

# ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ

УДК 621.81.004.1;621.9.015

В.В. Агафонов, Д.Н. Финатов, Д.И. Петрешин

## АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОБРАБОТКОЙ НА СТАНКАХ С УЧЕТОМ ЖЕСТКОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ

*Брянский государственный технический университет  
Брянск, Россия*

Жесткость станка, как элемент технологической системы (ТС), оказывает существенное влияние на такие важнейшие показатели качества изготовления деталей, как точность получаемых размеров, форму и взаимное положение обработанных поверхностей, их волнистость и шероховатость, а также стабильность этих показателей в заданных пределах [1]. Поскольку станок, будучи составной частью замкнутой ТС, является системой разомкнутой, а замыкание ветвей инструмента и заготовки осуществляется силовыми и кинематическими параметрами процесса резания, то жесткость станка выступает как критерий качества при решении прямой задачи управления точностью обработки и как расчетный критерий при решении задачи проектирования.

В настоящее время в результате теоретических и экспериментальных исследований накоплен значительный материал по технологическому обеспечению качества обработки деталей, что позволяет создавать математические модели управления процессом обработки на станках. Однако эффективность использования таких моделей не всегда дает удовлетворительный результат, так как они с недостаточной полнотой учитывают влияние сложной многокоординатной упругой системы (УС) станка на статическую и динамическую составляющую жесткости технологической системы и, следовательно, на качество обработки в реальном времени. На кафедре «Автоматизированные технологические системы» БГТУ разработана методика инженерных расчетов статической и динамической составляющей жесткости станка как элемента ТС в реальном времени для создания математических моделей адаптивных систем так называемого прогнозирующего типа с использованием систем ЧПУ класса PCNC на базе серийных компьютеров и программирования обработки на языках высокого уровня.

В основе методики лежит сочетание трехмерной статической и динамической моделей УС станка, приведенной к двумерной модели. Ее реше-

ние основано на так называемой теории координатной связи [2], согласно которой УС станка со многими степенями свободы приводится к эквивалентной УС с двумя степенями свободы по двум главным осям жесткости  $X_1$  и  $X_2$ , одна из которых ( $X_1$ ) проходит через так называемый «центр жесткости» УС и является осью с максимальной жесткостью. Методика имеет блочное строение и содержит ряд этапов, результаты решения которых имеют как самостоятельное значение, так и взаимосвязаны между собой. Такое построение методики позволяет достаточно просто разрабатывать программное обеспечение систем автоматического управления и проектирования, а также вносить изменения и дополнения в расчетные процедуры методики.

Методика расчета состоит из последовательного решения следующих основных этапов:

- 1) анализ структуры УС станка и расчет его статической жесткости методом декомпозиции;
- 2) приведение трехмерной модели УС к эквивалентной плоской двухмерной модели и расчет динамической составляющей жесткости УС станка;
- 3) расчет параметров установившегося колебательного процесса в технологической системе энергетическим методом;
- 4) расчет текущего значения точности размеров и высотных характеристик профиля обрабатываемой поверхности деталей в реальном времени.

На первом этапе вначале определяется структура УС станка, т.е. число подвижных блоков в ветвях инструмента и заготовки, тип, форма и размеры направляющих, рассчитывается их контактная жесткость и производится декомпозиция УС, то есть разбиение многокоординатной УС ветви на составляющие ее блоки, например для УС ветви инструмента токарного станка — это блоки условно верхнего и нижнего суппортов.

Затем рассчитывается положение осей жесткости (углы  $\lambda_x$  и  $\lambda_y$ ) и жесткости  $J_{X1_b}$ ,  $J_{X2_b}$  и  $J_{X1_n}$ ,  $J_{X2_n}$  по этим осям для каждой из однокоординатных УС, составляющих общую УС ветви. Этап завершается расчетом статической жесткости каждой однокоординатной УС подвижного блока и определением суммарной жесткости УС ветви и станка.

На втором этапе определяется динамическая жесткость УС ветвей инструмента, заготовки и станка в целом. Для этого вначале выполняются расчетные процедуры приведения трехмерной модели УС станка, учитывающей перемещение элементов УС под действием составляющих  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$  силы резания в трех плоскостях ( $XOY$ ;  $XOZ$ ;  $YOZ$ ), к эквивалентной двухмерной модели, удобной для определения динамической и статической жесткости УС, а также виброустойчивости при резании.

Задача приведения заключается в определении (уточнении) жесткости по главным осям  $X1$  и  $X2$  упругой системы в основной плоскости  $YOZ$  с учетом деформаций УС в плоскости  $XOY$  под действием силы  $P_0 = \sqrt{P_y^2 + P_x^2}$ . Затем рассчитываются основные параметры колебаний упругой системы по осям  $X1$ ,  $X2$ ,  $Y$ : величины амплитуд колебаний  $A_{x1}$ ,  $A_{x2}$ ,  $A_y$  по осям и значение сдвига по фазе колебаний по каждой оси ( $\phi_{x1}$ ,  $\phi_{x2}$ ,  $\phi_y$ ). Вычисления проводятся по эллипсу перемещений точки приложения силы  $\Delta P_0 \sin \omega t$ , построенного при амплитудно-фазовой характеристике колебательного процесса.

На третьем этапе условие виброустойчивости, то есть установившегося колебательного процесса, определяется на основе энергетического критерия в следующем виде:

$$W_B \leq W_{\Pi} + W_C,$$

где  $W_B$  — работа сил возбуждения колебательного процесса за один цикл колебаний;  $W_{\Pi}$  — суммарная работа сил сопротивления (рассеяние энергии за цикл), равная потенциальной энергии упругих связей колеблющихся элементов УС;  $W_C$  — суммарная работа сил сопротивления в демпфирующих элементах упругой системы.

Работу сил возбуждения определяем расчетом площади так называемого эллипса сил — фигуры, ограниченной диаграммой изменения силы  $P_y$  ( $P_z$ ) за цикл колебаний. В свою очередь, эллипсы сил строим с помощью диаграммы изменения толщины среза за цикл колебаний и эллипса перемещений.

Работы сил сопротивления определяем по выражениям

$$W_{\Pi} = W_{\Pi X1} + W_{\Pi X2};$$

$$W_C = \Psi_{X1} W_{\Pi X1} + \Psi_{X2} W_{\Pi X2}.$$

Здесь  $W_{\Pi X1} = \frac{A_{X1}^2 J_{X1}}{2}$ ;  $W_{\Pi X2} = \frac{A_{X2}^2 J_{X2}}{2}$  — соответственно работа упругих связей по осям  $X1$  и  $X2$ ;  $\Psi_{X1}$ ,  $\Psi_{X2}$  — относительное рассеяние (демфирование) энергии по осям  $X1$  и  $X2$ .

На четвертом этапе вычисляем текущее значение динамической составляющей высоты микронеровностей или высоты волн обрабатываемой поверхности принимая их равными величине амплитуд колебаний  $A_y$  по оси  $Y$  или подстановкой динамической жесткости, определенной на втором этапе, в зависимости [1], определяемые высотные параметры микрогеометрии обрабатываемой поверхности.

Случайные факторы, неизбежно присутствующие в процессе обработки, приводят к тому, что параметры качества поверхности, предсказываемые различными зависимостями, будут отличаться от фактических значений. В условиях мелкосерийного и единичного производства, когда обрабатываются различные детали из разных материалов, бывает невозможным обеспечить требуемое качество. Это объясняется тем, что не для всех обрабатываемых материалов есть математические зависимости, которые могли бы предсказать результат для данных условий обработки (обрабатываемый материал, инструмент, технологическое оборудование). Поэтому, зачастую, требуется проведение дополнительных экспериментальных исследований, которые значительно увеличивают время технологической подготовки производства.

Использование в управлении технологическим оборудованием современных микропроцессорных систем ЧПУ позволяет создавать самообучающиеся автоматизированные технологические системы (САТС)<sup>1</sup>, решающие проблему обеспечения заданного качества и значительно сокращающие время технологической подготовки производства.

Работа САТС заключается в получении математической модели, связывающей условия обработки и параметры качества обработанной поверхности, и использовании ее для управления технологической системой по любому из параметров качества.

Система работает следующим образом. Перед началом обработки партии деталей вводятся исходные данные: материал обрабатываемых деталей, геометрия инструмента, режимы резания, жесткость технологической системы, требуемое значение параметра качества обработанной поверхности и допуск на это значение. По введенным исходным данным система анализирует, имеется ли в базе данных соответствующая им математическая модель. Если в базе данных нет соответствующей математической модели, то система автоматически переходит в режим «обучение».

Задачей режима «обучение» является получение математической модели. Для этого необходимо на станке обработать пробную деталь — образец. Образец разбивается на участки, затем каждый из них автоматически обрабатывается с заданными режимами резания ( $S$ ,  $V$ ), и контролируются параметры качества обработанной поверхности, т.е. система проводит активный полнофакторный эксперимент<sup>2</sup>. Контроль параметров качества обработанной поверхности осуществляется системой автоматически в процессе обра-

---

<sup>1</sup> Работа выполняется при финансовой поддержке Министерства образования РФ по гранту (шифр — PD02 — 2.10 — 185) молодых ученых.

ботки. Данные о входных и выходных параметрах заносятся автоматически в ЭВМ, и получается математическая модель вида:

$$П = C_0 S^x V^y,$$

где  $П$  — управляемый параметр качества обработанной поверхности;  $S$  — величина продольной подачи, мм/об;  $V$  — скорость резания, м/мин;  $C_0$ ,  $x$ ,  $y$  — коэффициенты модели.

Полученные коэффициенты и условия «обучения» запоминаются в памяти ПЭВМ и используются в дальнейшем при управлении. При изменении инструмента, его геометрии, материала деталей, глубины резания и т.п. необходимо будет опять провести обучение системы.

После получения математической модели приступают к обработке партии деталей, используя режим «работа». Для осуществления процесса управления необходимо из модели получить закон управления, отражающий количественную связь между управляемым параметром и управляющим воздействием. Так как модель содержит два управляющих воздействия ( $S, V$ ), то управлять  $П$  можно либо путем изменения одного из воздействий, либо путем одновременного изменения обоих. Поэтому необходимое управляющее воздействие вначале выбирается по преобладающему влиянию его на параметр качества обрабатываемой поверхности. Так, если преобладающее влияние на управляемый параметр качества поверхности оказывает подача, то в этом случае скорость резания устанавливается на станке постоянной, а подача будет изменяться по закону

$$\left. \begin{aligned} V &= \text{const} \\ S_{\text{ск}} &= S_p \pm \Delta S \end{aligned} \right\},$$

где  $V$  — расчетное значение скорости резания;  $S_{\text{ск}}$  — скорректированное значение продольной подачи;  $S_p$  — расчетное значение продольной подачи;  $\Delta S$  — поправка на величину продольной подачи.

$\Delta S$  вносится в ход процесса обработки, чтобы параметр  $П$  достиг своего требуемого значения или находился в пределах допуска на требуемое значение, определяется по зависимости

$$\Delta S = \left( \frac{\Delta П}{C_0 V^y} \right)^{1/x},$$

где  $\Delta П$  — отклонение параметра качества обработанной поверхности от требуемого значения.

Знак коррекции, т.е. увеличение или уменьшение продольной подачи, система определяет сама автоматически на основе результата сравнения заданного значения параметра  $П$  и измеренного.

Так как модель не учитывает случайные факторы, возникающие в ТС при обработке, то необходимо периодически контролировать параметр  $\Pi$  и вносить, если это необходимо, соответствующие поправки в ход процесса.

Использование методологии позволяет:

1. Оценить качество станка по параметру жесткости путем сравнения расчетной жесткости с жесткостью станка данного типоразмера, регламентированной (заданной) ГОСТом.

2. Определить при проектировании станка рациональное значение конструкторских параметров, характеризующих жесткость упругой системы станка.

3. Создать математические модели управления точностью и качеством поверхностного слоя при обработке деталей. Так как жесткость УС станка зависит от взаимного положения подвижных блоков УС относительно друг друга и соответственно изменяется в процессе обработки детали, то применение модели управления, обеспечивающей постоянную жесткость, позволяет получать стабильные заданные параметры шероховатости, волнистости и точности размеров при обработке.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. — М.: Машиностроение, 2000. — 320с.
2. Кудинов В.А.. Динамика станков. — М.: Машиностроение, 1967. — 357с.

УДК 621.762

**Д.И.Божко, Л.С.Богинский, Л.Н.Ясюкевич**

### **АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ УСТАНОВОК ДЛЯ ИЗОСТАТИЧЕСКОГО ПРЕССОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ПАРАМЕТРИЗАЦИИ**

*Белорусский национальный технический университет,  
Институт повышения квалификации и переподготовки кадров по новым  
направлениям развития техники, технологии и экономики Минобразования РБ  
Минск, Беларусь*

В условиях рыночной экономики конкурентная борьба за потребителей требует от производственных предприятий постоянного обновления выпускаемой продукции и повышения ее качества. Это приводит к необходимости сокращения сроков и стоимости технической подготовки производства при