

Экспериментальные исследования самообучающихся мехатронных систем с пьезокомпенсаторами для станков некруглого точения¹

НИКОЛЬСКИЙ А.А., КОРОЛЕВ В.В.

Разработаны способы управления, обеспечивающие линеаризацию сегнетогистерезиса быстродействующих пьезодвигателей, предназначенных для компенсации ошибок формообразования при точении некруглых деталей. Применение устройств компенсации приводит к значительному снижению отклонений формы обрабатываемого изделия от заданной и к улучшению качества поверхности по параметру шероховатости на 1–1,5 класса.

Ключевые слова: электропривод, мехатроника, самообучающиеся системы, металлорежущие станки

Статья написана по результатам исследований, направленных на совершенствование мехатронных систем для воспроизведения точных циклических движений. Такие циклы воспроизводятся, в частности, приводами подачи станков некруглого точения при обработке партий одинаковых деталей: бескопирной обточке поршней с овально-бочкообразной формой поверхности, валов с лысками и фасками, кулачков и т.п.

Ошибки формообразования при токарной обработке содержат как систематическую составляющую, повторяющуюся от детали к детали, так и случайную, вызываемую вибрационными смещениями шпиндельного узла и режущего инструмента относительно друг друга. Для некруглых деталей существенной может оказаться ошибка формы, вызванная случайными изменениями скорости шпинделя.

Наиболее эффективным средством исключения систематических ошибок при этом является использование самообучения привода подачи, при котором ошибки формы, наблюдаемые при обработке предыдущей детали, учитываются при формировании программы управления движением резца для обработки последующих деталей [1]. При использовании электродинамического привода управления резцом самообучение позволило на 1–2 порядка (до 500–700 Гц) расширить частотный диапазон безошибочного воспроизведения повторяющейся от детали к детали траектории движения режущего инструмента по сравнению со случаем применения традиционного следящего привода подачи. На этой основе были реализованы самообучающиеся электроприводы подачи и внедрены спе-

Control methods are developed that make it possible to linearize the segnetohysteresis of quick-response piezomotors intended for compensating shape formation errors in machining nonround parts. The use of compensation devices results in essentially smaller deviations of the shape of a machined article from its specified pattern and in improvement of the surface quality according to the roughness parameter by 1 to 1.5 class points.

Key words: electric drive, mechatronics, self-learning systems, metal-cutting machines

циализированные токарные станки для обработки автотракторных поршней [2].

Попытки использования самообучения для компенсации ошибок взаиморасположения резца и детали делались ранее в предположении, что существенная их часть является систематической [3]. Оказалось, что эффективно компенсируемые самообучением ошибки от действия систематических возмущений ограничены, как правило, низшими (первой – третьей) гармониками на обороте шпинделя. Компенсация первой гармоники систематических ошибок взаиморасположения инструмента и детали ведет к улучшению соосности разных сечений изделия, а второй и третьей – к некоторому уменьшению отклонений формы изделий от круглости. Однако значительного улучшения точности в поперечном сечении и качества поверхности (шероховатости, волнистости) как в продольном, так и в поперечном сечениях достичь не удастся из-за относительной малости низкочастотных систематических возмущений, особенно в станках высокой точности с качественным выполнением шпиндельного узла.

Вместе с тем, ошибка взаиморасположения инструмента и детали содержит несистематические составляющие, вызванные как низкочастотными колебаниями с частотами, близкими к частотам, кратным обороту шпинделя, так и высокочастотными возмущениями вибрационного характера, имеющими в своем спектре колебания с амплитудами в несколько микрометров на частотах до 1000 Гц. Практически ни те, ни другие не могут быть устранены самообучением (из-за их неповторяемости от детали к детали) и не могут быть компенсированы воздействием применяемого на стан-

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 10-08-00195-а).

ке электродинамического привода подачи, имеющего недостаточное быстродействие (полоса пропускания его контура положения в следящем режиме не превышает 100 Гц).

Как показали исследования [3], для прямой компенсации измеренных случайных нарушений взаиморасположения резца и детали может использоваться второй канал привода подачи, выполненный на базе стержневого пьезокомпенсатора подходящего типоразмера. В [4] обоснованы структуры двухканальных самообучающихся приводов поперечной подачи для токарных станков некруглого точения с быстродействующим пьезокомпенсатором ошибок взаиморасположения резца и детали.

На рис. 1 приведена кинематическая схема такого привода [4] с формированием траектории движений резца P путем механического суммирования движений электродинамического линейного исполнительного двигателя $\mathcal{E}\mathcal{D}$ и стержневого пьезокомпенсатора $\mathcal{P}\mathcal{K}$ с помощью рычажного механизма $\mathcal{P}\mathcal{M}$. В пренебрежении малой вращательной составляющей движений рычажного механизма движения резца X_p в направлении оси X определяются выражением

$$X_p = X_0 + D_1 / (1 + K_p) + D_2 K_p / (1 + K_p), \quad (1)$$

где X_0 – положение в пространстве поперечного суппорта станка, являющегося основанием для установки режущего инструмента, $\mathcal{E}\mathcal{D}$ и $\mathcal{P}\mathcal{K}$; D_1 , D_2 – перемещения исполнительного двигателя первого $\mathcal{E}\mathcal{D}$ и второго $\mathcal{P}\mathcal{K}$ каналов относительно положения основания X_0 ; K_p – передаточное отношение $\mathcal{P}\mathcal{M}$, равное отношению большого плеча рычага к малому (для поршневых станков, как правило, $K_p \gg 5$).

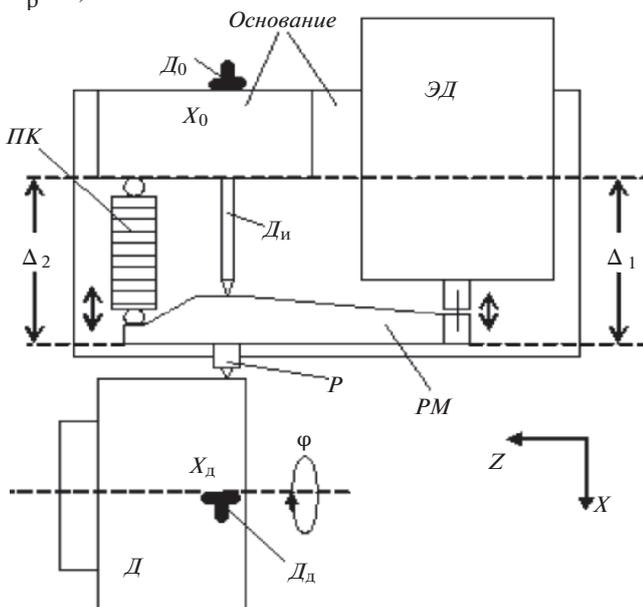


Рис. 1. Кинематическая схема двухканального электропривода подачи

На рис. 1 показана также обрабатываемая деталь D , положение которой в пространстве определяется поперечной координатой выбранной геометрической оси X_d . Форма некруглой детали $X_\phi(j, Z)$ задается как функция угловой j и продольной Z координат детали и определяется отклонениями всех точек поверхности детали от соответствующих точек ее геометрической оси. При точении ось детали практически совпадает с осью шпинделя. Биения и вибрации последнего приводят к смещениям оси детали в процессе ее обточки и определяют первую составляющую погрешности формообразования. Вторая составляющая этой погрешности вызывается вибрационными смещениями в пространстве положения X_0 основания, на котором установлены резец, $\mathcal{E}\mathcal{D}$ и $\mathcal{P}\mathcal{K}$.

В [4] предложено организовать взаимодействие каналов таким образом, чтобы систематические ошибки формы компенсировались за счет движений D_1 электродинамического привода первого канала, а случайные ошибки вибрационного характера – за счет движений D_2 пьезокомпенсатора:

$$D_1 = X_\phi(j, Z)(1 + K_p); \quad (2)$$

$$D_2 = (X_d - X_0)(1 + K_p) / K_p. \quad (3)$$

На схеме рис. 1 показан также комплект датчиков D_0 и D_d , измеряющих, соответственно, перемещения основания X_0 и оси X_d обрабатываемой детали и позволяющих решать поставленную задачу: обеспечить процессы самообучения и компенсацию вибрационных возмущений взаимного расположения резца и заготовки. Кроме того, привод содержит датчик $D_{и}$, измеряющий перемещение $X_{и}$ резца относительно основания:

$$\begin{aligned} X_{и} &= X_p - X_0 = D_1 / (1 + K_p) + D_2 / (1 + K_p) = \\ &= X_\phi(j, Z) + X_d - X_0. \end{aligned} \quad (4)$$

Отметим, что для измерения относительного смещения оси детали и основания $X_d - X_0$ могут быть использованы либо два инерциальных датчика D_d и D_0 , либо один датчик, установленный на основании и измеряющий смещение оси вращения шпинделя относительно основания. Это измерение можно сделать, контролируя положение оси эталонной цилиндрической меры, установленной на шпинделе станка соосно с обрабатываемой деталью и вращающейся вместе с ней. Рабочая длина эталонной меры должна быть не меньше длины обрабатываемого участка детали.

Структура двухканальной самообучающейся системы, отвечающая рассмотренной кинематиче-

ской схеме, подробно рассмотрена в [4], а методы организации самообучения в [1– 3].

При отсутствии компенсации вибрационных возмущений ошибка формообразования в двухканальном приводе будет по меньшей мере равна ошибке взаиморасположения $X_d - X_0$. Для того чтобы ошибки взаиморасположения резца и детали скомпенсировать, их надо измерить и подать в виде задающего сигнала $D_{зд} = X_d - X_0$ на вход контура управления быстродействующим пьезокомпенсатором.

Кроме ошибок взаиморасположения инструмента и детали, на форму некруглых деталей влияет точность воспроизведения главным приводом станка скорости шпинделя. Здесь также возникают как систематические $d_{си}$ (вызванные, например, пульсациями скорости), так и случайные $d_{сл}$ составляющие скоростных ошибок $d_{ск}$ формы. Если для контроля и компенсации ошибок взаиморасположения инструмента и детали необходимо иметь специальные датчики D_0 и D_d , то ошибки $d_{ск} = d_{си} + d_{сл}$, вызванные изменениями скорости шпинделя, можно выделить из сигнала датчика D_i и контролировать непосредственно на выходе главного сумматора контура самообучения как разницу между заданной $X_{фз}(j, Z)$ и реально получающейся $X_{ф}(j, Z)$ в процессе обточки формы детали:

$$\begin{aligned} X_{и} &= X_{ф}(j, Z) + X_d - X_0 = X_{фз}(j, Z) - d_{ск} + X_d - X_0 = \\ &= X_{фз}(j, Z) - d_{си} - d_{сл} + X_d - X_0. \end{aligned} \quad (5)$$

Систематические составляющие скоростной ошибки $d_{си}$ формы будут успешно подавляться за счет самообучения, а для исключения случайных составляющих $d_{сл}$ можно (как и для исключения ошибок взаиморасположения) использовать пьезокомпенсатор. При этом сам контур самообучения будет выполнять дополнительную функцию разделения скоростной ошибки на систематическую и случайную составляющие. В самом деле, после завершения начальных переходных циклов самообучения систематическая составляющая стремится к нулю $d_{си} \rightarrow 0$, и на выходе главного сумматора контура согласно (5) формируется сигнал, пропорциональный случайной составляющей

$$d_{сл} \approx X_{фз}(j, Z) - X_{ф}(j, Z), \quad (6)$$

который можно использовать для компенсации случайных ошибок формы, вызванных нестабильностью скорости шпинделя, подавая его как задающий сигнал управления пьезокомпенсатором.

Оценим возможные отклонения $d_{сл}$ формы $X_{ф}(j, Z)$ некруглых изделий типа автотракторных

поршней от заданной $X_{фз}(j, Z)$, вызванные случайными изменениями частоты вращения шпинделя $d_{вш}$. Заданный и истинный профили поперечного сечения поршня можно представить в виде гармонических рядов:

$$X_{фз}(j, Z) = R_{0з} + \sum_{k=2}^n R_{kз}(j, Z) \cos(kj + j_{0кз}); \quad (7)$$

$$X_{ф}(j, Z) = R_0 + \sum_{k=2}^n R_k(j, Z) \cos(kj + j_{0к}), \quad (8)$$

где $R_{0з}$, R_0 – средние радиусы заданного и истинного профилей сечения (нулевая гармоника); $R_{kз}$, R_k – амплитуды k -й гармоники заданного и истинного профилей сечения ($k=2, 3, \dots, n$); $j_{0кз}$, $j_{0к}$ – начальные углы k -й гармоники заданного и истинного профилей.

Сравнительно малые случайные девиации скорости шпинделя $d_{вш}$, составляющие для различных главных приводов $\leq 15\%$ ее заданного значения, приводят к фазовым $j_{0кз} \rightarrow j_{0к}$ и амплитудным $R_{kз}(j, Z) \rightarrow R_k(j, Z)$ отклонениям истинного профиля (8) от заданного (7). Соответствующие максимальные ошибки формы d_{jk} и d_{Rk} , вызываемые отклонениями скорости шпинделя $d_{вш}$, можно определить по формулам:

$$d_{jk} = R_k d_{вш} (\partial j / \partial \omega)^{wk}; \quad (9)$$

$$d_{Rk} = R_k d_{вш} (\partial R_k / \partial \omega)^{wk},$$

где $(\partial j / \partial \omega)^{wk}$ и $(\partial R_k / \partial \omega)^{wk}$ – частные производные, соответственно, фазово-частотной и амплитудно-частотной характеристик контура положения электродинамического привода резца в точке $\omega = \omega_k$; ω – круговая частота, c^{-1} .

Типовые настройки контура положения электродинамического привода резца [1] обеспечивают в диапазоне рабочих частот от 0 до 400 Гц следующие значения частных производных частотных характеристик: $\partial j / \partial \omega = 0,002 \div 0,003$ с и $\partial R_k / \partial \omega = R_k (0 \div 0,00033)$ мкм/с. При таких соотношениях частных производных ошибки формы, связанные со случайными возмущениями частоты вращения шпинделя, определяются главным образом фазовыми ошибками d_{jk} , причем $d_{jk} = (7 \div 20) d_{Rk}$. Так, для тепловозных поршней с $R_2 = 500$ мкм при мгновенной частоте вращения шпинделя 500 ± 25 об/мин максимальное значение «фазовой» составляющей ошибки формы может достигать ± 4 мкм, а «амплитудной» $\pm 0,43$ мкм. Обе составляющие «скоростной» ошибки пропорциональны девиации скорости шпинделя $d_{вш}$ и согласно (7) и (8) мультипликативны. Практически они могут рассматриваться как аддитивные составляющие, поскольку в основном локализируются на разных участках поперечных

профилей: «амплитудные» – на участках максимального и минимального отклонений профиля от описываемой окружности, а «фазовые» – на участках быстрых изменений профиля при максимальной скорости движения резца. Внешние проявления скоростной ошибки разнообразны и зависят от характера изменения скорости шпинделя. Если скорость изменяется плавно и медленно, то от детали к детали будут наблюдаться погрешности угловой ориентации овала. Быстрые и резкие колебания скорости за время, сопоставимое с временем оборота, проявятся в виде ухудшения качества поверхности по волнистости и шероховатости. Порядок случайных ошибок формы некруглых изделий (б), вызванных нестабильностью скорости шпинделя, вполне согласуется с возможным диапазоном их пьезокompенсации.

В статье рассматриваются способы и результаты обеспечения возможно более точной компенсации измеренных случайных высокочастотных ошибок.

Контур управления пьезокompенсатором показан на рис. 2,а, где через И-ПК обозначен собственно пьезокompенсатор ПК с регулируемым источником питания И. Использование обычного контура регулирования положения, замкнутого по сигналу датчика деформации D пьезокompенсатора, неэффективно. Дело в том, что для обеспечения статической точности в контуре должен быть использован интегральный регулятор

$$W_{\text{рег}}(p) = k_{\text{и}} / p, \quad (10)$$

где $p = d / dt = j\omega$ – оператор Лапласа, c^{-1} ; $k_{\text{и}}$ – коэффициент интегрирования, c^{-1} .

Поскольку пьезокompенсатор обладает ярко выраженными резонансными свойствами [5], то значение коэффициента $k_{\text{и}}$ должно быть достаточно малым, чтобы исключить возникновение автоколебаний на резонансной частоте ω_p . Как видно из упрощенной ЛАЧХ разомкнутой части такого контура (рис. 2,б), это приводит к резкому снижению быстродействия. Частота среза ω_c контура регули-

рования, которая отвечает границе возможности компенсации возмущений, существенно ниже резонансной: $\omega_c = (0,01 \dots 0,1) \omega_p$.

Прямая компенсация вибрационных и скоростных возмущений, имеющих нулевое среднее значение, возможна по разомкнутой схеме (штриховая линия на рис. 2,а). При этом измеренный сигнал ошибки взаиморасположения $D_{\text{вз}} = X_d - X_0$ и сигнал случайной составляющей скоростной ошибки $d_{\text{сл}}$ поступают непосредственно на вход управления компенсатором. При точении детали можно задать $D_{\text{зд}} \ll 0$, а интегральный регулятор (10) в этом случае будет выполнять свои обычные стабилизирующие функции, поддерживая среднее значение $D \gg D_{\text{зд}} \ll 0$. Причем, чем ниже быстродействие замкнутого контура регулирования ПК, тем меньше регулятор (10) будет вмешиваться в процесс прямой компенсации и нарушать его. Если бы быстродействующие пьезокompенсаторы обладали линейными свойствами, то схема прямой компенсации прекрасно решала бы задачу снижения случайных «скоростных» ошибок и ошибок от вибрационных возмущений взаимного расположения инструмента и детали. Однако пьезокompенсаторы, управляемые напряжением U (при этом И – источник напряжения), обладают сегнетогистерезисной зависимостью $D(U)$ с шириной петли η достигающей 70% ее размаха. При управлении ими по разомкнутой схеме компенсируемые ошибки могут быть устранены лишь частично.

В [5] предложены способы линеаризации пьезокompенсаторов с использованием управления от источника заряда Q . Согласно [4] в данном случае линеаризованный пьезокompенсатор представляет собой колебательное звено со структурой, показанной на рис. 3, где Y – параметр, управляющий деформацией ПК, в рассматриваемом случае $Y=Q$, K ; $F_y(p) = K_y D(p)$ – усилие упругой деформации пьезокompенсатора, H ; $F_3(p) = K_0 / C_0$ – усилие в ПК, вызванное действием приложенного электрического поля, H ; $F_c(p)$ – усилие внешнего статического

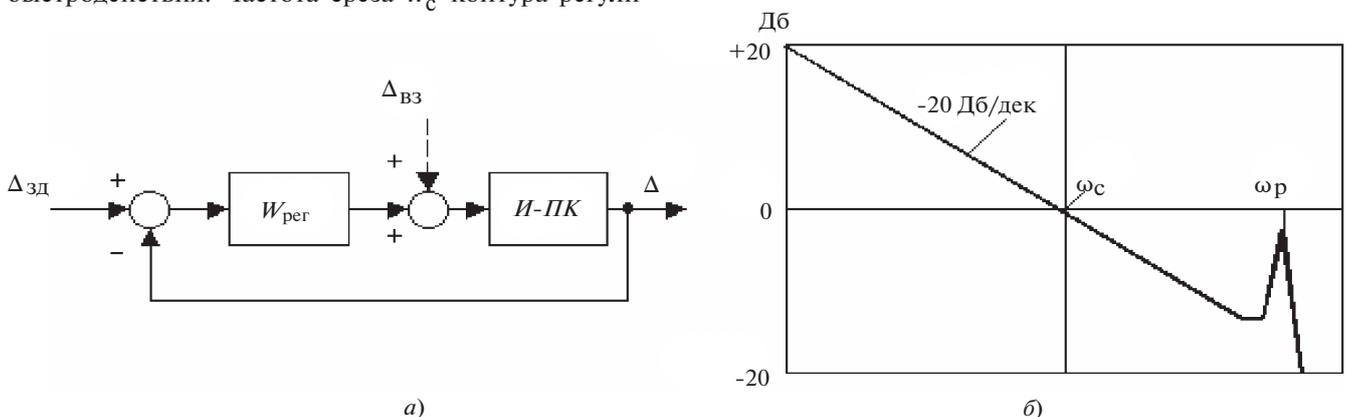


Рис. 2. Контур управления пьезокompенсатором (а) и ЛАЧХ разомкнутого контура управления пьезокompенсатором (б)

нагружения, Н; $F_{дин}(p) = -m_S p^2 D(p)$ – динамическое усилие, пропорциональное второй производной деформации ПК, Н; m_S – приведенная к ПК масса перемещаемого рабочего органа (резцедержки с резцом), кг; $F_d(p) = -K_d V(p)$ – демпфирующее усилие, пропорциональное скорости деформации пьезокомпенсатора, Н; C_0 – емкость ПК, Ф; K_y – коэффициент упругости ПК, Н/м; $K_o = K_{\pi} = K_y d_{\pi}$ – равные между собой коэффициенты обратного и прямого пьезоэффектов, Н/В; d_{π} – пьезомодуль материала ПК, Кл/Н; K_d – коэффициент демпфирования, кг/с; $V(p) = pD(p)$ – скорость деформации пьезокомпенсатора, м/с. Расчет основных параметров ПК можно найти в [6].

Как показано в [4], управляя ПК от источника заряда (при этом I – источник заряда Q), можно практически полностью компенсировать измеримые ошибки взаиморасположения инструмента и детали, что подтверждено опытами по точному воспроизведению линейаризованным компенсатором заданных гармонических движений.

Практическая реализация управления ПК от источника заряда имеет ряд специфических особенностей. Схема строится в виде высоковольтного операционного усилителя BOY , охваченного обратной связью по заряду пьезокомпенсатора (рис. 4). В качестве «шунта», измеряющего заряд ПК, используется последовательно включенный с ним конденсатор C с малым коэффициентом диэлектрических потерь. Емкость измерительного конденсатора C существенно превышает собственную емкость ПК C_0 . Напряжение на измерительной емкости C , в динамике пропорциональное заряду ПК, используется для замыкания контура с BOY . Известно, что получившийся емкостный «делитель» позволяет адекватно замерять изменения заряда ПК только в динамических режимах. В статике на его выходе установится сигнал, определяемый не зарядом ПК, а соотношением активных потерь в емкостях C_0 и C . Для исключения этого явления емкость C_0 ПК и измерительную емкость C следует зашунтировать резисторами R_0 и R .

Если выбрать

$$C_0 R_0 = CR, \tag{11}$$

то в статике описываемое устройство будет работать как нелинейная схема с источником напряжения, а в динамике – как линейная схема с источником заряда. Однако статическая нелинейность легко устраняется медленно работающим внешним стабилизирующим контуром с регулятором (10). Для этого следует лишь согласовать параметры регулятора и резисторов R_0 и R , выбрав

$$C_0 R_0 = CR >> 1/k_{\pi}. \tag{12}$$

Кратко опишем иной вариант параметрической линейаризации пьезокомпенсаторов – с использованием источника тока, который также был подвергнут экспериментальной проверке на станке. Для того чтобы из схемы с источником заряда (рис. 4) получить схему с источником тока, следует заменить шунтирующую емкость C на шунтирующий резистор. Поскольку заряд ПК является результатом интегрирования тока, то включение источника тока в контур регулирования (рис. 3) эквивалентно введению в него интегрирующего звена. При этом регулятор на схеме рис. 3 должен выполняться не как интегральное звено (10), а как пропорциональное звено с коэффициентом передачи k_{π} :

$$W_{рег}(p) = k_{\pi}. \tag{13}$$

Кроме того, в схеме с использованием источника тока на его вход в качестве сигнала, подлежащего прямой компенсации, следует включать не ошибку взаиморасположения детали и инструмента $D_{зд} = X_d - X_0$, как в схеме рис. 4, а ошибку скорости их взаиморасположения $V_{зд} = V_d - V_0$.

С этой целью в схеме с источником тока необходимо использовать не датчики положения, а датчики вибрационной скорости. Такие датчики с подходящими параметрами доступны на рынке измерительных приборов (например датчик AV02 фирмы «Глобалтест») либо они могут быть реализованы на базе акселерометров с интегрирующими усилителями. Более сложно в этом случае решается и задача компенсации ошибок, вызванных нестабильностью скорости шпинделя.

Эксперименты показали, что обе схемы позволяют осуществить примерно одинаковую по эффективности компенсацию вибрационных возмущений взаиморасположения инструмента и детали. Однако схема с источником тока оказалась существенно сложнее в реализации измерительной части. Устройства измерения в этом случае должны

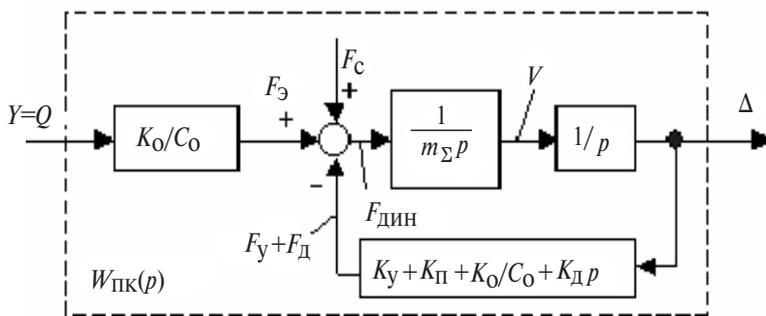


Рис. 3. Структурная схема ПК, управляемого от источника заряда

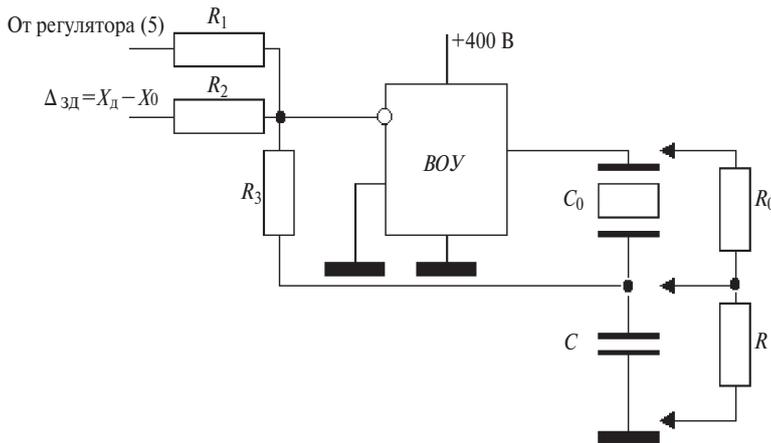


Рис. 4. Электрическая схема ПК, управляемого от источника заряда

исключать возможность возникновения паразитных механических связей между пьезокомпенсатором и узлами крепления датчиков. В противном случае эффективность компенсации в системе с источником тока снижается и могут возникать автоколебания на паразитных связях.

В обоих случаях, как в системе с источником заряда, так и с источником тока, удалось обеспечить практически полную компенсацию возмущений на частотах до 500–700 Гц.

В качестве ПК использовался составной стержневой пьезодвигатель ППУ-1м с диапазоном перемещений 15 мкм при изменении управляющего напряжения от нуля до 400 В, выполненный из керамики ЦТС-19, обладающей зависимостью $D(U)$ с шириной петли $m \gg 0,2$.

Эксперименты проводились на станке 16K20 при обточке алюминиевых образцов диаметром 125–130 мм радиусными ($R=2$ мм) резцами из поликристаллического алмаза. На каждом образце за

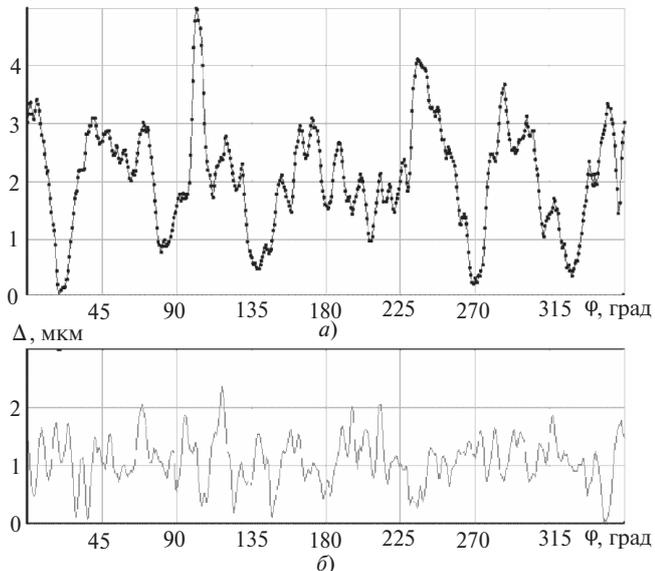


Рис. 5. Ошибки формы поперечного сечения при отсутствии (а) и наличии (б) (нижняя кривая) пьезокомпенсации ошибок

один продольный проход выполнялась обточка без компенсации ошибок взаиморасположения на первой половине длины образца с последующим включением компенсации на второй половине. Обточка проводилась на частотах вращения шпинделя от 500 до 1600 об/мин с продольными подачами 0,05–0,15 мм/об. При обработке снимался припуск 0,1 мм на радиус детали без применения СОЖ, что отвечает режимам финишной обточки автотракторных и тепловозных поршней. Проведено свыше 50 экспериментальных проточек.

На рис. 5 приведены результаты контроля отклонений от заданной формы двух поперечных сечений образца, обработанного при частоте вращения шпинделя 1600 об/мин. Контроль поперечных сечений образцов выполнялся на стенде «Эталон-1мш» с погрешностью, не превышающей 0,5 мкм. Результаты, близкие к приведенным на рис. 5, получены на всех образцах для всех указанных выше режимов обработки. Зафиксировано, что применение устройств компенсации взаиморасположения инструмента и детали приводит к двух-трехкратному снижению отклонений формы обрабатываемого изделия от заданной.

Контроль чистоты поверхности в продольном сечении выполнялся на измерителе шероховатости TR-240. На всех образцах зафиксировано снижение параметра R_a в 1,5–2 раза от значений 1,0–1,3 до 0,6–0,77 мкм за счет использования устройств компенсации ошибок взаиморасположения инструмента и детали. Такое снижение R_a отвечает повышению качества поверхности на 1–1,5 класса.

Ранее было показано [4], что линейризованные пьезокомпенсаторы позволяют весьма точно воспроизводить заданные движения и потенциально способны обеспечить полную компенсацию ошибок формы изделий некруглого точения, связанных с вибрационными ошибками взаиморасположения инструмента и детали. Однако описанные выше эксперименты показали: применение пьезокомпенсации эффективно уменьшает ошибки формы обрабатываемых изделий, однако полного исключения погрешностей достичь не удается. Остаточные после компенсации погрешности формы внешне напоминают ошибки, вызванные вибрационными возмущениями взаиморасположения резца и детали, но на самом деле таковыми не являются. Они вызваны тонкими нестационарными явлениями процесса резания — налипаниями на резец и срывами с него металла обрабатываемой детали, спонтанным смещением зоны резания по режущей кромке инструмента, неоднородностями обрабатываемого материала и т.п. Остаточные погрешности

формы могут быть снижены за счет подбора материала реза, выбора режимов резания, применения СОЖ и т.п. [7].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Никольский А.А.** Устойчивость самообучающихся электроприводов подачи металлорежущих станков и точность процессов самообучения. – Электричество, 2007, №5.
2. **Кацевич В.Л., Никольский А.А., Спанаки К.Д.** Двухканальные самообучающиеся электроприводы подачи станков для обточки автомо-бильных поршней. – Наука и промышленность России, 2002, № 6–7.
3. **Кацевич В.Л., Королев В.В., Никольский А.А.** Применение самообучающихся электроприводов подачи токарных станков для повышения точности формы серийных деталей. – Мехатроника, автоматизация, управление, 2004, № 5.
4. **Никольский А.А., Бычкова Е.В.** Разработка самообучающихся двухканальных электроприводов с линеаризованными пьезокомпенсаторами в точном канале. – Электричество, 2010, №10.
5. **Никольский А.А.** Математическая модель нелинейных явлений в пьезоэлектрических двигателях и датчиках. – Электричество, 1990, №12.
6. **Никольский А.А.** Точные двухканальные следящие электроприводы с пьезокомпенсаторами. – М.: Энергоатомиздат, 1988.
7. **Суслов А.Г., Петрешин Д.И.** Определение закона управления для адаптивной технологической системы при обеспечении заданных параметров качества поверхностного слоя деталей машин при механической обработке. – СТИН, 2010, № 1.

[10.06.11]

*Авторы: **Никольский Алексей Анатольевич** окончил факультет электрификации и автоматизации промышленности и транспорта МЭИ в 1972 г. Защитил докторскую диссертацию (1991 г.) по тематике управления точными двухканальными электроприводами с пьезокомпенсаторами в точном канале. Ведущий научный сотрудник кафедры автоматизированного электропривода МЭИ.*

***Королев Владимир Викторович** окончил факультет электрификации и автоматизации промышленности и транспорта МЭИ в 1970 г. Защитил кандидатскую диссертацию (1985 г.) по тематике оптимального управления электроприводами. Старшим научным сотрудником кафедры автоматизированного электропривода МЭИ.*