

УДК 621.914.1

Е.В. Кирющенко, аспирант,

Научный руководитель: **А. М. Козлов**, д.т.н., проф., Липецкий государственный технический университет

E-mail: kam-48@yandex.ru

Динамический анализ технологической системы при фрезеровании плоскостей крупногабаритных деталей

В работе анализируется технологическая система фрезерования плоских поверхностей крупногабаритных деталей в динамике. Математическая модель учитывает динамические силы резания и случайные факторы процесса обработки.

Ключевые слова: динамика системы, виброскорость, системы дифференциальных уравнений в частных производных с запаздыванием, отрицательная обратная связь, адаптивная система.

E. V. Kiryuschenko, A. M. Kozlov

Dynamic Analysis of the Technological System of Milling Surfaces of Large Parts

This paper discusses the technological system of milling flat surfaces of large parts of the dynamics. The mathematical model takes into account the dynamic cutting force and the random factors of the processing.

Keywords: system dynamics, velocity, the system of differential equations in partial derivatives with delay, negative feedback, adaptive system.

Отличительной особенностью агрегатов и машин горно-металлургической промышленности являются их большие габариты. Отдельные детали имеют массу более 40 т и их обработка требует наличия крупногабаритного оборудования.

Ремонт таких деталей, если он связан с механической обработкой, представляет достаточно сложную задачу. В этом случае используют технологию обработки непосредственно в месте работы машины или агрегата. Отличительной особенностью данной технологии является установка станочного оборудования непосредственно на деталь, причем обрабатывается не вся деталь, а её отдельные участки. Недостатком такого метода является малая жесткость технологической системы. Дополнительные сложности возникают из-за большой протяженности поверхности обработки.

Крупногабаритные детали обладают высокой стоимостью, поэтому при механической обработке их поверхностей лезвийным инструментом

$$\Delta F = -(F(t) - F(t - \tau)). \quad (3)$$

Таким образом, технологическую систему фрезерования поверхностей крупногабаритной детали в динамике можно рассматривать как замкнутую нелинейную систему с запаздыванием. Рассматриваемая система не подвержена внешним воздействиям. Такой системе может соответствовать математическая модель в виде системы дифференциальных уравнений, полученная с использованием уравнения Лагранжа. В качестве примера такой модели можно привести следующее уравнение:

$$[M] \cdot [\ddot{q}] + [D] \cdot [\dot{q}] + [C] \cdot [q] = [\bar{F}], \quad (4)$$

где $[q]$ – вектор обобщённых координат, $[\bar{F}]$ – вектор внешних сил и моментов действующих на систему, $[M]$, $[D]$, $[C]$ – матрицы инерционных, диссипативных и жесткостных параметров.

При колебаниях станка происходит взаимодействие упругой системы станка с динамическими процессами в зоне резания. Динамическая характеристика фрезерования является одним из элементов в замкнутой динамической технологической системе, что в математической модели (4), учитывается вектором $[F]$, который определяется динамическими силами фрезерования. Динамическая характеристика фрезерования вводится для равномерного фрезерования, так как динамические силы фрезерования определяются путем суперпозиции динамических сил косоугольного резания, действующих на режущие зубья фрезы.

Согласно литературным данным [1], динамику процесса фрезерования можно также охарактеризовать с помощью матрицы $K^{(i)}(p)$, элементами которой являются передаточные функции – динамические характеристики резания:

$$K^{(i)}(p) = \begin{bmatrix} k_{11}^{(i)}(p) & k_{12}^{(i)}(p) & k_{13}^{(i)}(p) \\ k_{21}^{(i)}(p) & k_{22}^{(i)}(p) & k_{23}^{(i)}(p) \\ k_{31}^{(i)}(p) & k_{32}^{(i)}(p) & k_{33}^{(i)}(p) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

Под динамической характеристикой фрезерования будем понимать передаточную функцию динамических процессов резания, связывающих приращения сил резания с относительными колебаниями режущей пластины и детали в зоне резания. Для случая классической обработки детали на станке, эта матрица связывает приращения проекций сил резания с проекциями вектора относительных колебаний резца и детали. В рассматриваемой технологической системе эта матрица связывает приращения проекций сил резания с проекциями вектора относительных колебаний режущей пластины и шпинделя станка. Отметим, что шпинделю колебания передаются как через оправку, так и через деталь [2].

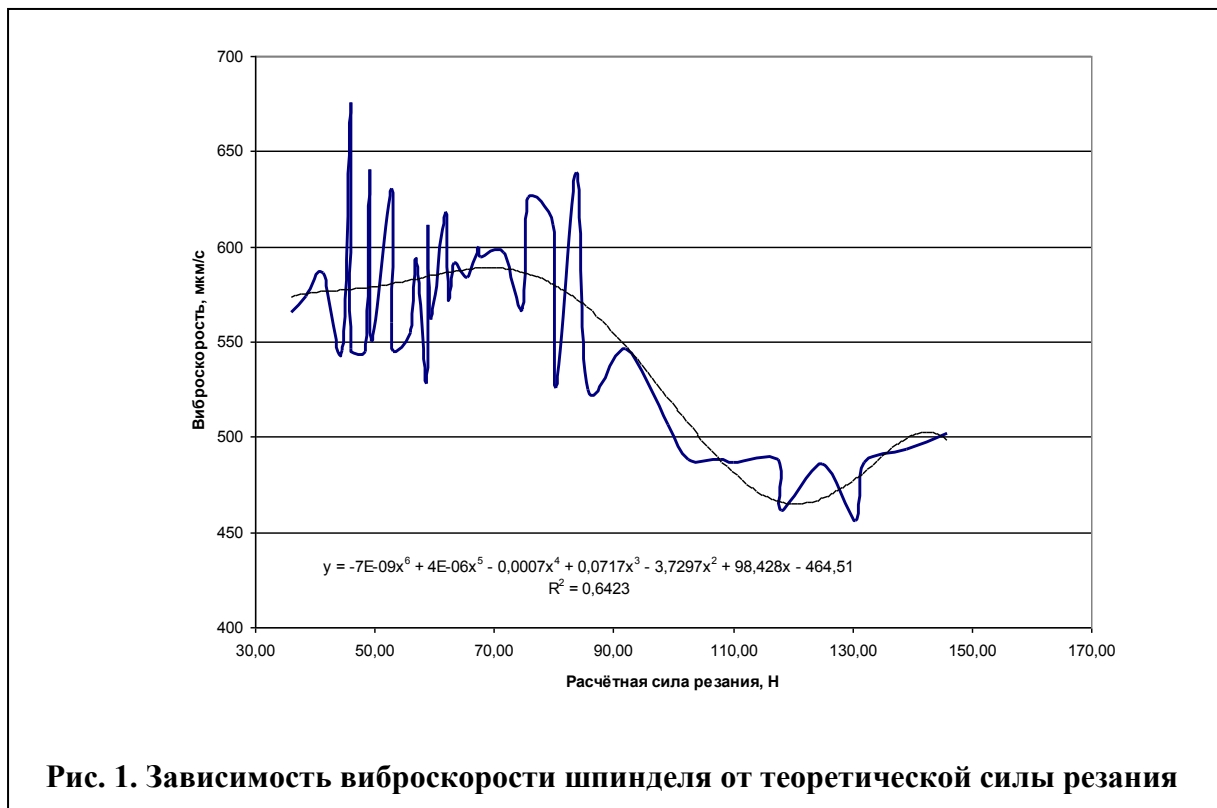
В таких технологических системах проявляется влияние ряда факторов, прогноз или анализ которых затруднён (например, неоднородность свойств поверхностного слоя детали), к тому же

существующие методы решения систем нелинейных уравнений являются приближёнными. Поэтому, для более точного анализа динамики системы и дальнейшего прогноза точности обработки на его основе, в уравнение (4) нужно добавить матрицу случайных факторов:

$$[M] \cdot [\ddot{q}] + [D] \cdot [\dot{q}] + [C] \cdot [q] = [\bar{F}] + [X], \quad (6)$$

где $[X]$ – матрица случайных параметров.

Для подтверждения зависимости (6) был проведён эксперимент, в ходе которого исследовалась взаимосвязь виброскорости шпинделя станка и силы резания при торцовом фрезеровании. С помощью виброанализатора измерялся уровень виброскорости при различных режимах обработки. Сила резания определялась как расчётным путём, так и с помощью амперметра в сети привода главного движения станка, по показаниям которого можно судить о фактических колебаниях силы резания. На основе экспериментальных данных были построены графики зависимости виброскорости шпинделя от теоретической силы резания (рис.1) и от фактической силы резания (рис. 2).



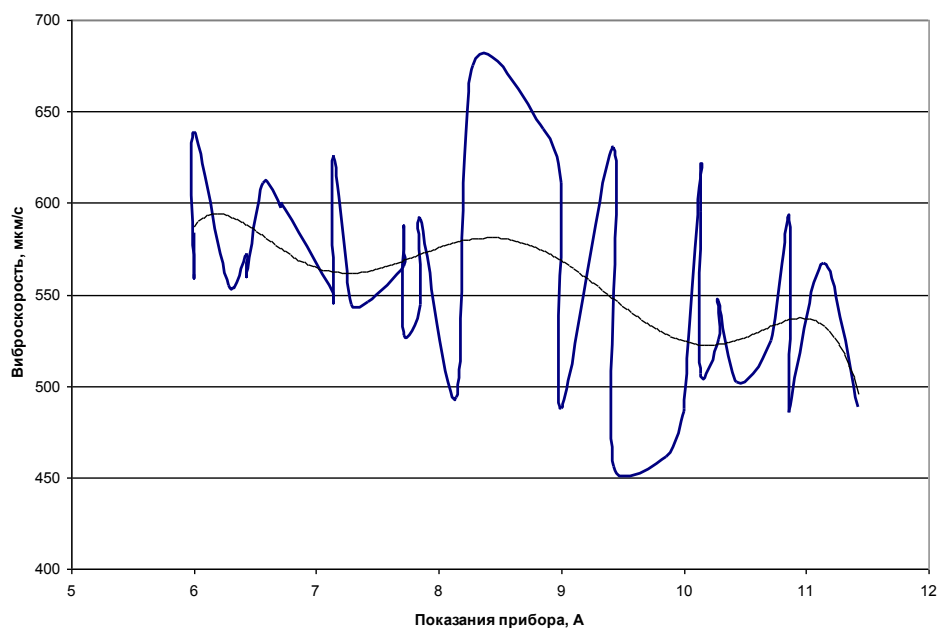


Рис. 2. Зависимость виброскорости шпинделя от фактической силы резания

Как показал математический анализ, зависимость, представленная на рисунке 2 может быть выражена уравнением:

$$y = f(x) = k_1 \cdot x \cdot \tan^a(k_2 \cdot x^b + k_3) - k_4 \cdot x + k_5, \quad (7)$$

где y – виброскорость, x – скорость резания, $k_1...k_5$ – постоянные коэффициенты, a , b – показатели степени, являющиеся так же постоянными коэффициентами.

Определение постоянных коэффициентов уравнения (7) является задачей экспериментальных исследований.

Как видно из графиков, фактические колебания силы резания отличаются от теоретических расчётов на непостоянную величину. Однако в целом на обоих графика прослеживается одинаковая тенденция к снижению виброскорости при увеличении силы резания. Это позволяет сделать два вывода:

- 1) Зависимость (5) подтверждается экспериментальными данными;
- 2) Сгладить колебания маложесткой технологической системы можно за счёт применения технологии высокоскоростной обработки в определённых диапазонах режимов резания.

Система управления, созданная на основе динамической модели (5), позволит варьировать режимы резания для сглаживания колебаний системы, поддержания виброскорости в пределах определенного диапазона и, следовательно, обеспечить требуемый уровень точности и качества поверхности при большой протяжённости обработки.

Но отрицательным моментом является сложность математического решения уравнения (5). Решение можно получить посредством

линеаризации нелинейных уравнений с помощью обратной связи. Очень эффективен принцип замкнутых систем с глубокой отрицательной обратной связью, особенно, если он сочетается с принципом действия самонастраивающихся систем управления. Такие системы являются адаптивными, т.е. самоприспосабливающимися. Широкое применение нашли самонастраивающиеся системы управления, которые отличаются в частности от несамонастраивающихся тем, что в их алгоритме управления предусмотрена функция анализа системы и внешних воздействий. [3]

Нами была разработана система контроля (рис. 3), создающая отрицательную обратную связь, на базе бесконтактных индуктивных датчиков.



Рис. 3. Оправка для насадных торцовых фрез с интегрированной системой контроля

Система контроля интегрирована в фрезерную оправку и представляет собой комплекс бесконтактных датчиков, расположенных по окружности относительно оси инструмента. Инструмент с оправкой вращаются, а корпус с датчиками остается неподвижным за счёт системы подшипниковых опор и упругих элементов. Датчики могут измерять как расстояние до поверхности детали с высокой точностью, так и уровень вибрации непосредственно в зоне резания. При торцовом фрезеровании плоской поверхности это позволяет в режиме реального времени следить за отклонениями от плоскостности и уровнем виброскорости и в случае

необходимости корректировать режимы обработки для их изменения. Таковую систему можно назвать адаптивной. Она позволяет учитывать влияние труднопрогнозируемых факторов и обеспечить требуемый уровень точности при большой протяженности обработки.

Динамический анализ технологической системы при фрезеровании плоских поверхностей крупногабаритных деталей позволил сделать следующие выводы:

1) Данную технологическую систему в динамике следует рассматривать как мало жесткую нелинейную замкнутую систему с запаздыванием;

2) Колебания системы могут быть «сглажены» за счёт применения метода высокоскоростной обработки;

3) На базе динамической модели можно создать систему адаптивного управления процессом резания при наличии отрицательной обратной связи за счёт системы контроля.

4) Система с отрицательной обратной связью может учитывать случайные факторы процесса обработки, например, неоднородность поверхностного слоя детали.

Полученные результаты будут использованы при разработке программного обеспечения для систем управления и динамического анализа конструкций станочного оборудования, применяемого при изготовлении и ремонте крупногабаритных деталей.

Список литературы

1. **Городецкий Ю.И.** Фундаментальные проблемы нелинейной динамики станков. Динамика технологических систем: Сб.тр.VII Междунар. Н.-т. Конф. – Саратов: СГТУ, 2004 г.

2. **Степанов А.** Высокоскоростное фрезерование в современном производстве / А. Степанов // САМ/CAE Observer. – 2003 г. №4. – С. 2–8.

3. **Pontius, К.** Высокоскоростное фрезерование заготовок из разнородных деталей / К. Pontius // Cutting Tool Engineering. – 2002 г. – Nr. 2, V. 54. – С. 41–43.