

М 73846

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище им. Н. Э. Баумана

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

Аспирант ШАЧНЕВ Ю. А.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ
УСТРОЙСТВ АКТИВНОГО КОНТРОЛЯ
РАЗМЕРОВ ДЕТАЛЕЙ, ОБРАБАТЫВАЕМЫХ
НА КРУГЛОШЛИФОВАЛЬНЫХ СТАНКАХ**

(251 — «Метрология и взаимозаменяемость»)

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в МВТУ им. Н. Э. Баумана, ОКБ
МСИИП и на ЗиЛе.

Научные руководители: д. т. н., проф. Якушев А. И.,
к. т. н., доц. Воронцов Л. Н.

Официальные оппоненты:

д. т. н., проф. Корсаков В. С. (МВТУ им. Баумана),
к. т. н. Высоцкий А. В. (Бюро Взаимозаменяемости).

Ведущая организация ОКБ МСИИП.

Автореферат разослан « » 1969 г.

Защита диссертации состоится « » 1969 г.

на заседании Ученого совета факультета АМ МВТУ им.
Н. Э. Баумана по адресу: М

С диссертацией можно
лища.

Ученый секретарь совета

М73846





1073846

Шачнев Ю.А. Исследование

Введение

Постоянно растущие требования к качеству машин и приборов определяют задачу дальнейшего развития и совершенствования средств измерения и контроля параметров качества. «Есть три отрасли,— указывал в выступлении на ноябрьском Пленуме ЦК КПСС в 1962 году академик М. В. Келдыш,— которые являются базой всякого производства. Это — энергетика, это — рациональные материалы и исходные вещества, это — методы и средства измерения, контроля и управления производственными процессами. Прогресс в каждой из этих отраслей связан с использованием достижений современной науки».

Важнейшей предпосылкой повышения качества является повышение точности изготовления изделий и их элементов и, следовательно, повышение точности механической обработки. Одним из способов повышения точности обработки является применение устройств активного контроля размеров деталей.

Наиболее совершенными средствами активного контроля являются устройства активного контроля размеров деталей в процессе обработки (УАК), которые в последнее время называют устройствами управляющего контроля, так как при их применении оценка точности размера обрабатываемой детали происходит в процессе обработки, что позволяет воздействовать на технологический процесс до его окончания, т. е. в определенной степени управлять им. Очевидно, что такое воздействие является более эффективным, чем при других способах активного контроля, информация при которых не позволяет воздействовать на технологический процесс одной детали, а позволяет воздействовать на процесс обработки в лучшем случае лишь следующей, и при этом обязательно подобной детали. Устройства активного контроля размеров позволяют значительно сократить время на операционный контроль и повысить производительность труда, обеспечивая прямой экономический эффект.

Глава I. Обзор и анализ работ по исследованию устройств активного контроля размеров

Устройство активного контроля с одной стороны является самостоятельным контрольно-измерительным прибором, измеряющим текущий размер детали и контролирующим один из пределов этого размера. Вместе с тем, в силу указанной специфики воздействия на технологический процесс, оно одновременно является функциональным (т. к. точность УАК влияет на точность обработки детали) узлом станка. При этом устройство активного контроля размеров воспринимает возмущающие воздействия от станка через подвеску и деталь. Практика эксплуатации и некоторые исследования позволяют качественно, а в ряде случаев и количественно определить основные факторы, влияющие на точность устройства активного контроля размеров в процессе врезного круглого шлифования. В некоторых работах, особенно вышедших в последнее время, подчеркивается необходимость рассматривать устройство активного контроля в непосредственной связи со станком. При этом подчеркивается существенное влияние на точность устройства конструкции измерительной головки.

В известных работах по исследованию колебательного процесса наконечников измерительная головка рассматривается или как одномассовая система или сводится к таковой при решении дифференциальных уравнений. Для определения ошибки при контактном методе контроля существенным является замечание Киселева В. М. о том, что при измерении шероховатости поверхности, если игла не отрывается от поверхности, то известной величиной в дифференциальном уравнении является не сила (в правой части), а перемещение. Это замечание правильно используется Воронцовым Л. Н. при исследовании измерительной головки с тремя воспринимающими наконечниками. Однако, без учета взаимных связей наконечников, и в этом случае головка по существу рассматривается как одномассовая система. Следует отметить также, что все известные работы были направлены, в основном, на анализ, а не на синтез измерительных головок.

Анализ работ по исследованию влияния настройки элементов цикла на точность обработки показал, что они были направлены на разработку новых технологических циклов, а не на создание устройств активного контроля размеров, что имеет значение только для определения технологии обработки детали.

Для создания оптимальных устройств управляющего контроля необходимо решать совместную задачу: 1) по опреде-

лению оптимального управления станком, которое определит функции устройства и, следовательно, будет служить основой для его конструирования и 2) по определению оптимальных динамических характеристик элементов измерительного тракта.

Известные работы по синтезу оптимальных по времени (по производительности) систем основаны на том, что входной сигнал заранее задан и не учитывают его колебание. Эти работы могут быть основой для выбора и разработки элементов измерительного тракта устройств активного контроля.

При выборе характеристик точности автоматических устройств активного контроля как правило используют только те характеристики, которые относятся к дискретным устройствам. Для показывающих приборов (т. е. в сущности при измерении) рассматривают и непрерывные характеристики (например, переходную функцию). Таким образом еще не разработан комплекс характеристик для оценки точности устройств активного контроля размеров в процессе обработки. Не разработаны также методы и средства испытаний устройств активного контроля размеров. Имеющиеся в ряде организаций стенды в основном предназначены для испытания одноконтатных устройств или для определения одной из характеристик и обладают известными недостатками. Тем не менее, необходимо отметить уже значительный опыт в исследованиях и в оценке точности устройств активного контроля размеров.

Из представленного обзора и анализа работ, рассматривая УАК как функциональный узел технологической системы, формирующий заданную функцию управления точностью обработки детали по текущему размеру, ставятся основные задачи исследования: 1) исследование УАК как узла технологической системы, т. е. исследование динамической точности УАК с учетом основных факторов, действующих на УАК в процессе работы, 2) определение оптимальной функции управления размерной точностью и разработка на ее основе нового устройства активного контроля с коррекцией по информации, предшествующей окончательной команде.

Глава II. Теоретический анализ динамической точности измерительной головки устройства активного контроля размеров

Анализ основных возмущающих факторов, действующих на измерительную головку устройства активного контроля размеров деталей, показал, что наиболее существенным яв-

ляется воздействие обрабатываемой детали. Это воздействие определяется не только погрешностями формы и положения, но и колебанием скорости вращения детали, а также изменением среднего значения текущего размера.

Для определения динамической погрешности был выбран обобщенный показатель возмущающих воздействий — скорость изменения текущего размера. Основываясь на известном представлении текущего размера, даны аналитические зависимости для скорости и ускорения изменения контролируемого текущего размера обрабатываемой детали как для точечного, так и для линейного контакта с измерительным наконечником.

Учитывая, что динамическая погрешность в кинематической паре появляется из-за разности скорости движения измерительных наконечников и скорости изменения контролируемого размера, определены необходимые и достаточные условия ее возникновения:

$$\begin{aligned} 1) \frac{dh_n}{dt} &> \frac{dh}{dt}; \quad а) \frac{d^2h_n}{dt^2} > \frac{d^2h}{dt^2}; \quad б) \frac{d^2h_n}{dt^2} < \frac{d^2h}{dt^2}, \\ 2) \frac{dh_n}{dt} &= \frac{dh}{dt}, \quad 3) \frac{dh_n}{dt} < \frac{dh}{dt}. \end{aligned}$$

Основываясь на необходимом и достаточном условиях, определен функционал, отвечающий динамической погрешности кинематической пары деталь — наконечник измерительной головки устройства активного контроля размеров:

$$\Delta_n = \int_{t_0}^t \left(\frac{\partial h_n}{\partial t} - \frac{\partial h}{\partial t} \right) dt.$$

Рассматривается также связь статической, кинематической и динамической погрешностей в кинематической паре измерительный наконечник — деталь.

В этой главе дан анализ конструктивных схем типовых измерительных головок устройств активного контроля размеров. Проведенный анализ позволил установить различие между одномассовыми и многомассовыми схемами измерительных головок.

Для рассмотренных типовых схем измерительных головок АК-3 и БВ-1096 получены в функции конструктивных параметров, а также параметров настройки измерительных головок и условий их эксплуатации необходимые и достаточные

условия отсутствия динамической погрешности. Оценка этих условий с помощью неравенств позволяет установить границы оптимальных значений как параметров настройки измерительной головки, так и конструктивных ее параметров и условий эксплуатации.

Анализ рассмотренных схем измерительных головок позволил также получить необходимые и достаточные условия появления динамической погрешности и дать оценку ее величины.

Глава III. Определение оптимального управления движением шлифовальной бабки круглошлифовального станка при врезном шлифовании и разработка способов и устройств управляющего контроля для его реализации

В этой главе с целью разработки принципов конструирования устройств активного контроля размеров в процессе обработки, была поставлена задача определения оптимального управления движением шлифовальной бабки для наиболее распространенных типов станков с дискретным изменением подачи. Введенные при этом специальные граничные условия:

$$S^n(t) = 0, \quad r_{\text{ср}}^n(t) = 0,$$

позволили одновременно поставить задачу получения наивысшей точности. Затем, используя математическую теорию оптимальных процессов и, в частности, методику построения оптимального управления, изложенную в работах акад. Понтрягина Л. С. и его учеников, получена оптимальная по быстродействию фазовая траектория движения шлифовальной бабки. Эта траектория в силу указанных выше условий соответствует такому движению шлифовальной бабки, при котором обеспечивается наивысшая точность обработки детали. В соответствии с процессом, происходящим при круглом врезном шлифовании, за координаты фазовой плоскости приняты отклонение текущего радиуса Δr и подача S . Анализ оптимальной фазовой траектории показал функциональную связь текущего припуска и действительной подачи, а также позволил определить и оптимальное управление движением шлифовальной бабки.

Сравнение оптимального управления с управлением, которое может реализовать типовое устройство активного контроля размеров, показывает, что существующие устройства обладают тем недостатком, что момент срабатывания у них

зависит только от величины текущего припуска и не зависит от действительной подачи (точнее скорости изменения припуска). Последнее противоречит существованию функциональной (имеется ввиду отличной от функции $S=\text{const}$) связи Δr и S .

Анализ точности перехода на последний (неуправляемый) участок траектории позволил определить ошибки $\Delta r_{\text{ср}}$ в зависимости от ΔS . При этом было показано, что положительная по отношению к точке оптимальной фазовой траектории ошибка подачи ΔS при переключении дает большую ошибку размера обработанной детали, чем равная ей по величине отрицательная ошибка подачи. В связи с этим предлагается оптимальную траекторию считать верхней предельной траекторией, а нижнюю ее границу установить в зависимости от допустимой величины ошибки текущего радиуса, зависящей от недобега шлифовальной бабки.

Таким образом было показано, что для получения высокой точности размера обрабатываемой детали с помощью устройства активного контроля необходимо связывать момент отключения (т. е. уровень срабатывания устройства) со скоростью изменения текущего размера (в частности, с действительной подачей).

Построение и анализ оптимального управления позволили разработать способ введения корректирующего сигнала в зависимости от колебаний скорости изменения текущего размера, на основе которого разработаны конструкции устройств активного контроля размеров в процессе обработки деталей (при использовании типовых устройств) методом врезного шлифования на круглошлифовальных станках с коррекцией уровня срабатывания по величине колебания действительной подачи.

В главе дан анализ предложенных конструкций, указаны их недостатки.

Глава IV. Экспериментальное исследование измерительной головки устройства активного контроля и разработка некоторых методов уменьшения ее динамической погрешности

В этой главе рассматривается преобразование измерительной головкой различных возмущающих факторов. В частности, представлен разработанный стенд и методика исследования, основанная на тензометрировании. Применение специально разработанного метода таррировки позволило опре-

делить составляющую погрешности от деформации базовой скобы по линии измерения, что и сделало возможным применить тензометрирования. Разработанный стенд имеет и самостоятельное значение в случае определения смещения уровня настройки при различных эталонах, имитирующих обрабатываемую деталь, что нашло отражение при проведении соответствующих экспериментов.

Представленные исследования влияния скорости изменения текущего размера, определяемой погрешностями формы, положения и скоростью вращения, на деформацию скобы, показывают, что при малых скоростях, т. е. когда нет разрыва в кинематической паре наконечники — деталь, деформация носит квазистатический характер и соответствует характеру изменения отклонений текущего размера. При увеличении скорости появляются высокочастотные составляющие деформации. Изменение высокочастотных составляющих деформации определяется не просто изменением скорости вращения детали, а и связанным с этим соотношением собственными и вынужденными частот. Поэтому с увеличением скорости вращения детали величина деформации, а, следовательно, и ее составляющая по линии измерения, носит все более случайный характер.

Исследование трехконтактных скоб различной жесткости показывает, что для уменьшения динамической погрешности, связанного с изменением текущего размера детали от погрешности формы, положения и от скорости ее вращения, необходимо уменьшать жесткость скобы, причем в зоне контакта с деталью. Получающееся при этом увеличение статической погрешности не может существенно повлиять на погрешность обработки в силу особенностей работы устройства активного контроля размеров и его настройки.

Исследование влияния измерительного и базового усилий показывает, что погрешность будет минимальной при наименьших их начальных значениях, определяющих лишь силовое замыкание кинематической пары наконечник — деталь в квазистатическом режиме работы устройства.

Шероховатость поверхности обрабатываемых деталей может оказывать на точность обработки с устройствами активного контроля некоторое влияние при обработке поверхностей выше 10 и ниже 6 классов чистоты. В остальных случаях это влияние несущественно.

В главе приведены исследования погрешности, появляющейся при контроле сырых деталей в виде внедрения наконечника в деталь.

Глава V. Исследование устройства активного контроля размеров как функционального узла технологической системы

Основываясь на том, что устройство активного контроля размеров является функциональным узлом технологической системы, задача которой обеспечить наименьшее рассеивание размеров в партии обрабатываемых деталей, был разработан метод исследования точности этих устройств.

На основании общего метода исследования разработан метод определения переходной функции устройства активного контроля размеров. Разработан стенд для снятия переходных процессов и переходной функции типовых устройств активного контроля размеров.

Для определения влияния различных технологических факторов и конструктивных элементов устройства разработан стенд для определения некоторых дифференцированных характеристик точности устройств активного контроля размеров. Проведены исследования смещения уровня срабатывания устройств активного контроля размеров. На основании исследований намечены некоторые пути уменьшения колебания уровня срабатывания.

Представленные в этой главе аналитические исследования влияния масштабного фактора позволили определить общую закономерность изменения погрешности, а также зависимость погрешности контроля от номинального размера обрабатываемой детали. Следует отметить, что полученные зависимости не являются следствием лишь технологических принципов (в противоположность известной зависимости допуска от размера), а в равной степени могут отвечать и эксплуатационным принципам. Все зависит от того, на основе каких (технологических или эксплуатационных) предпосылок получены неизвестные параметры.

В главе предлагается система комплексных и дифференцированных характеристик динамической точности устройств активного контроля размеров деталей.

Общие выводы

1. Анализ условий работы устройства активного контроля размеров и основных возмущающих факторов, действующих на устройство в процессе обработки детали, показывает, что основная динамическая погрешность возникает в измерительной головке в процессе контакта ее измерительных наконечников с обрабатываемой деталью, т. е., главным образом, в

кинематической пары наконечник — деталь. Поэтому в основу исследований было положено исследование влияния текущего размера детали на динамическую погрешность устройства. Основываясь на уже известном в основе представлении текущего размера, были выделены главные его составляющие, влияющие на динамическую погрешность измерительной головки.

2. В качестве обобщенной характеристики возмущающих воздействий была выбрана скорость изменения текущего размера контролируемой детали. Этот показатель позволил комплексно учесть не только влияние погрешности формы и положения детали, но и влияние станка, выраженное через колебание скорости вращения детали и действительной подачи.

3. Учитывая, что динамическая погрешность в кинематической паре появляется из-за разности скорости движения измерительных наконечников и скорости изменения контролируемого размера, сформулированы и представлены в виде неравенств необходимые и достаточные условия ее возникновения, основываясь на которых, получен функционал, определяющий динамическую погрешность кинематической пары деталь — наконечник измерительной головки устройства активного контроля размеров.

4. Проведенный анализ позволил установить различие между одномассовыми и многомассовыми схемами измерительных головок. Для рассмотренных типовых схем измерительных головок получены в функции конструктивных параметров, а также параметров настройки измерительных головок и условий их эксплуатации необходимые и достаточные условия отсутствия динамической погрешности. Оценка этих условий с помощью неравенств позволяет установить границы оптимальных значений как параметров настройки измерительной головки, так и конструктивных ее параметров и условий эксплуатации. Для случаев, когда нельзя исключить динамическую погрешность, получены необходимые и достаточные условия ее появления и даны примеры оценки ее величины.

5. С целью разработки принципов конструирования устройств активного контроля размеров в процессе обработки, было определено оптимальное управление движением шлифовальной бабки для наиболее распространенных типов станков с дискретным изменением подачи. Введенные при этом специальные граничные условия позволили одновременно поставить задачу получения наивысшей точности.

6. Анализ полученной на основе математической теории оптимальных процессов оптимальной фазовой траектории показал функциональную связь текущего припуска и действительной подачи. Анализ точности перехода на последний (неуправляемый) участок траектории, являющийся неуправляемым, позволил определить ошибки размера в зависимости от колебания подачи.

7. Сравнение оптимального управления с управлением, реализуемым типовым устройством, показывает, что для получения высокой точности размера обрабатываемой детали с помощью устройств активного контроля необходимо связывать момент отключения (т. е. уровень срабатывания устройства) со скоростью изменения текущего размера (в частности, с действительной подачей).

8. Построение и анализ оптимального управления позволили разработать способ введения корректирующего сигнала в зависимости от колебаний скорости изменения текущего размера, на основе которого, используя типовые устройства, разработаны конструкции устройств активного контроля размеров в процессе обработки деталей методом врезного шлифования на круглошлифовальных станках с коррекцией уровня срабатывания по величине колебания действительной подачи.

9. Для экспериментального исследования измерительной головки устройства активного контроля размеров разработан стенд и методика исследования, основанная в основном на применении тензометрирования. Применение специально разработанного метода тарировки позволило определить составляющую погрешности от деформации базовой скобы именно по линии измерения, что и определило возможность применения тензометрирования. Разработанный стенд имеет и самостоятельное значение в случае определения смещения уровня настройки.

10. Исследование деформации скобы показывает, что при малых скоростях вращения детали деформация скобы соответствует характеру изменения отклонений текущего размера. При увеличении скорости появляются высокочастотные составляющие деформации. Изменение высокочастотных составляющих деформации определяется не просто изменением скорости вращения детали, а и, связанного с этим, соотношением частот. Поэтому с увеличением скорости вращения величина деформации, а следовательно, и ее составляющая по линии измерения, носит все более случайный характер. Среднее значение низкочастотной составляющей деформации при скоростях

вращения детали до 300 об/мин для устройств активного контроля размеров типа АК-3 изменяется от колебания скорости вращения незначительно.

11. Исследование трехконтактных скоб измерительных головок различной жесткости показывает, что для уменьшения динамической погрешности, связанной с изменением текущего размера детали от погрешности формы, положения и от скорости ее вращения, необходимо уменьшить жесткость скобы, причем в зоне контакта с деталью.

12. На основании сформулированного в работе общего метода исследования разработан метод определения переходной функции устройств активного контроля размеров. Разработан стенд для снятия переходных процессов и переходной функции типовых устройств активного контроля размеров.

13. Для определения влияния различных технологических факторов и конструктивных элементов устройства разработан стенд для определения некоторых дифференцированных характеристик точности устройств активного контроля размеров и проведены исследования смещения уровня срабатывания.

14. Аналитические исследования влияния масштабного фактора позволили определить общую зависимость колебания погрешности, а также зависимость погрешности контроля от номинального размера обрабатываемой детали. Полученные зависимости не являются следствием лишь технологических принципов (в противоположность известной зависимости допуска от размера), а в равной степени могут отвечать и эксплуатационным принципам.

15. Разработана система комплексных и дифференцированных характеристик динамической точности устройств активного контроля размеров.



Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Авторское свидетельство № 222679. Бюллетень № 23, 22 августа 1968 г.

2. Стенд для определения динамических характеристик точности устройств активного контроля размеров (соавторы: Воронцов Л. Н., Раввин А. Г., Чибриков В. Г.). «Измерительная техника», № 5, 1969 г.

3. Методы и средства проверки устройств активного контроля размеров, раздел 8.6. «Справочник контролера машино-

строительных заводов» под ред. проф. Якушева А. И. Из-во «Машиностроение», 1969 г. (в печати).

4. Аналитический метод определения зависимости допуска от размера. Сб. НИИ метрологии вузов, вып. 4, «Взаимозаменяемость в машиностроении и приборостроении» под ред. проф. Якушева А. И. Из-во Стандартов (в печати).

Содержание диссертации доложено на:

1. Межвузовской научной конференции по новым высокопроизводительным и точным производственным процессам в машиностроении и приборостроении, МВТУ им. Баумана, 13.IX. 1967, тема доклада «Пути повышения точности и надежности устройств для контроля размеров в процессе обработки».

2. Пятой юбилейной ленинградской научно-технической конференции по взаимозаменяемости, точности и методам контроля в машиностроении, Ленинград, 6—8.XII. 1967, тема доклада «Исследование динамической точности устройств активного контроля размеров».

3. Научно-техническом совете ОКБ МСиИП.