

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИЙ ПРИВОДОВ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ С ИЗОТРОПНОЙ КООРДИНАТНОЙ ПОДАТЛИВОСТЬЮ

А.Ф. Денисенко

Самарский государственный технический университет
443110, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Предложена методика разработки приводов подач металлорежущих станков с ЧПУ с одинаковой податливостью по управляемым координатам с поступательным перемещением. Обоснован выбор способа реализации условия изотропности. На основе анализа конструкций приводов подач токарных станков показана техническая и технологическая возможность реализации условия изотропности координатной податливости.

Ключевые слова: станок с ЧПУ, упругая деформация, привод подач, анизотропия, податливость, ходовой винт, передача винт-гайка.

При обработке на станках с ЧПУ форма и размеры обработанной детали вследствие влияния целого ряда факторов [1] не совпадают с параметрами идеальной поверхности, определяемой запрограммированными траекториями перемещения инструмента. Одним из таких факторов являются упругие деформации станка по управляемым координатам с поступательным перемещением. Величина погрешностей, связанных с упругими деформациями, прямо пропорциональна координатной податливости станка и силам, возникающим в зоне резания.

Таким образом, при обработке криволинейных поверхностей, доля которых весьма значительна для станков с ЧПУ, отклонения формы обрабатываемых деталей связаны не только с тем, что составляющие силы резания постоянно меняются по величине, но также с различной координатной податливостью станка.

Конструкция приводов подач современных станков с ЧПУ определяется их структурой, требованиями к эксплуатационным характеристикам и компоновкой станка. Указанные обстоятельства приводят к тому, что на одном станке приводы подач, управляющие разными координатами, имеют значительные отличия в конструкции и размерах входящих в их состав элементов, что приводит к существенной разнице жесткостных характеристик приводов, обеспечивающих основную долю координатной податливости станка.

Таким образом, еще на стадии проектирования в конструкцию станка заложена координатная анизотропия податливости.

Повысить точность обработки криволинейных поверхностей можно увеличением охвата обратной связью цепи подач (установка линеек для контроля перемещений рабочего органа), однако это увеличивает стоимость станка и требует строгого соблюдения требований технического обслуживания. Другим путем является разработка конструкций, обеспечивающих одинаковые параметры податливости по координатам.

Податливость конструкции привода подач определяется собственной податливостью деталей, входящих в привод, и упругими деформациями в местах их соединения.

Современный привод подач станков с ЧПУ, использующий ходовой винт, как правило, включает приводной двигатель, муфту, соединяющую вал двигателя и хо-

довой винт, опоры которого смонтированы в корпусных деталях, и ходовую гайку, соединенную с рабочим органом (часто через промежуточные корпусные детали).

Таким образом, податливость привода подач определяется податливостью крутильной и поступательной систем, связующим элементом между которыми является передача винт-гайка качения (ВГК). Причем определяющей является поступательная система как содержащая значительно большее число элементов и соединений.

При односторонней заделке ходового винта суммарная податливость привода будет определяться как сумма податливостей последовательно соединенных элементов

$$e_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n e_i, \quad (1)$$

где e_1 – податливость муфты; e_2 – податливость ходового винта; e_3 – податливость опор ходового винта; e_4 – податливость передачи винт-гайка и т. д.

Определение величин отдельных e_i , входящих в состав e_{Σ} , может быть выполнено по методикам, приведенным в [2, 3], и часто представляет трудности в связи с необходимостью учета кроме собственных податливостей деталей контактных упругих деформаций, а также вследствие того, что эти податливости образуются соединением последовательно, параллельно и параллельно-последовательно связанных элементов.

Для простоты ниже будем рассматривать 2-координатную обработку.

Тогда для каждой координаты в соответствии с (1) имеем

$$e_{\Sigma 1} = \sum_{i=1}^n e_{1i}; \quad e_{\Sigma 2} = \sum_{j=1}^n e_{2j}. \quad (2)$$

Примем, что

$$e_{\Sigma 1} = \delta \cdot e_{\Sigma 2}, \quad \text{где } \delta > 1. \quad (3)$$

Рассмотрим возможность создания конструкции с изотропной координатной податливостью, то есть конструкции, где податливости вдоль обеих управляемых координат равны.

Достижение этого возможно путем изменения податливостей ряда элементов, входящих в состав e_{Σ} , однако более рациональным и технологичным, а часто и реально возможным является изменение e_{Σ} за счет изменения только одного из входящих в баланс податливости элементов.

При этом для достижения условия равенства податливостей цепей с учетом (3) возможны три способа [4]:

1) уменьшение податливости одного из элементов цепи 1 (снижение $e_{\Sigma 1}$ до значения $e'_{\Sigma 1} = e_{\Sigma 2}$);

2) увеличение податливости одного из элементов цепи 2 (увеличение $e_{\Sigma 2}$ до значения $e'_{\Sigma 2} = e_{\Sigma 1}$);

3) одновременное уменьшение податливости одного из элементов цепи 1 (снижение $e_{\Sigma 1}$ до значения $e'_{\Sigma 1}$) и увеличение податливости одного из элементов цепи 2 (увеличение $e_{\Sigma 2}$ до значения $e'_{\Sigma 2}$): $e'_{\Sigma 1} = e'_{\Sigma 2}$.

Способ 1. Для определения величины уменьшения податливости i -того элемента 1-й цепи с целью обеспечения условия $e'_{\Sigma 1} = e_{\Sigma 2}$ можно записать

$$e_{\Sigma 1} - e_{\Sigma 2} = e_{1i} - \frac{e_{1i}}{\lambda_{1i}}, \quad (4)$$

где λ_{1i} – коэффициент, показывающий, во сколько раз нужно уменьшить податливость i -того элемента 1-й цепи.

Отсюда

$$\lambda_{1i} = \frac{e_{1i}}{e_{1i} - (e_{\Sigma 1} - e_{\Sigma 2})}. \quad (5)$$

Для обозначения доли податливости отдельного элемента в общем балансе суммарной податливости цепи привода введем обозначения:

$$a_{1i} = \frac{e_{1i}}{e_{\Sigma 1}}; \quad a_{2j} = \frac{e_{2j}}{e_{\Sigma 2}}. \quad (6)$$

С учетом (3) и (6) коэффициент λ_{1i} можно записать в виде

$$\lambda_{1i} = \frac{e_{1i} \cdot \delta}{(e_{1i} - 1)\delta + 1}. \quad (7)$$

Для того чтобы достичь условия $e'_{\Sigma 1} = e_{\Sigma 2}$ за счет изменения только одного элемента 1-й цепи, должно быть выполнено условие

$$e_{1i} > e_{\Sigma 1} - e_{\Sigma 2}, \quad (8)$$

или с учетом (3) и (6)

$$\delta < \frac{1}{1 - a_{1i}}. \quad (9)$$

Если ни одна упругая связь в 1-й цепи не соответствует неравенствам (8) или (9) или если $\lambda_{1i} > \lambda'_{1i}$ (где λ'_{1i} – предельное значение коэффициента изменения податливости, определяемое техническими возможностями конструкции), то для достижения условия $e'_{\Sigma 1} = e_{\Sigma 2}$ следует уменьшить податливости нескольких элементов.

Способ 2. Для определения величины увеличения податливости j -того элемента 2-й цепи для обеспечения условия $e'_{\Sigma 2} = e_{\Sigma 1}$ можно записать

$$e_{\Sigma 1} - e_{\Sigma 2} = e_{2j} \cdot \lambda_{2j} - e_{2j}, \quad (10)$$

где λ_{2j} – коэффициент, показывающий, во сколько раз нужно увеличить податливость j -того элемента 2-й цепи.

С учетом (3) и (6) из выражения (10) получим

$$\lambda_{2j} = \frac{a_{2j} + \delta - 1}{a_{2j}}. \quad (11)$$

Способ 3. Условие создание изотропной по податливости конструкции одновременным уменьшением податливости одного из элементов цепи 1 и увеличением податливости одного из элементов цепи 2 можно записать в виде

$$e_{\Sigma 1} - e_{\Sigma 2} = e_{1i} - \frac{e_{1i}}{\lambda_{1i}} + e_{2j} \cdot \lambda_{2j} - e_{2j}. \quad (12)$$

Если обозначить

$$e_{1i} = \xi_{ij} \cdot e_{2j}, \quad (13)$$

то с учетом (3) и (6) из выражения (12) получим

$$\lambda_{2j} = \frac{\delta - 1}{a_{2j}} - \xi_{ij} \left(1 - \frac{1}{\lambda_{1i}} \right) + 1. \quad (14)$$

Указанные три способа создания изотропной по податливости конструкции станка не являются равноправными, так как при значительной величине δ второй способ часто не может быть использован в связи с необходимостью обеспечения точностных характеристик станка, а достижение координатной изотропности только уменьшением податливости наталкивается на технические и технологические трудности. В связи с изложенным третье направление является наиболее универсальным и реально достижимым.

Таким образом, выбрав i -тый элемент 1-й цепи и задавшись технически осуществимым значением λ_{1i} , по формуле (14) вычисляем ряд значений λ_{2j} , меняя последовательно j . В качестве окончательного варианта выбираем такое значение j , для которого реализация технически осуществима.

Если в 1-й цепи имеется техническая возможность выбора i -того элемента, то в качестве окончательного варианта комбинации $i - j$ выбирается такая, при которой увеличение податливости 2-й цепи будет минимальным.

Рассмотрим, как может быть реализован принцип изотропной координатной податливости для поступательной системы привода подач.

Как было показано в работах [2, 5], в общем случае осевая податливость привода подач складывается из трех слагаемых:

$$e_{oc} = e_k + e_z + e_\theta,$$

где e_k – податливость корпусных деталей (корпус опоры, кронштейн крепления передачи ВГК к рабочему органу, фартук токарного станка и т. п.); e_z – податливость передачи ВГК; e_θ – податливость ходового винта с опорами.

Каждая из составляющих податливостей ($e_k; e_z; e_\theta$) является величиной, определяемой последовательным, параллельным или параллельно-последовательным соединением составляющих податливостей. Так, например, податливость корпусных деталей складывается из собственной податливости корпусной детали, угловой и касательной податливости стыка корпусной детали с базовой деталью станка. В работе [5] на примере токарных станков мод. 16Б16Ф3 и 16Б16Т1 было экспериментально показано, что $e_k = const$. Условие постоянства податливостей e_z и e_θ обеспечивается значительными предварительными натягами в соединениях элементов ВГК и опор ходового винта.

В соответствии с методикой, приведенной в [2], были определены осевые податливости приводов подач станков мод. 16Б16Ф3 и 16Б16Т1 (табл. 1):

$$e_{oc} = e_1 + e_2 + \dots + e_7.$$

Таким образом, суммарные осевые податливости приводов продольных и поперечных подач составляет соответственно $e_{\Sigma 1} = 0,14$ мкм/даН; $e_{\Sigma 2} = 0,1062$ мкм/даН и коэффициент $\delta = e_{\Sigma 1} / e_{\Sigma 2} = 1,319$.

Т а б л и ц а 1

**Составляющие осевой податливости приводов подач станков
мод. 16Б16Ф3 и 16Б16Т1, мкм/даН**

Составляющие осевой податливости привода	Обозначение	Привод продольных подач	Привод поперечных подач
Угловая податливость стыка корпуса опоры винта с базовой деталью	e_1	0,006	0,008
Касательная податливость стыка корпуса опоры винта с базовой деталью	e_2	0,001	0,0014
Податливость стыка опорного кольца подшипника с корпусом опоры	e_3	0,011	0,014
Податливость комбинированного подшипника	e_4	0,003	0,0052
Податливость ходового винта	e_5	0,041	0,06
Податливость передачи ВГК	e_6	0,012	0,017
Податливость корпуса опоры винта и крепления передачи ВГК к суппорту	e_7	0,066	0,0006

Т а б л и ц а 2

**Значения коэффициентов a и λ привода продольных подач станков
мод. 16Б16Ф3 и 16Б16Т1**

Составляющие осевой податливости привода	a_{1i}	λ_{1i}
e_1	0,0429	-0,216
e_2	0,0071	-0,03
e_3	0,0786	-0,482
e_4	0,0214	-0,097
e_5	0,2929	5,731
e_6	0,0857	-0,549
e_7	0,4714	2,053

Поскольку податливость приводов подач рассматриваемых токарных станков оказывает существенное влияние на целый ряд эксплуатационных характеристик (плавность перемещения, зона нечувствительности, мертвый ход и др.), а податливость привода поперечных подач непосредственно сказывается на точности диаметральных размеров обрабатываемых деталей, то создание изотропной по податливости конструкции только увеличением податливости элементов цепи привода поперечных подач не может быть осуществлено. В связи с этим, как было отмечено выше, предпочтительным является уменьшение податливости одного или (при необхо-

димости) нескольких составляющих элементов привода продольных подач, или, в крайнем случае, одновременное изменение податливости обоих приводов. Причем анализ составляющих e_i привода продольных подач (табл. 1) показывает, что условие (8), позволяющее создать анизотропную конструкцию изменением податливости только одного из элементов, выполняется лишь для двух элементов: e_5 и e_7 . Однако приведенные в табл. 2 значения λ_{1i} показывают, что без существенного изменения конструкции приводов (увеличения диаметра ходового винта) технические возможности имеются только для уменьшения податливости e_7 , которая должна быть уменьшена примерно в 2 раза.

Если такие изменения технически реализовать не представляется возможным вследствие конструктивных и компоновочных особенностей станков (наличие корпуса опоры ходового винта со значительной консолью и невозможность увеличения массы фартука в связи с резким возрастанием переориентации суппорта при реверсе [6]), то создание изотропной по податливости конструкции возможно только одновременным уменьшением податливости одного из элементов цепи привода продольных подач и увеличением податливости одного из элементов цепи привода поперечных подач. Такая возможность может быть проиллюстрирована данными табл. 3, показывающими, во сколько раз следует увеличить податливость одного из элементов цепи привода поперечных подач при условии, что податливость e_7 привода продольных подач будет снижена не в 2 раза, а в 1,25; 1,5 или 1,75 раз (коэффициент λ_{17}).

Т а б л и ц а 3

Оценка возможности создания конструкции с изотропной координатной податливостью на базе станков мод. 16Б16Ф3 и 16Б16Т1 путем одновременного изменения податливости привода продольных и поперечных подач

λ_{2j}	λ_{17}		
	1,25	1,5	1,75
λ_{21}	3,579	2,479	1,694
λ_{22}	15,73	9,445	4,955
λ_{23}	2,475	1,846	1,397
λ_{24}	5,012	3,303	2,083
λ_{25}	1,344	1,198	1,093
λ_{26}	2,214	1,697	1,327
λ_{27}	34,947	20,281	9,805

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Денисенко А.Ф., Зубенко В.Л. Оценка влияния некоторых факторов на точностные параметры станка с ЧПУ // Технология и автоматизация производственных процессов в машиностроении. – Пенза: ППИ, 1977. – Вып. 6. – С. 130-134.
2. Кордыш Л.М. Механизмы подачи с передачами винт-гайка качения для металлорежущих станков с ЧПУ. – М.: НИИМаш, 1984. – 88 с.
3. Денисенко А.Ф. Исследование осевой жесткости опор ходовых винтов с учетом погрешностей изготовления и сборки // Автоматизированные станочные системы и роботизация производства. – Тула: ТПИ, 1989. – С. 158-163.

4. Багдонас К.И., Толочка Р.-Т.А. К вопросу сравнения статической жесткости упругих систем // Вибротехника. – 1972. – №3(16). – С. 207-213.
5. Денисенко А.Ф., Зубенко В.Л. Исследование зоны нечувствительности приводов подач станков с ЧПУ при дифференцированном учете потерь на трение // Автоматические манипуляторы и металлообрабатывающее оборудование с программным управлением. – Тула: ТПИ, 1984. – С. 131-140.
6. Клебанов М.К., Денисенко А.Ф. Анализ пространственного положения узлов металлорежущих станков с ЧПУ, перемещающихся по направляющим скольжения // Автоматические манипуляторы и металлообрабатывающее оборудование с программным управлением. – Тула: ТПИ, 1986. – С. 160-166.

Статья поступила в редакцию 17 марта 2011 г.

UDC 621.9.06-529-589

DESIGN OF MACHINE UNIT ACTUATOR WITH ISOTROPIC COORDINATE PRIABILITY

A.F. Denisenko

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

The method of designing CNC machine unit actuator with identical progrestue motion axis pliability is offered. The choice of isotropy condition implementation method is justified. Based on analysis of lathe actuators design the technical and technological possibility of axis pliability isotropy condition implementation is shown.

Keywords: *the machine tool with CNC, elastic deformation, a drive of supplies, anisotropy, a pliability, the running screw, transfer the screw-nut.*