

Раздел I. ИСПЫТАНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ СТАНКОВ

1. Введение. Станочное оборудование занимает особое место среди изделий машиностроения. Именно металлообрабатывающие станки в основном формируют показатели качества выпускаемых изделий. Поэтому технический уровень станочного парка любой страны определяет ее промышленный потенциал.

Современные станки должны обеспечивать очень высокую точность обработанных деталей, причем требования к точности изделий машиностроения непрерывно возрастают. Понятно, что для выполнения этого требования точность и надежность станочного оборудования должна повышаться еще интенсивнее. Особенно высокие требования предъявляются к станкам, осуществляющим финишные операции, формирующим основные параметры выпускаемых изделий.

Поэтому при создании нового станочного оборудования конструктор, кроме хорошего знания всех аспектов процесса проектирования, должен владеть методами его испытания и исследования и ясно представлять важнейшие свойства и качества, определяющие технический уровень станков.

2. Цели и методы исследования и испытания станочного оборудования

Исследование, как процесс выработки новых знаний о свойствах станка, обычно проводят на начальном этапе проектирования. Исследование призвано обеспечить конструктора недостающей информацией, без которой затруднен поиск и объективная оценка новых технических решений.

Различают два уровня исследования - эмпирический, когда с помощью натурного эксперимента устанавливают новые сведения об объекте, и теоретический, связанный с построением математической модели и последующим анализом свойств изучаемого объекта в процессе моделирования на ЭВМ.

Испытания станков являются завершающей стадией процесса их изготовления. Основными видами испытаний являются приемочные испытания опытных образцов новых моделей станков и приемосдаточные испытания серийно выпускаемых станков.

Первый вид испытаний предназначен для решения вопроса о целесообразности постановки на производство данной модели станка. Эти испытания обычно проводят в лабораторных условиях.

Приемосдаточные испытания проводят контролеры ОТК завода в цеховых условиях с целью проверки работоспособности готового станка и соответствия его заранее установленным техническим условиям.

3. Номенклатура показателей качества станков

Для сравнительной оценки технического уровня станочного оборудования используют набор технико-экономических показателей, характеризующих их свойства и качество.

Показатели качества количественно определяют свойства станков и регламентированы ГОСТ 4.93-86 "Номенклатура показателей". В нем содержится 11 групп показателей качества станков, таких как: показатели назначения и надежности, экономические, эргономические, эстетические, и экологические показатели, показатели безопасности, патентно-правовые и др., которые еще подразделены на подгруппы.

Каждая подгруппа может состоять ещё из некоторого набора количественных показателей.

Общее количество показателей качества, приведенных в ГОСТе очень велико, но они в большей мере отражают технические характеристики станков, а не его качества с точки зрения точности и надежности.

Часто для оценки качества оборудования используют только обобщенные показатели, такие как: **эффективность, производительность, гибкость, надежность, точность**. В курсе ИИО особое внимание уделяется двум показателям качества оборудования: точности и надежности.

Надежность - свойство оборудования обеспечивать бесперебойный выпуск продукции заданного качества и количества в течение определенного срока службы.

Надежность оборудования определяется несколькими показателями, такими как - безотказность, долговечность, ремонтпригодность, технический ресурс, технологическая надежность (как свойство сохранять во времени заданную точность и качество обработки).

Эффективным средством повышения надежности оборудования является диагностирование. В этом случае осуществляют целенаправленный сбор и анализ информации о состоянии его важнейших узлов и элементов.

Точность станочного оборудования - в основном обуславливает точность обработанных на нем изделий.

По характеру и источникам возникновения все погрешности обработки детали на станке условно разделяют на несколько групп.

В общем случае точность станочного оборудования можно характеризовать: геометрической и кинематической точностью, жесткостью, виброустойчивостью, теплостойкостью и точностью позиционирования. Перечисленные выше показатели применимы для оценки технического уровня не только станочного, но и другого технологического оборудования.

4. Основные виды испытания станков по параметрам точности и надежности

4.1. Испытания станков на геометрическую и кинематическую точность

закljučаются в оценке точности работы отдельных механизмов и точности изготовления отдельных элементов станка.

К проверкам геометрической точности относятся проверки точности вращения шпинделей, прямолинейности и плоскостности направляющих или базовых поверхностей столов, прямолинейности перемещения суппортов и столов, точности ходовых винтов и т. д.

Также определяется точность положения рабочих органов при их остановке (точность позиционирования), оценивается правильность взаимного положения узлов и элементов станка, например, проверяется параллельность или перпендикулярность поверхностей столов по отношению к шпинделю.

Проверка кинематической точности станка включает измерение точности взаимосвязанных движений его рабочих органов, например, шпинделя и суппорта при нарезании резьбы на токарном станке.

Оценку геометрической и кинематической точности станков проводят по нормам ГОСТ для соответствующих типов станков. Величины допустимых отклонений зависят от класса точности станка.

При испытаниях станков на точность применяют универсальные и специальные измерительные приборы и инструменты. В последнее время все шире применяют высокоточные приборы, обеспечивающие автоматизированную запись информации, а в ряде случаев и ее обработку.

К числу таких приборов относятся лазерные интерферометры, автоколлиматоры с цифровой индикацией и выводом информации на ЭВМ, кинематомеры, использующие оптический, фотоэлектрический и др. принципы действия.

4.2. Испытания станков на статическую жесткость включают оценку деформаций основных узлов станка, которые определяют относительное положение инструмента и заготовки. Жесткость станка непосредственно связана с точностью

обработки, с возможностью применения ускоренных режимов обработки. Она также является одной из основных характеристик виброустойчивости станка.

При проведении испытаний на жесткость получают характеристику упругих деформаций узлов в координатах "сила - деформация". Форма "кривых жесткости", характер петли гистерезиса, линейность характеристики и др. - служит информативным сигналом о состоянии упругой системы станка.

4.3. Испытания станков на виброустойчивость связаны с анализом динамических процессов, возникающих в станке при его работе, особенно в процессе резания.

Колебания в упругой системе станка оказывают непосредственное влияние на качество обработанных поверхностей (волнистость, шероховатость), а также при определенных режимах могут привести к возникновению недопустимых резонансных явлений.

Наибольшее развитие получили испытания, связанные с получением амплитудно-фазовой частотной характеристики (АФЧХ), которая позволяет оценить запас устойчивости, определить допустимый диапазон режимов работы, указать слабые элементы, снижающие динамические характеристики системы.

Особым видом испытаний прецизионных станков является оценка плавности медленных перемещений столов и суппортов, в случаях, когда определенные условия трения в направляющих, служат причиной возникновения автоколебательных явлений в приводах подач.

4.4. Оценка тепловых деформаций станков особенно важна для прецизионных станков, у которых величина тепловых деформаций имеет доминирующее значение в достижении требуемой точности обработки.

Тепловые деформации изменяют геометрические параметры станка, например, смещают ось шпинделя, искривляют направляющие и станину, что приводит к нарушению взаимного положения узлов станка, несущих заготовку и инструмент.

Кроме того тепловые деформации могут привести к изменению жесткости системы, например за счет увеличения натяга в подшипниках при их нагреве. Они также могут изменить условия контакта в сопряжениях деталей узла, в результате чего меняется характеристика жесткости стыка.

Для определения тепловых деформаций узлов станка обычно используют те же приборы, что и при оценке их геометрической точности и жесткости. Однако специфика

данных испытаний заключается в том, что здесь необходимо измерять деформационный процесс, протекающий во времени. Поэтому для регистрации таких деформаций используются самопишущие приборы, или цифропечатающие устройства.

Для исследования динамики тепловых полей применяют термопары, установленные на исследуемых деталях в зонах источников теплоты или тепловизоры, регистрирующие инфракрасное излучение объекта.

4.5. Испытание станков на надежность заключается в получении численной оценки их способности во времени выполнять требуемые функции в заданных режимах. Функции станка заключаются в осуществлении определенных технологических процессов с заданными требованиями к точности и качеству поверхности.

Основным показателем надежности является вероятность безотказной работы $P(t)$, рассчитанная для определенного периода времени $t = T$.

Вероятность безотказной работы характеризует степень опасности отказа и находится в пределах, $0 \leq P(t) \leq 1$. Чем выше ее значение, тем более надежно будет работать машина.

Объектом испытания на надежность могут быть отдельные узлы станка, весь станок или система станков.

При испытании на надежность простых деталей можно сравнительно быстро и просто накопить данные о длительности работы изделия до отказа. Однако проведение испытаний на надежность сложного станочного комплекса, сопряжено со значительными трудностями. В настоящее время еще нет установившихся методик испытания станков на надежность. Рассмотрим некоторые методические подходы к решению этой задачи.

Метод А. Ресурсные испытания станка без форсирования условий его работы. Заключаются в доведении станка до отказа при определенных режимах его работы. Длительность таких испытаний достаточно велика, а полученные результаты отражают лишь свойство станка при принятых условиях испытания. Их эффективность невелика, а трудоемкость весьма значительна.

Таким методом можно достичь ценных результатов лишь при испытаниях отдельных механизмов, если их работа в течение рабочего цикла станка занимает незначительное время (например, механизм поворота стола или револьверной головки). Однако для станка в целом проведение ресурсных испытаний практически неосуществимо.

Метод Б. Оценка надежности станка по данным эксплуатации позволяет с большой достоверностью получить данные о его надежности (например, по параметру точности) с учетом различных режимов работы и условий эксплуатации.

Основной недостаток этого метода заключается в том, что полные данные о надежности системы получаются тогда, когда ценность этих сведений минимальна, поскольку станки уже устарели. Собранные данные могут быть непосредственно использованы только для тех узлов новых станков, которые не претерпели конструктивных изменений.

Существующие методы статистической экстраполяции мало пригодны для разработки новых станочных систем, поскольку новые модели станков, как правило, обладают значительными отличиями. Поэтому, оценить надежность новой модели станка на основании статистических данных об отказах его прототипа, практически затруднительно.

Метод В. Ускоренные испытания на надежность позволяют получить показатели надежности за короткий промежуток времени.

Различают ускоренные испытания, основанные на интенсификации процессов, способствующих отказам и сокращенные испытания без интенсификации этих процессов. В последнем случае сокращение времени длительности испытаний может быть достигнуто за счет уплотнения испытаний во времени, путем сокращения простоев, холостых ходов и т.д. Однако, использовать метод ускорения испытаний оборудования, можно только после выявления степени влияния перерывов в работе на интенсивность процесса износа или разрушения его узлов. Например, увеличение частоты циклов нагружения при усталостных разрушениях почти не влияет на результат испытаний, в то время как перерывы в работе подшипника скольжения с жидкостным трением могут значительно ускорить его износ.

Интенсификация режимов разрушения при проведении форсированных испытаний достигается ужесточением режимов работы за счет увеличения нагрузок, скоростей, температур и т. п. по сравнению с нормальными величинами.

Метод форсированных испытаний следует применять весьма осторожно, так как работа сложных механизмов при форсированных режимах может качественно изменить картину отказов. В этом случае приведение показателей надежности к нормальным условиям работы может привести к грубым ошибкам.

Форсированные испытания дают хорошие результаты только при исследовании надежности простых изделий с одним процессом разрушения. В то же время попытки проведения таких испытаний для станка в целом успеха не имеют.

Метод Г. Испытания оборудования на технологическую надежность дают данные о способности станка сохранять точность обработки во времени.

Цель этих испытаний, во-первых - выявить запас по точности обработки, которым обладает станок на текущий момент времени, во - вторых - дать прогноз о сроках расходования этого запаса точности.

Испытания проводятся с использованием типовой детали, которая должна представлять всю номенклатуру обрабатываемых на станке деталей. Ее конфигурация должна позволять вести обработку с использованием основных технологических возможностей станка. Из тех же соображений должны выбираться режимы обработки и материал детали. Такой подход к выбору параметров типовой детали отражает вероятностную природу номенклатуры обрабатываемых деталей.

4.6. Диагностирование является эффективным средством повышения надежности оборудования. Диагностика технологического оборудования призвана давать оценку технического состояния станка и выявлять причины и места нарушения его работоспособности. Системы диагностирования, включающие объект и средства диагностики, относятся к системам контроля.

В технической диагностике проверка состояния сложного объекта строится как процесс управления этим объектом, выполняемый по определенной программе. В последние годы создаются сложные автоматизированные системы диагностики, которые измеряют большое число параметров, обрабатывают эти данные и дают заключение о работоспособности оборудования.

Возможность применения диагностики в процессе эксплуатации станков во многом зависит от приспособленности их конструкций к размещению на ней различных измерительных средств, от наличия встроенных приборов, например, для измерения давления в гидросистеме, скорости движения, температуры и т. д.

Параметрами технического состояния, которые контролируются в процессе диагностирования, могут быть:

а) параметры станка, непосредственно характеризующие его работоспособность (биение шпинделя, точность позиционирования стола и др.);

б) повреждения, которые могут привести к отказу, например изнашивание направляющих, ходовых винтов, подшипников;

в) косвенные признаки, функционально или стохастически связанные с выходными параметрами. К их числу относятся виброакустические сигналы, тепловые поля, величины крутящих моментов и др. Например, применение спектрального анализа частот виброакустического сигнала привода, снятого с зубчатой коробки скоростей, позволяет оценить состояние каждой зубчатой пары и подшипников качения. В некоторых случаях в качестве диагностического сигнала о состоянии шпиндельного узла, используется его АФЧХ.

Однако, следует отметить, что диагностика еще не стала неотъемлемым условием эксплуатации станков и в развитии этого направления имеются широкие возможности.

Вопросы для самоподготовки

1. Роль станков в повышении качества изделий машиностроения. Цель и задачи испытания и исследования станочного оборудования;
2. Показатели качества станков по ГОСТ 4.93-86 “Номенклатура показателей”;
3. Обобщенные показатели качества станочного оборудования;
4. Основные виды испытания станков по параметрам точности;
5. Испытания станков на надежность;
6. Задачи диагностики станков.

ИСПЫТАНИЯ СТАНКОВ НА ТОЧНОСТЬ ПО СТАНДАРТНЫМ МЕТОДИКАМ

В настоящее время разработаны типовые методики испытаний металлорежущих станков, представленных в виде стандартов (ГОСТов), которые реализуются посредством приемочных испытаний опытных образцов новых моделей станков и приемосдаточных испытаний серийно выпускаемых станков.

1. Общие требования к испытаниям станков на точность по ГОСТ 8-82Е

В соответствии с ГОСТ 8 - 82Е точность металлорежущих станков определяется тремя группами показателей:

- показатели точности обработки образцов - изделий;
- показатели геометрической точности станков;
- дополнительные показатели.

К показателям, характеризующим точность обработки образцов-изделий, относятся: точность геометрических форм и расположения обработанных поверхностей ; точность и постоянство размеров партии ; шероховатость обработанных поверхностей образцов - изделий.

Размеры, форма и требования к базовым и обрабатываемым поверхностям образцов-изделий должны соответствовать ГОСТ 25443, стандартам на нормы точности станков конкретных типов и техническим условиям.

К показателям геометрической точности станка, относятся:

1- точность баз для установки заготовки и инструмента; 2 - точность перемещений рабочих органов станка, несущих заготовку и инструмент; 3 - точность расположения осей вращения рабочих органов относительно друг друга и баз станка; 4 - точность взаимосвязанных относительных перемещений формообразующих узлов станка; 5 - точность позиционирования (координатных перемещений).

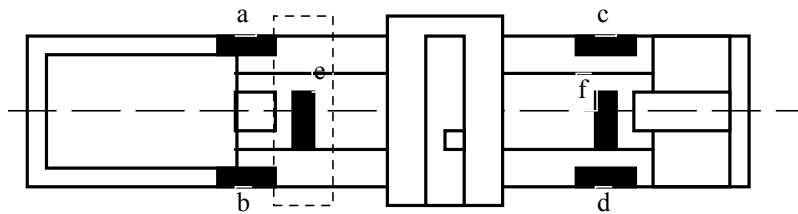
Дополнительные показатели точности характеризуют способность станка сохранять взаимное расположение рабочих органов при условии:

- приложения внешней нагрузки (показатели жесткости);
- воздействия тепла, возникающего при работе станка;
- воздействия колебаний, возникающих при работе станка.

Нормы точности станков установлены в стандартах к конкретным типам станков и согласованы с классом точности самих станков (Н, П, В, А, и С). Значения допусков показателей точности при переходе от одного класса точности к другому принимается по ряду со знаменателем $\phi = 1,6$, а в некоторых случаях с ϕ от 1 до 2,0.

Испытания на точность должны производиться на окончательно собранном, установленном на фундаменте и выверенном по уровню станке.

Например, для станков токарной группы уровни устанавливают на направляющих в позициях *a*, *b*, *c*, *d* для выверки в продольном направлении и в позициях *e* и *f* для выверки в поперечном



направлении (рис.1.). Допускается производить демонтаж тех узлов станка, которые мешают выверке.

Рис.1 Пример размещения уровней на станках токарной группы

При этом требования к фундаменту и установки на нем

станка, затяжка фундаментных болтов должны соответствовать указаниям, приведенным в эксплуатационных документах, разработанных по ГОСТ 2.601-68.

Если такие указания отсутствуют, то допускаемые отклонения при выверке станка по уровню не должны превышать 0,04 мм/м станков классов точности Н и П и 0,02 мм/м для станков более высокого класса точности.

Допускается снятие кожухов, щитков, патронов, люнетов и других съемных принадлежностей к станку, если это не влияет на его точность. Подвижные части станка при испытании должны находиться в средних рабочих положениях. Относительное положение и перемещение рабочих органов станка при измерении должно воспроизводить их состояние при обработке заготовки.

При испытании станки должны быть защищены от потоков воздуха тепловой радиации и других источников тепла. Колебания температуры рабочего пространства в период испытаний на точность станков классов точности В, А и С не должны превышать 2° С. Для станков класса точности Н и П колебания температуры не регламентируются.

Условия испытаний станков на жесткость должны приближаться к условиям их нагружения при типовом виде обработки. В качестве измеряемых величин принимаются наибольшие перемещения узлов станка, несущих инструмент или заготовку, при плавно возрастающих до определенного предела, нагружающих силах.

Все узлы должны подводиться в положение проверки движением противоположным направлению силы, действующей на них при проверке. Величины и направления нагружающих сил, точки их приложения, направления и точки, в которых должны измеряться перемещения, способы и средства измерения, должны соответствовать требованиям стандартов.

В качестве средств нагружения должны быть использованы специальные нагружающие устройства или механизмы станка.

2. Требования к методам проверки и средствам измерения по ГОСТ 22267-76

Методы и средства измерений должны соответствовать ГОСТ 22267-76 "Схемы и способы измерений геометрических параметров".

При выборе методов проверки предпочтение следует отдавать тем из них, результаты которых прямо характеризуют проверяемый параметр без дополнительных расчетов.

Средства измерения, применяемые для проверки точности станков, должны быть аттестованы и стандартизованы на температуру рабочего пространства. При необходимости должна быть проведена коррекция результатов измерений по температуре.

Приборы для измерения длин должны, как правило, устанавливаться на место инструмента, а применяемые при измерении поверочные линейки и угольники, контрольные оправки, шары, кольца, образцовые штриховые меры и т.п. - на место обрабатываемой заготовки.

Проверки непрямолинейности направляющих станка или непрямолинейности перемещения его рабочего органа на длине до 1600 мм целесообразно производить точным уровнем или контрольной линейкой, а на длине более 1600 мм микроскопом или автоколлиматором.

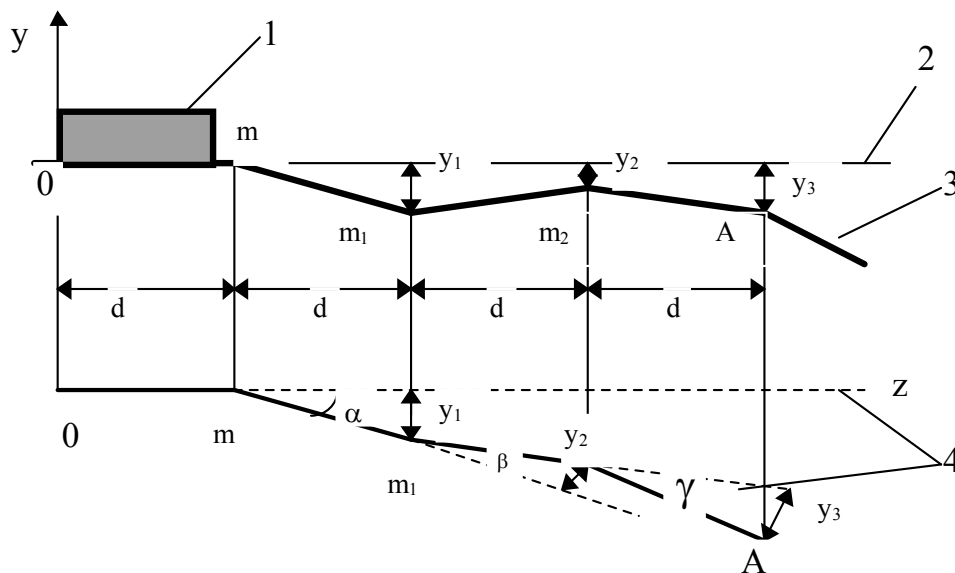


Рис.2 Контроль прямолинейности плоскости с помощью уровня
1 - уровень; 2 - линия горизонта; 3 - профиль реальной поверхности;
4 - условные контрольные прямые.

При измерении прямолинейности с помощью уровня отсчет отклонений ведется от линии горизонта. При измерении с помощью автоколлиматора отсчет ведется от линии светового луча.

При контроле прямолинейности плоскости, близкой к горизонтальной, с помощью уровня используется метод последовательных отклонений отдельных участков плоскости к условной контрольной прямой (рис. 2). Для этого уровень устанавливают вдоль линии Ао последовательно с шагом 100 - 500 мм. Измерения производят в прямом и обратных направлениях. По полученным данным строят линию omm_1m_2A .

Контрольно - измерительный инструмент для проверки точности станков

Контрольные линейки бывают двух исполнений: в форме бруса равного сопротивления, и плоскопараллельные линейки. По длине линейки бывают 300, 800, и 1600 мм. При измерении линейка устанавливается на опоры, расположенные на расстоянии $\frac{2}{9} L$ от её торцов, где L - длина линейки. В этом случае прогиб линейки под действием силы тяжести будет минимальным.

Контрольная линейка должна удовлетворять следующим техническим требованиям:

1. максимальный прогиб линейки не более 10 мкм на 1 м длины;
2. неплоскостность и непрямолинейность контрольной (рабочей) поверхности линейки не более $(2 + 10 L)$ мкм, где L - длина линейки в метрах, что соответственно составляет 5, 10 и 18 мкм;
3. непараллельность контрольных плоскостей линейки в пределах $1.5(2 + 10 L)$ мкм, что соответственно составляет 7, 5; 15; 27 мкм.

Контрольные оправки. По способу установки на станке оправки различаются на консольные с хвостовиком (цилиндрическим или коническим) и на оправки с центровыми отверстиями (рис.3).

Консольные оправки предназначены для измерения положения осей и их радиального биения. Длины рабочих частей этих оправок лежат в пределах 75 ... 500 мм. Длина оправок с центровыми отверстиями находятся в диапазоне 150 ... 1600 мм, а наружный диаметр в диапазоне 40 ... 105 мм.

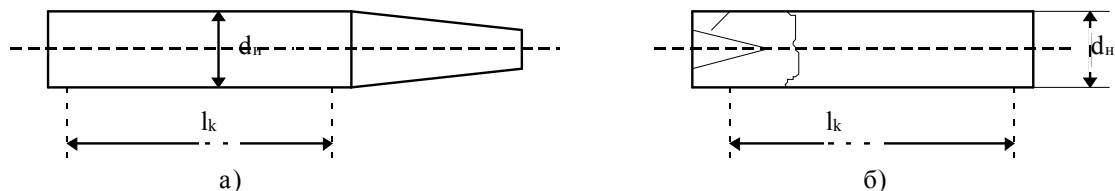


Рис. 3. Контрольные оправки: а) - с центровым отверстием; б) - консольная с коническим хвостовиком

Оправки должны быть установлены на станке так, чтобы положение их контрольных поверхностей обеспечивало возможность измерения отклонений на длинах, к которым отнесены допуски, данные в нормах точности на станки. Длины контрольных частей оправок l_k так же регламентированы и согласованы с их наружными диаметрами d_n .

Главное требование при изготовлении оправок - высокая точность. Например, допускаемое радиальное биение оси оправки с коническим хвостовиком при рабочей длине контрольной части 75 ... 500 мм должно быть в пределах 2 ... 3 мкм, а отклонение от круглости в пределах 2 ... 3 мкм. Прогиб от собственного веса таких оправок не должен превышать 0.9 ... 6.6 мкм соответственно. Контрольные оправки должны иметь высокую твердость поверхности не менее HRC 53 и шероховатость поверхности контрольных частей не более $Ra\ 0,32$ мкм.

Контрольные угольники. Предназначены для проверки перпендикулярности плоскостей и осей. Типы угольников показаны на рис. 4.

Допуск на неплоскостность и непрямолинейность рабочих граней угольников нормируется в микронах по выражению $(2 + 10L)$, где L - длина грани в метрах. Допуск на неперпендикулярность граней угольников - 5 мкм на 300 мм. Кроме того, угольники проверяются на жесткость. Для этого одну из граней угольника нагружают усилием равным 25 Н и измеряют её прогиб. Допуск на прогиб определяют по формуле $0,7\sqrt{L}$ мкм, где L - длина грани в метрах.

Уровни. Для проверки станочного оборудования используются уровни, имеющие точность при измерении уклонов 5 ... 10 мкм на 1 метр или чувствительность по углу 10 сек. При такой чувствительности уровня уклон контролируемой поверхности 0,05 мм на 1 м вызывает перемещение воздушного пузырька на одно деление. Отклонение от плоскостности базовой поверхности уровня должно укладываться в допуск: 4 мкм на длине $L \leq 250\text{мм}$; 6 мкм на длине $250 < L \leq 500\text{мм}$.

Погрешность измерений не должна превышать значений, приведенных в стандартах на нормы точности станков. Если такие указания отсутствуют, то погрешность измерений не должна превышать 30% допуска измеряемой величины.

Погрешность обработки числовых данных измерений, является составной частью погрешности измерения и не должна превышать 0,1 ее доли.

При проведении измерений с интервалами (шагами) их длины должны соответствовать стандартам на нормы точности станков. При отсутствии указаний шаг принимают равным 0,05 - 0,3 длины проверяемой поверхности (перемещения), но не более 1000 мм.

ГОСТ 22267-76 регламентирует способы и схемы измерения четырех показателей геометрической точности станков: траекторий перемещения рабочих органов; формы и относительного положения поверхностей, служащих для базирования заготовки и инструмента; положения осей вращения и траекторий перемещения рабочих органов относительно друг друга и баз; координат линейных и угловых перемещений рабочих органов.

Эти показатели представлены в ГОСТ 22267-76 большим набором параметров (21 параметр), для которых в свою очередь, приводятся большое число схем и методов их измерений (до 10 и более методов). Назовем только некоторые из них.

Параметр 1. Прямолинейность перемещения узлов;

Метод 1,(2) - с помощью поверочной линейки и прибора для измерения длин (с помощью консольной контрольной оправки).

Метод 3 - с помощью натянутой струны и микроскопа.

Метод 4,(7) - с помощью гидростатического уровня (уровня).

Метод 5 - с помощью визирной трубы.

Метод 6,(8) - с помощью оптического квантового генератора и фотоприемника (автоколлиматора).

Далее в ГОСТе дано подробное описание этих методов и схем измерения. Однако результат измерения во всех случаях (независимо от точности средств измерения) сводится к выявлению наибольшей алгебраической разности показаний измерительного прибора.

Параметр 2 Плоскостность поверхностей (дано 13 методов измерения). Отклонение от плоскостности определяется как наибольшая алгебраическая разность показаний приборов.

Параметр 3. Взаимная параллельность направлений перемещений и эквидистантность траекторий перемещений (2 метода).

Параметр 5. Параллельность плоскости и оси. и. т. д.

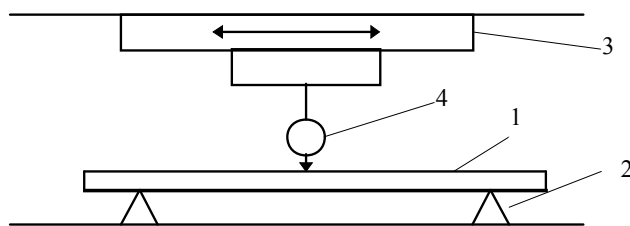


Рис.5. Схема измерения по методу 1,а: 1 - поверочная линейка; 2 - опоры(концевые меры); 3 - проверяемый рабочий орган; 4 - измерительный прибор.

В качестве примера рассмотрим способ измерения прямолинейности перемещения по методам 1 и 2.

Метод 1 (а, б) - для измерения отклонений от прямолинейности траектории рабочего органа, несущего инструмент (а), заготовку (б), при длине измерения до 1600 мм. Средства измерения: поверочная линейка, прибор для измерения длин. Схема измерения указана на рис.5.

Проверочную линейку устанавливают так, чтобы показания измерительного прибора были одинаковыми в крайних точках длины перемещения.

ния.

Отклонение от прямолинейности траектории перемещения

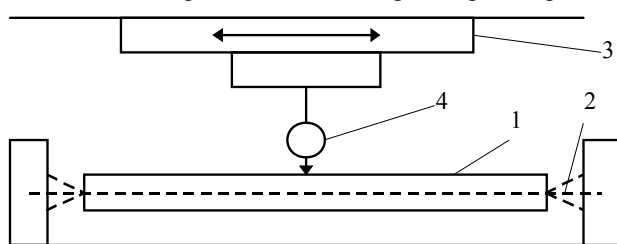


Рис.6. Схема измерения по методу 2,а: 1 - контрольная оправка; 2 - центра; 3 - проверяемый рабочий орган; 4 - измерительный прибор.

равно наибольшей алгебраической разности показаний измерительного прибора на заданной длине перемещения.

Метод 2 (а, б) - с помощью консольной оправки при длине измерения до 500 мм и с помощью центральной оправки при длине измерения до 1600 мм. Схема измерения показана на рис.6.

Отклонение от прямолинейности траектории перемещения равно наибольшей алгебраической разности показаний измерительного прибора на заданной длине перемещения.

Допускается производить измерения, если показания измерительного прибора на концах оправки неодинаковы. В этом случае отклонения от прямолинейности перемещения определяют относительно прямой, проходящей через начало и конец траектории (рис.7).

Отклонение траектории определяют по условию $\Delta = |y'_{\max}| + |y'_{\min}|$,

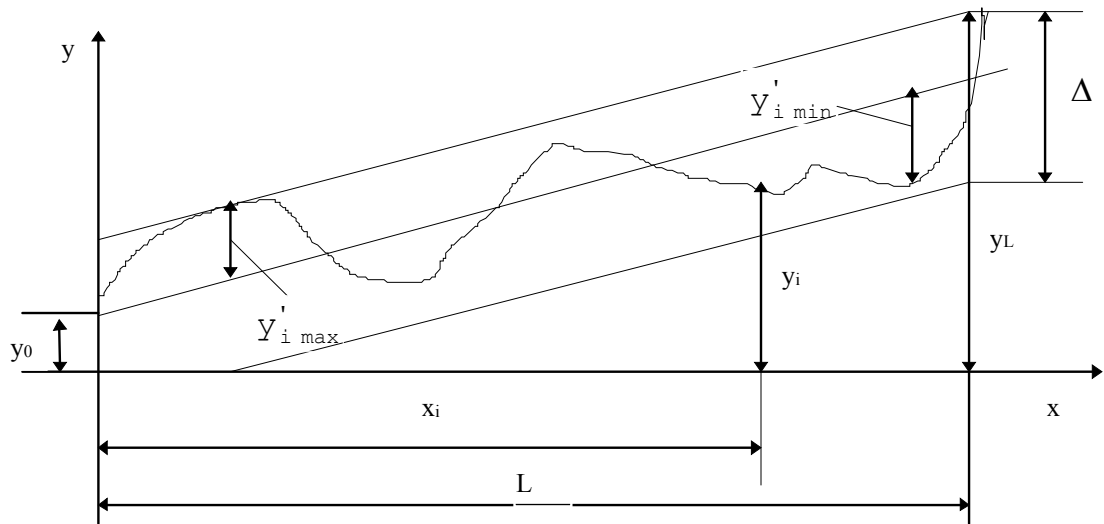


Рис. 7

$$\text{где } Y'_i = Y_i - Y_0 - \frac{(Y_L - Y_0)x_i}{L}.$$

3. Анализ применяемых типовых методов испытания станков

Давая оценку содержания ГОСТ 22267-76 в целом, можно сделать вывод о том, что даже очень значительное количество параметров качества и методов их измерения, приведенных в ГОСТ, вследствие их бессистемности, не могут дать объективной информации о качестве станка в целом.

Отметим основные, принципиальные недостатки применяемых в настоящее время методов проверки станков.

1) Обычно основной проверкой качества станка является проверка его геометрической и кинематической точности. При этом проверки, как правило, осуществляются в статическом состоянии оборудования. Затем проводятся дополнительные испытания, в которых дается оценка влияния на точность станка его жесткости, тепловых деформаций и вибраций. Все испытания проводятся раздельно, когда искусственно выделяется действие только одного исследуемого фактора. Например, проверка прямолинейности направляющих это лишь одна из характеристик их точности, но не станка в целом.

Вместе с тем известно, что лишь при одновременном действии всех факторов системы могут быть получены достоверные результаты о свойствах станка. Так, результаты, полученные при последовательном и одновременном съеме информации о геометрической точности, жесткости, тепловых деформаций, вибрациях, могут существенно отличаться. Разные результаты дают испытания, проведенные в статическом состоянии станка и под нагрузкой или на холостом ходу.

2) В методиках, разработанных в стандартах для испытаний станков, даже не ставится вопрос о системном подходе в выборе номенклатуры его выходных параметров. Вместо этого, на последних этапах испытаний проводят проверку станка на точность при обработке стандартной

детали в определенных условиях и режимах обработки. Однако уровень точности обработки на станке образцов-деталей не может быть выбран в качестве оценочного критерия, так как он является результатом действия всех компонентов технологической системы (инструмента, заготовки и др.). Нам же необходимо давать оценку только параметрам станка.

3) При испытании станков не учитывается вероятностная природа исследуемых явлений. В то время как подлинная оценка качества станков, которые работают в широком диапазоне режимов и условий, возможна лишь в вероятностной трактовке.

4) При испытаниях не применяются тестовые методы диагностирования, дающие информацию о состоянии станка при различных нагрузках. Нет нагрузочных устройств, пригодных для этой цели.

5) При испытаниях не применяются методы прогнозирования. Однако оценка надежности станка по параметрам точности возможна лишь в сочетании испытания с прогнозированием.

6) При испытаниях практически не используются возможности ЭВМ. Вместе с тем, применение новых методических подходов к проведению испытаний возможно лишь на базе вычислительной техники.

Таким образом, перечисленные недостатки показывают, что применяемые в настоящее время методы испытания станочного оборудования, уже не могут удовлетворить растущим требованиям к оценке его качества и надежности. Необходимо проводить дальнейшее развитие методов испытания, базируясь на достижениях науки и практики станкостроения, используя в должной мере современную метрологическую базу и возможности ЭВМ.

Новый подход к испытаниям станков по параметрам качества и надежности с использованием управляющих испытанием программ, охватывающих весь диапазон условий эксплуатации станка, с применением специальных нагрузочных устройств, управляемых от ЭВМ, получил название программного метода.

Вопросы для самоподготовки

1. Общие требования к испытаниям станков на точность по ГОСТ 8-82;
2. Требования к методам проверки и средствам измерения по ГОСТ 22267-76;
3. Показатели геометрической точности станков по ГОСТ 22267-76, примеры методов и схем измерений;
4. Основные недостатки типовых методов проверки станков. Новый подход к испытаниям станков.

ТОЧНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

1. Компоненты станочной системы, выходные параметры компонентов

Точность обработки - главный показатель качества станочной системы. В металлообработке под точностью обработанной детали понимают точность размеров, формы и взаимного расположения обработанных поверхностей, их волнистость и шероховатость.

Технологическую систему можно представить совокупностью 7-ми компонентов. Точность обработки зависит от всех компонентов технологической системы - станка (технологической машины), инструмента, заготовки, приспособления, окружающей среды, оператора. Для наглядного представления о влиянии компонентов на точность обработки дадим структурную схему их взаимодействия (рис. 1).

Рассмотрим выходные параметры каждого из указанных компонентов системы. Знание этих параметров позволит установить обоснованные требования и нормативы к качеству каждого компонента, дать основу для установления зависимостей между точностью обработки и выходными параметрами компонентов, разработать рациональные методы испытания.

1. Металлорежущий станок является наиболее дорогим и сложным компонентом технологической системы.

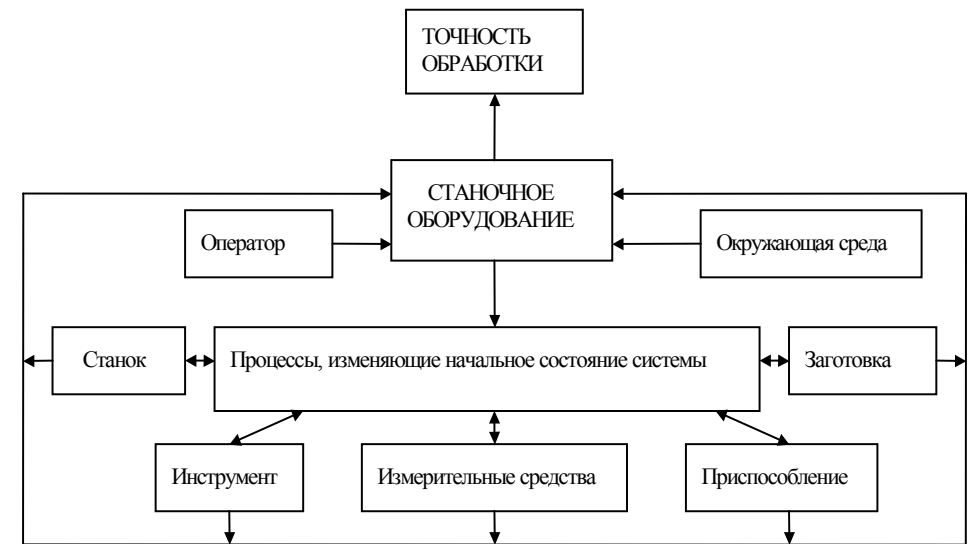


Рис. 1 Схема взаимодействия компонентов станочной системы

Если провести анализ процесса формообразования обрабатываемых поверхностей то можно сделать вывод о том, что качество станка зависит от точности выполнения заданных движений узлов, несущих инструмент и заготовку.

Так идеальный станок, который не вносит своего вклада в погрешности обработки, можно представить себе как станок, который осуществляет движения по заданным геометрическим траекториям, не изменяющимся при любых внешних воздействиях.

Поэтому для оценки качества станка необходимо, прежде всего, дать оценку отклонений формообразующих узлов станка от заданных идеальных траекторий.

Таким образом, *основной выходной параметр станка - точность траекторий рабочих органов.*

2. Режущий инструмент непосредственно участвует в образовании поверхностей и работает в напряженном термодинамическом режиме.

Свой вклад в образование погрешностей обработки инструмент вносит из-за отклонения начальной конфигурации режущих кромок от идеальной и, главное, в результате ее изменения при изнашивании. *Основной выходной параметр режущего инструмента - точность геометрии режущих кромок и поверхностей резания.*

К характеристикам точности режущего инструмента относится также положение его режущих кромок в пространстве, которое может измениться при деформации тела инструмента.

3. Приспособление должно обеспечить заданную точность положения инструмента или заготовки.

Деформация и изнашивание зажимных элементов приспособления, посадочных, установочных и направляющих поверхностей изменяют с течением времени его начальные характеристики точности. *Основной выходной параметр - точность положения инструмента или заготовки.*

4. Заготовка характеризуется точностью формы и стабильностью свойств материала. Неравномерный припуск, деформация заготовки, неравномерная твердость материала, изме-

нения в поверхностном слое, могут оказать влияние на точность обработки через механизм технологического наследования.

Поэтому *точность формы и стабильность свойств материала являются выходными параметрами заготовки.*

5. Измерительные средства. Погрешности измерения размеров обработанных деталей оказывают существенное влияние на обеспечение требуемой точности обработки.

Поэтому измерительные средства необходимо считать как самостоятельный компонент технологической системы.

Характеристики точности измерений являются выходными параметрами измерительных средств.

6. Окружающая среда является элементом технологической системы, в условиях которой функционируют все другие компоненты.

Поэтому характеристики состояния среды такие как: температура, влажность, запыленность атмосферы, вибрационные воздействия, должны быть регламентированы в зависимости от точности обработки. *Основной выходной параметр - стабильность свойств окружающей среды.*

7. Оператор - участвует в осуществлении технологического процесса и может вносить погрешность в точность обработки или, наоборот, способствовать достижению более высокого уровня точности. *Основной выходной параметр - точность функционирования.*

Таким образом, для обеспечения технологической системой заданного уровня точности обработки, необходимо регламентировать требования к выходным параметрам всех компонентов технологической системы.

Отдельные компоненты технологической системы в первом приближении можно рассматривать как независимые. Поэтому испытания с целью оценки качества только станка могут проводиться раздельно, но с учетом его возможных взаимодействий с другими компонентами и с максимальным приближением к условиям эксплуатации.

Рассматривая функционирование системы в целом, необходимо учитывать действие обратных связей, существующих в станочной системе. Например, износ инструмента приводит к изменению сил резания и, значит, изменению динамического состояния системы, что кроме ухудшения выходных параметров системы, может привести к интенсификации процесса изнашивания инструмента.

Следует иметь в виду, что все выходные показатели качества компонентов технологической системы, проявляются как случайные величины или функции. Стохастическая природа выходных параметров компонентов требует выяснения законов их распределения или представление этих законов через численные характеристики (математическое ожидание, дисперсия). Только в этом случае оценка выходных параметров станка или других элементов технологической системы обладает достаточной досто-

верностью и объективностью и может гарантировать работоспособность системы в течение заданного периода эксплуатации.

Область, в которой с известной вероятностью находятся выходные параметры станка, называется его областью состояний. В общем случае это многомерное пространство, поскольку для каждого станка регламентируются целый ряд показателей.

Область, в которой величины показателей установлены нормативно - технической документацией, называется областью работоспособности.

Область состояний является комплексной характеристикой качества станка, так как отражает его реакцию на внешние и внутренние воздействия. Чем меньше область состояний в сравнении с областью работоспособности, тем выше исходное качество станка, а чем медленнее она изменяется во времени, тем выше его надежность.

2. Выбор показателей для выходных параметров станка

Выбор показателей для оценки качества станка по параметру точности зависит от требований точности, предъявляемых к обрабатываемым на нем деталям, и от той доли, которую может внести станок в образование погрешностей обработки.

Выходные параметры станка должны характеризовать точность движения его формообразующих узлов, т.е. оценивать их отклонения от идеальных траекторий.

Параметры, по которым можно оценить точность движения формообразующих узлов, должны являться параметрами траектории движения некоторых опорных (фиксированных) точек этих узлов, характеризующих траекторию движения, как с качественной, так и с количественной стороны.

Опорные точки должны выбираться из условия, что их координаты в каждый момент времени определяют взаимное положение инструмента и заготовки и отражают отклонения, связанные только со станком, причем местонахождение опорных точек не должно создавать серьезных трудностей с размещением и функционированием измерительных средств.

Исходя из этих требований опорные точки, как правило, располагают на установочных базах станка, определяющих положение инструмента, заготовки или приспособления.

Число опорных точек и их расположение связано со способом обработки, определяющим характер движения его формообразующих органов (точение, фрезерование, и т.д.) и способом закрепления заготовки и инструмента (в центрах, в патроне, на столе и т. д.).

Рассмотрим типовые варианты выбора опорных точек. При этом будем использовать правую систему прямоугольных

координат станка $OXYZ$, у которой ось Z совпадает с осью главного шпинделя (или параллельна ей), а ось X всегда горизонтальна.

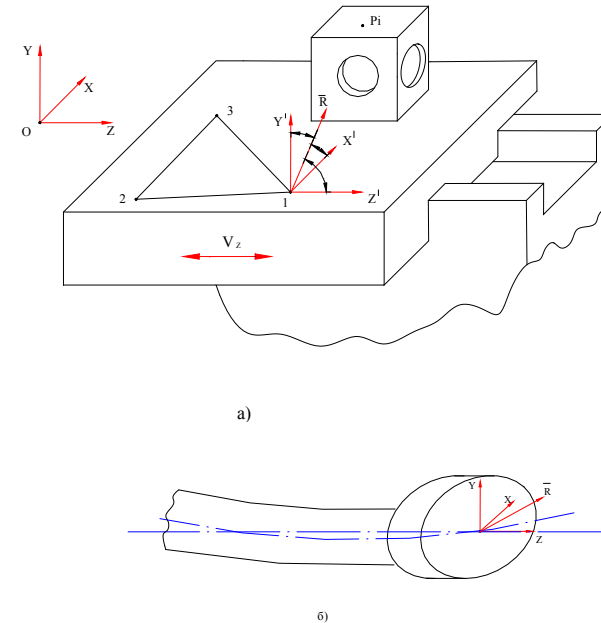


Рис. 2. Система опорных точек для фрезерного станка.

а) для стола; б) для шпинделя

Кроме того, нами может быть еще использована координатная система $O_1X_1Y_1Z_1$, связанная с какой либо установочной плоскостью столов, относительно которой всегда могут быть определены координаты точек P_i (по чертежу детали), обрабатываемой поверхности детали.

Для фрезерных, расточных, шлифовальных и др. станков точность обработки определяется точностью перемещения

стола в пространстве с закрепленной на нем заготовкой и точностными свойствами шпиндельного узла.

Для однозначного определения положения плоскости стола необходимо рассматривать траектории движения, как минимум, трех опорных точек, (рис. 2, а). Зная координаты этих точек в каждый момент времени $x_i = x(t)$, $y_i = y(t)$, $z_i = z(t)$ при движении стола вдоль направляющих, мы можем судить о положении плоскости стола с течением времени.

О положении плоскости стола в пространстве можно еще судить и по траектории движения только одной опорной точки (например, точки 1), но при условии одновременного определения положения вектора $\bar{R} = \bar{R}(t)$, перпендикулярного плоскости стола и определяемого через углы $\alpha = \alpha(t)$, $\beta = \beta(t)$, $\gamma = \gamma(t)$ (рис. 2, а).

При наличии углов наклона стола (α, β, γ) измеренные отклонения траекторий опорных точек установочной поверхности стола, не будут совпадать с отклонениями точек P_i на обрабатываемой поверхности заготовки, и причем тем больше, чем дальше эти точки отстоят от установочной плоскости стола. В этом случае, полученная с помощью опорных точек информация о положении установочной плоскости стола в пространстве, может быть использована для расчета отклонений траекторий отдельных точек обрабатываемой поверхности деталей P_i , закрепленных на столе.

В шпиндельном узле, который является основным элементов любого металлорежущего станка, искажение точности траектории его вращения влияет на положение инструмента или заготовки, установленных в шпинделе непосредственно или при помощи приспособления (патрона, центра).

Для случая, когда положение инструмента определяет плоскость переднего торца шпинделя (в патроне), его точностные свойства можно изучить с помощью трех опорных точек, размещенных на его торцевой поверхности или путем изучения траектории только одной опорной точки (а), расположенной в центре торцевой поверхности шпинделя при одновременном определении положения в пространстве вектора $\bar{R}$, проведенного из точки (а) перпендикулярно к переднему торцу шпинделя (рис. 2, б).

Для токарных станков точность обработки, в общем случае, определяется точностными свойствами суппорта, обеспечивающего прямолинейную траекторию резцу и точностными свойствами шпиндельного узла, обеспечивающего вращение заготовки относительно базовой оси станка Z .

Точностные свойства суппорта токарного станка могут быть определены отклонениями вершины резца от прямолинейной траектории при движении его вдоль оси Z (рис.3). Для измерения этих отклонений достаточно одной опорной точки, являющейся вершиной резца.

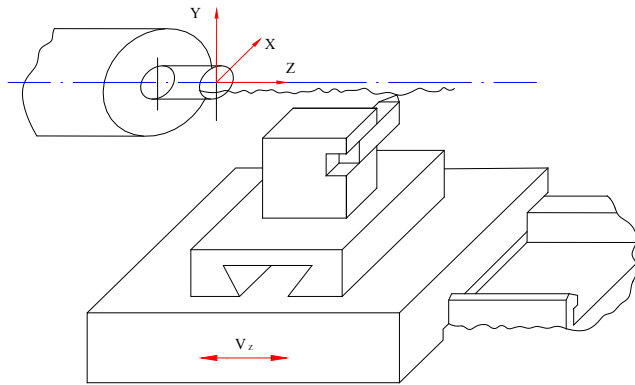


Рис. 3 Опорная точка для суппорта токарного станка

Траектория данной опорной точки будет служить достаточной характеристикой возможностей суппорта по обеспечению точности размера, формы обработанной поверхности, волнистости и др. показателей точности.

Вопросы для самоподготовки

1. Компоненты технологической системы, их выходные параметры;
2. Область состояний и область работоспособности станочного оборудования;
3. Выбор местоположения и числа опорных точек на станках;
4. Система опорных точек для фрезерного станка;
5. Система опорных точек для токарного станка

ПАРАМЕТРЫ ТРАЕКТОРИЙ ОПОРНЫХ ТОЧЕК при поступательном движении формообразующих узлов

Выясним, какие параметры траектории формообразующих узлов станка, полученные посредством изучения движения опорных точек, влияют на точность обрабатываемых деталей и описывают ее в количественном отношении.

Понятно, что отклонения в траектории движения суппорта токарного станка приведут к возникновению погрешности диаметра и формы обрабатываемой детали, а погрешности в движении стола фрезерного станка отразятся на линейном размере детали. Поэтому параметры фактической траектории узла должны, в первую очередь, характеризовать ее отклонение от заданной идеальной траектории.

Покажем типичные виды реализаций траекторий опорных точек в плоскости XZ при поступательном движении узлов, где ось Z определяет направление движения, а ось X отклонение от заданного движения (масштабы по осям X и Z различны) (рис.1).

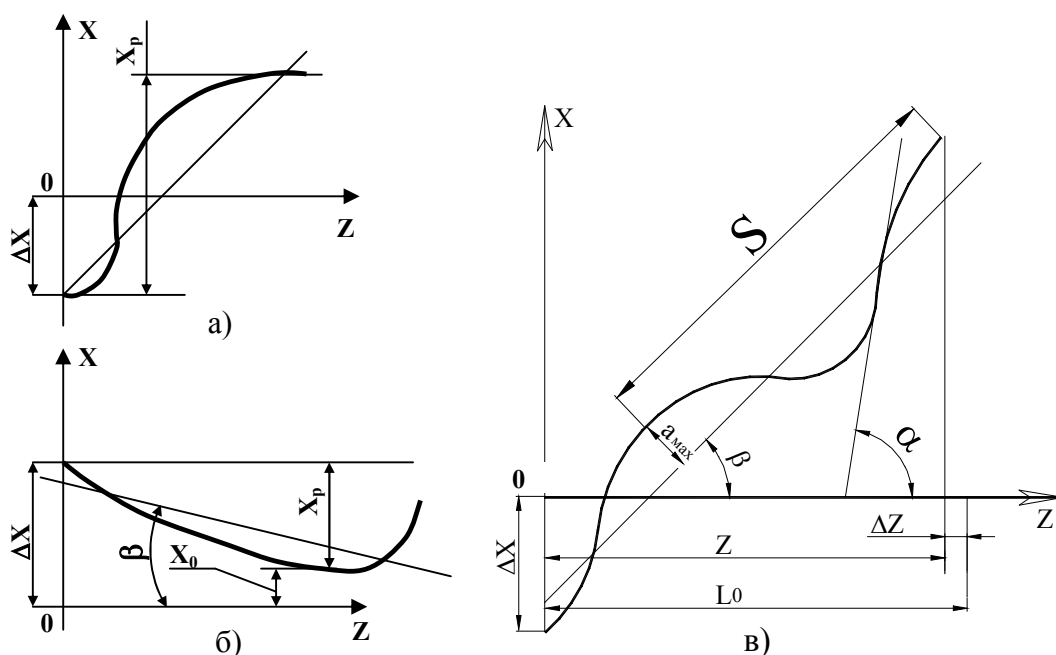


Рис.1. Типичные траектории движения и их параметры

1. Параметры, определяющие точность положения траектории.

Обозначим через $k_1, k_2, \dots, k_i$ ряд подлежащих регламентированию параметров, которые будут рассматриваться нами как выходные параметры станка.

Размах траектории $k_1 = x_p$ - параметр оценивает наибольшее расстояние между ее координатами в направлении оси X (рис.1, а - б).

Иногда точность обработки детали определяется начальным смещением траектории Δx . Так, поворотные - фиксирующие механизмы в револьверных станках и автоматах подводят узел шпинделя или заготовки в заданную позицию, после чего начинаются формообразующие движения узлов. В этом случае координата начала траектории $k_2 = \Delta x$ является одним из параметров, характеризующих смещение траектории относительно оси Z.

Смещение траектории, также, можно оценивать параметром $k_2 = x_0$ - характеризующим удаленность траектории от оси Z. За координату x_0 здесь принимается наименьшая из двух по абсолютной величине координат траектории, определяющих ее размах. При $x_0 = 0$ (за счет поднастройки станка) траектория всегда касается оси Z и все ее ординаты имеют одинаковый знак.

В некоторых случаях точность положения траектории должна быть выдержанна не только в отношении оси X, но и вдоль оси Z при приходе узла в конечную точку траектории, когда $z = L_0$ (рис.1, в).

Параметр $k_3 = \Delta z = L_0 - z$ определяет точность позиционирования конца траектории (с координатой z) относительно заданного значения L_0 . Например, в координатно-расточных станках, когда стол перемещается с позиции на позицию в соответствии с координатами обрабатываемых отверстий, параметр k_3 определяет точность размера между их осями. В токарных станках параметр k_3 будет определять точность обработки по длине ступенчатых валиков. Теперь перейдем к следующей группе параметров.

2. Параметры формы траектории

Точность формы поверхности является одним из основных требований при обработке прецизионных деталей, поскольку именно форма поверхностей во многом определяет эксплуатационные характеристики изделий.

Достижение высокой точности формы обработанных поверхностей более сложная задача, чем обеспечение точности размера и это связано с разнообразием возможных изменений формы поверхности в пределах заданного допуска на размер.

К отклонениям формы поверхностей относятся: отклонение от плоскостности (выпуклость и вогнутость плоских поверхностей); отклонение от круглости поперечного сечения цилиндрических поверхностей (овальность, огранка и т. д.); отклонения от прямолинейности оси в продольном сечении; конусообразность; бочкообразность; седлообразность; погрешности формы профиля поверхностей.

Форма траектории движения узла, как правило, определяет погрешность формы обработанной поверхности. Соответственно и регламентируемые параметры траектории должны отражать характеристики ее формы.

Для траекторий, показанных на рис. 1, в качестве параметров, характеризующих их форму, можно принять параметр $k_4 = \tan \beta$, отражающих наклон средней линии траектории по отношению к оси Z. Среднюю линию траектории находят по методу наименьших квадратов, обеспечивающего выполнение условия по которому сумма квадратов расстояний от точек траектории до средней линии оказывается минимальной.

Другим параметром формы траектории может быть величина $k_5 = |\tan \alpha_{\max}|$, характеризующая наибольший по модулю наклон траектории к оси Z.

В зависимости от требований, которые предъявляются к форме обрабатываемой поверхности, могут быть назначены и другие параметры профиля траектории.

Одной из характеристик формы (профиля) траектории является волнистость, представляющая собой периодические неровности поверхности, имеющие некоторый шаг. Волнистость поверхности занимает промежуточное положение между характеристикой ее формы и ее шероховатостью. Шаг волнистости значительно больше, чем шаг микронеровностей, характеризующих шероховатость поверхности.

Причиной появления волнистости на поверхности детали могут являться периодические составляющие на траектории движения формообразующего узла. Для поступательного движения волнистость траектории может быть связана с формой направляющих, имеющих на своей поверхности периодические волны.

Волнистость траектории можно оценить двумя параметрами: шагом $k_6 = t$ и амплитудой $k_7 = a_{\max}$ (рис.1, в).

Следует отметить, что волнистость траектории при перемещении суппорта или стола станка может быть вызвана и более сложными явлениями, чем простое копирование профиля направляющих, например, динамическими явлениями в упругой системе станка в процессе резания, когда возможно возникновение автоколебаний.

3. Параметры траектории, отражающие динамические свойства упругой системы станка

Динамическое состояние упругой системы станка оказывает влияние на микрорельеф обрабатываемой поверхности. Высокочастотные составляющие траекторий (колебания) инструмента и заготовки определяют шероховатость обработанной поверхности, а в ряде случаев и волнистость. Колебания формообразующих узлов станков характеризуются широким спектром

частот, поэтому для регламентации выходных параметров станка, связанных с шероховатостью обработанных поверхностей, целесообразно осуществлять гармонический анализ траекторий с использованием ряда Фурье.

Суть этого метода заключается в том, что любую периодическую функцию $f(\varphi)$ можно рассматривать как сумму ряда гармонических колебаний со взаимосвязанными частотами и амплитудами.

Тригонометрический ряд Фурье функции $f(\varphi)$ с периодом 2π имеет вид

$$f(\varphi) = a_0/2 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\varphi + b_n \sin n\varphi), \quad (1)$$

где $a_0, a_n, b_n, (n = 1, 2, \dots)$ - коэффициенты Фурье функции $f(\varphi)$ (постоянные числа), определяемые по выражениям

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\pi}^{\pi} f(\varphi) d\varphi, \quad a_n = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\pi}^{\pi} f(\varphi) \cos(n\varphi) d\varphi, \quad b_n = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\pi}^{\pi} f(\varphi) \sin(n\varphi) d\varphi. \quad (2)$$

При практическом применении ряда Фурье часто используют следующее свойство любой периодической функции $f(\varphi)$ с периодом 2π

$$\int_{-\pi}^{\pi} f(\varphi) d\varphi = \int_{\lambda}^{\lambda+2\pi} f(\varphi) d\varphi. \quad (3)$$

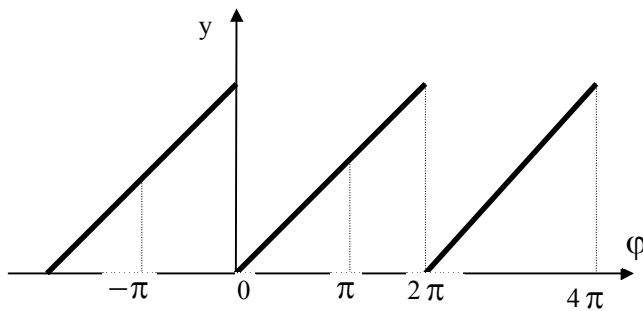


Рис. 2. Периодическая функция $f(\varphi)$ с периодом 2π

Из указанного свойства вытекает, что при вычислении коэффициентов Фурье мы можем заменить промежуток интегрирования $(-\pi; \pi)$ промежутком интегрирования $(\lambda; \lambda+2\pi)$, где λ любое число. Число λ подбирается таким образом, чтобы аналитическое выражение для функции $f(\varphi)$ имело

простой вид.

Например, функция, показанная на рис. 2 очень просто описывается на промежутке $(0; 2\pi)$, когда $\lambda = 0$. В этом случае функция будет иметь вид $y = \varphi$.

В тоже время для интервала $[-\pi; \pi]$ функция $f(\varphi)$ задается двумя выражениями

$$[-\pi; 0] \rightarrow y = |\varphi + 2\pi|, \quad [0; \pi] \rightarrow y = \varphi.$$

Заметим, что разложение в ряд Фурье может произведено для функций $f(x)$ с любым другим (отличным от 2π) периодом, и даже непериодических функций (на некотором интервале) после доопределения их четным или нечетным образом.

Для разложения в ряд Фурье периодической функции $f(x)$ периодом $2l$ необходимо сделать замену переменных по формуле $x = \frac{l\varphi}{\pi}$. Тогда функция $f\left(\frac{l\varphi}{\pi}\right)$ станет периодической по аргументу φ с периодом 2π . Ее можно разложить в ряд Фурье на отрезке $-\pi \leq \varphi \leq \pi$ по выражениям (1) и (2).

Затем после возвращения к старой переменной (x) с использованием условия $\varphi = \frac{x}{l} \pi$, $d\varphi = \frac{\pi}{l} dx$ получим

$$a_0 = \frac{1}{l} \int_{-l}^l f(x) dx, \quad a_n = \frac{1}{l} \int_{-l}^l f(x) \cos\left(\frac{\pi n x}{l}\right) dx, \quad (4)$$

$$b_n = \frac{1}{l} \int_{-l}^l f(x) \sin\left(\frac{\pi n x}{l}\right) dx.$$

Теперь формула (1) принимает вид

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cos\left(\frac{\pi n x}{l}\right) + b_n \sin\left(\frac{\pi n x}{l}\right) \right]. \quad (5)$$

Кроме того, полезно помнить, что для четных функций $f(x)$ коэффициенты b_n всегда равны нулю $b_n = 0$ и ряд Фурье содержит только "косинусы", а для нечетных функций коэффициенты $a_n = 0$ и ряд содержит только "синусы".

Во многих случаях указанные выше свойства упрощают процесс нахождения коэффициентов ряда Фурье.

Для уяснения сути гармонического анализа с использованием рядов Фурье рассмотрим пример.

Пусть после исследования плоской поверхности детали, полученной механической обработкой (строгание, шлифование), найдено некоторое уравнение $y = f(x)$, описывающее профиль микронеровностей, имеющих периодический характер с шагом $t = 2l$. Тогда если есть основание считать причиной возникновения микронеровностей упругие колебания в системе СПИД, то возникает задача по выявлению параметров этих колебаний и их причин.

Примем (условно) следующий закон периодического изменения профиля микронеровностей поверхности детали: $f(x) = x$ на интервале $[0; 2l]$.

Подвергнем эту функцию гармоническому анализу, т.е. разложим ее в ряд Фурье с ограниченным числом членов (примем $n = 2$).

Тогда на основе выражения (4) и принимая во внимание что $f(x) = x$ является нечетной функцией (поэтому $a_n = 0$), имеем:

$$a_0 = \frac{1}{1} \int_0^{21} x \cdot dx = \left. \frac{x^2}{21} \right|_0^{21} = 21; \left\{ \begin{array}{l} \text{интегр. по частям} \\ \int u dv = uv - \int v du \\ \sin x dx = d(-\cos x) \end{array} \right\}$$

$$b_n = \frac{1}{1} \int_0^{21} x \sin\left(\frac{\pi n x}{1}\right) dx = \left[-\frac{x}{\pi n} \cos\left(\frac{\pi n x}{1}\right) + \frac{1}{\pi^2 n^2} \sin\left(\frac{\pi n x}{1}\right) \right] \Big|_0^{21} = -\frac{21}{\pi n}. \quad \text{В}$$

этом случае ряд Фурье будет иметь вид

$$f(x) = 1 - \frac{21}{\pi} \sin\left(\frac{\pi x}{1}\right) - \frac{1}{\pi} \sin\left(\frac{2\pi x}{1}\right) - \frac{21}{3\pi} \sin\left(\frac{3\pi x}{1}\right) - \dots$$

Если сумму ряда S_n получать графическим способом, то хорошо видно что форму функции $f(x) = x$ в основном определяют первые три члена ряда, а остальные составляющие только приближают результат к исходной функции (рис.3).

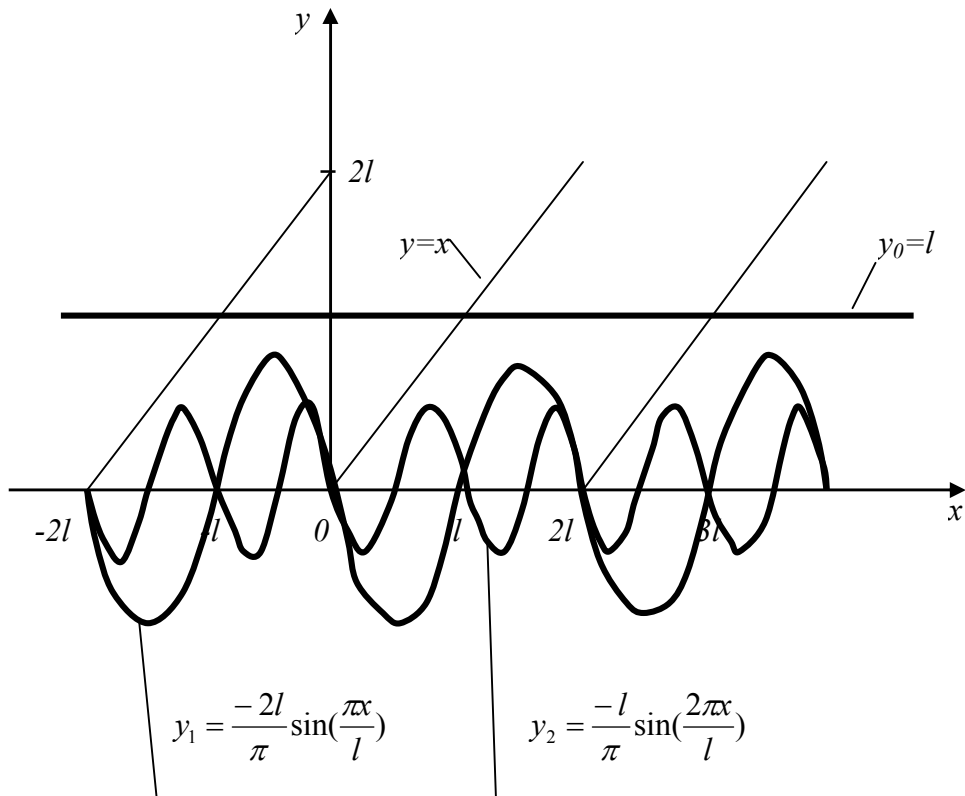
Нулевой член ряда есть постоянная величина 1, которая определяет среднее значение величины микронеровностей на детали.

Первый $\frac{21}{\pi} \sin\left(\frac{\pi x}{1}\right)$ и второй $\frac{1}{\pi} \sin\left(\frac{2\pi x}{1}\right)$ члены ряда описывают колебательные процессы, которые должны существовать во время обработки детали в системе СПИД.

Определим параметры колебаний упругой системы станка (соответствующие этим членам ряда) в реальном масштабе времени, т.е. найдем величины круговых частот ω_1 и ω_2 двух первых гармоник.

Учтем, что шаг волны первой гармоники равен $t_1 = 21$. Тогда, при известной скорости подачи v_0 (скорость резания при строгании и скорость подачи при шлифовании), можно найти период колебаний T_1 этой гармоники $T_1 = \frac{t_1}{v_0} = \frac{21}{v_0}$.

При этом частота колебаний первой гармоники f_1 составит $f_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{v_0}{21}$, а круговая частота ω_1 , соответственно будет равна $\omega_1 = \frac{2\pi}{T_1} = \frac{v_0 \pi}{1}$.



$$y_3 = l - \frac{2l}{\pi} \sin(\frac{\pi x}{l}) - \frac{2l}{\pi} \sin(\frac{2\pi x}{l})$$

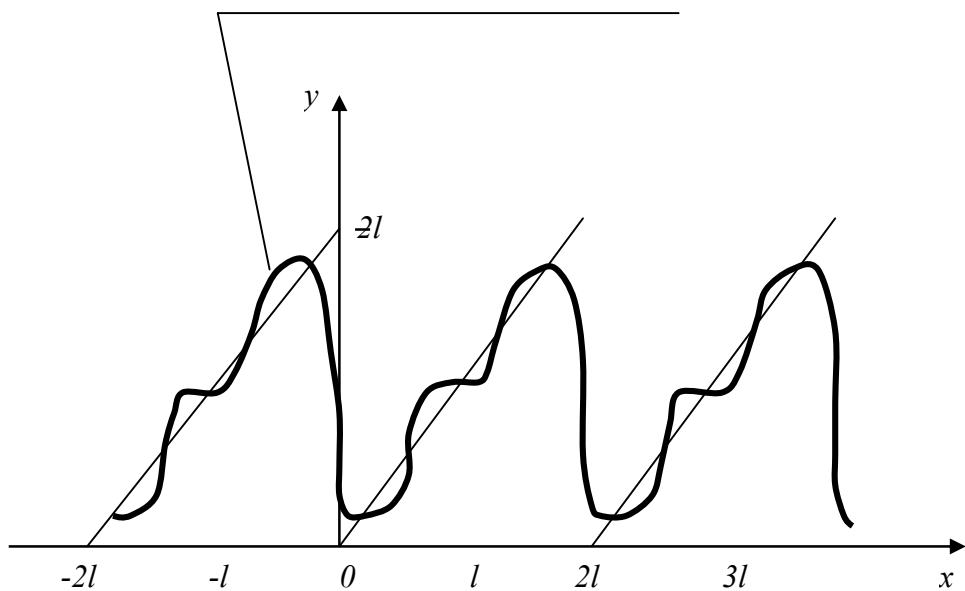


Рис.3 . Зависимость суммы ряда S_n от числа членов ряда

Амплитуда первой гармоники определяется условием $A_1 = \frac{2l}{\pi}$.

Тогда уравнение первой гармоники при известных значениях ω_1 и A_1 запишется в следующем виде

$$y_1 = A_1 \sin(\omega_1 t) = \frac{2l}{\pi} \sin\left(\frac{v_0 \pi t}{l}\right), \text{ где } t - \text{ время.}$$

Так как частоты f_n , ω_n и амплитуды A_n следующих гармоник ряда взаимосвязаны, то они должны подчиняться соотношениям

$$\begin{aligned} f_2 &= 2f_1, f_3 = 3f_1, \dots, f_n = nf_1, \\ \omega_2 &= 2\omega_1, \omega_3 = 3\omega_1, \dots, \omega_n = n\omega_1, \\ A_2 &= A_1/2, \dots, A_n = A_1/n, \end{aligned}$$

тогда уравнение n -ой гармоники в функции времени имеет вид

$$y_n = A_n \sin(\omega_n t) = \frac{A_1}{n} \sin(n\omega_1 t).$$

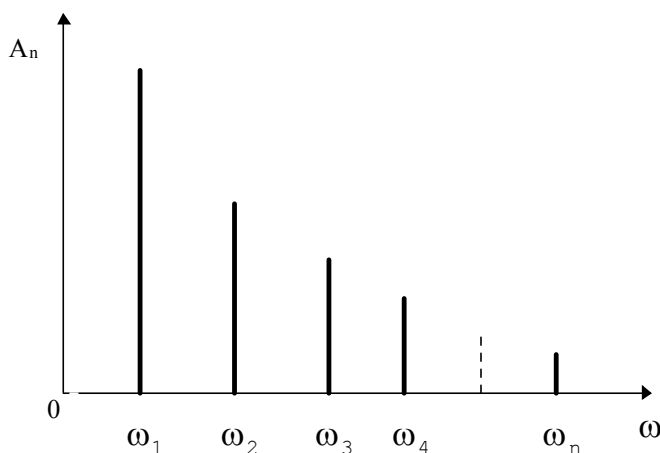


Рис. 4. Частотный спектр полигармонических колебаний, полученных разложением функции $f(x) = x$ в ряд Фурье

Полученные таким образом параметры гармоник определяют частотный спектр колебаний динамической системы станка, который представляется графически соответствующим набором дискретных линий (рис.4).

Если параметры колебаний динамической системы станка известны заранее (например, частоты ω_n и амплитуды A_n

гармоник получены экспериментально), то может быть решена и обратная задача, позволяющая выявить параметры определяющие шероховатость поверхности: - высоту микронеровностей $k_8 = a_w$ и их шаги $k_9 = t_w$ (см. рис. 1, в).

4. Вычисление приближенных значений коэффициентов ряда Фурье

Довольно часто, функциональная зависимость периодической функции $f(x)$ с периодом $2l$ или 2π , полученная в результате эксперимента, задается в виде таблицы опытных данных или в виде графика, который вычерчивается каким-либо прибором. В этих случаях коэффициенты Фурье могут быть вычислены при помощи приближенных численных методов интегрирования.

Будем рассматривать промежуток $0 \leq x \leq 2\pi$ длины 2π . Этому всегда можно добиться заменой переменных и соответствующим выбором масштаба и начала координат по оси Ox .

Разделим промежуток $[0; 2\pi]$ на k равных частей точками $x_0 = 0, x_1, x_2, \dots, x_k = 2\pi$. Тогда шаг деления будет равен $\Delta x = 2\pi / k$.

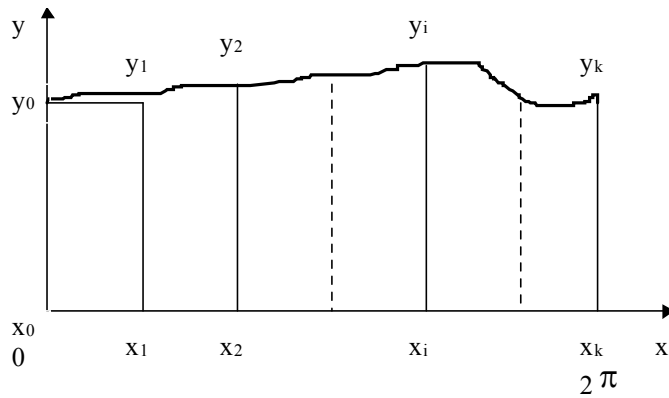


Рис. 5. Приближенный метод вычисления коэффициентов Фурье

Значения функции $f(x)$ в точках $x_0, x_1, x_2, \dots, x_k$ обозначим, соответственно, через $y_0, y_1, y_2, \dots, y_k$.

Эти значения можно определить по таблице опытных данных или по графику - измерением соответствующих ординат (рис. 5).

Тогда, приближенные значения коэффициентов Фурье, можно определить по формулам (метод

прямоугольников):

$$a_0 = \frac{2}{k} \sum_{i=1}^k y_i, \quad a_n = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k y_i \cos(nx_i), \quad b_n = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k y_i \sin(nx_i).$$

где n - порядковый номер гармоники.

Вопросы для самоподготовки

1. Параметры, определяющие точность положения траектории поступательно движущихся узлов;
2. Параметры формы траектории поступательно движущихся узлов;
3. Параметры траектории, отражающие динамические свойства упругой системы станка (для поступательно движущихся узлов). Ряды Фурье. Гармонический анализ траекторий, частотный спектр;
4. Преобразование Фурье. Спектральный анализ.

Выходные параметры станков, обрабатывающих цилиндрические поверхности

Рассмотрим детали, являющиеся телами вращения, полученными при токарной, расточной, шлифовальной и других операциях, и характеристики формы их поперечного сечения (овальность, огранку).

Покажем профиль обработанной цилиндрической детали заданного радиуса R_0 с искажением формы поперечного сечения в виде огранки 1, волнистости 2 и шероховатости 3

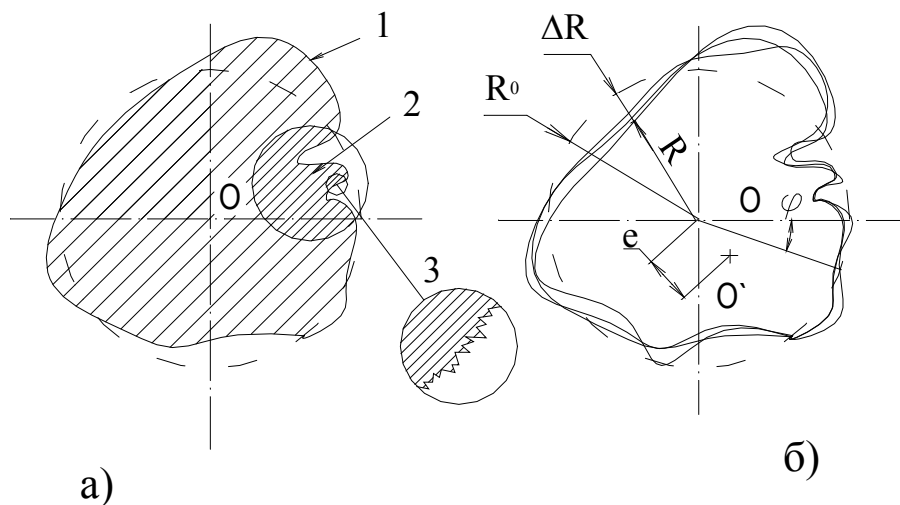


Рис. 6. Траектории опорных точек при образовании цилиндрических поверхностей:
(рис. 6, а). а) профиль поперечного сечения детали; б) траектории движения опорной точки на шпинделе.

Рядом покажем траекторию движения опорной точки, расположенной на торце шпинделя, на том же радиусе R_0 (рис. 6, б). При этом траектория движения опорной точки повторяет этот контур, хотя и не идентична ему полностью, поскольку на геометрический профиль детали влияет и траектория движения инструмента.

Дальнейший анализ круговых траекторий опорной точки удобно осуществлять, рассматривая отклонение ΔR текущего радиуса поверхности R от номинального R_0 в функции угла поворота шпинделя $f(\varphi) = R_{(\varphi)} - R_0 = \Delta R(\varphi)$.

Разложим данную функцию в ряд Фурье, но представим его в другой форме записи.

Для этого вместо коэффициентов Фурье a_0 , a_n и b_n введем постоянные C_0 , C_n и φ_n ,

такие что $\frac{a_0}{2} = C_0$, $a_n = C_n \sin \varphi_n$, $b_n = C_n \cos \varphi_n$, причем $\varphi_n = \arctg(a_n / b_n)$.

После подстановки в (1) получим

$$f(\varphi) = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \{ \cos(n\varphi) \sin \varphi_n + \sin(n\varphi) \cos \varphi_n \}$$

$$f(\varphi) = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \sin(n\varphi + \varphi_n), \quad (1)$$

где C_n - амплитуда n -ой гармоники; φ_n - начальная фаза n -ой гармоники; n - порядковый номер гармоники.

Если φ_n - угол, то $\varphi_n = \omega_n t$ (при $\omega_n = \text{const}$)

$$f(t) = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \sin(n\omega t + \varphi_n).$$

Нулевой член разложения C_0 является средним значением функции $f(\varphi)$ за период 2π

$$C_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\varphi) d\varphi = \Delta R_{\text{ср}},$$

поэтому C_0 - среднее значение погрешности размера.

Первый член разложения $C_1 \sin(\varphi + \varphi_1)$ выражает несовпадение центра вращения шпинделя O_1 с геометрическим центром траекторий O , т.е. определяет эксцентриситет $e = OO_1 = C_1$, который определяет отклонение положения обработанных поверхностей (рис. 7, а).

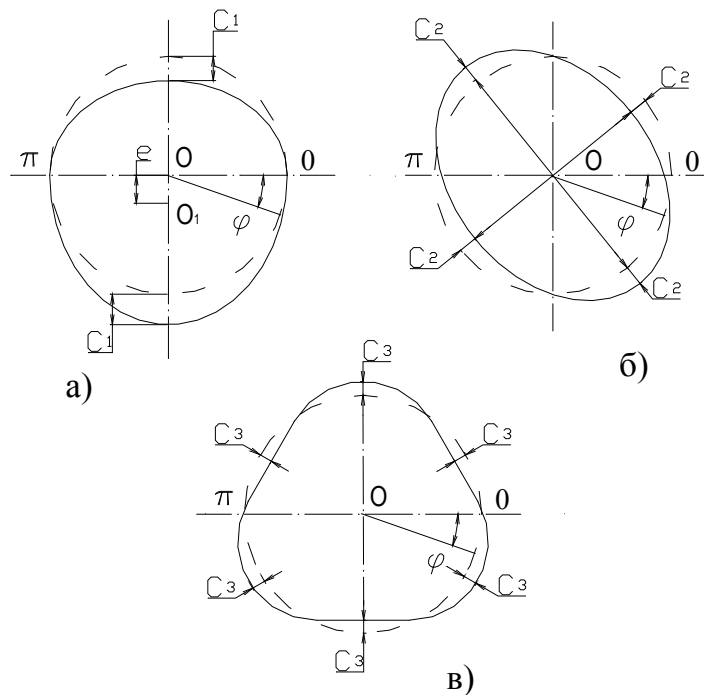


Рис.7 Геометрическое представление ошибок круговых траекторий членами ряда Фурье (при $\varphi_n = 0$): а) эксцентриситет; б) овальность; в) огранка с трех вершинным профилем

Остальные члены ряда определяют форму поперечного сечения обработанной детали.

Так второй член ряда $C_2 \sin(2\varphi + \varphi_2)$ выражает овальность профиля (рис. 7, б), третий $C_3 \sin(3\varphi + \varphi_3)$ огранку с трехвершинным профилем (рис. 7, в) и т.д.

Последующие члены ряда начнут выражать волнистость и далее шероховатость поверхности.

Следует иметь в виду, что требования к точности формы обработанных поверхностей не включают оценку профиля по фазе, поэтому член φ_n в формуле (1а) можно не учитывать.

Таким образом, при обработке цилиндрических деталей регламентировать выходные параметры станка, влияющие на форму поверхности, можно следующим образом: $k_{10} = C_0$, $k_{11} = C_1$, $k_{12} = C_2$ и т.д. до k_{16} , или сами гармоники $k_n = C_n \sin(n\varphi)$.

Число реально учитываемых членов ряда зависит от требований, предъявляемых к поверхности изделия.

Форма траектории вращающихся шпинделей может быть достаточно сложной и содержать как периодические, так и аperiodические составляющие.

Начало движения вала шпинделя из состояния покоя (из точки О) до заданной угловой скорости $\omega_{ш}$ происходит, как правило, по спиральной траектории, хотя может иметь и более сложный характер (рис.8) .

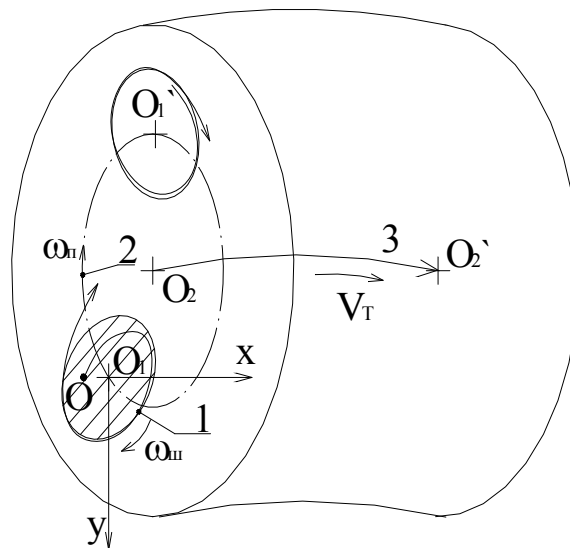


Рис. 8. Схема траектории движения центра шпинделя: 1 - движение за каждый оборот; 2 - планетарное движение; 3 - тренд шпиндельного узла.

В период установившегося движения наиболее типично движение центра шпинделя по эллиптической траектории (орбите) 1 с центром в точке O_1 , которая может содержать и высокочастотные составляющие. Именно эта траектория и описывается рядом Фурье.

В ряде случаев возможно и планетарное движение шпинделя (прецессия) 2 с центром в точке O_2 с угловой скоростью ω_{π} меньшей, чем угловая скорость шпинделя $\omega_{\text{ш}}$. Такое явление наблюдается в аэростатических подшипниках.

В результате этих движений центр шпинделя может находиться в пределах площади, учитывающей и его движение по эллиптической траектории, и планетарное движение, образуя некоторую область состояний см. (рис.8).

По мере работы шпинделя могут меняться параметры, влияющие на характер его движения (например, изменение температуры). Тепловые деформации шпинделя и корпусных деталей могут привести к тому, что вся область состояний шпинделя будет смещаться по некоторой траектории 3 со скоростью v_T относительно неподвижной системы координат станка.

Суммарная область состояний должна учитывать возможное положение шпинделя за весь период работы станка, до стабилизации тепловых полей. Тогда сложное движение центра шпинделя может быть описано нулевым членом разложения Фурье, который в этом случае будет являться функцией времени. Таким образом, положение траекторий опорных точек в своей области состояний имеет некоторую неопределенность.

При наличии спектра силовых и тепловых воздействий на станок изменение положения его узлов проявляется как случайные функции, которые при испытании дают совокупности (ансамбли) траекторий опорных точек. Такие совокупности характеризуют стохастическую природу этого явления. Рассмотрим типичные совокупности траекторий применительно к поступательному движению рабочих органов.

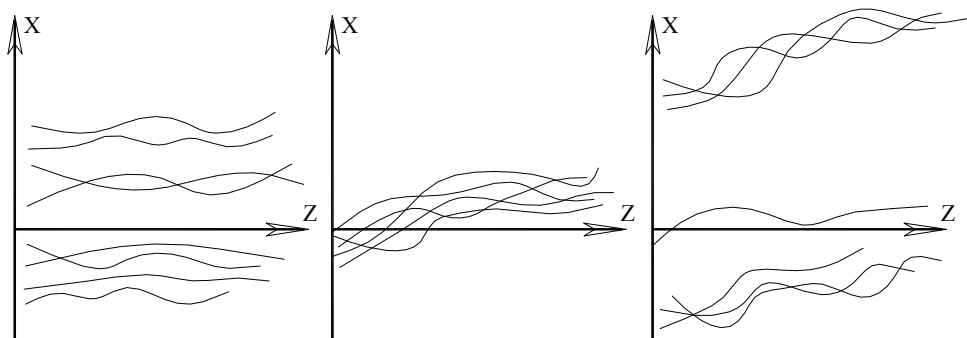


Рис. 9. Совокупности траекторий опорных точек при поступательном движении узлов

Широкополосные совокупности траектории характерны для мало жестких узлов, когда основное влияние на смещение траектории относительно неподвижной оси координат, оказывают внешние силовые воздействия (рис.9, а).

Узкополосные ансамбли траекторий характерны при превалирующем влиянии геометрических погрешностей направляющих. Дисперсия, связанная с силовым воздействием на узел, играет в этом случае второстепенную роль (рис.9, б).

Тепловые деформации узлов, как правило, вызывают миграцию ансамбля в пределах области состояний (рис.9, в).

Каждая реализация в ансамбле отражает параметры точности только одной детали, а характеристика всего ансамбля реализаций отражают точностные показатели всей партии обработанных на станке деталей.

Преобразования Фурье. Спектральный анализ

Следует иметь в виду, что гармонический анализ на основе рядов Фурье применим только для исследования гармонических и полигармонических колебаний.

Однако колебательные явления, происходящие при работе станков более разнообразны, и часто содержат различные переходные непериодические и случайные процессы. Основное их отличие в том, что они не могут быть представлены дискретным рядом Фурье.

Для исследования случайных непериодических процессов выполняют частотный (спектральный) анализ на основе интеграла Фурье. В то время как разложение в ряд Фурье дает представление периодической функции (с периодом $2l$) в виде суммы гармонических колебаний с дискретными частотами ($n \frac{\pi}{l}$, $n = 1, 2, 3, \dots$), интеграл Фурье представляет функцию $f(x)$ как бы в виде суммы бесконечно большого числа колебаний с непрерывно меняющейся частотой. В этом случае можно говорить, что интеграл Фурье дает разложение в непрерывный спектр, позволяющий выявить частоты, на которых колебания наиболее интенсивны.

Суть спектрального анализа колебаний заключается в следующем. Если с помощью какой-либо аппаратуры непрерывно регистрировать колебания $s(t)$, возникающие при работе механической системы (например, записывать на осциллограмму), представляющие собой сложный спектр, состоящий из набора составляющих $A_n \sin(\omega_n t + \varphi_n)$, возбуждаемых отдельными элементами системы и помехами $\theta(t)$, а затем подвергнуть их преобразованию Фурье, то получится непрерывный спектр колебаний в функции частоты $A(\omega)$ (рис.10.).

Пики на спектре показывают, колебания каких частот преобладают в данной временной реализации. Применительно к станкам это могут быть собственные частоты колебаний узлов привода и несущей системы и частоты вынужденных колебаний от какого-либо источника (двигателя, фундамента и пр.).

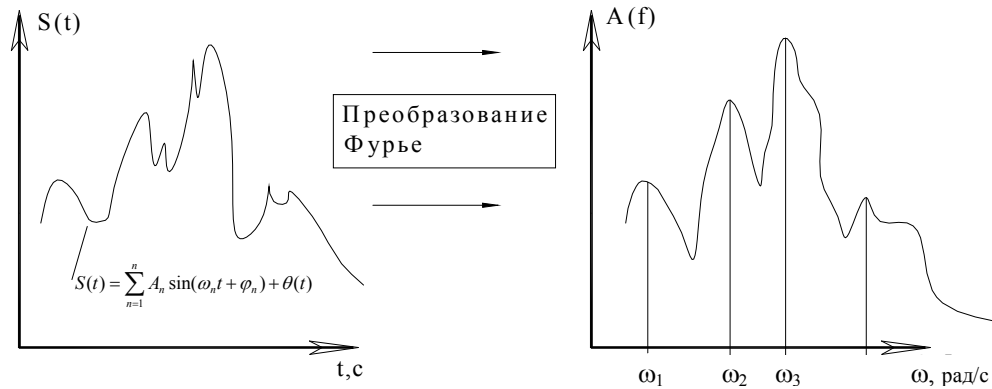


Рис. 10. Случайные колебания и их частотный спектр

Выяснить какие частоты относятся к собственным колебаниям, иногда удастся простым способом: путем изменения частоты вращения шпинделя.

Приборы, осуществляющие спектральный анализ называются анализаторами спектра. Измерения проводятся по полосам частот с использованием специальных фильтров, которые пропускают только те составляющие спектра, частоты которых лежат в определенных пределах $\Delta\omega$. В этом случае сигнал на выходе фильтра состоит суммы моногармонического сигнала и уровня шума $P(t)$.

Вопросы для самоподготовки

1. Анализ круговых траекторий с использованием ряда Фурье;
2. Область возможных состояний шпинделя за весь период работы станка;
3. Типичные области состояний при поступательном движении рабочих органов.
4. Преобразование Фурье. Спектральный анализ.

Выходные параметры станков, определяющие точность взаимного положения поверхностей

Взаимное положение обрабатываемых поверхностей и точность их формы, во многих случаях обусловлено точностью взаимосвязанных относительных движений и положений формообразующих органов станков.

К отклонениям расположения обработанных поверхностей относятся:

- отклонения от параллельности и перпендикулярности плоскостей и осей;
- отклонение от соосности и смещение осей;
- торцевое и радиальное биение цилиндрических поверхностей;
- отклонение от симметричности детали и др.

Рассмотрим типичные примеры, когда выходные параметры станка должны учитывать точность взаимного положения формообразующих узлов станка или соотношение их движений.

Так для координатно-расточного станка нарушение перпендикулярности оси шпинделя к плоскости стола приводит к отклонению от перпендикулярности оси обработанного отверстия к базовой плоскости детали (рис.1, а).

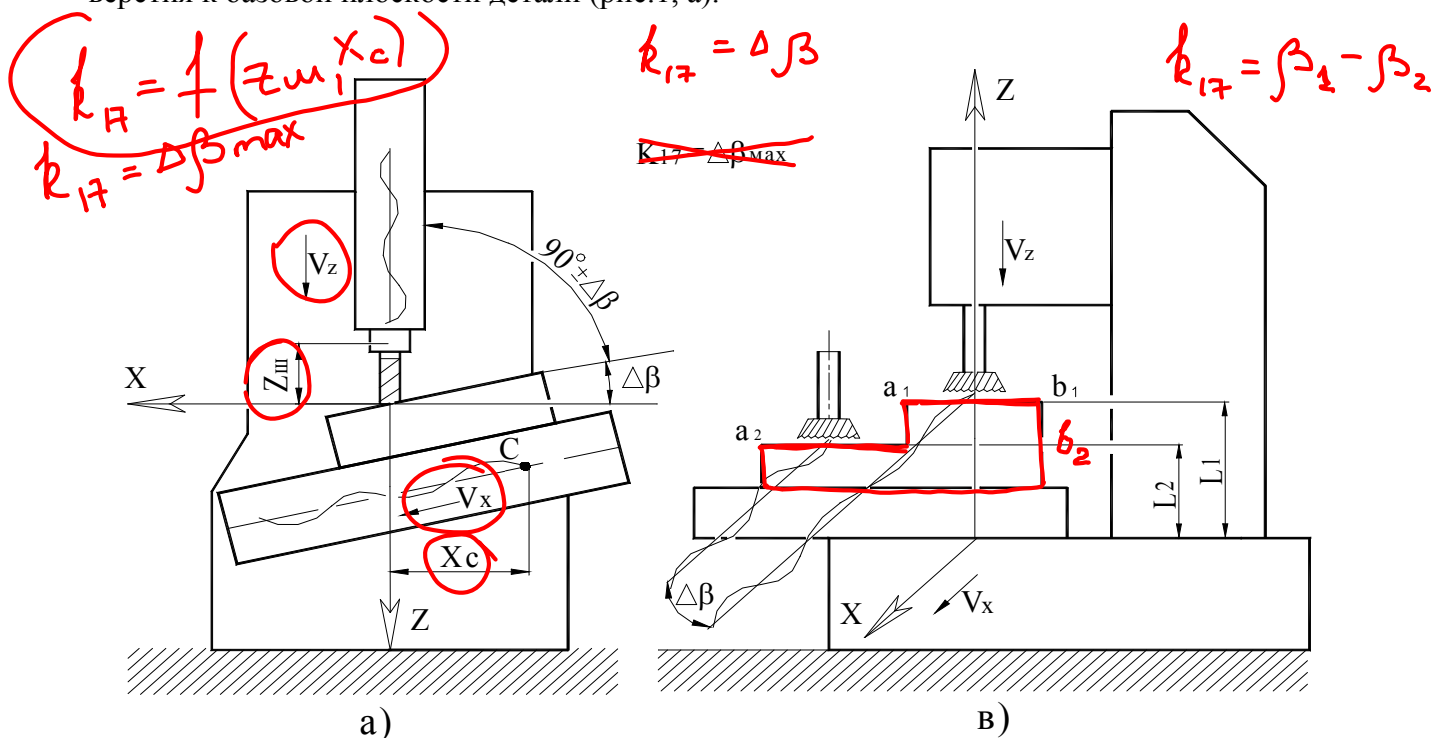


Рис.1. Отклонение положения поверхности для координатно-расточного станка

Выходным параметром станка k_{17} оценивающим это отклонение, может служить угол $\Delta\beta$ или его составляющие в плоскостях OZX, OZY - $\Delta\beta_x$ и $\Delta\beta_y$. Значение параметра $k_{17} =$

$\Delta\beta$ зависит от положения шпинделя (координата $z_{ш}$) и стола (координата x_c). При этом выходной параметр k_{17} проявляет себя как некая функция $k_{17} = f(z_{ш}, x_c)$, образующая некую область состояний этого параметра.

Обычно из всех значений этой области в качестве параметра следует выбрать максимальное значение отклонений $k_{17} = \Delta\beta_{\max}$.

При обработке с одной установки нескольких поверхностей, параметры, определяющие точностные характеристики станка, находятся в различных зонах его области состояний. Например, при фрезеровании на детали ступенчато расположенных параллельных плоскостей необходима перестановка шпиндельной бабки (рис.11, б). При перестановке шпиндельной бабки изменится и траектория движения стола с заготовкой, поскольку на этот узел будет действовать уже другая система сил и сам шпиндель может занять новое (отличное от первоначального) положение по отношению к столу. В итоге наклон траектории стола изменяется $k_4 = \beta_2$ в сравнении с первоначальным наклоном $k_4 = \beta_1$ и возникает отклонение от параллельности обработанных поверхностей a_1b_1 и a_2b_2 . Параметром станка, оценивающим эту погрешность, может служить величина $k_{17} = \Delta\beta = \beta_1 - \beta_2$.

При нарезании зубчатых колес, резбонарезании, обработки фасонных поверхностей и др. требуются точные соотношения в движениях формообразующих узлов станка. В этом случае к рассмотренным характеристикам траекторий добавляется в качестве выходного параметра станка точность передаточного отношения u , связывающего между собой скорости формообразующих узлов, например, по осям X и Z - $u = v_x / v_z$.

Так при обработке фасонных, например конических поверхностей тел вращения, методом двух подач, обязательно должно быть выдержано определенное соотношение скоростей (или перемещений) в продольном Z и поперечном X направлениях (рис. 2).

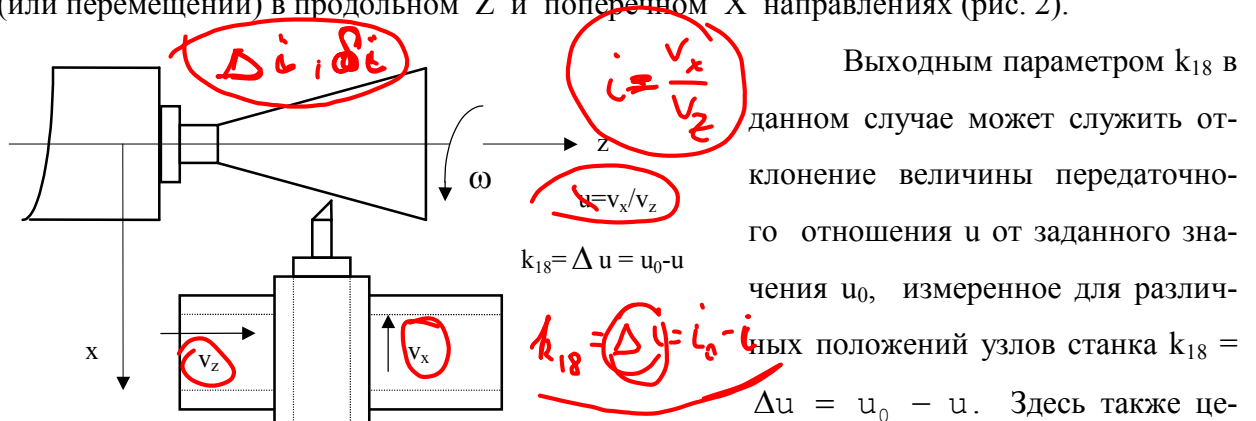


Рис. 2. Обработка конической поверхности методом двух подач

максимальное значение отклонения $k_{18} = \Delta u_{\max}$.

При обработке одной фасонной поверхности параметр k_{18} определяет точность ее формы, а при обработке нескольких поверхностей еще и точность их расположения.

В отдельных случаях для оценки взаимного расположения формообразующих узлов станка может потребоваться несколько показателей, а для согласования их движений несколько характеристик законов движения.

Например при нарезании косозубых зубчатых колес червячной фрезой в определенной взаимосвязи должны находиться сразу четыре исполнительных движения станка, участвующих в двух сложных формообразующих движениях станка: движении резания $\Phi_v (B_1, B_2)$ и движении подачи $\Phi_s (\Pi_3 B_4)$, где B_4 - дополнительное вращение заготовки. Точность осуществления заданных законов этих движений является важнейшим параметром точности данного станка.

Выбор номенклатуры выходных параметров

При выборе номенклатуры выходных параметров станка зададим положение установочной поверхности узла вектором.

Этот способ особенно удобен для шпиндельного узла, когда все изменения положения плоскости его переднего торца (определяющей и положение заготовки) могут быть заданы координатами точки пересечения оси шпинделя с торцевой плоскостью (координаты a, b, c) и положением вектора R , перпендикулярного этой плоскости (углами α, β), рис.3.

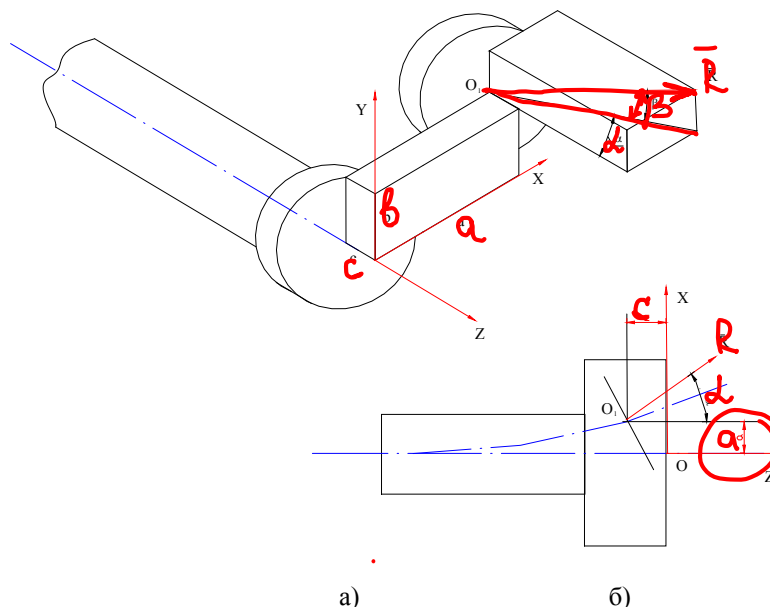


Рис. 3. Выходные параметры шпиндельного узла

Таким образом, положение шпиндельного узла в пространстве можно определить пятью параметрами. Иногда эту задачу можно свести к плоской. Например, для токарного станка на точность обработки основное влияние оказывают перемещения шпинделя в плоскости XZ .

Поэтому здесь достаточно трех показателей: координат a и c , точки приложения характеристического вектора R и угла его наклона α (рис.3, б).

В этом случае отклонение координаты a определяет форму обрабатываемой цилиндрической поверхности в поперечном сечении и может быть определено одним или несколькими членами ряда Фурье.

Координата c определяет точность обработки торцовых поверхностей, а изменение угла α влияет на точность формы поверхности вдоль оси Z (конусность и др.).

Номенклатура выходных параметров станочного оборудования зависит от метода обработки и требований к точности обрабатываемых деталей. Число выходных параметров при высоких требованиях к точности обработки может быть достаточно велико (до 25), но это не должно служить препятствием для поведения испытаний, если учесть следующие положения:

1. Применение ЭВМ позволяет перерабатывать большой объем информации, и свести его к ограниченному числу выходных показателей.

2. Предварительный анализ схемы обработки, а в ряде случаев и предварительный эксперимент, могут позволить выделить из всей номенклатуры выходных параметров, только несколько основных, оказывающих существенное влияние на точностные свойства станка.

Система рассмотренных выходных параметров позволяет дать достаточно полную оценку точностных качеств станка. Такой подход оценки уровня качества станков, когда используется система отдельных (единичных) показателей качества, описывающих точность траекторий формообразующих узлов, называется дифференциальным методом. Этот метод считается основным.

Однако, для оценки результатов испытаний, целесообразен и другой комплексный (интегральный подход), когда оценивается качество обработки одной типовой детали и по ее геометрическому образу, делается оценка погрешностей, связанных с конструкцией станка. Этот метод используется как дополнительный к основному.

Вопросы для самоподготовки

1. Параметр, характеризующий точность взаимного положения поверхностей при обработке детали на координатно-расточном станке (отклонение от перпендикулярности оси и плоскости);
2. Параметр, характеризующий точностные свойства фрезерного станка при обработке ступенчато расположенных параллельных плоскостей;
3. Номенклатура выходных параметров, характеризующих точностные свойства шпиндельного узла токарного станка.
4. Суть дифференциального и интегрального методов оценки уровня качества станочного оборудования.

Лекция 7 ИЗНОС СОПРЯЖЕНИЙ СТАНКОВ

Износ сопряжений формообразующих узлов станков приводит к изменению их взаимного положения, что отражается на параметрах траекторий движения опорных точек и выходных параметрах станка в целом. Форма и величина износа направляющих поступательного движения станка может быть определена аналитически.

Основной характеристикой изнашивания деталей является линейный износ u , который измеряется в направлении, перпендикулярном поверхности трения. В силу ряда причин износ поверхности может быть неравномерным.

Для полной характеристики величины износа детали необходимо знать распределение износа по поверхности трения $u(x, y)$.

Задачу расчета износа направляющих решают исходя из следующих предположений:

1. Износ материалов в заданной точке поверхности подчиняется следующей закономерности

$$u = kpS,$$

где S - путь трения; p - давление в рассматриваемой точке; k - коэффициент износа материала, показывающий износ в мкм при действии давления в 1 МПа на протяжении пути трения в 1000 м.

2. Эпюра давления в сопряжении по длине стола l_0 (суппорта) известна $p = f(l_0)$ и при изнашивании сохраняется.

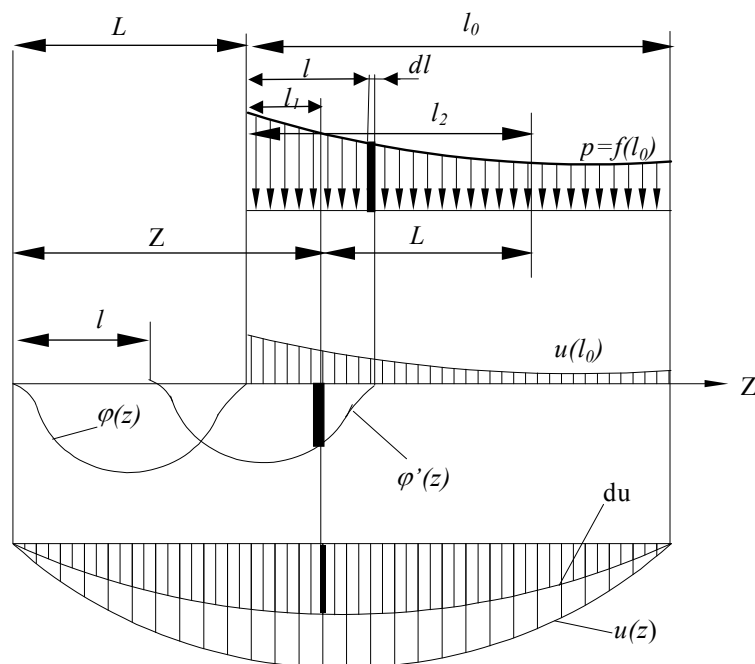


Рис.1. Схема расчета износа направляющих

3. Известна кривая распределения перемещений суппорта по длине направляющих станины $\varphi(z)$. Обычно эта кривая привязана к левой крайней точке суппорта.

Обозначим линейный износ направляющих суппорта $u(l_0)$ и станины $u(z)$, l_0 - длина направляющих суппорта, L - ход суппорта (рис.1).

Величина износа направляющих суппорта $u(l_0)$ определяется просто. Каждая точка направляющих суппорта проходит один и тот же путь трения S с постоянным давле-

нием, определяемым условием $p = f(l_0)$. Поэтому кривая износа $u(l_0)$ будет подобна эпюре давления и описывается условием

$$u(l_0) = k_1 \cdot S \cdot f(l_0).$$

Для отыскания величины износа станины $u(z)$ рассмотрим, как изнашивается точка направляющих станины с координатой (z) . В этой точке станина изнашивается под действием участка эпюры давления длиной равной ходу стола L (см. рис.1). Выделим на этом отрезке элементарный участок dl . Каждый элементарный участок эпюры давления с координатой l изнашивает направляющую станины на величину пропорциональную $pdl = f(l) dl$.

Чтобы определить элементарный износ du , вызванный воздействием величины pdl , необходимо еще определить путь трения, приходящийся на точку станины с координатой z . Для этого воспользуемся кривой распределения $\varphi(z)$. Так как уравнение этой кривой привязано к перемещению левой точки суппорта ($l=0$), то для точки суппорта с координатой l уравнение кривой принимает вид

$$\varphi(z)' = \varphi(z-1)$$

и доля пути трения S , приходящаяся на точку станины с координатой z будет равна

$$S' = S\varphi(z-1).$$

Тогда элементарный износ станины в точке z от воздействия элемента эпюры давления pdl составит

$$du = k_2 S \cdot \varphi(z-1) \cdot f(l) dl.$$

Износ в точке z от воздействия всего участка эпюры давления от l_1 до l_2 определяется интегрированием

$$u = k_2 \cdot S \cdot \int_{l_1}^{l_2} \varphi(z-1) \cdot f(l_0) dl.$$

Полученная выше формула износа станины носит обобщенный характер, т. к. она учитывает влияние основных факторов износа. По ней можно проанализировать влияние на износ станины каждого из них. Например, из формулы видно, что форма изношенной поверхности станины обуславливается неравномерностью эпюры давления $f(l_0)$ и рациональностью загрузки станка (кривая $f(z)$). Поэтому при большом ходе суппорта, когда $L > l_0$ для получения более равномерного износа по длине направляющих станины, оказывается нецелесообразной загрузка станка обработкой коротких деталей, т.к. в этом случае форма поверхности направляющих станины приближается к форме кривой $f(z)$. При малых ходах суппорта ($L < l_0$) форма изношенной поверхности станины приближается к форме эпюры давлений $f(l_0)$ и тут надо стремиться к равномерности эпюры давлений (конструктивно).

ляющей станины движется средняя точка (с) направляющей суппорта ($l = l_0/2$) и ее траектория копирует форму направляющих станины рис.3.

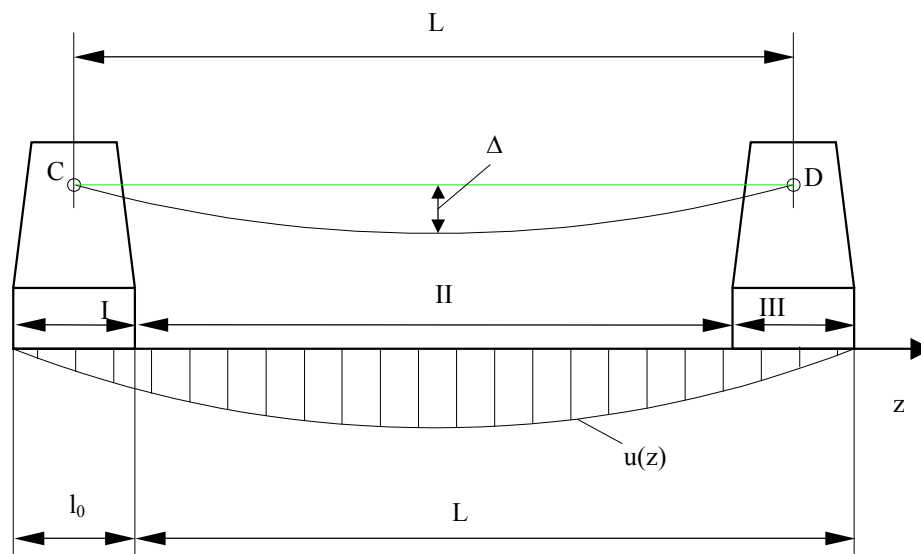


Рис.3. Траектория движения стола при ($L \gg l_0$)

При значениях L и l_0 близких друг к другу основную роль в искажении траектории играют крайние участки износа (I и III) направляющих станины. В этом случае можно рассматривать движение суппорта как плоскопараллельное, состоящее из поступательного и вращательных движений, когда только крайние точки суппорта A и B скользят по изношен-

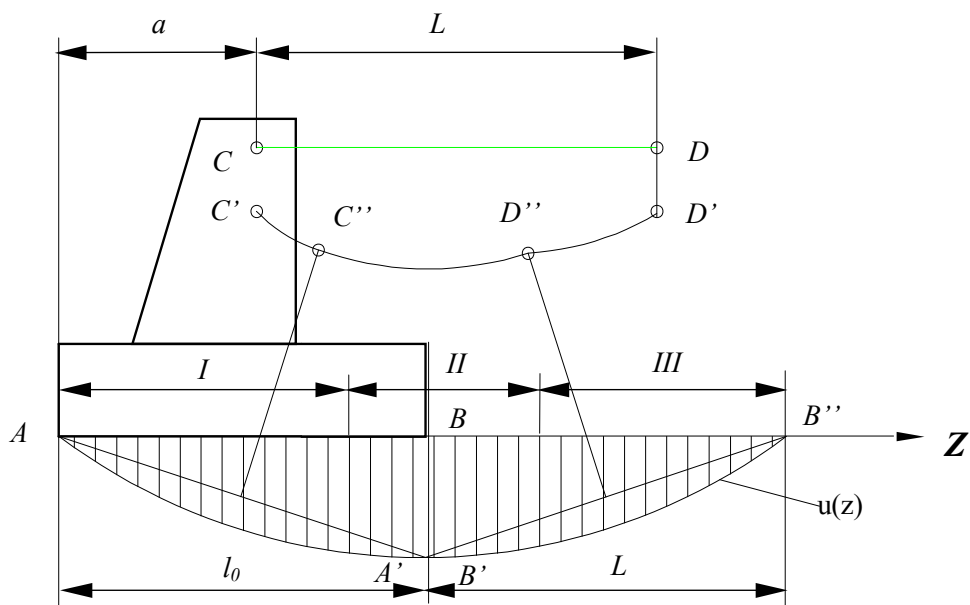


Рис.4 Траектория движения стола при ($L \approx l_0$)

ной поверхности направляющих станины рис.4 с нарушением условия касания по всей поверхности трения.

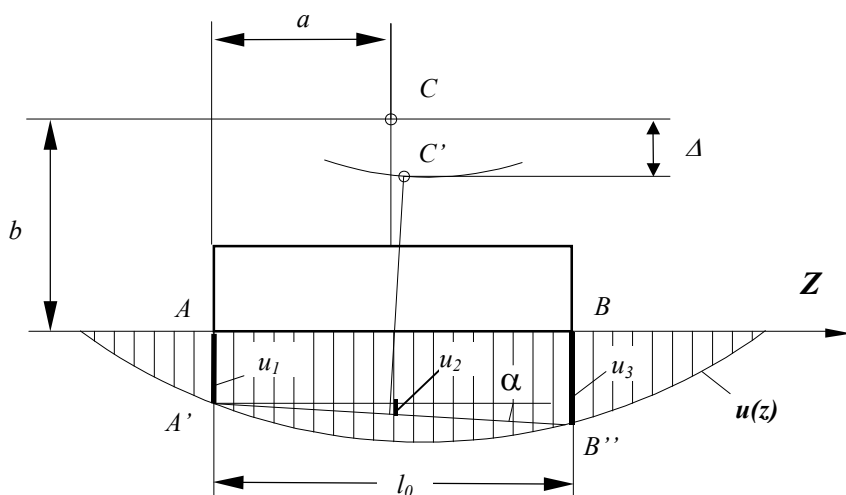


Рис.5. Расчет отклонения траектории стола при ($L = l_0$)

Рассмотрим промежуточное положение стола. В результате износа точка (C) переместится в положение C'. Отклонение траектории этой точки Δ является результатом опускания стола на величину износа $u_1 = AA'$ и поворота ползуна на угол α рис. 5.

Величина отклонения траектории от прямой

$$\Delta = u_1 + u_2; \quad \text{где } u_2 = \frac{a(u_3 - u_1)}{l_0} = atg\alpha, \quad tg\alpha = \frac{(u_3 - u_1)}{l_0}.$$

При расчете отклонений траектории опорных точек столов следует учитывать, что стол перемещается как минимум по трем граням направляющих рис. 6. При этом каждая грань может иметь свою форму изношенной поверхности. В результате одновременный износ всех граней оказывает суммарное влияние на параметры траектории движения опорной точки стола.

Рассмотрим влияние одновременного износа трех граней направляющих (a, b, c) на точность перемещения суппорта токарного станка.

При износе направляющих резец изменяет свое положение и точность обработки падает. При этом именно неравномерность износа направляющих станины приводит к искажению траектории суппорта, поскольку равномерный износ направляющих станины может быть полностью компенсирован за счет соответствующей начальной установки резца. По той же причине износ направляющих суппорта практически не оказывает влияния на точность обработки.

Отклонение траектории Δ опорной точки связанной с вершиной резца складывается из:

1 - горизонтального смещения суппорта на величину $x_1 = u_b \sin \beta - u_a \sin \alpha$;

2 - горизонтального смещения суппорта в результате его поворота на величину

$$x_2 = (y - u_c)H/B,$$

где y - величина опускания суппорта на передней направляющей (грани a и в) $y = u_b \cos \beta + u_a \cos \alpha$.

Следовательно, изменение радиуса детали, если не учитывать величину (y) в виду ее малости, будет

$$\Delta = x_1 + x_2 = u_a \left(\frac{H}{B} \cos \alpha - \sin \alpha \right) + u_b \left(\frac{H}{B} \cos \beta + \sin \beta \right) - \frac{H}{B} u_c$$

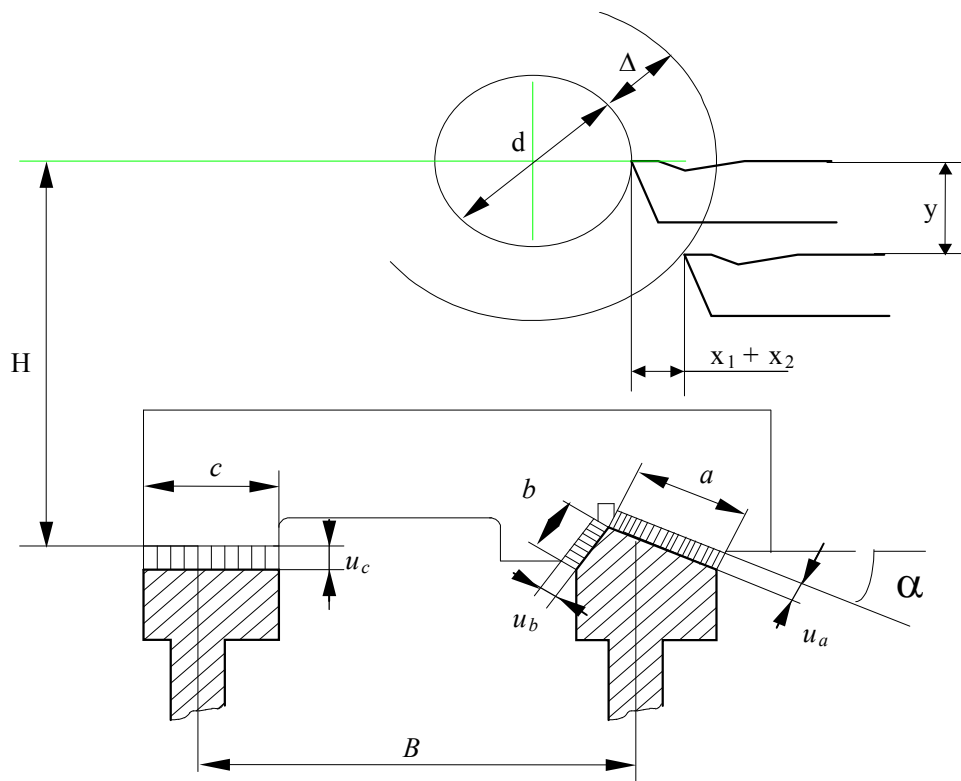


Рис.6. Суммарное влияние износа граней направляющих станины

При значениях $\alpha = 25^\circ$, $\beta = 65^\circ$, $H/B = 0,6$ получим $\Delta = 0,12u_a + 1,16u_b - 0,6u_c$.

Здесь еще не учитывается изменение износа по длине суппорта.

Приведенное выше выражение позволяет рассчитать изменение начальной траектории суппорта Δ , которое произошло в результате совместного износа направляющих. Значение величины Δ линейно зависит от времени. Поэтому можно говорить и о скорости отклонения траектории $\gamma = \frac{\Delta}{t}$.

Вопросы для самоподготовки

1. Постановка задачи и определение износа направляющих суппорта;
2. Определение износа направляющих станины;
3. Влияние формы износа направляющих станины на траекторию движения суппорта;
4. Влияние одновременного износа всех граней направляющих станины на точность перемещения суппорта.

Основные принципы программного метода испытания оборудования

Основная цель испытания - оценка степени сопротивляемости станка спектру эксплуатационных воздействий, и выявление области состояний для регламентированных выходных параметров.

В качестве выходных параметров должны быть выбраны показатели точности движения формообразующих узлов. Эти движения характеризуются траекториями движения опорных точек.

Опорные точки станка должны располагаться на посадочных поверхностях станка, предназначенных для крепления приспособления, заготовки и инструмента.

Условия эксплуатации станка и их стохастическая природа учитывается тем, что испытания проводятся при одновременном действии силовых и тепловых факторов, посредством программного нагружения станка специальными устройствами.

Условия испытания станка должны отражать весь спектр эксплуатационных воздействий. Поэтому программа испытаний предусматривает большое число циклов, каждый из которых отражает одну из комбинаций возможных воздействий на станок.

Испытания проводятся в специально оборудованных испытательно-диагностических центрах. При этом ЭВМ обрабатывает информацию о параметрах траектории, для всех реализаций программного нагружения станка.

ЭВМ должна выполнять следующие функции:

- а) обрабатывать и хранить результаты испытаний;
- б) обрабатывать априорную информацию о нагрузках, условиях эксплуатации, износостойкости материалов и о других характеристиках данной модели станка;
- в) осуществлять программное управление режимами работы станка и нагрузочными устройствами, обеспечивающими имитацию внешних воздействий (изменение величины и направления сил, наложение вибраций, воздействие тепловыми потоками и др.);
- г) осуществлять расчеты показателей качества и прогнозировать показатели надежности оборудования.

Покажем структуру испытательно-диагностического комплекса и взаимодействия его составных частей (рис.1).

Испытание должно проводиться в режиме автоматизированного эксперимента и состоять из последовательных циклов, число которых N должно быть достаточным для статистической обработки результатов (обычно $N = 100...150$).

Каждый цикл осуществляется при своем сочетании факторов, влияющих на параметры точности. Траектории каждой опорной точки являются реализациями некоторого случайного процесса, отражающего движение рабочих органов станка при его эксплуатации.

Параметры каждой траектории определяются с помощью измерительного комплекса и вводятся в ЭВМ, где производятся необходимые расчеты. Одновременно с этим ЭВМ проводит анализ диагностических сигналов и выдает прогноз об изменении параметров траекторий при длительной эксплуатации станка.

Таким образом, программное испытание требует специальной организации измерительно-вычислительного процесса, что требует предварительной разработки подробной логической структурной схемы (алгоритма программного испытания).



Рис.1. Структура испытательно- диагностического комплекса

Испытания могут быть полными (определяется вся область состояния параметров), либо проводиться по экстремальному уровню, когда определяется только граница области состояния выходных параметров.

Расчет значений входных варьируемых параметров может осуществляться различными методами, например основанными на статистических принципах.

Полученные тем или иным способом значения входных параметров, преобразуются в сигналы управления программными нагрузочными устройствами.

Можно управлять также режимами обработки посредством специальной детали, которая имеет такую конфигурацию, что, позволяет реализовать при ее обработке весь диапазон режимов резания.

После проведения всех N циклов испытания можно получить законы распределения выходных параметров. Эти законы распределения являются полной характеристикой областей состояний, поскольку учитывают стохастическую природу входных воздействий.

Если полученные показатели качества и надежности станка соответствуют техническим требованиям, предъявляемым к станку, то испытания заканчиваются. Если параметры станка при некоторых режимах работы выходят за допустимые пределы зоны работоспособности, то возможна положительная оценка работоспособности данного станка с указанием ограничений по режимам обработки.

При необходимости могут быть осуществлены лишь фрагменты полного цикла испытаний. Например, могут быть проведены испытания лишь одного узла (шпинделя, суппорта, стола), который является слабым местом станка.

Предложенный методический подход может быть использован и для целей проектирования новых моделей станков, если вместо натурных испытаний проводить расчет выходных параметров станка с использованием математических моделей. В этом случае необходимо иметь аналитические зависимости, связывающие параметры траекторий рабочих органов с размерами, жесткостью, износостойкостью, теплостойкостью и другими параметрами станка.

2. Подготовительные этапы при разработке методики программного испытания

Рассмотрим основные подготовительные этапы, которые необходимо осуществить при разработке методики программного испытания станка.

Первый этап. Анализ конструкции станка и методов формообразования. На этом этапе анализируются основные технологические возможности станка в следующей последовательности.

1. Определение точности установочных баз.

К установочным базам станка предъявляют высокие требования по точности, так как они определяют положение в пространстве инструмента, приспособления, заготовки.

Необходимо оценить точность формы установочной поверхности и тем самым выявить систематическую погрешность установки инструмента, заготовки, приспособления и точность положения установочных поверхностей по отношению к координатной системе станка. Например, должна быть обеспечена параллельность плоскости стола фрезерного станка с направлениями его движения по двум координатам или должно быть обеспечено совпадение оси конусного отверстия шпинделя с осью его вращения.

2. Выбор опорных точек. При выборе опорных точек необходимо стремиться к ограничению их числа. В ряде случаев возможно сведение пространственного движения опорной точки к плоскому движению.

Последнее возможно если погрешности траектории в направлении одной из координат станка практически не оказывают влияние на точность обработки. Например, для токарных станков можно не рассматривать траекторию опорной точки, характеризующей движение резца в плоскости YZ , так как смещение резца в этом направлении не окажет практического влияния на точность обработки.

Здесь можно ограничиться рассмотрением параметров траектории в горизонтальной плоскости XZ .

3. Выявление вида идеальных траекторий опорных точек.

В результате анализа методов формообразования может быть сформировано представление об идеальном с позиции точности станке, у которого движение опорных точек происходит по идеальным траекториям.

Поскольку такого станка быть не может, то дальнейшие этапы относятся к выявлению тех параметров, которые позволят дать объективную оценку достигнутого уровня качества реального станка.

Второй этап. Анализ требований к точности обработки.

Требования к точности обработки определяют номенклатуру выходных параметров станка. Регламентировать определенный параметр станка имеет смысл лишь в том случае если доля погрешности обработки станка, определяемая этим параметром, сравнима с погрешностями, вносимыми другими компонентами технологической системы. Если же влияние станка на данную погрешность обработки мало, то станок не лимитирует данный показатель и соответствующий параметр станка может не регламентироваться.

Расчет точности обработки может базироваться на экспериментальных и теоретических исследованиях, позволяющих оценить погрешности, вносимые всеми компонентами технологической системы. Так, в технологии машиностроения, имеются методы расчета по определению погрешности установки заготовок в приспособление, погрешности установки и закрепления режущего инструмента. В ряде случаев учитывается и погрешность измерения.

Для оценки вклада станка в суммарную погрешность обработки учитывается геометрическая точность и упругие деформации, указанные в стандартах точность и жесткость станков. Кроме того, имеются справочные данные по тепловым деформациям станка.

При испытаниях эти расчеты необходимы для того, чтобы установить, какая доля из допуска на точность обработки детали приходится на станок, что позволяет установить предельно допустимые отклонения для параметров станка.

Однако эти расчеты дают лишь ориентировочную оценку долей погрешности станка и поэтому не всегда обязательны. Можно просто установить относительную долю

станка (например, 50% или 30%), которую он может занимать в образовании погрешности обработки. В этом случае допустимые значения выходных параметров (область работоспособности) определяется как заданная доля (например, 0,5 или 0,3) по отношению к допустимой погрешности обработки детали.

Третий этап. Выбор номенклатуры выходных параметров станка.

Чем выше требования к точности обрабатываемых на станке деталей, тем большим числом выходных параметров должно оцениваться качество станка. Кроме того, число выходных параметров зависит от класса точности станка.

Минимальное число для станков нормальной точности (Н).

Для прецизионных станков (особо высокой (А) и сверхвысокой точности (С)) следует устанавливать все выходные параметры, которые могут быть применены для данного типа станков.

В качестве примера приведем выбор номенклатуры выходных параметров токарного станка (рис. 2). С учетом схемы токарной обработки все параметры станка можно рассматривать в горизонтальной плоскости XZ .

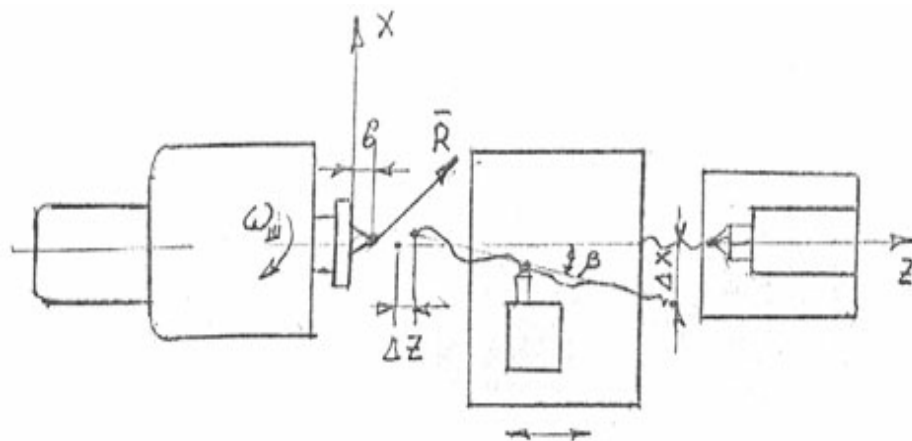


Рис. 2. Схема расположения опорных точек токарного станка

Опорные точки расположим:

- на суппорте - в точке, совпадающей с вершиной резца;
- на шпинделе - в центре вращения при помощи вектора **R**;
- на задней бабке - в точке, совпадающей с вершиной центра установленного в пиноль.

Ниже в таблице 1 приведены все параметры, которые могут быть применены для токарной группы станков.

Выходные параметры токарного станка

Таблица 1.

Узел	Положение опорных точек	Выходной параметр	Характеристика параметра траектории	Отклонения геометрических параметров детали	Класс точности			
					Н	П	В	А/С
Суппорт	Совпадает с вершиной резца	$k_1 = x_p$	Размах траектории	Точность радиального размера	+	+	+	+
		$k_2 = \Delta x$	Координата начала траектории	-----	+	+	+	+
		$k_3 = \Delta z$	Координата конца траектории	Точность осевого размера		+	+	+
		$k_4 = \operatorname{tg} \beta$	Средний наклон траектории	Конусообразность	+	+	+	+
		$k_5 = \operatorname{tg} \alpha_{\text{мфх}}$	Наибольший наклон траектории	Бочкообразность, седлообразность		+	+	+
		$k_6 = t$	Шаг волн	Волнистость в продольном направлении.			+	+
		$k_7 = a_w$	Амплитуда высокочастотных составляющих траектории	Шероховатость			+	+
Шпиндель	Координаты характеристического вектора R (a)	$k_8 = C_0$ (a)	Коэффициенты разложения Фурье: среднее значение координаты (a) ;	Точность радиальных размеров	+	+	+	+
		$k_9 = C_1$ (a)	эксцентриситет вращения;	Точность расположения поверхности	+	+	+	+
		$k_{10} = C_2$ (a)	второй член;	Овальность	+	+	+	+
		$k_{11} = C_3$ (a)	третий член;	Трехгранность		+	+	+
		$k_{12} = C_4$ (a)	члены, начиная с четвертого;	Многогранность			+	+
		$k_{13} = C_n$ (a)	n - ый член;	Волнистость в радиальном сечении				+
		$k_{14} = C_m$ (a)	m - ый член m > n.	Шероховатость		+	+	+
		(b)	Аналогичные члены разложения для координаты (b)	Отклонения от перпендикулярности торца	+	+	+	+
		$k_{15} = C_0$ (b)		Отклонения от плоскостности торца	+	+	+	+
		$k_{16} = C_1$ (b)		Волнистость торца			+	+
Задняя бабка	В вершине центра	$k_{17} = C_2$ (b)		Конусообразность	+	+	+	+
		$k_{18} = \alpha_{\text{max}}$	Наклон вектора R в плоскости XZ					
		$k_{19} = \Delta x$	Смещение центра	Конусообразность	+	+	+	+
Взаимное движение	положение и	$k_{20} = \Delta u_1$	Погрешность передаточного отношения: шпинделя и суппорта	Точность шага винтовой поверхности	+	+	+	+
		$k_{21} = \Delta u_2$	продольных и поперечных салазок.	Точность фасонных поверхностей		+	+	+
		$k_{22} = \operatorname{tg} \beta$	Угол между R и средней линией траектории суппорта	Конусообразность	+	+	+	+

Четвертый этап. Проведение предварительных экспериментов.

Предварительный эксперимент проводится как подготовительный этап полного цикла испытаний.

Основные цели предварительных экспериментов заключаются в проверке правильности принятых решений и сокращении до минимума объема основных испытаний.

Необходимо проверить целесообразность назначения всей выбранной номенклатуры выходных параметров. Следует доказать, что выбранный параметр действительно оказывает существенное влияние на показатели точности станка. При проведении основных испытаний следует стремиться к минимуму регламентированных параметров.

3. Выбор метрологических средств

При выборе метрологических средств необходимо учитывать, что при программном методе испытаний идет непрерывный автоматизированный процесс измерений и ввод данных в ЭВМ. Поэтому наиболее целесообразно применять бесконтактные измерительные преобразователи, которые стыкуются с аналогово-цифровыми преобразователями, вводящими сигнал в ЭВМ уже в цифровой форме.

К метрологическим задачам относится также выбор системы координат, в которой измеряются параметры траекторий. Возможно применение, как единой системы координат, так и нескольких систем, удобных для оценки отдельных траекторий.

Выбор и разработка методов и средств программного нагружения.

При программном методе испытания необходимо имитировать действие на станок силовых и тепловых факторов с учетом и вероятностной природы. Поэтому программные устройства должны управляться от ЭВМ и воспроизводить всю гамму эксплуатационных нагрузок.

Режимы работы и взаимные положения узлов станка могут устанавливаться при помощи системы управления ЧПУ станка. Для создания необходимого спектра сил и тепловых воздействий нагрузочных устройств практически нет. Исключение представляют электромагнитные вибраторы, которые приспособлены для управления частотой и интенсивностью колебаний.

Поэтому для реализации программного метода испытаний требуется создание специальных конструкций нагрузочных устройств.

Вопросы для самоподготовки

1. Структура испытательного комплекса;
2. Подготовительные этапы при разработке методики программного испытания;
3. Номенклатура выходных параметров токарных станков.