

Адаптивная система роботизированной механообработки

Робототехнический комплекс для механической обработки деталей (РТК-М), например, путём их фрезерования, имеет в своём составе многостепенный промышленный робот, который по программе, выполняемой устройством управления, перемещает инструмент (фрезу).

Пример комплекса для механообработки на основе роботов фирмы АВВ показан на рис.7.



Рис. 7. Робот фирмы АВВ, используемый для механообработки

Роботы оснащаются шпинделями, приводящими во вращение режущий инструмент. Например, шпиндели, имеющие мощность 7,5 и 15 кВт (рис. 8), позволяют осуществлять фрезерование, сверление, снятие заусенцев, шлифование и полирование.



Рис. 8. Фрезерный шпиндель, устанавливаемый на робот

Фрезерованием обрабатываются детали из дерева, пластика, алюминия, стали или камня. На стальных деталях производится только снятие фасок или заусенцев.

Критерии эффективности и особенности технологического процесса роботизированной механообработки

Создаваемый роботизированный комплекс для механообработки должен быть технологически пригодным и высокоэффективным. Это значит, что он должен удовлетворять требованиям к производительности и обладать необходимой точностью движений рабочего органа (РО) технологического робота (ТР), удовлетворительной надежностью и минимальной стоимостью.

Эффективность РТК-М тем выше, чем больше его производительность. Поэтому при создании РТК-М важно решить задачу достижения максимальной возможной производительности.

В качестве **критерия эффективности** Q роботизированной механообработки, например, фрезерования будем рассматривать **скорость удаления материала заготовки** ($\text{мм}^3/\text{с}$).

Она вычисляется по формуле

$$Q = BhV, \quad (1)$$

где h – глубина резания; B – ширина резания; V – скорость продольной подачи инструмента относительно поверхности обрабатываемой детали.

В процессе механической обработки возникают силы резания, действующие на инструмент и передающиеся на привод инструмента и манипулятор робота. Они функционально связаны с главной (окружной) силой резания F_p , абсолютное значение которой зависит от свойств инструмента, детали и значений параметров движения инструмента относительно объекта обработки, причём эта зависимость носит нелинейный характер.

Сила резания F_p вычисляется по эмпирическим формулам, известным в теории резания и в области технологии машиностроения. Одна из таких формул имеет вид

$$F_p = k_F B^{n_1} h^{n_2} V^{n_3},$$

где k_F – коэффициент пропорциональности, учитывающий свойства материала обрабатываемой детали и инструмента, диаметр, число зубьев, частоту вращения и степень износа фрезы; n_1, \dots, n_3 – показатели степени,

значения которых определяются путём обобщения результатов экспериментальных исследований.

В результате действия сил резания фактическая траектория движения инструмента, например, концевой фрезы, определяющая положение образующейся обработанной поверхности детали, может отличаться от желаемой траектории. В этом можно убедиться, рассмотрев математическую модель влияния этих сил на отклонения рабочего органа шестистепенного универсального манипулятора.

Компоненты сил резания образуют (6×1) -вектор F сил и моментов, действующих на рабочий орган робота, причём этот вектор рассматривается в базовой системе координат робота. Вектор F вызывает появление (6×1) -вектора моментов сил реакции M в сочленениях манипуляционного механизма, который может быть вычислен по формуле

$$M = J^T(q)F ,$$

где $J(q)$ – (6×6) -матрица Якоби манипулятора; q – (6×1) -вектор обобщённых координат манипулятора.

Компоненты вектора моментов M вызывают упругие деформации в механических передачах приводов робота, которые можно оценить, введя в рассмотрение диагональную (6×6) -матрицу G коэффициентов упругой податливости механических передач. Вектор угловых отклонений Δq в степенях подвижности можно оценить по формуле

$$\Delta q = GM .$$

Учитывая малость компонентов вектора угловых отклонений Δq в степенях подвижности, вектор ΔX отклонений координат рабочего органа манипулятора, вызванных силами резания, можно определить, используя зависимость

$$\Delta X = J(q)GJ^T(q)F .$$

Проекция вектора на направление, перпендикулярное плоскости, касательной к обрабатываемой поверхности, образует ту часть отклонения инструмента от желаемой траектории δ_T , которая обусловлена действием сил резания:

$$\delta_T = f(\Delta X).$$

Здесь $f(\Delta X)$ – функция, связывающая δ_T с компонентами вектора ΔX . Эта функция зависит от формы поверхности обрабатываемой детали и её расположения в системе координат робота.

Видно, что упругие деформации приводят к отклонению инструмента от запрограммированной траектории движения и снижают точность изготавливаемого изделия. Отклонение δ_T тем больше, чем больше значения контурной скорости движения инструмента и глубины резания. При этом изменения глубины резания обусловлены, в частности, отклонением расположения поверхности детали от запрограммированного уровня. Таким образом, точность обработки и производительность оказываются взаимосвязанными.

Очевидно, что при создании РТК-М должно выполняться условие

$$\delta_T \leq \delta_{T, \text{доп}}, \quad (2)$$

где $\delta_{T, \text{доп}}$ – допустимое отклонение инструмента. Поэтому увеличение производительности должно быть согласовано с допустимой погрешностью обработки.

Это обстоятельство выступает в роли ограничения при оптимизации параметров механообработки по критерию производительности. Таким образом, рост производительности должен быть обеспечен, прежде всего, при соблюдении требования к точности обработки.

Построение адаптивной системы управления робототехническим комплексом механообработки

Проблема состоит в том, что форма поверхности обрабатываемой детали может быть сложной, а величина припуска нестабильной. Поэтому фактическая глубина резания может колебаться в некоторых пределах случайным образом, и учесть заранее эти колебания при программировании робота невозможно. Это приводит к нестабильности сил резания, которая может привести к недопустимым отклонениям фрезы от желаемой траектории. Кроме того, момент сил, действующий на привод инструмента, вызывает снижение частоты вращения фрезы, что ведёт к ещё большему росту силы резания. При неблагоприятном стечении обстоятельств это может вызвать поломку инструмента или робота.

Одним из актуальных направлений совершенствования системы управления (СУ) роботом в составе РТК-М является построение адаптивной системы управления скоростью подачи инструмента. В каждый момент времени СУ должна устанавливать контурную скорость, максимально возможную с точки зрения обеспечения гарантированной точности обработки, но не превышающую максимальную рекомендованную скорость, отвечающую условию достижения требуемого качества поверхности.

Адаптивность достигается использованием аналитически задаваемых программных траекторий движения инструмента, зависящих от пути вдоль этих траекторий. В этом случае появляется возможность вычислять путь, интегрируя по времени желаемую скорость движения, причем эта скорость определяется с учётом оценки δ_T отклонения инструмента от желаемой траектории.

Расчёт величины δ_T производится по измеренным силам, действующим на инструмент, и коэффициентам динамической податливости механических передач в составе приводов манипулятора технологического робота. Информация о силах поступает в систему управления РТК-М от датчика, установленного в «запястье» манипулятора, или вычисляется на основании данных от датчиков привода инструмента (рис. 9).

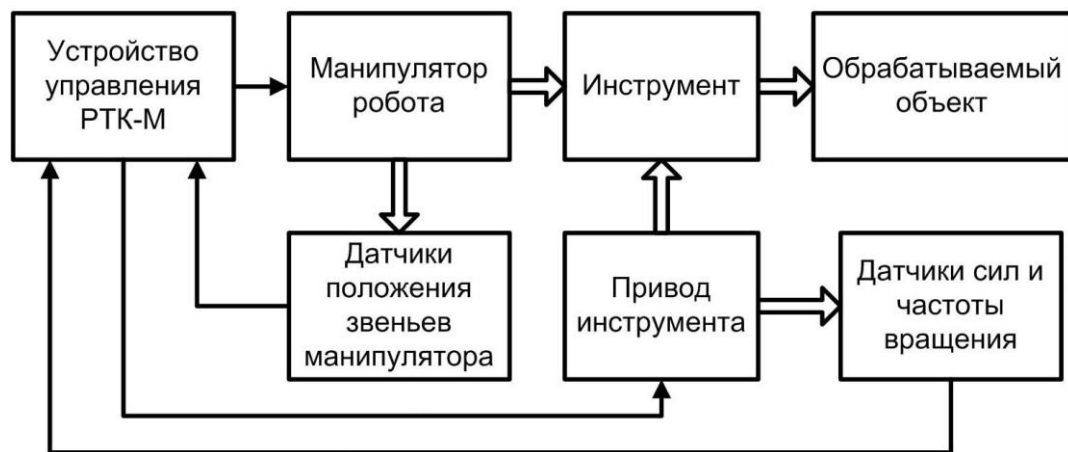


Рис. 9 Структура адаптивной системы управления РТК-М

Если оценка отклонения инструмента от желаемой траектории δ_T превышает заданный уровень $k_0\delta_{T,доп}$, то производится снижение контурной скорости V движения рабочего органа. Здесь k_0 – коэффициент, значение которого не превышает 1.

Для того, чтобы осуществить регулирование контурной скорости, желаемая траектория движения рабочего органа разбивается на отдельные

участки. На каждом участке желаемые значения координат рабочего органа описываются многочленами, зависящими от длины пути L , пройденного рабочим органом по заданному участку траектории. Например, декартовы координаты рабочего органа могут быть представлены в виде

$$x = x_0 + a_x L + \frac{1}{2} b_x L^2 + \frac{1}{6} c_x L^3,$$

$$y = y_0 + a_y L + \frac{1}{2} b_y L^2 + \frac{1}{6} c_y L^3,$$

$$z = z_0 + a_z L + \frac{1}{2} b_z L^2 + \frac{1}{6} c_z L^3,$$

где a_x, b_x, \dots, c_z – коэффициенты, характерные для рассматриваемого участка траектории; x_0, y_0, z – начальные значения координат соответственно.

Желаемая контурная скорость $V_{\text{Ж}}$ оперативно рассчитывается устройством адаптации, входящим в состав устройства управления РТК-М, и поэтому является функцией времени. Путь L образуется в результате интегрирования желаемой контурной скорости движения $V_{\text{Ж}}$ по времени и, таким образом, тоже является функцией времени:

$$L(t) = \int_0^t V_{\text{Ж}}(t) dt.$$

Законы регулирования желаемой скорости $V_{\text{Ж}}$ могут быть различными. Например, желаемое значение контурной скорости можно рассчитывать по формуле

$$V_{\text{Ж}} = \begin{cases} V_0 & \text{при } \delta_T \leq k_0 \delta_{T.\text{доп}} \\ V_0 - k_V (\delta_T - k_0 \delta_{T.\text{доп}}) & \text{при } \delta_T > k_0 \delta_{T.\text{доп}} \end{cases},$$

где V_0 – номинальная желаемая контурная скорость; k_V – коэффициент усиления, влияющий на характер и точность процессов регулирования скорости и сил резания. Если расчётное значение $V_{\text{Ж}}$ превышает V_0 , то оно ограничивается на уровне V_0 .

Структурная схема адаптивной системы, построенной в соответствии с описанным выше подходом, показана на рис.10.

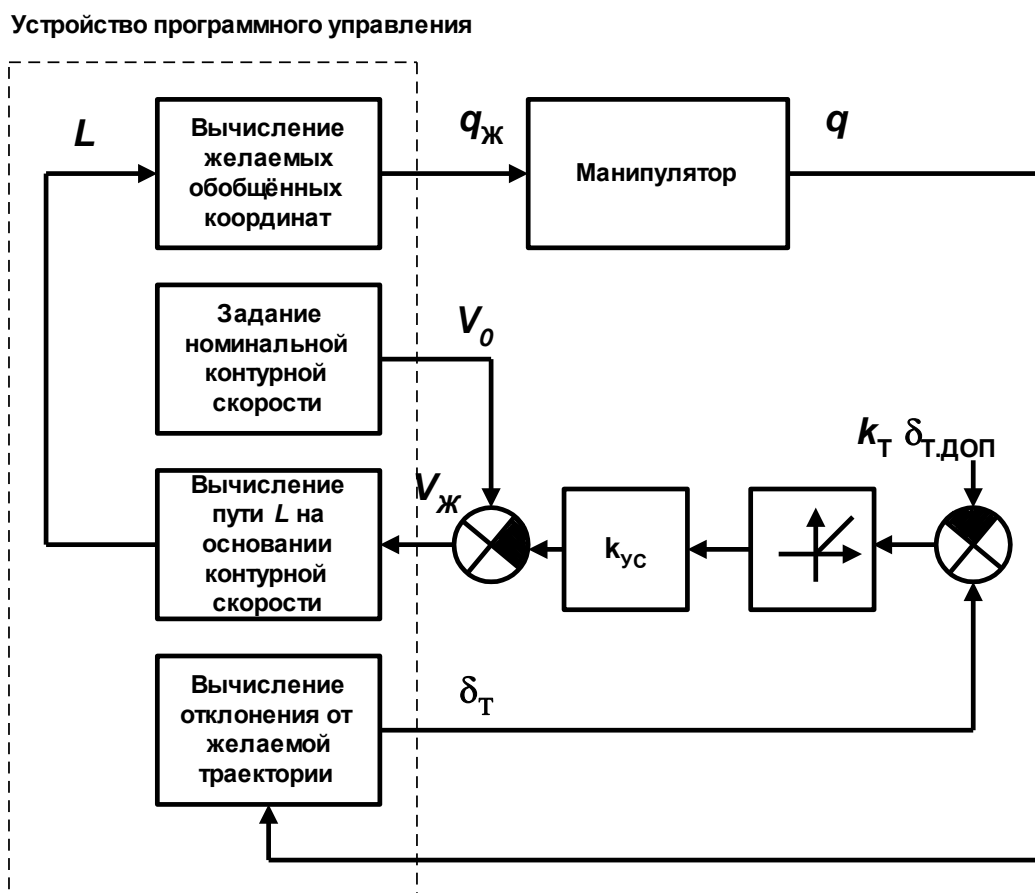


Рис. 10. Структурная схема адаптивной системы

Таким образом, регулируя контурную скорость и через неё влияя на силы резания, адаптивная система управления способна автоматически поддерживать наибольшую производительность механообработки и при этом обеспечивать требуемую точность движения инструмента по программной траектории.

Чем больше динамическая жёсткость манипулятора, тем меньше δ_T и, следовательно, по мере роста жёсткости можно увеличивать скорость подачи, наращивая производительность механообработки. Целесообразно построение систем управления РТК-М, обладающих способностью увеличения динамической жёсткости средствами регулирования при неизменной механической части.

Реализация всех рассмотренных выше методов адаптивного управления требует затрат времени на измерение тех или иных величин, накопление данных, их обработку и вычисления управляющих воздействий.

Одно из важных требований к устройствам, входящим в состав вспомогательного контура, состоит в том, что они должны обладать высоким быстродействием. Это необходимо для того, чтобы сформированные ими воздействия на регулятор были актуальными, т.е. отражали выявленные свойства объекта управления или всей системы в текущий момент времени. В противном случае динамические свойства адаптивной системы окажутся низкими, и она даже может потерять устойчивость.