

О. Б. Шагниева, аспирант, shagnoleg@yandex.ru,
И. К. Шаньшин, магистрант, ivan.fizik92@yandex.ru,
С. Ф. Бурдаков, д-р техн. наук, проф., burdakov.s@yandex.ru,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург

Управление регенеративными автоколебаниями в процессе фрезерования

Рассматривается проблема возникновения и оперативного подавления автоколебаний, возникающих в процессе фрезерования с помощью робота-манипулятора. Предполагается, что инструмент (фреза) связан с роботом упругим подвесом, который используется для силового очувствления робота. На основе математической модели регенеративных автоколебаний (chattering) проведено моделирование системы "робот—инструмент—обрабатываемая поверхность". Инструмент равномерно двигается вдоль обрабатываемой поверхности с заданным прижатием к ней. Прижатие фрезы, обеспечивающее необходимую осевую глубину резания (axial depth of cut), осуществляется с помощью позиционно-силового алгоритма управления. Данный алгоритм управления реализуется средствами двух ПИД регуляторов с позиционной и силовой обратными связями. Равномерное движение вдоль обрабатываемой поверхности, обеспечивающее требуемую подачу инструмента, осуществляется с помощью алгоритма управления по скорости. Управление по скорости осуществляется средствами отдельного ПИД регулятора. Настройки всех регуляторов обеспечивают быстроедействие и плавность переходных процессов. Для сглаживания нежелательной динамики при нелинейной форме обрабатываемой поверхности возможно использование обучения на пробных циклах движения. Рядом авторов экспериментально и аналитически показано, что при фрезеровании "по следу", который остается на обрабатываемой поверхности при предыдущем проходе инструмента, возможно возникновение неустойчивых (регенеративных) автоколебаний. Неустойчивые автоколебания являются сдерживающим фактором для повышения производительности, которая главным образом зависит от глубины резания и скорости вращения инструмента. В настоящей работе рассматривается возможность оперативного детектирования начала возникновения неустойчивых автоколебаний по амплитудному спектру показаний датчиков горизонтальных сил взаимодействия инструмента с обрабатываемой поверхностью. Амплитудный спектр строится с помощью быстрого преобразования Фурье, что позволяет оперативно определять начало ухода процесса резания в неустойчивую зону. Следующее за этим небольшое уменьшение осевой глубины резания (в пределах 1...2 %) практически полностью стабилизирует процесс резания. В работе предлагается вариант построения контура адаптации для системы управления вертикальным движением робота, основанный на допустимом изменении осевой глубины резания.

Ключевые слова: механообработка, упругая система "робот—инструмент—обрабатываемая поверхность", силовое очувствление, позиционно-силовое управление, вибрации, регенеративные автоколебания, амплитудный спектр, быстрое преобразование Фурье, адаптация

Введение

Механическая обработка металлов является одним из основных методов изготовления деталей в машиностроении. Наиболее распространенной операцией механообработки является операция фрезерования [1—3], которая в последнее время все больше осуществляется с помощью робототехнических комплексов. Для расширения области применения и повышения производительности актуальными являются оптимизация и интенсификация процесса механообработки. Главным сдерживающим фактором повышения производительности фрезерования является возможная потеря динамической устойчивости системы "робот—инструмент—обрабатываемая поверхность", вызванная вибрациями инструмента [4—6]. Вибрации становятся причиной поломок инструмента, преждевременного износа режущих кромок, снижения качества и точности механообработки. На практике для исключения воз-

можности потери устойчивости системы технологические параметры режимов механообработки осознанно занижаются, что, естественно, приводит к снижению производительности.

В настоящее время существует ряд гипотез относительно механизма возникновения вибраций при механообработке и последующих регенеративных автоколебаний, которые, в свою очередь, приводят к неустойчивости процесса фрезерования. Наиболее популярной является гипотеза о запаздывании изменения силы резания при изменении толщины срезаемого слоя из-за относительного смещения инструмента и обрабатываемой поверхности. В работах [7, 8] показано, что вследствие модуляции толщины снимаемого слоя в систему вносится энергия, необходимая для поддержания автоколебаний. Учитывая, что регенеративные автоколебания могут приводить к потере устойчивости, оператору необходимо постоянно контролировать процессы в системе.

Экспериментальные и теоретические исследования многих авторов в большинстве случаев

позволяют получить лишь качественное представление о процессах. Так, в результате анализа устойчивости процесса резания с помощью нелинейных дифференциальных уравнений с запаздыванием получают так называемые лепестковые диаграммы устойчивости, позволяющие оператору подбирать корректные технологические параметры резания [9, 10]. Однако эта процедура не всегда гарантирует нахождение процесса в устойчивой зоне в силу приближенности модели.

Для процессов точения и фрезерования E. Vudak и Y. Altintas разработали методы определения условий динамической устойчивости системы, позволяющие связать значение осевой глубины резания и скорости вращения фрезы, соответствующие устойчивой области [11–13]. Дальнейшие исследования этих авторов позволили разработать целый ряд практических способов снижения вибраций при фрезеровании. На данный момент наиболее распространены offline способы борьбы с вибрациями (нерегулярные фрезы, модуляторы скорости [14]). Вместе с тем актуальной в этом смысле остается задача построения адаптивной системы управления процессом фрезерования, способной в режиме online корректировать параметры механообработки в целях поддержания устойчивости процессов резания. В работах [15–17] описаны методы борьбы с вибрациями с помощью активного подвеса с настройкой по частоте вращения фрезы. В этих работах основной акцент делается на учете конструктивных особенностей станков с ЧПУ, что серьезно ограничивает возможность оперативной корректировки параметров механообработки в режиме online. С точки зрения гибкости системы управления и возможности пространственной обработки деталей произвольного профиля перспективным является использование многокоординатных роботов с инструментом, установленным в упругом подвесе. Упругий подвес обеспечивает силовое ощущение робота как минимум по трем осям [18]. Такая конфигурация позволяет использовать стандартный робот-манипулятор в режиме гибридного позиционно-силового управления, при котором перемещение робота в пространстве происходит с учетом контактных сил взаимодействия между инструментом и обрабатываемой поверхностью [19]. Применительно к задаче управления режимом механообработки установка инструмента в упругий подвес дает дополнительные возможности для организации контуров адаптации, способных

своевременно контролировать возможную потерю устойчивости процесса механообработки и обеспечивать необходимое соотношение технологических параметров резания, при котором вибрации системы "робот—инструмент—обрабатываемая поверхность" находятся на допустимом уровне [20, 21].

В настоящей работе исследуется возможность автоматической коррекции осевой глубины резания при появлении признаков потери динамической устойчивости. При этом соответствующий момент времени фиксируется с помощью амплитудного спектра горизонтальной силы резания. Представлены результаты компьютерного моделирования работы контура адаптации, демонстрирующие его эффективность.

Постановка задачи

Будем считать, что робот, оснащенный фрезой в упругом подвесе, в соответствии с технологической задачей движется с некоторой скоростью вдоль обрабатываемой поверхности с заданным прижатием к ней. Рассматривается торцевое фрезерование. Для обеспечения заданного уровня прижатия инструмента к поверхности используется позиционно-силовой алгоритм управления, реализованный на базе штатной системы позиционного управления робота [22]. В режиме возникновения контакта инструмента с поверхностью происходит переключение с режима позиционирования на режим позиционно-силового управления, которое осуществляется с помощью дополнительной обратной связи по информации, получаемой от датчика вертикального усилия. На основании этих данных формируется скорректированное задание, которое определяет осевую глубину резания. Своевременное уменьшение осевой глубины резания позволяет сгладить негативное влияние сил резания на динамику системы практически без потери производительности.

Управление горизонтальным движением робота осуществляется на базе алгоритма управления по скорости. Целью управления является поддержание желаемой подачи инструмента. Расчетная схема робота в режиме контактного взаимодействия с обрабатываемой поверхностью представлена на рис. 1.

На рис. 1 введены следующие обозначения: m — приведенная масса руки робота; m_s — приведенная масса инструмента; c_{sx} , c_{sy} и c_{sz} — эквивалентные жесткости подвеса инструмента

в трех направлениях; y — вертикальная координата руки робота; y_s — вертикальная координата инструмента; x, z — горизонтальные координаты руки робота; x_s, z_s — горизонтальные координаты инструмента; $y_{sf}(x)$ — уравнение обрабатываемой поверхности; F_x, F_y, F_z — силы, развиваемые приводами вдоль соответствующих осей; R_x, R_y, R_z — силы резания, действующие на инструмент со стороны обрабатываемой поверхности; S — горизонтальная подача; n — частота вращения фрезы; a — осевая глубина резания. Предполагается, что координаты робота и инструмента учитывают их конструктивные размеры.

В режиме контакта с обрабатываемой поверхностью математическая модель оупштвенного робота как объекта управления имеет следующий вид:

$$m\ddot{y} + b_y\dot{y} + c_{sy}(y - y_s) = F_y - mg;$$

$$y_s = y_{sf}(x, z);$$

$$F_y = \left(k_p + k_i \frac{1}{p} + k_d \frac{N_y}{1 + N_y \frac{1}{p}} \right) (\tilde{y}^d - y);$$

$$\tilde{y}^d = \left(\theta_p + \theta_i \frac{1}{p} + \theta_d \frac{N_f}{1 + N_f \frac{1}{p}} \right) (F_{sy}^d - F_{sy});$$

$$m\ddot{x} + b_x\dot{x} + c_{sx}(x - x_s) = F_x;$$

$$m_s\ddot{x}_s + b_{sx}\dot{x}_s + c_{sx}(x_s - x) = R_x;$$

$$F_x = \left(k_{px} + k_{ix} \frac{1}{p} + k_{dx} \frac{N_x}{1 + N_x \frac{1}{p}} \right) (\dot{x}^d - \dot{x});$$

$$m\ddot{z} + b_z\dot{z} + c_{sz}(z - z_s) = F_z;$$

$$m_s\ddot{z}_s + b_{sz}\dot{z}_s + c_{sz}(z_s - z) = R_z;$$

$$F_z = \left(k_{pz} + k_{iz} \frac{1}{p} + k_{dz} \frac{N_z}{1 + N_z \frac{1}{p}} \right) (\dot{z}^d - \dot{z}).$$

Задающие параметры $F_{sy}^d, \dot{x}^d, \dot{z}^d$ устанавливаются оператором в соответствии с технологическими требованиями. Задание \tilde{y}^d формируется с помощью второго ПИД регулятора на основании обратной связи по силе вертикаль-

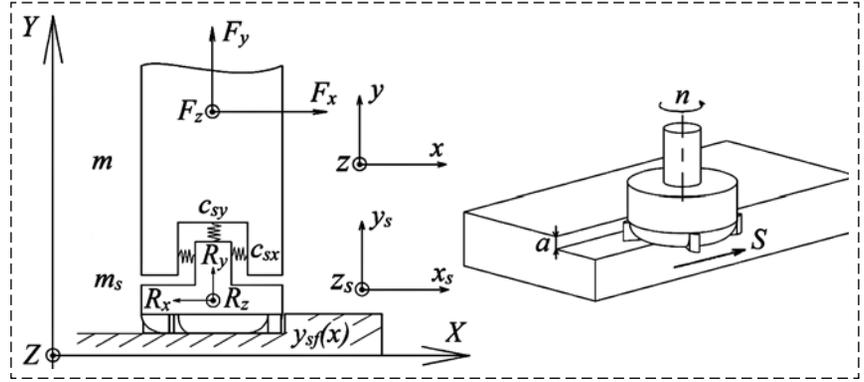


Рис. 1. Расчетная схема системы "робот—инструмент—обрабатываемая поверхность"
Fig. 1. The calculation scheme of the "robot—tool—working surface" system

ного взаимодействия инструмента и обрабатываемой поверхности $F_{sy} = c_{sy}(y - y_s)$. Настройки всех ПИД регуляторов ($k_p, k_i, k_d, N_y, \theta_p, \theta_i, \theta_d, N_f, k_{px}, k_{ix}, k_{dx}, N_x, k_{pz}, k_{iz}, k_{dz}, N_z$) обеспечивают максимальное быстродействие и плавность переходных процессов движения вдоль осей X, Y, Z . Динамическая взаимосвязь движений вдоль обрабатываемой поверхности осуществляется через горизонтальные силы резания R_x, R_z и силу $R_y = F_{sy}$, определяющую осевую глубину резания.

При компьютерном моделировании предполагается, что настройки ПИД регуляторов таковы, что движения робота осуществляются по предписанным законам. В дальнейшем используются следующие значения параметров системы:

$$\begin{aligned} m &= 2 \text{ кг}; m_s = 0,2 \text{ кг}; \\ b_s &= b_{sx} = b_{sy} = b_{sz} = 50 \text{ Н}\cdot\text{с/м}; \\ b &= b_x = b_y = b_z = 20 \text{ Н}\cdot\text{с/м}; \\ c_s &= c_{sx} = c_{sy} = c_{sz} = 2,2 \cdot 10^5 \text{ Н/м}. \end{aligned}$$

Принятые значения параметров соответствуют характерным диапазонам рабочих частот для роботов-манипуляторов, выполняющих операции фрезерования. Они позволяют сделать следующую оценку парциальных частот колебаний инструмента в горизонтальной плоскости:

$$\omega_x = \omega_z \cong \sqrt{\frac{c_s}{m_s}} = 1049 \frac{\text{рад}}{\text{с}} = 167 \text{ Гц}.$$

Эта оценка определяет диапазон возможных колебаний в системе.

Расчетная схема процесса фрезерования

Для пояснения характера сил резания R_x, R_z , возникающих между инструментом и обрабатываемой поверхностью, приведем расчетную схему фрезы (рис. 2).

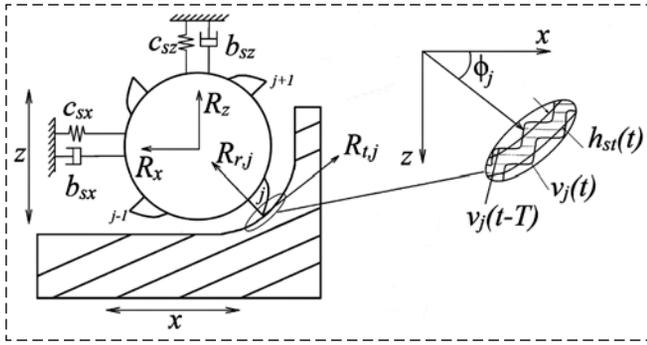


Рис. 2. Расчетная схема фрезы
Fig. 2. The calculation scheme of cutter

Расчетная схема построена в предположении, что настройки ПИД регуляторов таковы, что движение робота осуществляется по предписанным значениям задающих параметров F_{sy}^d , \dot{x}^d , \dot{z}^d . На ней отображено возникновение вибрационной компоненты в процессе съема материала фрезой. Соответствующая математическая модель имеет следующий вид:

$$m_s \ddot{x}_s + b_{sx} \dot{x}_s + c_{sx} x_s = R_x;$$

$$m_s \ddot{z}_s + b_{sz} \dot{z}_s + c_{sz} z_s = R_z,$$

где R_x , R_z — горизонтальные силы резания, определяющие нелинейную динамику процесса.

На расчетной схеме (рис. 2) введены следующие обозначения:

$h_{st} = S \sin \varphi_j$ — расчетная составляющая толщины стружки, зависящая от подачи S : $v_j(t)$ и $v_j(t - T)$ — динамические перемещения инструмента на текущем и предыдущем проходах j -го зуба фрезы; $T = 60/(Nn)$ — период врезания зубов фрезы в материал; частота вращения фрезы n (измеряется в мин^{-1}); N — число зубов фрезы; φ_j — угол поворота j -го зуба.

Реальная толщина снимаемой стружки зависит от целого ряда факторов, основным из которых является угол поворота фрезы [11]. Помимо расчетной составляющей она содержит динамическую составляющую. В сумме они имеют вид

$$h(\varphi_j) = (S \sin \varphi_j + v_j(t - T) - v_j(t))g(\varphi_j) =$$

$$= (S \sin \varphi_j + (x(t) - x(t - T)) \sin \varphi_j +$$

$$+ (z(t) - z(t - T)) \cos \varphi_j)g(\varphi_j) =$$

$$= (S \sin \varphi_j + \Delta x \sin \varphi_j + \Delta z \cos \varphi_j)g(\varphi_j);$$

$$g(\varphi_j) = 1 \text{ при } \varphi_{st} < \varphi_j < \varphi_{ex};$$

$$g(\varphi_j) = 0 \text{ при } \varphi_j < \varphi_{st} \text{ или } \varphi_j > \varphi_{ex},$$

где $g(\varphi_j)$ — это функция, определяющая, режет ли материал в данный момент j -й зуб или нет;

φ_{st} и φ_{ex} — углы входа зуба в заготовку и выхода зуба из заготовки соответственно (при известной конструкции фрезы эти углы характеризуют ширину резания).

Считается [11], что тангенциальная и радиальная составляющие сил резания пропорциональны толщине снимаемой стружки $h(\varphi_j)$:

$$R_{t,j} = K_t a h(\varphi_j), \quad R_{r,j} = K_r R_{t,j},$$

где K_t , K_r — постоянные резания; a — осевая глубина резания.

Спроецировав силы резания на оси X и Y , получим

$$R_{x,j} = -R_{t,j} \cos \varphi_j - R_{r,j} \sin \varphi_j;$$

$$R_{z,j} = R_{t,j} \sin \varphi_j - R_{r,j} \cos \varphi_j.$$

С учетом числа режущих кромок фрезы N окончательно получим

$$R_x = \sum_{j=0}^{N-1} R_{x,j}(\varphi_j), \quad R_z = \sum_{j=0}^{N-1} R_{z,j}(\varphi_j).$$

При появлении фазового сдвига между предыдущей $v_j(t - T)$ текущей $v_j(t)$ волнами (рис. 2), образующимися на обрабатываемой поверхности в процессе фрезерования, в системе возникают так называемые регенеративные автоколебания, которые, в свою очередь, могут привести к неустойчивости всего процесса фрезерования [7–9].

Подобные расчетные схемы хорошо согласуются с экспериментальными данными и используются многими авторами для приближенного построения диаграмм устойчивости в пространстве технологических параметров резания. Примером может служить лепестковая диаграмма, приведенная на рис. 3.

Лепестковая диаграмма построена с использованием метода D-разбиения для принятых выше параметров системы. Она показывает зависимость критической осевой глубины резания $a_{кр}$ от частоты вращения фрезы n . Лепестковая диаграмма выделяет область устойчивого фрезерования при $a < a_{кр}$. Видно, что существует осевая глубина резания a^* , при которой устойчивость имеет место для любых частот вращения фрезы. Вместе с тем диаграмма показывает, что глубину резания можно устанавливать значительно больше a^* , если настроиться на определенную частоту вращения фрезы (точка 1 на рис. 3). Дальнейшее увеличение глубины резания (переход к точке 2 на рис. 3) приводит к неустойчивости. Таким об-

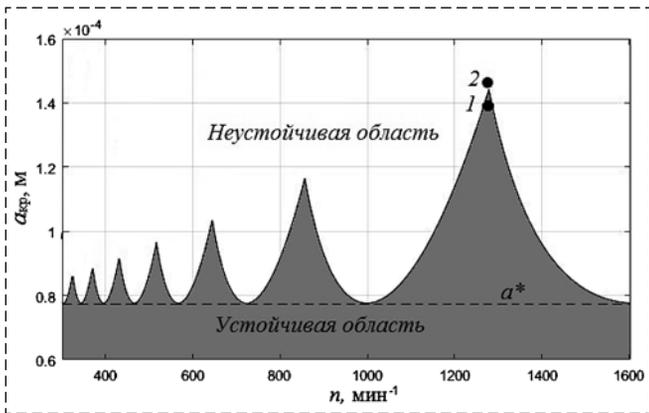


Рис. 3. Диаграмма устойчивости процесса фрезерования
Fig. 3. Milling process stability lobe diagram

разом, лепестковая диаграмма может служить качественным подтверждением правильности выбора технологических параметров резания.

В принятой выше расчетной схеме (см. рис. 1) осевая глубина резания косвенно связана с заданием по вертикальной силе прижатия F_{sy}^d . Меняя задание F_{sy}^d , можно корректировать осевую глубину резания. Осевая глубина резания при высоких требованиях к производительности процесса фрезерования является определяющим фактором возникновения неустойчивости (см. точки 1, 2 на рис. 3). Вместе с тем подача S , как оказалось, влияет только на амплитуду колебаний инструмента. Подобный анализ с использованием D-разбиения можно проводить и относительно других комбинаций параметров резания (осевая глубина резания, ширина резания, подача, частота вращения фрезы). Таким образом, диаграмма устойчивости показывает, что существуют рациональные комбинации параметров резания, но точно определить их по диаграмме в силу приближенности модели резания не представляется возможным. Поэтому

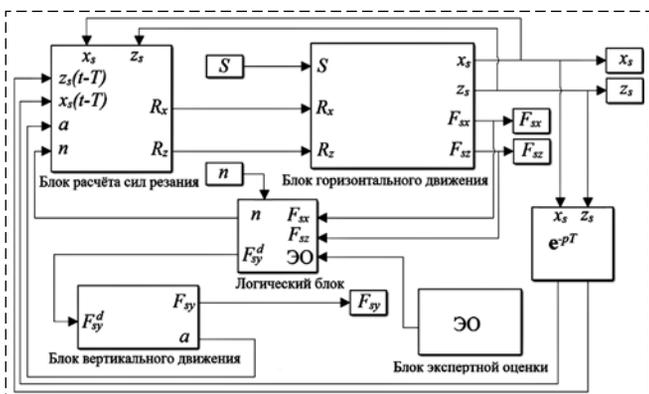


Рис. 4. Структурная схема компьютерного моделирования
Fig. 4. Block diagram of computer simulation

более целесообразным для определения расчетных параметров резания может быть прямое компьютерное моделирование. Структурная схема компьютерного моделирования процесса фрезерования представлена на рис. 4.

Здесь подача S определяет задание для системы управления горизонтальным движением. Осевая глубина резания a связана с заданием на силу прижатия F_{sy}^d по вертикальной координате для системы управления вертикальным движением. Уровень силы прижатия выбирается таким, чтобы обеспечить требуемую осевую составляющую сил резания R_y . На основании измерений датчиков силы по горизонтальным направлениям F_{sx} и F_{sz} с учетом экспертной информации в логическом блоке при появлении неустойчивости формируется скорректированное задание по вертикальной силе прижатия для того, чтобы в автоматическом режиме уменьшить осевую глубину резания и вывести систему из зоны неустойчивости. Учитывая, что горизонтальные силы резания R_x , R_z зависят от толщины стружки, которая, в свою очередь, зависит от координат зубов фрезы в моменты времени t и $t - T$, в схеме выделен блок расчета горизонтальных сил резания R_x и R_z , которые выступают в роли возмущающего воздействия для системы управления вертикальным движением. Блок экспертной оценки подразумевает участие в процессе управления оператора на этапе формирования предпочтительных значений параметров резания. Блок содержит экспертные данные, качественные данные типа лепестковых диаграмм и другие данные.

Результаты компьютерного моделирования

Форму обрабатываемой поверхности считаем плоской $y_{sf}(x, z) = \text{const}$, число зубов фрезы $N = 4$. Исходя из характерных для фрезеровки стали диапазонов значений подачи $S = 0,1 \dots 0,2$ мм/зуб устанавливается задание по скорости горизонтального движения $\dot{x}^d = 0,01$ м/с. Трение считаем линейным. Заданный уровень силы вертикального прижатия принят равным $F_{sy}^d = 40$ Н. Постоянные резания принимались равными $K_t = 1000$ МПа, $K_r = 0,6$. Углы φ_{st} и φ_{ex} принимались равными 0 и $\pi/2$ соответственно. Расчетная частота вращения фрезы $n = 1260$ мин⁻¹.

На рис. 5 и 6 представлены графики вибраций по координате инструмента x_s , результирующей горизонтальной режущей силы $R_{рез}$ и ам-

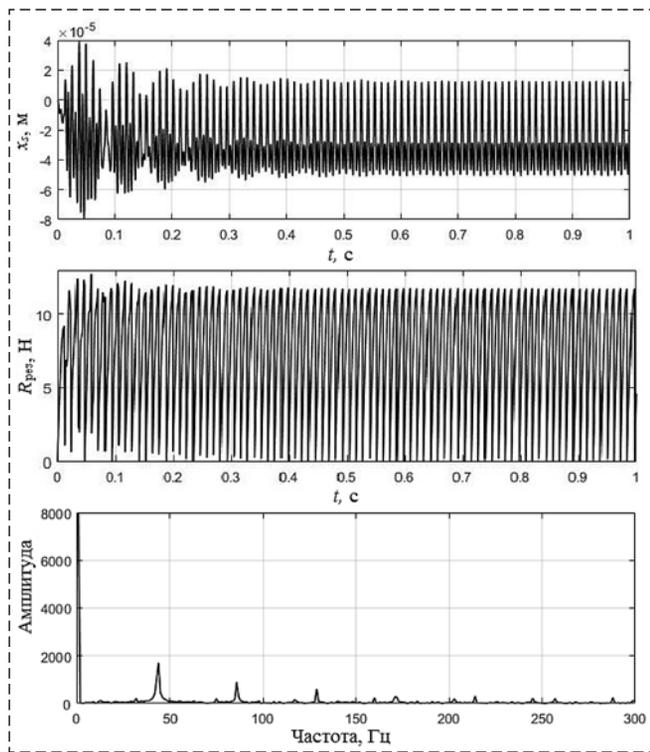


Рис. 5. Графики координаты инструмента x_s , результирующей горизонтальной режущей силы и ее амплитудного спектра (для точки 1 на рис. 3)

Fig. 5. Time-histories of the instrument coordinate x_s , the total horizontal cutting force and its amplitude spectrum (point 1 in Fig. 3)

плитудного спектра суммарной режущей силы для устойчивого (точка 1 на рис. 3) и неустойчивого (точка 2 на рис. 3) режимов фрезерования соответственно. Амплитудный спектр получается с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ). Координата инструмента x_s учитывает только вибрационную составляющую.

Моделировалась ситуация, когда из-за неточного подбора параметров резания система оказалась в неустойчивой области. Необходимо оперативно (за короткое время) обнаружить нарастание пика на амплитудном спектре на частоте автоколебаний для того, чтобы средствами управления перевести систему из неустойчивого состояния (точка 2 на рис. 3) в устойчивое (точка 1 на рис. 3). Видно, что в отличие от устойчивого (см. рис. 5) в неустойчивом (рис. 6) режиме резко возрастает составляющая амплитудного спектра на частоте порядка 200 Гц. Это состояние передается в логический блок (см. рис. 4), в котором корректируются параметры резания (в рассматриваемом случае осевая глубина резания).

На рис. 7 представлены графики координаты инструмента x_s и результирующей горизонтальной режущей силы $R_{рез}$ для режима перехода

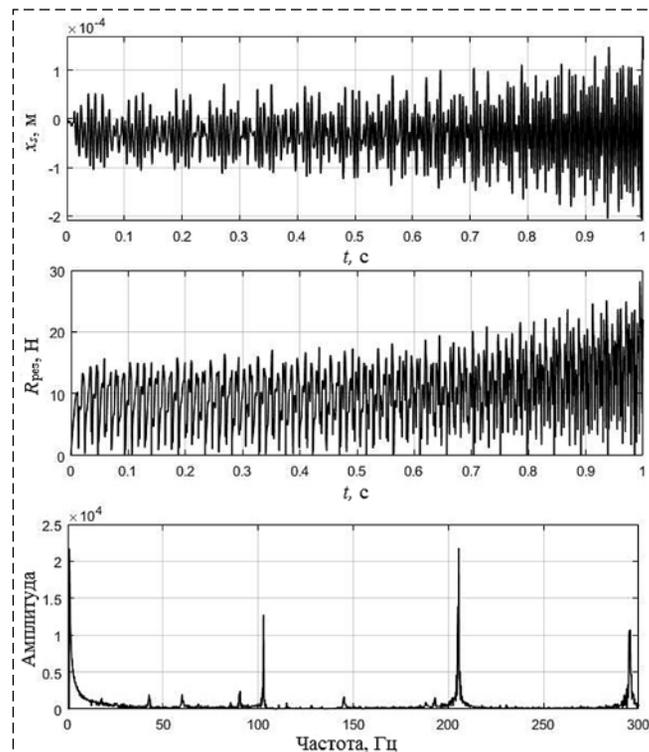


Рис. 6. Графики координаты инструмента x_s , результирующей горизонтальной режущей силы и ее амплитудного спектра (для точки 2 на рис. 3)

Fig. 6. Time-histories of the instrument coordinate x_s , the total horizontal cutting force and its amplitude spectrum (point 2 in Fig. 3)

системы из неустойчивого (точка 2 на рис. 3) в устойчивое (точка 1 на рис. 3) состояние.

Видно, что в некоторый момент времени (примерно при $t = 2$ с) с помощью амплитудного спектра установлено нарастание амплитуд

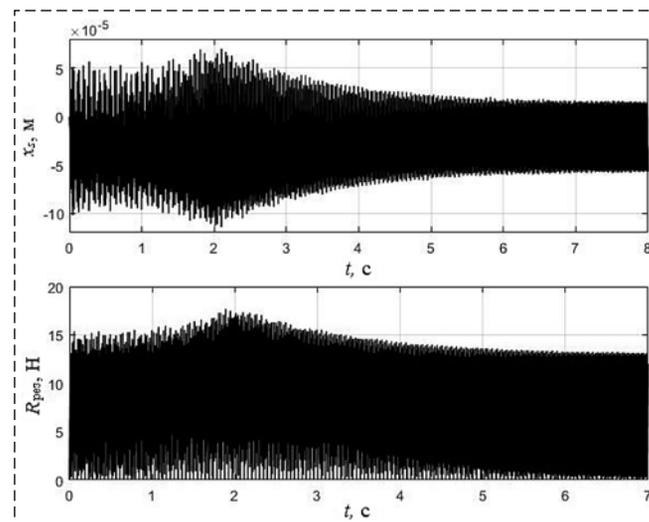


Рис. 7. Графики координаты инструмента x_s и результирующей горизонтальной режущей силы

Fig. 7. Time-histories of the instrument coordinate x_s and total horizontal cutting force

колебаний. В этот момент времени с помощью логического блока происходит уменьшение осевой глубины резания в пределах 1 %, что количественно укладывается в допуск на точность для процессов механообработки. В результате уменьшения осевой глубины резания процесс выходит на установившийся вибрационный режим.

Заключение

В реальных ситуациях согласовать желаемые параметры резания расчетным путем с высокой точностью практически невозможно. Лепестковые диаграммы устойчивости могут служить лишь ориентиром при настройке параметров механообработки. Кроме того, в силу ряда причин, в том числе и причин случайного характера, возможны отклонения процесса резания от расчетного. Разработанная система управления позволяет для случая малых отклонений от устойчивого состояния практически мгновенно в режиме online обнаружить нарастание вибраций и скорректировать режим резания, не нарушив технологию механообработки.

Внедрение робототехнических комплексов наряду со станками с ЧПУ на массовом производстве является актуальной задачей промышленности. С точки зрения управления перспективным видится направление на интеллектуализацию контуров адаптации с помощью обучаемых нейронных сетей [23]. При наличии большого объема экспериментальных и экспертных данных в системах с обучением появляется дополнительная возможность для адаптации системы управления к возможной потере устойчивости процесса резания. Речь может идти не только об установлении факта начала развития неустойчивости процесса, как это сделано в настоящей работе, но и о прогнозировании появления нежелательных режимов, таких как регенеративные автоколебания. Это дает возможность коррекции параметров механообработки в режиме реального времени. Внедрение подобных систем на производстве позволит на больших партиях серьезно снизить процент брака и увеличить производительность.

Список литературы

1. Панов А. А., Аникин В. В., Бойм М. Г. и др. / под общ. ред. А. А. Панова. Обработка металлов резанием. Справочник технолога. М.: Машиностроение, 2004. 784 с.
2. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=VJqvMY5cT10>
3. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=iBfPC88xaJo>

4. Кудинов В. А. Динамика станков. М.: Машиностроение, 1967. 359 с.
5. Кедров С. С. Колебания металлорежущих станков. М.: Машиностроение, 1978. 200 с.
6. Мурашкин Л. С., Мурашкин С. Л. Прикладная нелинейная механика станков. Л.: Машиностроение, 1977. 192 с.
7. Tobias S. A., Fishwick W. The chatter of lathe tools under orthogonal cutting conditions // Transactions of ASME. 1958. Vol. 80, Iss. 1. P. 1079–1088.
8. Tlustý J., Poláček M. The stability of the machine tools against self-excited vibrations in machining // International Research in Production Engineering. 1963. Vol. 1, Iss. 1. P. 465–474.
9. Tobias S. A. Machine tool vibration. New York: Wiley, 1961. 352 p.
10. Воронов С. А., Непочатов А. В., Киселев И. А. Критерии оценки устойчивости процесса фрезерования нежестких деталей // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2011. № 1. С. 50–62.
11. Altintas Y. Metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design. Cambridge University press, 2012. 382 p.
12. Altintas Y., Stepan G., Merdol D., Dombovari Z. Chatter stability of milling in frequency and discrete time domain // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 2008. № 1. P. 35–44
13. Budak E. Maximizing Chatter Free Material Removal Rate in Milling through Optimal Selection of Axial and Radial Depth of Cut Pairs // CIRP Annals — Manufacturing Technology. 2005. Vol. 54, Iss. 1. P. 353–356.
14. Свинин В. М. Исследование кинематических и динамических характеристик головки для модуляции скорости резания и выбор ее конструктивных параметров // Ученые записки Забайкальского государственного университета. Физика, математика, техника, технология. 2010. С. 85–97.
15. Иванов И. И., Воронов С. А., Николаев С. М., Куць В. А. Моделирование вибраций при плоском фрезеровании с коррекцией частоты вращения в режиме реального времени // Наука и Образование МГТУ им. Н. Э. Баумана. Электрон. Журн. 2017. № 3. С. 1–16.
16. van Dijk N., van de Wouw N., Doppenberg E., Oosterling H., Nijmeijer H. Chatter control in the high-speed milling process using μ -synthesis // American Control Conference (ACC). 2010. P. 6121–6126.
17. van Dijk N., van de Wouw N., Doppenberg E., Oosterling H., Nijmeijer H. Robust active chatter control in the high-speed milling process // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2012. Vol. 20, Iss. 4. P. 901–917.
18. Юревич Е. И. Сенсорные системы в робототехнике: учеб. пособ. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. 100 с.
19. Гориневский Д. М., Формальский А. М., Шнейдер А. Ю. Управление манипуляционными системами на основе информации об усилиях / Под ред. В. С. Гурфинкеля и Е. А. Девянина. М.: Физматлит, 1994. 368 с.
20. Егоров И. Н. Позиционно-силовое управление робототехническими и мехатронными устройствами. Владимир: Изд-во Владимир. гос. ун-та, 2010. 192 с.
21. Байдина Т. А., Шагниев О. Б., Бурдаков С. Ф. Управление вибрационным состоянием робота при силовом взаимодействии с шероховатой поверхностью неопределенного профиля // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2016. № 4. С. 43–52.
22. Бурдаков С. Ф., Шагниев О. Б. Модели механики в задаче управления силовым взаимодействием робота с поверхностью неопределенного профиля // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2015. № 4. С. 68–79.
23. Юревич Е. И., Калев И. А., Лохин В. М., Макаров И. М. Интеллектуальные роботы: учебное пособие для вузов / Под общей ред. Е. И. Юревича. М.: Машиностроение, 2007. 360 с.

Control of Regenerative Self-Excited Vibrations in the Milling Process

O. B. Shagniev, shagnoleg@yandex.ru, I. K. Shanshin, ivan.fizik92@yandex.ru,

S. F. Burdakov, burdakov.s@yandex.ru,

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation

Corresponding author: Shagniev Oleg B., Ph. D. Student, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: shagnoleg@yandex.ru

Abstract

The problem of the occurrence and rapid suppression of vibrations arising in the process of milling using robot arm is considered. It is assumed that the tool (cutter) is connected with the robot by an elastic suspension, which is used for the force sensation of the robot. Based on the mathematical model of regenerative self-excited vibrations (chattering), the simulation of the system "robot-tool-work surface" was carried out. The tool moves evenly along the work surface with a given pressure on it. The cutter is pressed using the position-force control algorithm based on two PID-controllers with coordinate and force feedbacks. It provides the necessary axial depth of cut. Uniform movement along the work surface is carried out using the velocity control algorithm based on PID-controller with velocity feedback. It provides the required tool feed. Several authors have experimentally and analytically shown that in the process of milling "on the track" unstable regenerative self-oscillations can occur. Track remains on the machined surface during the previous cutter tooth pass. Chattering is a deterrent to increase productivity which mainly depends on rotation speed of cutter and the axial depth of cut. In this paper we consider the possibility of promptly detecting the onset of unstable auto-oscillations from the amplitude spectrum of the sensor readings of the horizontal forces of interaction between the instrument and the work surface. The amplitude spectrum is obtained using the fast Fourier transform, which allows to promptly determine the beginning of unstable processes in system. The subsequent decrease of the axial depth of cut (within one to two percent) almost completely stabilizes the cutting process. This paper proposes a variant of adaptation contour for the robot vertical movement control system based on the allowable change of the axial depth of cut.

Keywords: machining, elastic system "robot-tool-machined surface", force sensing, position-force control, chattering, regenerative self-oscillations, amplitude spectrum, fast Fourier transform, adaptation

For citation:

Shagniev O. B., Shanshin I. K., Burdakov S. F. Control of Regenerative Self-Excited Vibrations in the Milling Process, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2019, vol. 20, no. 5, pp. 291–298.

DOI: 10.17587/mau.20.291-298

References

1. Panov A. A., Anikin V. V., Boym M. G. i dr. *Obrabotka metallov rezaniyem. Spravochnik tekhnologa* (Metal cutting. Technology handbook), Moscow, Mashinostroyeniye, 2004, 784 p. (in Russian).
2. Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=VJqvMY5cTl0>
3. Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=iBfPC88xaJo>
4. Kudinov V. A. *Dinamika stankov* (Machine tools dynamics), Moscow, Mashinostroyeniye, 1967, 359 p. (in Russian).
5. Kedrov S. S. *Kolebaniya metallovezhushchikh stankov* (Machine tools vibrations), Moscow, Mashinostroyeniye, 1978, 200 p. (in Russian).
6. Murashkin L. S., Murashkin S. L. *Prikladnaya nelineynaya mekhanika stankov* (Applied nonlinear dynamics of machine tools), Leningrad, Mashinostroyeniye, 1977, 192 p. (in Russian).
7. Tobias S. A., Fishwick W. The chatter of lathe tools under orthogonal cutting conditions, *Transactions of ASME*, 1958, vol. 80, iss. 1, pp. 1079–1088.
8. Tlustý J., Polacek M. The stability of the machine tools against self-excited vibrations in machining, *International Research in Production Engineering*, 1963, vol. 1, iss. 1, pp. 465–474.
9. Tobias S. A. *Machine tool vibration*, New York, Wiley, 1961, 352 p.
10. Voronov S. A., Nepochatov A. V., Kiselev I. A. *Kriterii otsenki ustoychivosti protsessa frezerovaniya nezhestkikh detaley* (Criteria for assessing the stability of the milling process of non-rigid parts), *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye*, 2011, iss. 1, pp. 50–62 (in Russian).
11. Altintas Y. *Metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design*, Cambridge University press, 2012, 382 p.
12. Altintas Y., Stepan G., Merdol D., Dombovari Z. Chatter stability of milling in frequency and discrete time domain, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2008, iss. 1, pp. 35–44.
13. Budak E. Maximizing Chatter Free Material Removal Rate in Milling through Optimal Selection of Axial and Radial Depth of Cut Pairs, *CIRP Annals — Manufacturing Technology*, 2005, vol. 54, iss. 1, pp. 353–356.
14. Svinin V. M. *Issledovaniye kinematicheskikh i dinamicheskikh kharakteristik golovki dlya modulyatsii skorosti rezaniya i vybor yeye konstruktivnykh parametrov* (Investigation of the kinematic and dynamic characteristics of the head for cutting speed modulation and the choice of its design parameters), *Uchenyye zapiski Zabaykalskogo gosudarstvennogo universiteta. Fizika, matematika, tekhnika, tekhnologiya*, 2010, pp. 85–97 (in Russian).
15. Ivanov I. I., Voronov S. A., Nikolayev S. M., Kuts V. A. *Modelirovaniye vibratsiy pri ploskom frezerovanii s korrektsiyey chastoty vrashcheniya v rezhime realnogo vremeni* (Vibration simulation during face milling with real-time rotation speed correction), *Nauka i Obrazovaniye MGTU im. N. E. Baumana. Elektron. Zhurn.*, 2017, iss. 3, pp. 1–16 (in Russian).
16. van Dijk N., van de Wouw N., Doppenberg E., Oosterling H., Nijmeijer H. Chatter control in the high-speed milling process using μ -synthesis, *American Control Conference (ACC)*, 2010, pp. 6121–6126.
17. van Dijk N., van de Wouw N., Doppenberg E., Oosterling H., Nijmeijer H. Robust active chatter control in the high-speed milling process, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2012, vol. 20, iss. 4, pp. 901–917.
18. Yurevich Ye. I. *Sensornyye sistemy v robototekhnike* (Sensor systems in robotics), SPb., Publishing house of Politekh. un-ta, 2013, 100 p. (in Russian).
19. Gorinevskiy D. M., Formalskiy A. M., Shneyder A. Yu. *Upravleniye manipulatsionnymi sistemami na osnove informatsii ob usiliyakh*, Pod red. V. S. Gurfinkelya i Ye. A. Devyanina, Moscow, Fizmatlit, 1994, 368 p. (in Russian).
20. Yegorov I. N. *Pozitsionno-silovoye upravleniye robototekhnicheskimi i mekhatronnymi ustroystvami* (Position-force control of robotic and mechatronic devices), Vladimir, Publishing house of Vladimir. Gos. Un-ta, 2010, 192 p. (in Russian).
21. Baydina T. A., Shagniyev O. B., Burdakov S. F. *Upravleniye vibratsionnym sostoyaniyem robota pri silovom vzaimodeystvii s sherokhovatoy poverkhnostyu neopredelennogo profilya* (Control of vibrational state of a robot interacting with a rough free-formed surface), *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravleniye*, 2016, iss. 4, pp. 43–52 (in Russian).
22. Burdakov S. F., Shagniyev O. B. *Modeli mekhaniki v zadache upravleniya silovym vzaimodeystviyem robota s poverkhnostyu neopredelennogo profilya* (Mechanics models in the control problem of the force interaction between a robot and a free-formed surface), *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravleniye*, 2015, iss. 4, pp. 68–79 (in Russian).
23. Yurevich Ye. I., Kalyayev I. A., Lokhin V. M., Makarov I. M. *Intellektualnyye roboty: uchebnoye posobiye dlya vuzov* (Intelligent robots: textbook for universities), Moscow, Mashinostroyeniye, 2007, 360 p. (in Russian).