODEL DEVELOPMENT AND CORRECTIONS IN THE
OPERATION OF CNC EQUIPMENT INPUT**

**Р. Ю. Некрасов, У. С. Путилова, А. И. Стариков, И. В. Соловьёв,
Ю. А. Темпель**

R. Yu. Nekrasov, U. S. Putilova, A. I. Starikov, I. V. Soloviev, Yu. A. Tempel

Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

*Ключевые слова: моделирование технологических процессов; числовое программное
управление; диагностика технологического оборудования*

*Key words: modeling of technological processes; numerical control;
diagnostics of technological equipment*

Развитие научно-технического прогресса предъявляет все более жесткие требования к машиностроительной отрасли в части технологической возможности изготовления той или иной продукции. Зачастую опережающая мысль ученых приводит к невозможности реализации смелых идей из-за отсутствия технологий или невозможности выполнения операций по изготовлению изделий на существующем технологическом оборудовании. Одним из технологических факторов, лимитирующих темпы научно-технического прогресса, является возможность обеспечения требуемой точности в процессе обработки на технологическом оборудовании. Реализовать ужесточающие требования невозможно без применения станков с числовым программным управлением (ЧПУ).

Проблемам повышения точности обработки на станках с ЧПУ посвящены работы многих современных исследователей. Данная проблема все более актуальна в условиях изменения технологических составляющих силы резания, приводящего к отклонениям расположения элементов технологических систем (ТС) в процессе обработки. Системы ЧПУ позволяют отслеживать нагружение приводов и вносить соответствующие коррективы в расположение исполнительных рабочих органов (ИРО) станков. Но, учитывая многокритериальный характер возникающих погрешностей, полного решения проблемы компенсации отклонений расположения всего комплекса элементов технологических систем при обработке на станках с ЧПУ к настоящему времени не найдено [1].

Для исключения погрешностей, вызванных технологическими составляющими силы резания, Б. С. Балакшиным было предложено использование систем адаптивного управления, однако данные системы не нашли широкого применения в станках с ЧПУ, так как стабилизация силы резания сама по себе при изменении входных параметров процессов обработки не обеспечивает постоянства отклонений расположения комплекса элементов технологических систем в различных точках рабочего пространства станков с ЧПУ.

Для стабилизации силы резания, величина которой определяется по лимитирующему участку траектории перемещения ИРО станка, на практике приходится в значительной мере занижать режимы резания на тех участках траектории, где этого не требуется по техническим условиям. При этом стабилизация силы резания соответствует выбранным критериям оптимальности [2–4]. Учеными Тюменского индустриального университета предлагается проведение комплекса предварительной и оперативной диагностики ТС станков с ЧПУ с последующим оперативным вводом коррекций в траектории движения ИРО станков непосредственно в процессе обработки, с учетом данных оперативной диагностики процесса резания.

Качество проведения диагностики технического состояния ТС является основополагающим фактором, определяющим точность обработки. Качество и, соответственно, результативность проведения диагностики напрямую зависит от количества факторов, влияющих на точность обработки, учитываемых при реализации диагностических мероприятий. В ходе исследования влияния, осуществляемого отдельными факторами, на итоговую точность, а точнее на величину итоговой погрешности, было сформулировано предложение о целесообразности разделения диагностических мероприятий на предварительные и оперативные. Принципиальная схема представлена на рисунке 1:

- группа параметров 1 представляет собой параметры предварительной диагностики, служащие для определения величин оперативных коррекций в процессе обработки для всех деталей и инструмента;
- группа параметров 2 представляет собой параметры предварительной диагностики, служащие для определения величин оперативных коррекций в процессе обработки для конкретной детали и инструмента;
- группа параметров 3 представляет собой параметры текущей оперативной диагностики, служащие для определения величин, их суммирования и ввода оперативных коррекций в процессе обработки по траекториям перемещений инструмента и режимам резания.

Деление диагностических мероприятий на предварительные и оперативные обусловлено использованием различного оборудования для их осуществления, а также получаемыми в итоге значениями погрешностей. Принципиальное различие заключается в статической и динамической природе технического состояния ТС. При проведении предварительной диагностики ТС находится в статическом состоянии, то есть не проводится обработка, что позволяет использовать высокоточное оборудование для ее осуществления, такое как лазерные системы контроля точности позиционирования ИРО. Существенным недостатком предварительной диагностики является пренебрежение отдельными факторами, влияющими на величину возникающих в процессе обработки погрешностей. Необходимо заметить, что процесс обработки имеет сложную стохастическую природу. Таким образом, используя данные толь-

Рис. 1. Схема диагностики и оперативного ввода коррекций

ко предварительной диагностики, невозможно добиться оптимального результата повышения точности обработки.

Исходя из данных предпосылок, для определения величин и ввода компенсирующих коррекций отклонения расположения элементов ТС необходимо использовать данные как предварительной, так и оперативной диагностики, в частности параметров силового нагружения приводов ИРО станков с ЧПУ [5].

В современных системах ЧПУ используются интерполяторы расчета траекторий по нескольким координатам, которые позволяют оперативно вводить коррекции для компенсации возникающих погрешностей не только одиночных шагов, но накопленных, например погрешности ходового винта. При этом проверка точности позиционирования производится периодически, как правило, в начале цикла обработки, а погрешность определяется по всей длине перемещения ИРО станка [6–9].

С целью разработки математической модели, позволяющей определять величину погрешности, вызываемой упругими силовыми деформациями ТС, был проведен ряд исследований, в ходе которых были экспериментально реализованы условия как статического технического состояния ТС, так и динамического. Для этого предварительно было разработано математическое описание проводимых диагностических мероприятий. Данное описание было выполнено на языке математической логики [10]:

$$\forall M \exists B_{i_2}^2 \in \left(\left(P \subset A_{i_1}^1 \right) \in \left(B_{i_2}^{2_2} \supset B_{i_2}^{2_{i_1}} \right) \right) \in \left(B_{i_2}^{2_1} \supset B_{i_2}^{2_{i_1}} \right) \rightarrow \left(B_{i_2}^{2_3} \in B_{i_2}^{2_{i_1}} \right), \quad (1)$$

$$M = A \supset P \supset W \supset B$$

где $B_{i_2}^{2_{i_1}} = \{x \in N, F(x)\}$; $\forall(0;c)$ — интервал варьирования величины нагружения; c — максимальная величина нагружения; $F(x) = x_l \cdot q^{n-1}$; $x_l = 5$ — минимальная величина нагружения, отличная от нуля; $q = 2$ — шаг изменения величины нагружения.

Читается следующим образом: для множества ТС (M), включающей множество средств технологического оснащения (A), множество предметов производства (труда) (P), множество исполнителей работ (W) и множество технических средств автоматизированных систем управления технологическим процессом (B), существует множество систем средств диагностики изменения пространственного положения ($B_{i_2}^2$) предмета труда (P) установленного в технологическое оснащение ($A_{i_1}^1$), нагружаемого с помощью устройства ($B_{i_2}^{2_2}$) множеством грузов ($B_{i_2}^{2_{i_1}}$), измеряемых устройством ($B_{i_2}^{2_1}$), включающим щуп ($B_{i_2}^{2_{i_1}}$), регистрируемых прибором ($B_{i_2}^{2_3}$) множество отклонений ($B_{i_2}^{2_{i_1}}$) пространственного положения. Или с точки зрения инженера-технолога: диагностика автоматизированной технологической системы операций, состоящей из средств технологического оснащения, предмета производства (труда), исполнителей работ и технических средств автоматизированной системы управления технологическим процессом, по определению изменения пространственного положения заготовки относительно оси OZ при ее нагружении составляющей силы резания P_Z заключается в следующем: на заготовку, установленную в приспособлении, воздействуют с помощью устройства, имитирующего действие составляющей силы резания P_Z , измерительное устройство, расположенное с противоположной стороны, включающее щуп, определяет величину отклонения, записываемую регистрирующим устройством.

Для проведения предварительной диагностики элементов технологической системы, для экспериментальной установки на базе токарного станка с ЧПУ (рис. 2) была разработана схема нагружения (рис. 3).

Рис. 2. Экспериментальная установка на базе токарного станка с ЧПУ

Рис. 3. Схема диагностики отклонений расположения инструмента при его нагружении в ТС станка с ЧПУ

Диагностика осуществляется за счет эмуляции составляющих силы резания P_x 1 и P_y 2 путем нагружения подвешенными на тросах 3 гириями 4 через систему независимых блоков. Индикаторы 5 фиксируют отклонения режущего инструмента 6 в системе координат станка 7, полученные данные заносятся в систему коррекции 8 положения режущего инструмента 6, для определения величины необходимой коррекции с учетом направления перемещения режущего инструмента 6 и возникающих при обработке усилий.

Согласно разработанной схеме нагружения ИРО проведен эксперимент, в результате которого получены данные зависимости отклонений от конкретного положения элементов технологической системы (рис. 4–5).

Рис. 4. Зависимость отклонений расположения суппорта от нагрузки по оси OZ

Рис. 5. Зависимость отклонений расположения суппорта от нагрузки по оси OX

В результате аппроксимации данных диагностики, проведенной в программном комплексе MATLAB, получена зависимость отклонений ИРО ΔZ расположения суппорта станка по оси OZ от составляющей силы резания P_z при перемещении суппорта по координате OZ станка с ЧПУ (рис. 6).

Рис. 6. Аппроксимированная зависимость отклонений расположения суппорта от нагрузки по оси OZ

Соответственно, полином 3-й степени, описывающий представленную на рисунке 6 поверхность, выглядит следующим образом:

$$\Delta Z = p00 + p10 \times Z + p01 \times P_z + p20 \times Z^2 + p11 \times Z \times P_z + p02 \times P_z^2 + p30 \times Z^3 + p21 \times Z^2 \times P_z + p12 \times Z \times P_z^2 + p03 \times P_z^3, \quad (2)$$

где коэффициенты при переменных (с 95 % доверительным интервалом):

$$\begin{aligned} p00 &= 0,1751 (0,1731; 0,1772), \\ p10 &= -0,000368 (-0,0003991; -0,0003369), \\ p01 &= 0,0002162 (-2,922e-05; 0,0004615), \\ p20 &= -1,145e-08 (-3,523e-07; 3,294e-07), \\ p11 &= 1,224e-06 (1,554e-07; 2,293e-06), \\ p02 &= -1,057e-05 (-1,933e-05; -1,813e-06), \\ p30 &= 9,632e-10 (-1,849e-10; 2,111e-09), \\ p21 &= 5,315e-10 (-2,562e-09; 3,625e-09), \\ p12 &= -1,381e-08 (-2,438e-08; -3,231e-09), \\ p03 &= 9,668e-08 (2,113e-08; 1,722e-07). \end{aligned}$$

На рисунке 7 представлена аппроксимированная поверхность для зависимости отклонений расположения суппорта от нагрузки по оси OX.

Рис. 7. Аппроксимированная зависимость отклонений расположения суппорта от нагрузки по оси OX

Соответственно, полином 3-й степени, описывающий представленную на рисунке 7 поверхность, выглядит следующим образом:

$$\Delta X = p00 + p10 \times X + p01 \times P_x + p20 \times X^2 + p11 \times X \times P_x + p02 \times P_x^2 + p30 \times X^3 + p21 \times X^2 \times P_x + p12 \times X \times P_x^2 + p03 \times P_x^3, \quad (3)$$

где коэффициенты при переменных (с 95 % доверительным интервалом):

$$\begin{aligned} p00 &= 1,346 (1,329; 1,364), \\ p10 &= -0,001099 (-0,001343; -0,0008558), \\ p01 &= 0,0006868 (-0,001338; 0,002712), \\ p20 &= 1,688e-06 (-1,364e-07; 3,513e-06), \\ p11 &= -2,068e-06 (-8,976e-06; 4,84e-06), \\ p02 &= -5,871e-05 (-0,0001296; 1,214e-05), \end{aligned}$$

p30 = 3,79e-09 (–2,591e-10; 7,839e-09),
p21 = 2,232e-10 (–1,42e-08; 1,465e-08),
p12 = 2,167e-08 (–4,329e-08; 8,664e-08),
p03 = 5,737e-07 (–3,588e-08; 1,183e-06).

Таким образом, для определения величины оперативной коррекции, компенсирующей отклонения расположения элементов ТС, достаточно знать усилия, действующие на технологическую систему в конкретный момент времени.

Моделирование процессов диагностики технологических систем с использованием аппарата математической логики и вводом оперативных коррекций непосредственно в интерполятор и управляющую программу станка с ЧПУ является эффективным методом управления при обработке деталей на станках с ЧПУ. Использование предлагаемых методов предварительной и оперативной диагностики с вводом оперативных коррекций, обеспечивающих компенсацию отклонений расположения элементов ТС при их нагружении, позволяет повысить эффективность использования современных станков с ЧПУ.

Список литературы

1. Ломова О. С. Математическое моделирование структурных изменений в поверхностях заготовок при тепловых возмущениях в процессе шлифования // Омский научный вестник. – 2013. – № 2 (120). – С. 95–98.
2. Тахман С. И. Закономерности процесса изнашивания и основы прогноза износостойкости инструментов из стандартных твердых сплавов // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования. – 2010. – № 3. – С. 64–72.
3. Шаламов В. Г. Математическое моделирование при резании металлов: учеб. пособие. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007.
4. Михалев О. Н., Янюшкин А. С. Повышение степени автоматизации CAD/CAM-систем при проектировании обработки точных отверстий на многоцелевых станках с ЧПУ // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2008. – № 5. – С. 33–38.
5. Михалев О. Н., Янюшкин А. С., Кулехова Г. М. Повышение степени автоматизации CAM-систем при программировании УП для обработки точных отверстий на станках фрезерно-сверлильно-расточной группы с ЧПУ // Механика XXI века. – 2007. – № 6. – С. 246–251.
6. Ласуков А. А., Дурев В. В. Стружкообразование при обработке конструкционных материалов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – Т. 2, № 12. – С. 314–322.
7. Некрасов Ю. И. Диагностика деформирования срезаемого слоя и управление нагружением инструмента при точении на станках с ЧПУ // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2010. – № 4. – С. 57–61.
8. Совершенствование технологических процессов машиностроительных производств / А. С. Янюшкин [и др.] – Братск: Изд-во БрГУ, 2006. – 302 с.
9. Моделирование процессов диагностики технологической системы как средство повышения размерной точности при обработке на станках с ЧПУ / Н. А. Проскуряков [и др.] // СТН. – 2016. – № 1. – С. 2–5.
10. Моделирование технологических процессов диагностики и управления обработкой на станках с ЧПУ / Р. Ю. Некрасов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2015. – № 3. – С. 98–103.

Сведения об авторах

Некрасов Роман Юрьевич, к. т. н., доцент кафедры технологии машиностроения, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, тел. 8(3452)283673, e-mail: nekrasovrj@tyuiu.ru

Путилова Ульяна Сергеевна, к. т. н., доцент, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, тел. 8(3452)283671, e-mail: putilovaus@tyuiu.ru

Стариков Александр Иванович, ассистент кафедры технологии машиностроения, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, тел. 8(3452)283673, e-mail: hapsai@rambler.ru

Соловьёв Игорь Владимирович, ассистент кафедры технологии машиностроения, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, тел. 8(3452)283673, e-mail: aragorn89_89@mail.ru

Темпель Юлия Александровна, ассистент кафедры технологии машиностроения, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, тел. 8(3452)283673

Information about the authors

Nekrasov R. Yu., Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of Technology of Machine Building, Industrial University of Tyumen, phone: 8(3452)283673, e-mail: nekrasovrj@tyuiu.ru

Putilova U. S., Candidate of Engineering, Associate Professor, Industrial University of Tyumen, phone: 8(3452)283671, e-mail: putilovaus@tyuiu.ru

Starikov A. I., Teaching Assistant at the Department of Technology of Machine Building, Industrial University of Tyumen, phone: 8(3452)283673, e-mail: hapsai@rambler.ru

Soloviev I. V., Teaching Assistant at the Department of Technology of Machine Building, Industrial University of Tyumen, phone: 8(3452)283673, e-mail: aragorn89_89@mail.ru

Tempel Yu. A., Teaching Assistant at the Department of Technology of Machine Building, Industrial University of Tyumen, phone: 8(3452)283673