

УДК 621.91.52

Управление приводом металлорежущего станка с компенсацией эксцентриситета шпинделя

В.П. Легаев, Л.К. Генералов

Аннотация. Разработана математическая модель системы автоматического управления приводом поперечной подачи металлорежущего станка, обеспечивающая повышенную точность обработки деталей. Результат достигается введением дополнительного корректирующего сигнала в систему управления приводом, устраняющего погрешность, обусловленную эксцентриситетом шпинделя. Погрешность эксцентриситета функционально связана с усилием резания и по его изменению, с помощью модели, формируется корректирующий сигнал, повышающий точность обработки.

Ключевые слова: Станок; шпиндель; эксцентриситет; обработка; деталь; точность; модель; стабилизация.

Достижение заданной точности обработки деталей на металлорежущих станках, для нужд авиационной промышленности, при достаточно качественных характеристиках систем управления приводами, часто переходит в разряд труднорешаемых задач. Это связано с рядом возмущающих факторов, которые не всегда удается компенсировать. Среди таких факторов выделяется смещение оси вращения шпинделя относительно начального положения в процессе его вращения [1,2], получаемого за счет эксцентриситета шпинделя станка или упругих деформаций и других факторов, что в результате приводит к дисбалансу и появлению колебаний в определенном частотном диапазоне. Кроме этого при снятии неравномерного припуска в процессе обработки заготовок или изменении твердости материала, изменяется амплитуда колебаний и в какой – то момент наступает потеря устойчивости движения.

Существующие методы повышения точности обработки деталей, посредством адаптивного управления приводами, позволяют решать указанные проблемы путем регулирования относительного перемещения технологических баз инструмента и заготовки в процессе обработки [1], но не в полной мере, поскольку не учитывают влияние возмущающих воздействий, связанных с нестабильностью движения шпиндельного узла.

Рассмотрим возможность устранения возмущений, возникающих от действия эксцентриситета, приводящего к дополнительным смещениям заготовки относительно инструмента в процессе обработки.

Предположим, что диаметр детали, получаемый после обработки, включает погрешность вызванную эксцентриситетом и записывается выражением:

$$d(t) = d_d(t) + e(t), \quad (1)$$

или переходя к радиусам

$$r(t) = r_d(t) + e(t), \quad (2)$$

где $d_d(t), r_d(t)$ - диаметр и радиус детали после обработки; $e(t)$ - эксцентриситет.

На рис. 1, в плоскости перпендикулярной продольной оси детали показан вектор r_d и его составляющие, которые связаны соотношением:

$$r_d = r_y + r_n + e, \quad (3)$$

где r_y - вектор соединяющий точку, находящуюся на оси симметрии детали O_1 с точкой, находящейся на оси установочных центров O_2 ; r_n - вектор, соединяющий точку находящуюся на оси установочных центров O_2 с вершиной резца; 1 - идеальная траектория движения вершины резца; 2 - фактическая траектория движения.

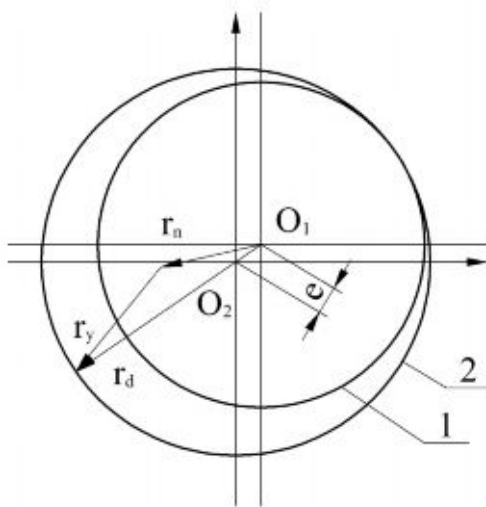


Рис. 1. Определение радиуса вектора детали.

Как видно из рисунка, $e(t)$ представляет ошибку или элемент возмущения связанный с эксцентриситетом. Основное влияние эксцентриситета на процесс резания заключается в дисбалансе вращающейся заготовки. По данным, приведенным в [1,2], установлено, что влияние эксцентриситета прослеживается на готовой детали периодически, поэтому, для повышения точности обработки следует изменять r_d непрерывно в течение каждого оборота.

Однако, реализовать данный прием весьма затруднительно и поэтому провести полную компенсацию погрешности не удастся. Выход из создавшегося положения может быть найден при использовании дополнительных сигналов, подаваемых в систему управления приводом поперечной подачи, компенсирующих влияние эксцентриситета шпинделя, упругих перемещений элементов станка, приспособления и заготовки.

Устранение вышеназванных погрешностей в процессе обработки производится путем сравнения фактического размера детали с заданным и формированием корректирующего воздействия. Указанный прием часто используется на практике, но при управлении процессом резания металла имеет ряд особенностей, одним из которых является задержка по времени корректирующего сигнала. Это обусловлено возможностями средств измерения и применяемыми методами. Так современные электромеханические привода имеют время реакции для изменения фактического размера детали в пределах 5 – 10 мс, а время измерения составляет 0,5 с и более и, кроме этого, замер производится не в зоне обработки, а на некотором расстоянии от него, что еще увеличивает сдвиг по времени. Поэтому, возникающая задержка корректирующего сигнала приводит к отставанию регулировки относительного положения инструмента и заготовки, что не позволяет добиться максимальной точности обработки.

Для решения задачи предлагается использовать прием, позволяющий существенно сократить время подготовки корректирующего сигнала, если использовать вместо измерительной системы виртуальный датчик, представляющий собой математическую модель процесса формирования размера детали при обработке. В этом случае для оценки получаемого диаметра детали используем выражение:

$$d_p(t) = \frac{P_y(t)}{C_y} + U(t) + e(t), \quad (4)$$

где $P_y(t)$ – составляющая силы резания, направленная по оси Y ; C_y – коэффициент упругости станочной системы;; $U(t)$ – величина упругой деформации, обусловленная податливостью элементов станочной системы. Значение силы резания в выражении (4) определяется по зависимостям, приведенным в справочной литературе [3]., жесткость станка и отдельных элементов берутся из паспортных данных.

Величина эксцентриситета в (4) неизвестна, но она входит в измеренный размер детали, который определяется из выражения (1). Поэтому, если сравнить диаметры расчетный и измеренный, можно определить эксцентриситете $e(t)$, который представляет собой ошибку на выходе виртуального датчика. Учитывая, что при наличии эксцентриситета ось шпинделя движется по эллиптической кривой с постоянными параметрами, то в этом случае легко измерить угловую скорость используя кодирующее устройство положения.

Мультигармоническая модель эксцентриситета для шпиндельного узла имеет вид:

$$e(t) = \sum \alpha_k \sin \omega_k t + \beta_k \omega_k t \quad (5)$$

где α_k и β_k являются неизвестными, а ω_k - известная величина.

Кроме того, каждый синусоидальный вход может быть представлен в пространстве состояний следующими траекториями:

$$\dot{x}_1^k = \omega_k x_1^k(t) \quad (6)$$

$$\dot{x}_2^k = -\omega_k x_2^k(t) \quad (7)$$

В этом случае для измеряемой составляющей силы резания $P_y(t)$ можем рассматривать влияние компонентов эксцентриситета с наложенным шумом:

$$P_y = \sum_{k=1}^N x_1^k(t) + x_2^k(t) + n(t) \quad (8)$$

Чтобы оценить значения x_1^k, x_2^k , определяемые по выражениям (6) и (7), используем фильтр Калмана[4], при $k = 1 \dots N$, представляющий собой математическую модель, позволяющую дополнить расчетное значение силы резания доизмеренного. Величина коррекции будет представлять собой ошибку от действия эксцентриситета. Система управления, обеспечивающая точность обработки цилиндрических поверхностей при точении показана на рис. 2.

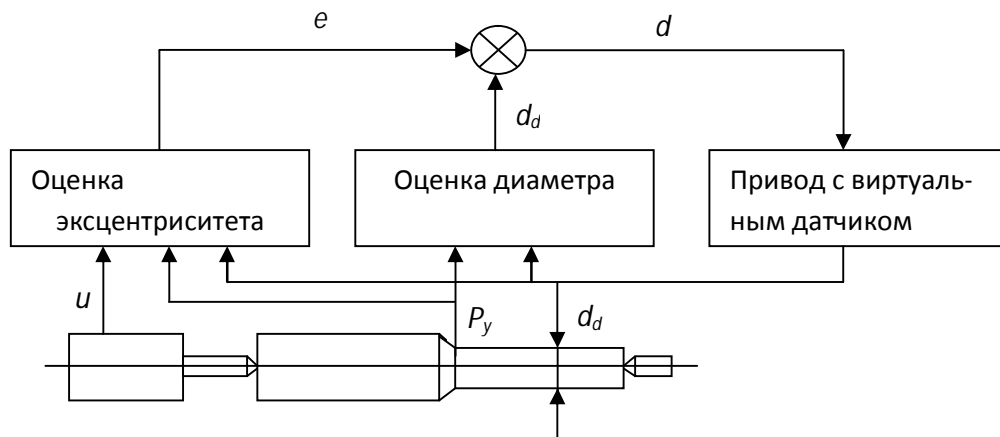


Рис. 2. Система управления процессом резания с компенсацией эксцентриситета.

Исследования системы автоматического управления показывают, что точно определить частоту эксцентриситетов в сигнале не удастся. Гармонические компоненты не являются стационарными ввиду нагрева опор шпинделя и трения скольжения в зоне резания. Поэтому, моделируя эти эффекты можно добавить небольшой шум процесса к правой части урав-

нений (6), (7). В этом случае модель становится стабилизируемой со стороны шума и управление сводится к поддержанию значения регулируемой величины после завершения переходного процесса. Это означает, что фильтр должен быть стационарным и использоваться для конкретных условий обработки. Если условия изменяются, используется переменный во времени фильтр, представляющий собой набор элементарных последовательно включаемых фильтров.

Для стационарного фильтра проведена оценка его влияния на точность обработки путем моделирования системы автоматического управления процессом резания на станке с ЧПУ. Математическая модель системы управления подробно описана в [5]. Структурная схема модели с фильтром показана на рис. 3.

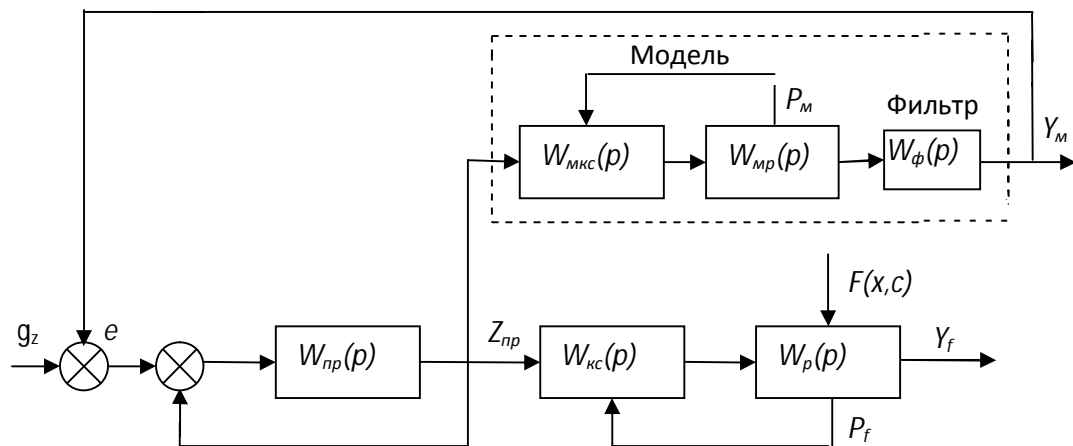


Рис. 3 Структурная схема привода

На схеме обозначены следующие передаточные функции: $W_{пр}(p)$ – разомкнутого привода; $W_{кc}(p)$ – кинематической системы для передачи движения инструмента по оси Y ; $W_p(p)$ – процесса резания с компонентами технологической системы; $W_{мкс}(p)$ – модели кинематической системы; $W_{мр}(p)$ – модели процесса резания с компонентами технологической системы; $W_{ф}(p)$ – модель фильтра.

На вход системы подается задающий сигнал q_z , который сравнивается с выходной величиной Y_M . Сигнал рассогласования e поступает на вход привода, с выхода которого снимается управление $Z_{пр}$. Под действием этого управления в технологической системе осуществляется процесс, влияющий на изменение выходной координаты Y_f . При этом координата Y_f является векторной величиной, представляющей перемещение инструмента в плоскости ко-

ординат XOY рабочего пространства станка, включающая дополнительную составляющую в виде эксцентриситета.

Проведем правильность выбранного метода устранения погрешностей путем моделирования процесса резания. Моделирование проведем в среде Simulink интегрированного пакета MATLAB. Исходными данными для моделирования являются режимы резания и геометрические размеры заготовки. В качестве фильтра используем константу, величина которой зависит непосредственно от выходного сигнала компенсирующей модели и изменяясь в пределах 1 – 1,5. При увеличении $W_{\phi}(p)$ выше предельного значения система автоматического управления потеряла устойчивость при обработке заготовок диаметром 30 мм длиной 130 мм при следующих режимах: $V = 100$ м/мин; $S = 1,0$ мм/мин; $t = 0,5$ мм. При снижении подачи и глубины резания устойчивость восстанавливалась.

Учитывая, что размеры детали формируются на окончательных переходах, моделирование проведем с режимами резания, характерными для финишных операций, когда подача находится в пределах 0,5 мм/мин, глубина резания 0,2 мм. По результатам моделирования сопоставим размеры детали, полученные с использованием модального фильтра и без него. Данные, полученные в результате исследований, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Коэффициент усиления фильтра k	Длина заготовки, мм									
	8	19	32	45	59	72	85	98	111	125
	Погрешность обработки, мм									
1,0	0,050	0,049	0,048	0,048	0,047	0,047	0,046	0,046	0,047	0,047
1,2	0,045	0,044	0,044	0,043	0,043	0,043	0,043	0,043	0,043	0,043
1,3	0,042	0,042	0,042	0,041	0,041	0,041	0,041	0,041	0,041	0,041
1,5	0,037	0,037	0,037	0,037	0,037	0,037	0,037	0,037	0,037	0,037

Графики изменения погрешности обработки деталей по длине, при различных значениях коэффициентов усиления фильтра, показаны на рис.4. Как видно из рисунка, с увеличением k происходит снижение погрешности обработки. Так при $k = 1$, считаем, что фильтр отсутствует, погрешность в начале обработанной детали составила 50 мкм, а при использовании фильтра с коэффициентом усиления $k = 1,5$, в том же сечении, погрешность составила 37 мкм. Снижение погрешности на 13 мкм или на 35% соответственно, показывает возможности данного метода компенсации погрешностей. Рассматривая промежуточные значения погрешностей при $k = 1,2$ и $k = 1,3$, можем заметить, что величина изменения погрешности

зависит от величины k . Поэтому, в данных условиях обработки, точность может регулироваться в широких пределах и достигать заданного значения без использования дополнительных средств технологического оснащения.

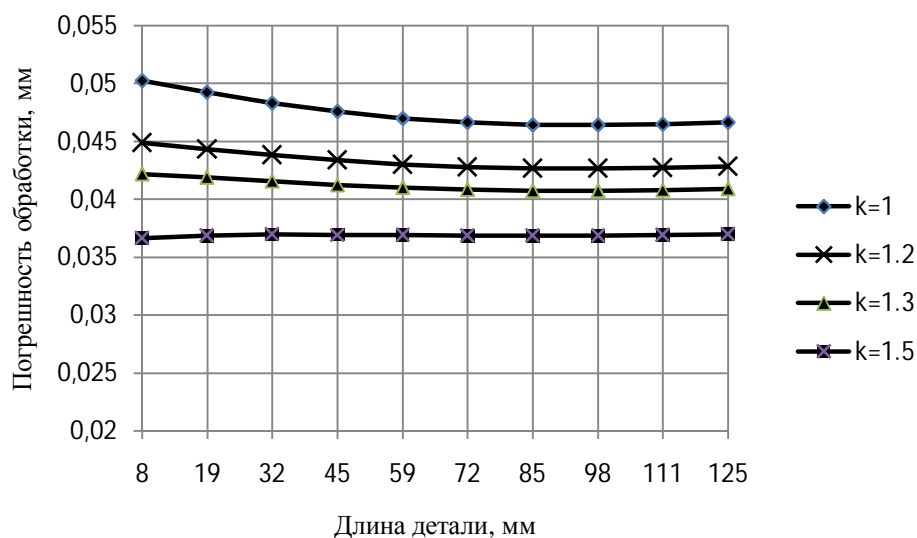


Рис. 4 Погрешность обработки деталей.

Дальнейшее исследование точности привода при пониженных режимах резания показывает, что погрешность снижается, но до определенного предела. Так при скорости резания 100 м/мин, подаче 0,2 мм/мин, глубине резания 0,1 мм точность обработки без фильтра составляет 18 мкм, а при использовании фильтра с $k = 1,3$, составляет 15 мкм, погрешность уменьшилась на 8,3 %. Следовательно, эффективность постоянного фильтра проявляется в большей степени при управлении приводами на промежуточных переходах обработки. Для финишной высокоточной обработки требуется проектирование переменного фильтра, учитывающего, кроме эксцентриситета, влияние других возмущающих факторов.

Проведенные исследования показывают возможности дополнительного управления приводами металлорежущих станков с использованием моделируемых корректирующих сигналов в цепях обратных связей. Указанный вид управления может применяться в случаях отсутствия априорной информации о состоянии объекта управления или отдельных его элементов и может использоваться для управления приводами технологических машин для обеспечения высокоточного движения исполнительных органов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Базров Б.М. Методы повышения точности обработки деталей типа тел вращения посредством адаптивного управления. // Станки и инструменты, 1973, №3, с. 8-11.
2. Аршанский М.М., Щербаков В.П. Вибродиагностика и управление точностью обработки на металлорежущих станках. – М.: Машиностроение, 1988. – 136 с.: ил. ISBN 5-217-00036-8.
3. Афанасьев В.Н., Колмановский В.Б., Носов В.Р. Математическая теория конструирования систем управления. - М.: Высш. шк., 1989. – 447 с. ISBN 5-06-000046-X.
4. Гудвин Г.К. Проектирование систем управления / Г.К. Гудвин, С.Ф. Гребен, М.Э. Сальдаго. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004. – 911 с., ил. ISBN 5-94774-128-8.
5. Кобзев А.А., Генералов Л.К. Модельное управление точностью обработки резанием. // Вестник машиностроения № 12, 2009, с. 65- 67.

Сведения об авторах

Легаев Владимир Павлович, профессор Владимирского государственного университета д.т.н.,

600000 г. Владимир, ул. Горького 87,

тел.: 8 (4922) 479876; 479971; E – mail:legaev@vlsu.ru

Генералов Леонтий Константинович, доцент Владимирского государственного университета, к.т.н.

600000 г. Владимир, ул. Горького 87,

тел.: 8 (4922) 479876; 479971

E – mail:generalov@vlsu.ru