

**Функциональные схемы реализации автоматизированных лазерных виброизмерительных систем с двумя оптически обращёнными каналами для контроля и управления параметрами вибраций.**

Матросова В.В., доц. к.т.н. Мурачев Е.Г.

Университет машиностроения

[Capitan.milena@mail.ru](mailto:Capitan.milena@mail.ru), (495) 223-05-23 доб. 1264

*Аннотация.* Математическое моделирование предполагает поиск оптимальных решений. Управление параметрами вибрации объектов и конструкций позволяет увеличить срок их эксплуатации. Проведен анализ влияния таких параметров, как соотношение мощностей каналов  $m$ , угла непараллельности  $\beta$ , а также угла погрешности оптического обращения  $\alpha$  на коэффициент стабилизации  $K$ .

*Ключевые слова:* Вибрация, лазерные системы, автоматический контроль, параметры вибрации

Контроль параметров вибраций различных технологических объектов имеет большое значение во многих отраслях промышленности, в том числе и в автомобилестроении. При автоматизации контроля параметров вибраций перспективными являются лазерные методы, при которых используется свойство светового луча распространяться в однородном пространстве практически по прямой линии. Отклонение от энергетической оси светового луча является мерой значения параметров вибраций.

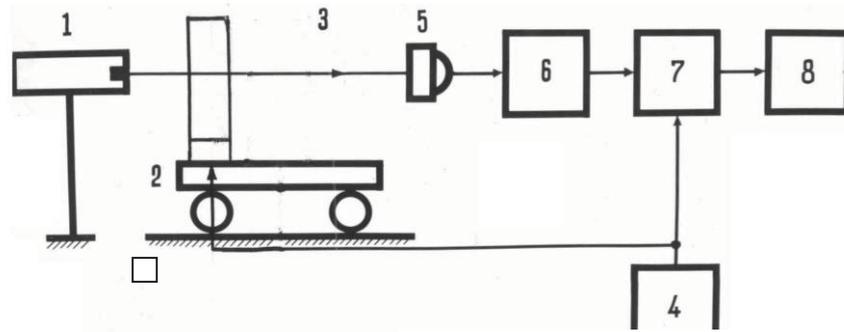
Развитие лазерной техники открывает широкие перспективы дальнейшего усовершенствования лазерных методов контроля. Луч лазера имеет преимущество перед тонким лучом от обычного источника света, потому что вся его мощность, благодаря монохроматичности, сосредоточена в узком спектральном интервале. Поэтому спектральная плотность энергии луча лазера в 100 000—150 000 раз больше спектральной плотности энергии обычного луча. Вследствие этого фотоприемник с помощью светофильтра можно защитить от фоновых помех, что позволяет использовать лазерный луч без его модуляции.

Характерным свойством ПЧФ является их способность воспринимать с помощью световой энергии информацию о параметрах вибраций объекта и преобразовывать ее в электрический сигнал, удобный для последующей обработки и измерения. Эти устройства обладают рядом преимуществ по сравнению с другими устройствами для измерения параметров вибраций. К ним, прежде всего, следует отнести преимущества, присущие лазерным методам контроля: высокую *точность* контроля и управления, *простоту* и *надежность* конструкции, небольшие размеры и масса (полупроводниковые излучатели), неограниченный *диапазон* трассы контроля, высокая *гибкость* перестройки одного режима контроля на другой, что особенно важно в гибком автоматизированном машиностроительном производстве.

В зависимости от того, меняется или не меняется расстояние между ПЧФ и источником излучения, возможны различные варианты выполнения функциональных схем автоматизированных лазерных виброизмерительных систем с двумя оптически обращёнными каналами.

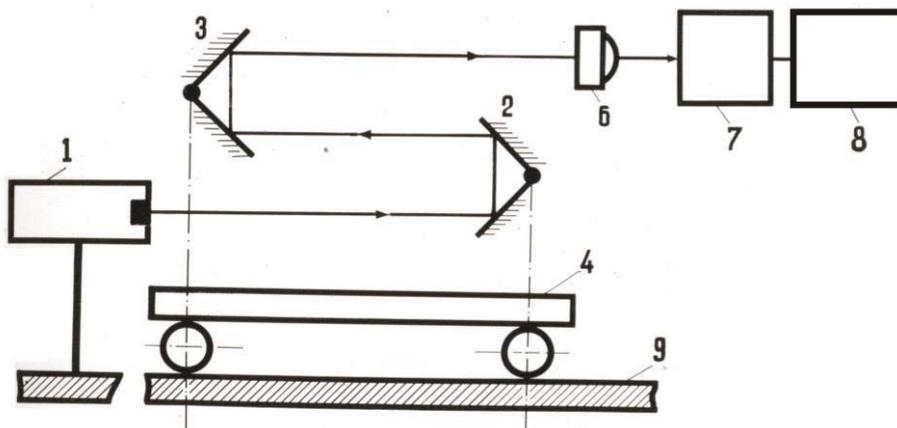
В приборах одной из групп АЛВ ДОК в процессе контроля параметров вибраций оптическая длина пути источника света - ПЧФ все время меняется. Чтобы чувствительность прибора не зависела от положения измерительной каретки, необходима пренебрежимо малая расходимость луча или неизменный угол наклона характеристики перемещения, а также неизменная чувствительность ПЧФ при расширении светового луча.

Устройство работает следующим образом. Луч лазерного источника 1 направляется параллельно поверхности контролируемого объекта, по которому перемещается, подвижная часть технологического оборудования 3 с укрепленным на ней ПЧФ – 5. При возникновении вибраций центр ПЧФ смещается относительно энергетической оси лазера на значение отклонения этих вибраций. Таким образом, напряжение на выходе фотодиода всё время пропорционально пространственно-временной траектории вибрации. Это напряжение усиливается усилителем 6 и через интерфейсы связи 4 и 7 передается для обработки на ЭВМ (на рис не показана) и на измерительный комплекс–8.



**Рисунок 1.** Функциональная схема автоматизированной лазерной виброизмерительной системы для контроля и управления параметрами вибраций с двумя оптически обращёнными каналами и одним ПЧФ: 1- лазерный излучатель, 2 – подвижная часть технологического оборудования, 3- оптический блок для формирования двух оптически обращённых каналов, 4 - интерфейс связи с ЭВМ, 5 – ПЧФ, 6 электронный блок, 7 - интерфейс связи с контроллером измерительного комплекса – 8

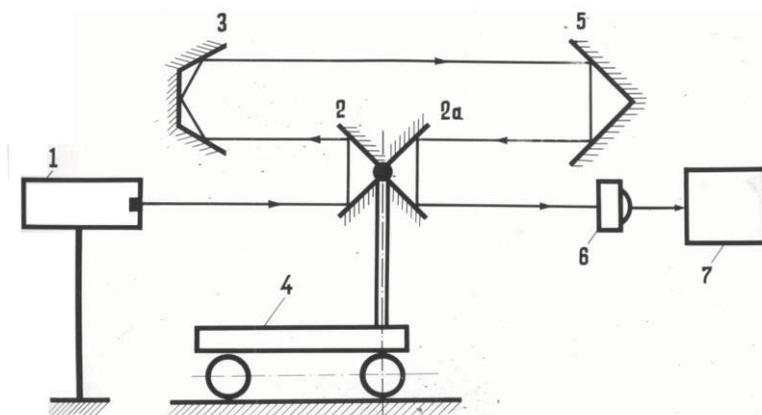
В приборах второй группы (рисунок 2) оптическая длина пути источник света - ПЧФ в процессе контроля остается неизменной. Это достигается за счёт использования трипель-призм и системы отражающих призм. Основным преимуществом таких приборов по сравнению с широко распространенными в настоящее время автоколлиматорами является, во-первых, получение информации об отклонении от прямолинейности в линейных единицах и, во-вторых, возможность получения информации непрерывно в пространстве и во времени, в то время как автоколлиматор применяется, в основном, при шаговом дискретном контроле параметров вибраций. Прибор работает следующим образом: излучатель, установленный на одном конце контролируемого объекта, направляет параллельно его поверхности луч света на трипель призмы 2 и 3, находящиеся на измерительной каретке 6 и дальше на ПЧФ, усилитель-4 и интерфейс связи с ЭВМ - 5.



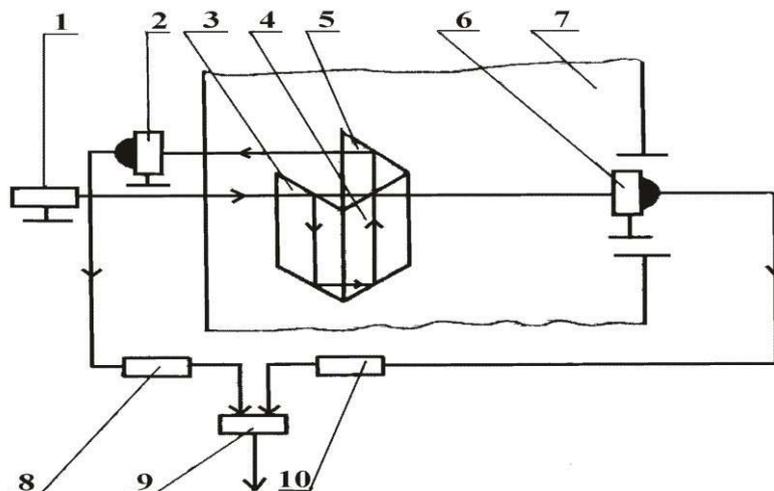
**Рисунок 2.** Функциональная схема автоматизированной лазерной виброизмерительной системы для контроля и управления параметрами угловых вибраций опрокидывания объекта: 1- лазерный излучатель с оптическим блок для формирования двух оптически обращённых каналов, 2,3 – трипель призма, 4 – объект контроля, 6 – ПЧФ, 7 - электронный блок и интерфейс связи с контроллером измерительного комплекса и ЭВМ, 9 – подвижная часть технологического оборудования

На рисунке 3 приведена схема другого варианта прибора с постоянным расстоянием источник - света - ПЧФ. Вместо прямоугольных угловых зеркал (ПУЗ) - 2, 2' ( ) применяются две трипель-призмы, развёрнутые в противоположные стороны, с общей вершиной и зеркальной системой 3', что позволяет увеличить чувствительность устройства, изображенно-

го на рисунке 3, в 2 и 4 раза по сравнению с чувствительностью устройств, изображенных на рисунках 1 и 2 соответственно. Необходимо отметить, что колебания интенсивности светового луча, вызванные флуктуациями воздушной среды на входе оптической системы из трипель призмы, не изменяются по величине и по характеру на его выходе, что увеличивает соотношение сигнал/шум на выходе в 2—4 раза по сравнению с устройствами, изображенными на рисунке 1 к 2. Тем самым точность контроля параметров вибраций повышается. Среднеквадратическая погрешность измерения параметров вибраций с помощью АЛВ ДОК не превышала 2 мкм на длине 2 м.



**Рисунок 3. Функциональная схема автоматизированной лазерной виброизмерительной системы для контроля и управления параметрами линейных вибраций одновременно в двух направлениях: 1- лазерный излучатель с оптическим блок для формирования двух оптически обращённых каналов, „2, 2а,3 – трипель призмы, 4 – объект контроля, 6 – ПЧФ, 7 - электронный блок и интерфейс связи с контроллером измерительного комплекса и ЭВМ**



**Рисунок 4. Лазерный датчик контроля параметров вибраций подвижных органов технологического оборудования: 1 – лазер, 2 – позиционно-чувствительный фотоприёмник, 3 и 4 – призмы, 5 – трипель-призма, 6 – позиционно-чувствительный фотоприёмник, 7 – контролируемый объект, 8 – электронный блок, 9 – сумматор, 10 – электронный блок**

Функциональная схема следующего устройства предназначено для повышения точности лазерного датчика *путевого и конечного положения подвижных органов технологического оборудования* за счет устранения влияния вибраций, вызванных угловой нестабильностью диаграммы направленности лазера (ДНЛ) [52]

Основная идея исследования состоит в следующем (рисунок 4).

Луч от лазера 1 направляется в оптический блок, в котором разделяется на два пучка, причём снабжение этого блока призмами (типа БС-0) обеспечивает одинаковый оптический

путь от лазера 1 до позиционно-чувствительных фотоприемников 2 и 6.

Благодаря этому сигналы, обусловленные нестабильностью диаграммы направленности лазера, устраняются в сумматоре 9, а полезная измерительная информация сохраняется.

Лазерный датчик может быть использован для контроля и управления параметрами вибраций при малых перемещениях, в том числе при контроле путевого и конечного положения подвижных механизмов станков и промышленных роботов.

Устройство работает следующим образом. Лазер 1, устанавливаемый неподвижно относительно основания, задает исходное положение контроля, например, положение позиционирования объекта 7. Оптический блок разделяет световой поток лазера 1 на два параллельных, приблизительно равных по мощности, световых потока. Один из этих потоков направляется через оптический удлинитель на ПЧФ 2 измерительного канала, который жестко связан с контролируемым объектом 7, а другой направляется на ПЧФ 6 опорного канала, который установлен относительно основания.

При перемещении объекта 7 на  $+\Delta X$  световой зонд перемещается по поверхности ПЧФ 2 на  $-\Delta X$ , формируя на его выходе электрический сигнал:

$$U_2 = -S_2 * \Delta X, \quad (1)$$

где:  $S_2$  - координатная чувствительность ПЧФ 2.

Одновременно световой зонд, отраженный от триппель-призмы, перемещается по поверхности ПЧФ 6 на  $+2 * \Delta X$ , формируя на его выходе электрический сигнал:

$$U_6 = 2 * S_6 * \Delta X, \quad (2)$$

где:  $S_6$  - координатная чувствительность ПЧФ 6.

Линейные и угловые флуктуации пространственного положения ДНЛ формируют на выходах ПЧФ напряжения:

$$U_2 = S_2 * \Delta X + S_2 * f * L_2 \quad (3)$$

$$U_6 = S_6 * \Delta X + S_6 * f * L_6, \quad (4)$$

где:  $f$  - угловая нестабильность ДНЛ;

$L_1, L_2$  - длины оптических путей от излучателя до ПЧФ.

После усиления сигналов с ПЧФ 2 и 6 электронными блоками 8 и 10, получаем:

$$U_8 = K_8 * S_2 * \Delta X + K_8 * S_2 * f * L_2 \quad (5)$$

$$U_{10} = 2 * K_{10} * S_6 * \Delta X + K_{10} * S_6 * f * L_6 \quad (6)$$

Регулируя коэффициенты  $K_8$  и  $K_{10}$  усиления электронных блоков 8 и 10, нетрудно обеспечить равенство  $K_8 S_2 = K_{10} S_6$ , а подбирая длину оптического плеча призмной системы, - равенство  $L = L_2 = L_6$ .

При выполнении этих условий на выходе сумматора 9 получаем:  $U_2 + U_{10} = K * S * \Delta X$ . Таким образом, на выходе сумматора 9 получаем электрический сигнал, пропорциональный перемещению объекта  $\Delta X$  в направлении оси ОХ, независимый от линейной и угловой нестабильности ДНЛ и флуктуаций воздушного тракта, по которому распространяется поток излучения лазера на промежутке от излучателя 1 до оптического блока разделения светового потока.

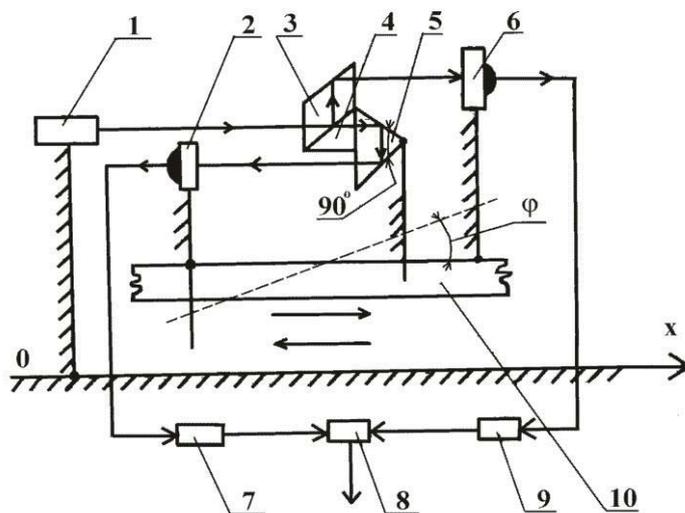
Аналогично выполняется анализ измерения и в направлении оси ОУ.

Рассматриваемый датчик угла применялся для контроля углового положения подвижной части (якоря) линейного шагового двигателя на воздушной подушке (ЛШД) [52].

ЛШД применяются в прецизионном машиностроении и, в частности, при автоматизации сборки печатных плат узлов персональных компьютеров и систем числового программного управления (ЧПУ), где требуется высокая точность пространственной ориентации подвижных сборочных органов и погрешности ориентации не должны превышать единиц и долей мкм. Возникает проблема контроля и измерения этих погрешностей на стадии экспериментального исследования и, особенно, в динамическом режиме работы с учётом влияния различных внешних факторов, воздействующих на оборудование, таких как вибрации, нагрузки и т.п.

Лазерный датчик может быть использован для контроля и управления параметрами

угловых вибраций положения подвижных частей роботизированного технологического оборудования: суппорта токарного автомата, захватного устройства промышленного робота и др.



**Рисунок 5. Лазерный датчик контроля параметров угловых вибраций подвижных органов технологического оборудования: 1-лазер, 2 и 6-ПЧФ, 3, 4 –оптическое плечо, 5-углоковый отражатель, 7 и 9 – усилительные блоки, 8 – суммирующее устройство, 10 – стол станка**

Его отличительной особенностью является повышение точности контроля за счёт исключения влияния на результаты измерения нестабильности пространственного положения энергетического центра пучка лучей излучения лазерного источника.

Он работает следующим образом (рисунок 4). Пучок лучей источника коллимированного излучения 1 делится светоделительной гранью призмы 4 типа БС-0 на два пучка лучей. Один из этих пучков лучей после выходной грани этой призмы попадает на чувствительную площадку позиционно-чувствительного фотоприемника (отсчетного узла) 6, который измеряет координату его энергетического центра.

Другой пучок лучей проходит через прямоугольную призму 5 и, отразившись от боковых граней уголкового отражателя, попадает на чувствительную площадку отсчетного узла 7. При угловых вибрации контролируемого объекта 3 сигнал с выхода отсчетного узла 6 будет пропорционален смещению его чувствительной площадки, равному смещению вершины уголкового отражателя 2 и величинам угловой и линейной нестабильности энергетического центра пучка лучей источника 1 коллимированного излучения, а сигнал с выхода отсчетного узла 7 будет пропорционален удвоенной величине смещения его чувствительной площадки, равной смещению вершины уголкового отражателя 2 и величинам угловой и линейной нестабильности энергетического центра лучей источника 1 коллимированного излучения.

Точность регистрации параметров вибраций лазерным методом зависит от свойств и параметров излучателя, задающего образцовую прямую; промежуточного звена, преобразующего контролируемый параметр в перемещение энергетической оси светового луча; среды, в которой распространяется световая энергия, и погрешности самого измерительного прибора.

Нестабильность излучателя влечет за собой нестабильность распределения интенсивности светового потока в нормальном сечений луча. Эта нестабильность приводит к флуктуациям энергетической оси светового луча и, следовательно, к погрешности при контроле параметров вибраций. Экспериментально было проведено исследование флуктуации энергетического центра луча лазера. Для исключения влияния воздушной среды фотоприёмник и лазер располагались на близком расстоянии друг от друга, (порядка 8-10 см). Среднее квадратическое отклонение энергетического центра светового луча составило 0,43 мкм.

Неустойчивость параметров ПЧФ тоже вносит погрешности в определение параметров вибраций. Основными из параметров являются чувствительность, положение нулевой точки

характеристики перемещения и нестабильность наклона характеристики ПЧФ. Нестабильность чувствительности ведет к нестабильности выходного напряжения ПЧФ, а нестабильность нулевой точки характеристики перемещения - к нестабильности положения начала отсчета перемещения по выходному напряжению. Важнейшими факторами, определяющими наклон характеристики перемещения, являются мощность светового потока излучателя и чувствительность самого фотоприемника, зависящая от температуры окружающей среды.

Воздушная среда, в которой распространяется световой поток, в реальных условиях всегда неоднородна. Неоднородности могут быть регулярные и случайные. Первые обусловлены изменением в пространстве стационарных характеристик среды: температуры, влажности, давления, вторые — случайными отклонениями от стационарных характеристик.

Регулярные неоднородности вносят в измерение параметров вибраций систематическую погрешность, которая может быть компенсирована юстировкой приборов. Так, при изменении температуры окружающей среды изменяется коэффициент преломления воздушного пространства, по которому распространяется луч света от лазера. Изменение коэффициента преломления воздушной среды изменит угол преломления луча между лазерной трубкой и воздухом, а следовательно, и направление распространения луча в воздушном пространстве. Повернув ось лазерной трубки на угол изменения направления распространения луча, но в противоположную сторону, мы можем легко устранить систематическую погрешность, которая была бы неизбежна.

Случайные неоднородности вызывают флуктуации амплитуды и фазы световой волны в точке ее приема, а также приводят к флуктуациям положения энергетической оси светового луча и тем самым к появлению случайной погрешности. По данным работ [3, 4], наиболее важной причиной случайных погрешностей являются температурные неоднородности и связанные с ними потоки воздуха, вызывающие колебания энергетической оси луча. Неоднородности воздуха могут быть аппроксимированы в виде сферических объемов диаметром 1,5—3 см со средней квадратической разностью температуры 0,03~0,08°C [6]. Наибольшая амплитуда колебания тонкого луча  $\delta H$  определяется выражением:

$$\delta H = \frac{1.74 \times \Delta n \times L^{1.5}}{a^{0.5}}, \quad (7)$$

где  $\Delta n = (0,9—2,4) \cdot 10^{-7}$  - колебания показателя преломления воздуха;  $a$  - размер неоднородности, см;  $L$  - расстояние, см. [4]. При обычных условиях помещения на длине  $L = 20$  м для тонкого луча была получена максимальная амплитуда колебания энергетической оси луча —  $\delta H = 90$  мкм [6].

Флуктуации интенсивности светового луча пропорциональны  $L^m$ , где  $L$  — расстояние от излучателя до фотоприемника в сантиметрах;  $m = 0.5 \dots 1.5$  в зависимости от условий среды [5].

В ряде работ исследованы возможности уменьшения влияния флуктуации воздушной среды на точность контроля. Оказывается, что на лазерный луч воздушные флуктуации оказывают меньшее влияние, чем на луч от обыкновенного источника [7]. В работах [8, 9] приведены результаты экспериментального исследования влияния фокусировки лазерного луча на уровень флуктуации его интенсивности при прохождении турбулентной воздушной среды. Эксперимент подтвердил предсказанное теорией значительное уменьшение уровня флуктуации интенсивности предварительно расширенного, а затем сфокусированного лазерного пучка по сравнению с уровнем флуктуации того же пучка, но параллельного.

Еще одним из способов уменьшения влияния воздушного тракта на точность контроля параметров вибраций является увеличение диаметра луча. Если диаметр луча значительно больше размера неоднородности  $a$ , то на него одновременно действует большее количество неоднородностей и в результате усреднения амплитуда колебаний оси луча уменьшается. Например, для «широкого» луча  $d=50$  мм амплитуда колебаний энергетической оси уменьшается в 3 раза по сравнению с амплитудой колебаний энергетической оси «тонкого»

луча ( $\delta N_{ш} = 30 \text{ мкм}$  [6]).

Применение защитного кожуха или трубы, которые бы могли чисто механически защищать луч от влияния окружающей среды, не является хорошим конструктивным решением, так как приводит к громоздкости установки и неудобству работы с ней.

Итак, среди существующих методов контроля параметров и управления параметрами вибраций лазерный метод контроля является одним из наиболее перспективных в связи с тем, что он содержит немало резервов повышения точности контроля. Самым значительным из них является уменьшение влияния воздушного тракта на лазерный луч, вот почему необходимы дальнейшие исследования в этом направлении.

#### Литература

1. Цуккерман С. Т., Панков Э. Д. Влияние воздушного тракта на точность приборов управления лучом. «Изв. вузов», сер. «Приборостроение», 2000 г., М., 12.
2. Матросова В.В. Разработка и исследование лазерного устройства для контроля положения осей отверстий деталей и конструкций технологических систем. // Симпозиум «Автотракторостроение. Промышленность и высшая школа. Методы обработки, станки и инструменты», М., МГТУ «МАМИ», 2001
3. Матросова В.В., Мурачев Е.Г.. Результаты графоаналитических исследований математических моделей анализа лазерных систем автоматического контроля и управления параметрами вибрациями технологических объектов и конструкций.
4. Известия МГТУ «МАМИ» №1 (15), 2013, т.2

### **О револьверных головках токарных станков с дополнительным приводом вращения осевых инструментов**

Пини Б.Е., Максимов Ю.В., Лебедев П.А.  
Университет машиностроения  
[assi@mami.ru](mailto:assi@mami.ru); (495) 223-05-23, доб. 1451.

*Аннотация.* Дополнительное вращение инструментов в револьверных головках токарных станков осуществляется при использовании устройств со сложной кинематикой, поэтому предложена и рассматривается более простая и надёжная конструкция привода вращения осевых инструментов для револьверных головок токарных станков.

*Ключевые слова:* револьверная головка, качество обработки, осевые инструменты, приводы вращения, зубчатое колесо

Токарные станки в машиностроении всегда играли существенную роль при изготовлении разнообразных деталей. Высококвалифицированные токари выполняли на них разнообразные, подчас даже не свойственные для токарных станков операции, при этом качество обработки и его стабильность напрямую зависели от их квалификации. Появление станков с ЧПУ позволило уйти от влияния субъективного фактора, определявшего качество обработки в зависимости от квалификации рабочего и создало условия для высокой степени повторяемости качественных показателей при изготовлении, в том числе точных, деталей. Современные токарные станки с ЧПУ, обладающие высокой степенью универсальности и гибкости при изготовлении разнообразных конструкций деталей, способны обеспечивать высокую точность и качество поверхности с минимальным разбросом при изготовлении партий одинаковых деталей. При этом, как правило, эти станки имеют продольное и поперечное управляемые перемещения суппорта с револьверной головкой и управляемое вращательное движение шпинделя станка. Наличие револьверных головок и быстрой смены режущих инструментов позволяет выполнять достаточно большой объем токарных работ с высокой производительностью, поэтому, по нашему мнению, такие станки можно отнести к производственным станкам. Значительно более широкими технологическими возможностями обладают так называемые многоцелевые станки – «обрабатывающие центры», имеющие количество