

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

А.Н. Гаврилин, Б.Б. Мойзес

ДИАГНОСТИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Часть 1

*Рекомендовано в качестве учебного пособия
Редакционно-издательским советом
Томского политехнического университета*

Издательство
Томского политехнического университета
2013

УДК 621.9.06.004(075.8)

ББК 34.63-5я73

Г12

Гаврилин А.Н.

Г12 **Диагностика технологических систем: учебное пособие. Часть 1 / А.Н. Гаврилин, Б.Б. Мойзес; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 120 с.**

В пособии изложены основные понятия, термины и определения методов диагностирования технологических систем. Рассмотрены последовательность проверок металлообрабатывающего оборудования, схемы и измерительные инструменты, применяемые при испытании станков. Акцент сделан на применение современных приборов и аппаратурно-программных комплексов для измерения геометрической точности станков с числовым программным управлением.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлениям 151900 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» (дисциплины «Надежность и диагностика технологических систем», «Конструкции технологического оборудования»), 200100 «Управление качеством» (дисциплина «Физические методы контроля»).

УДК 621.9.06.004(075.8)

ББК 34.63-5я73

Рецензенты

Технический директор ОАО «Томский
электромеханический завод им. В.В. Вахрушева»

А.А. Котельников

Главный специалист ОАО «Манотомь»

М.П. Посторов

© ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, 2013

© Гаврилин А.Н., Мойзес Б.Б., 2013

© Оформление. Издательство Томского
политехнического университета, 2013

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	7
ВВЕДЕНИЕ	8
ГЛАВА 1. ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА	11
1.1. Параметрические и физические методы диагностирования	14
ГЛАВА 2. ДИАГНОСТИКА МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ	17
2.1. Внешний осмотр станка, проверка комплектации и паспортных данных	17
2.1.1. Установка станков на предприятии	19
2.2. Испытание станков на холостом ходу, проверка работы механизмов	20
2.2.1. Проверка всех органов управления	21
2.2.2. Проверка рабочих скоростей	21
2.2.3. Проверка температуры подшипников	21
2.2.4. Проверка механизмов станка	22
2.2.5. Проверка уровня шума и вибрации станка	23
2.2.6. Проверка станка на ускоренных перемещениях и циклах	24
2.2.7. Проверка органов ручного управления	24
2.2.8. Проверка скоростей главного движения	24
2.2.9. Проверка величин подач	25
2.3. Испытание станков в работе под нагрузкой и производительности	25
2.3.1. Проверка точности деталей, изготовленных на станке	26
2.3.2. Проверка механизмов станка в работе под нагрузкой	27
2.3.3. Проверка скорости главного движения станка	28
2.3.4. Испытание станков на производительность	28
2.4. Проверка станков на геометрическую точность, чистоту обработки и точность обрабатываемой детали	35
2.4.1. Примерные условия проведения испытаний на чистовых режимах для станков	37
2.4.2. Испытание станков на чистоту обработки	39

2.4.3. Проверка геометрической точности станка без нагрузки (тестовый метод).....	40
2.4.4. Примеры проверок геометрической точности станков	43
2.4.4.1. Схема проверки геометрической точности токарного станка.....	43
2.4.4.2. Схемы контроля геометрической точности сверлильного станка.....	46
2.4.4.4. Схемы контроля геометрической точности вертикального консольно-фрезерного станка	48
2.4.4.5. Проверка плоскостности рабочей поверхности стола	50
2.4.4.6. Проверка параллельности рабочей поверхности стола направлению его перемещения.....	50
2.5. Кинематическая точность станков.....	51
2.5.1. Метод определения точности зубообрабатывающих станков	51
2.5.2. Методы определения точности резьбообрабатывающих станков.....	54
2.6. Испытание жесткостных характеристик узлов станка	57
2.6.1. Тестовый метод определения жесткости	60
2.6.2. Бесконтактный метод измерения жесткости	64
2.6.3. Метод измерения жесткости шпиндельного узла вертикально-фрезерного станка	65
2.6.4. Нормы жесткости станков (примеры)	65
2.6.5. Проверка жесткости станка методом функциональной диагностики	68
2.6.6. Методы повышения жесткости.....	72
2.7. Особенности погрешностей станков с ЧПУ и методы их измерения	73
2.7.1. Причины возникновения погрешностей в станках с ЧПУ	73
2.7.2. Методики проверки точности станков с ЧПУ	77
2.7.2.1. Проверка точности позиционирования для станков с ЧПУ.....	77

2.7.2.2. Контроль обработки системой привода подач станка единичных импульсов	79
2.7.2.3. Контроль обработки системой привода подач и выявление погрешностей в санках с ЧПУ	79
2.7.3. Проверка на безотказность станков с ЧПУ	82
2.8. Испытания на виброустойчивость	83
2.8.1. Методы испытаний станков на виброустойчивость	83
2.8.1.1. Метод определения виброустойчивости по амплитудно-фазовой частотной характеристике.....	83
2.8.1.2. Метод определения виброустойчивости при работе станка на холостом ходу	84
2.8.1.3. Метод определения виброустойчивости исследованием плавности медленных перемещений узлов станка.....	84
2.8.1.4. Метод оперативной оценки виброустойчивости элементов технологической системы.....	85
2.8.2. Причины вибрации в технологической системе	87
ГЛАВА 3. ТИПОВЫЕ СХЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ И ПРАВИЛЬНОСТИ ВЗАИМОРАСПОЛОЖЕНИЯ И ДВИЖЕНИЯ СБОРОЧНЫХ ЕДИНИЦ И ЭЛЕМЕНТОВ СТАНКА	94
3.1. Неплоскостность и непрямолинейность поверхности.....	94
3.2. Непрямолинейность траектории перемещения	94
3.3. Непараллельность элементов и перемещений.....	95
3.4. Неперпендикулярность относительного положения элементов...95	95
3.5. Несоосность валов	95
3.6. Радиальное и осевое биение	96
ГЛАВА 4. ОСНОВНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРИ ИСПЫТАНИИ СТАНКОВ.....	97
4.1. Методы проверки геометрической точности станков	97
4.1.1. Поверочные линейки.....	97
4.1.2. Поверочные угольники	98
4.1.3. Щупы	100

4.1.4. Оправки	100
4.1.5. Индикаторы и микрокаторы.....	101
4.1.6. Поверочные уровни.....	102
4.1.7. Проверочные мостики.....	106
4.1.8. Оптические приборы (коллиматоры)	106
4.1.9. Динамометры	108
4.2. Современные приборы и аппаратурно-программные комплексы для измерения геометрической точности	110
4.2.1. Беспроводная система QC20-W ballbar	110
4.2.2. Автоколлиматор цифровой двухкоординатный ОПТРО-АК-014 (Dual Axis Digital Autocollimator).....	111
4.2.3. Кинематомер	112
4.2.4. Лазерная измерительная информационная система	115
ЛИТЕРАТУРА.....	117

ПРЕДИСЛОВИЕ

Пособие «Диагностика технологических систем. Часть 1» предназначено для студентов, обучающихся по направлениям 151900 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» дисциплинам «Надежность и диагностика технологических систем», «Конструкции технологического оборудования» и 200100 «Управление качеством» дисциплине «Физические методы контроля».

В настоящее время существует большое количество книг, посвященных рассмотрению вопросов надежности и диагностики технологических систем, однако создание новых версий учебного пособия продолжается в связи с тем, что учащемуся трудно рационально использовать имеющийся многотомный материал. Он зачастую теряет в большом объеме информации, не в состоянии отдать предпочтение какому-либо источнику, и в результате у студента возникает недостаточная уверенность в области базовых понятий.

Потребность учащегося в логичном по содержанию, доступном для усвоения учебном пособии, ориентированном на подготовку специалистов по технологическим специальностям, всегда является актуальной.

В связи с этим настоящее учебное пособие можно рассматривать как попытку сформулировать основные существенные признаки предметной области в доступной форме, с тем, чтобы далее, в процессе практической деятельности, полученные базовые знания можно было углублять, расширять и уточнять с помощью других источников.

Содержание пособия в известной мере определено оглавлением.

Во введении приведены термины и определения основных понятий в области технического диагностирования и контроля технического состояния объектов.

В первой главе рассмотрены основные понятия, термины и определения технической диагностики.

Во второй главе рассмотрены методы диагностики металлообрабатывающего оборудования.

В третьей и четвертой главах дано краткое описание типовых схем измерения и основных измерительных инструментов, применяемых при испытании станков.

Авторы с благодарностью примут все замечания и предложения, направленные на улучшение пособия.

ВВЕДЕНИЕ

Диагностика – это отрасль знаний, включающая в себя теорию и методы организации процессов диагноза, а также принципы построения средств диагноза. Когда объектами диагноза являются объекты технической природы, говорят о *технической диагностике*.

Чтобы более четко увидеть область, охватываемую технической диагностикой, рассмотрим три типа задач по определению состояния технических объектов.

К первому типу относятся задачи по определению состояния, в котором находится объект в настоящий момент времени. Это – задачи диагноза.

Задачами второго типа являются задачи по предсказанию состояния, в котором окажется объект в некоторый будущий момент времени. Это – задачи прогноза (от греческого «прогнозис» – предвидение, предсказание).

Наконец, к третьему типу относятся задачи определения состояния, в котором находился объект в некоторый момент времени в прошлом. По аналогии можно говорить, что это задачи генеза (от греческого «генезис» – происхождение, возникновение, процесс образования).

Задачи первого типа формально следует отнести к технической диагностике, а второго типа – к технической прогностике (или, как чаще говорят, к техническому прогнозированию). Тогда отрасль знания, которая должна заниматься решением задач третьего типа, естественно назвать *технической генетикой* (по-гречески термин «генетикос» означает «относящийся к рождению, происхождению»).

Задачи технической генетики возникают, например, в связи с исследованием аварий и их причин, когда настоящее состояние объекта отличается от состояния, в котором он оказался в прошлом в результате появления первопричины, вызвавшей аварию. Решаются эти задачи путем определения возможных или вероятных предысторий, ведущих в настоящее состояние объекта. К задачам технической прогностики относятся, например, задачи, связанные с определением срока службы объекта или с назначением периодичности его профилактических, проверок и ремонтов. Решаются эти задачи путем определения возможных или вероятных эволюций состояния объекта, начинающихся в настоящий момент времени.

Согласно ГОСТ 20911–89 [1] устанавливаются следующие термины и определения основных понятий в области технического диагностирования и контроля технического состояния объектов.

Объект технического диагностирования (контроля технического состояния) – изделие и (или) его составные части, подлежащие (подвергаемые) диагностированию (контролю).

Техническое состояние объекта (техническое состояние) – состояние, которое характеризуется в определенный момент времени, при определенных условиях внешней среды значениями параметров, установленных технической документацией на объект.

Техническая диагностика (диагностика) – область знаний, охватывающая теорию, методы и средства определения технического состояния объектов.

Техническое диагностирование (диагностирование) – определение технического состояния объекта.

Примечания. Задачами технического диагностирования являются: контроль технического состояния; поиск места и определение причин отказа (неисправности); прогнозирование технического состояния. Термин «Техническое диагностирование» применяют в наименованиях и определениях понятий, когда решаемые задачи технического диагностирования равнозначны или основной задачей является поиск места и определение причин отказа (неисправности).

Контроль технического состояния (контроль) – проверка соответствия значений параметров объекта требованиям технической документации и определение на этой основе одного из заданных видов технического состояния в данный момент времени.

Примечание. Видами технического состояния являются, например, исправное, работоспособное, неисправное, неработоспособное и т. п. в зависимости от значений параметров в данный момент времени. Термин «Контроль технического состояния» применяется, когда основной задачей технического диагностирования является определение вида технического состояния.

Контроль функционирования – контроль выполнения объектом части или всех свойственных ему функций.

Рабочее техническое диагностирование (рабочее диагностирование) – диагностирование, при котором на объект подаются рабочие воздействия.

Тестовое техническое диагностирование (тестовое диагностирование) – диагностирование, при котором на объект подаются тестовые воздействия.

Экспресс-диагностирование – диагностирование по ограниченному числу параметров за заранее установленное время.

Система технического диагностирования (контроля технического состояния) или *система диагностирования (контроля)* – совокупность

средств, объекта и исполнителей, необходимая для проведения диагностирования (контроля) по правилам, установленным в технической документации.

Алгоритм технического диагностирования (контроля технического состояния) – совокупность предписаний, определяющих последовательность действий при проведении диагностирования (контроля).

Диагностическое обеспечение – комплекс взаимоувязанных правил, методов, алгоритмов и средств, необходимых для осуществления диагностирования на всех этапах жизненного цикла объекта.

Диагностическая модель – формализованное описание объекта, необходимое для решения задач диагностирования.

П р и м е ч а н и е . Описание может быть представлено в аналитической, табличной, векторной, графической и других формах.

Диагностический (контролируемый) параметр – параметр объекта, используемый при его диагностировании (контроле).

Работоспособное состояние (работоспособность) – состояние оборудования, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

Неработоспособное состояние (неработоспособность) – состояние оборудования, при котором значение хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

Исправное состояние (исправность) – состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

Неисправное состояние (неисправность) – состояние объекта, при котором он не соответствует хотя бы одному из требований нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

Отказ – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния оборудования.

Эксплуатационный показатель надежности – показатель надежности, точечная или интервальная оценка которого определяется по данным эксплуатации.

ГЛАВА 1. ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА

Анализ условий эксплуатации различного оборудования и систем промышленных объектов указывает на наличие естественных факторов, оказывающих разрушающее воздействие на элементы оборудования. К ним относятся механический и гидроабразивный износ, молекулярно-механическое изнашивание, коррозия и эрозия, объемное или упругое деформирование материала, образование, микротрещин в результате усталости материала, релаксация и деструкция металлов. Дополнительно к этому имеются субъективные факторы, способствующие ускоренному выходу из строя отдельных деталей и узлов. Это некачественное изготовление и монтаж оборудования, работа с нагрузками выше допустимых, несоблюдение технологии технического обслуживания и ремонта.

Своевременное обнаружение неисправностей и развивающихся дефектов из-за влияния указанных факторов возможно на основе методов технической диагностики. Она также изучает признаки дефектов, методы и средства, при помощи которых устанавливается диагноз, т. е. делается заключение о причине возникновения и месторасположения дефекта.

Основная цель технической диагностики состоит в организации эффективных процессов диагноза технического состояния сложных объектов.

Техническая диагностика базируется на общей теории распознавания образов и теории контролепригодности. Ее структура представлена на рис. 1



Рис. 1. Структура технической диагностики

Теория распознавания в составе технической диагностики включает разделы, связанные с построением диагностических моделей, правил принятия решений об отнесении объектов к определенным классам состояний, алгоритмов распознавания состояний.

Теория контролепригодности связана с разработкой методов и средств получения диагностической информации об объекте, проверки

его состояния и поиска возникших в нем дефектов. Под контролепригодностью понимают приспособленность объекта к оценке технического состояния с заданной достоверностью при минимальных затратах труда, времени и средств.

В процессе диагностирования устанавливается состояние объекта: исправное, работоспособное, предельное.

Одним из факторов, существенно влияющих на эффективность процесса диагноза, является качество алгоритмов диагноза.

Возможность оптимизации алгоритмов диагноза определяется следующими обстоятельствами. Число элементарных проверок, достаточных для решения конкретной задачи диагноза, как правило, меньше числа всех *допустимых* (т. е. физически возможных и реализуемых) элементарных проверок данного объекта. Разные элементарные проверки могут требовать разных затрат на их реализацию и давать разную информацию о техническом состоянии объекта. Кроме того, одни и те же элементарные проверки могут быть реализованы в различных последовательностях.

Поэтому для решения одной и той же задачи диагноза (например, для проверки исправности) можно построить несколько алгоритмов диагноза, различающихся между собой либо составом элементарных проверок, либо последовательностью их реализации, либо, наконец, тем и другим вместе, и поэтому, возможно, требующих разных затрат на их реализацию.

Эффективность процессов диагноза определяется не только качеством алгоритмов диагноза, но и в меньшей степени качеством средств диагноза.

Средства диагноза могут быть аппаратными или программными, внешними или встроенными, ручными, автоматизированными или автоматическими, специализированными или универсальными.

Наличие объективных статистических данных о вероятностях возникновения неисправностей, а также о средних затратах на обнаружение, поиск и устранение неисправностей, расширяет возможности эффективной организации процессов диагноза. Сбор таких данных требует применения надежно работающих внешних и встроенных аппаратных средств диагноза, обеспечивающих высокую точность измерений и автоматическое документирование данных. При этом будет гарантирована достоверность результатов диагноза, сведено к минимуму влияние субъективных факторов и упрощена статистическая обработка результатов.

Проверка работоспособности при диагностировании является менее полной, чем проверка исправности, так как может оставлять необ-

наруженными скрытые дефекты (в виде трещин, раковин и др., которые в момент оценки технического состояния объекта не препятствуют выполнению всех предписанных функций). Диагностирование является одним из путей определения работ по повышению надежности оборудования. При диагностировании используют, в зависимости от типа объекта и решаемых задач, тестовое диагностирование и функциональное диагностирование. При тестовом диагностировании на объект подают специально организованные тестовые воздействия от средств диагностики и анализируют соответствующие реакции. Это применяется при контроле работоспособности систем энергообеспечения, автоматике и телемеханики, отдельных исполнительных механизмов.

При функциональном диагностировании тестового воздействия на объект от средств диагностики не производится, а воспринимаются только рабочие воздействия от самого объекта. Например, для насоса измеряются и анализируются давления, потребляемая мощность, подача, вибрация, температура отдельных элементов и другие параметры, которые используются в алгоритме функционирования машины. Здесь также необходимо учитывать режим работы объекта.

При диагностировании необходимо определять количественные показатели измеряемых параметров с оценкой погрешности на каждом рабочем режиме. Когда поддержание фиксированных режимов работы объекта затруднительно, диагностирование ведут при изменяющихся по случайному закону режиме с определением характеристик случайных функций контролируемых величин.

Находясь в работоспособном состоянии, объект может быть неисправным по причине возникновения одного или нескольких дефектов. Например, при трещине в вале ротора насоса, последний может еще долго выполнять свои заданные функции в соответствии с нормативно-технической документацией. Поэтому дефекты подразделяют с учетом последствия отказа и анализируют критичность отказа [2]. Решение о продолжении эксплуатации принимают с учетом требований безопасности и последствий отказа. Достоверная оценка последствия отказа из-за обнаруженного дефекта определяется полнотой технического диагностирования и глубиной поиска места неисправности при выбранном методе диагностирования объекта.

1.1. Параметрические и физические методы диагностирования

В зависимости от природы контролируемых параметров объектов контроля различают параметрические и физические методы диагностирования. Параметрические методы базируются на контроле основных выходных и входных параметров, а также внутренних параметров, характеризующих правильное или неправильное функционирование объекта.

Параметрические методы контроля работоспособности основаны на измерении, соответствующем функциональному преобразовании результатов измерений и оценке выходных и внутренних параметров, объектов контроля. Эти методы обеспечивают контроль объекта, как при эксплуатации, так и в нерабочем состоянии.

Параметрические методы – это методы контроля работоспособности в целом станков и элементов технологической системы (ТС) (оснастки, инструмента), а также отдельных элементов шпинделей, направляющих и т. д. Отдельные элементы, как правило, контролируются в нерабочих состояниях объектов.

Физические методы основаны на контроле характеристик тех явлений в объекте, которые являются следствием его правильного или неправильного функционирования (нагрев, напряженно-деформированное состояние, магнитные, электрические поля, шумы, вибрации и т. д.). Данные методы принято называть методами неразрушающего контроля. Они основаны на использовании различных физических явлений, сопутствующих работоспособным и неработоспособным состояниям объектов, и могут быть разделены также на две группы. Одна из этих групп методов используется для контроля деталей объектов при их нерабочем состоянии, а вторая – при статических режимах работы объектов контроля.

В нерабочих состояниях объекта физические методы контроля обеспечивают определение скрытых механических повреждений и дефектов в деталях (появление скрытых сквозных и несквозных микротрещин, внутренних раковин и посторонних включений, надломов и т. д.). Для этих целей нашли широкое распространение магнитометрические, капиллярные, магнитные, токовихревые, ультразвуковые, радиолокационные, оптические методы.

Физические методы для контроля объектов в их рабочих состояниях обеспечивают выявление недопустимых износов и повреждений в сопряженных подвижных деталях механизмов (подшипниках, станинах и т. д.). К таким методам относятся тепловые и акустические, методы статистической обработки случайных колебаний выходных параметров объектов контроля.

Контроль состояния деталей механизмов неразрушающими методами называется *дефектоскопическим*. Как правило, такой контроль осуществляется на стадиях ремонта станков или их деталей и узлов. При таком контроле определяют механические повреждения, зоны, в которых возникают эксплуатационные дефекты (микротрещины, высокие напряжения).

Задачи, решаемые технической диагностикой и прогнозированием, включают теоретическое и практическое направления, неразрывно взаимосвязанные друг с другом.

В теоретическом направлении осуществляется построение логических моделей объектов диагностирования, отображающих логические связи между принятыми к распознаванию техническими состояниями и признаками состояний объектов, а также математических моделей объектов диагностирования, которые обеспечивают формальное описание взаимосвязей между техническими состояниями и их признаками. Разрабатываются применительно к конкретным объектам наиболее информативные методы диагностирования и прогнозирования работоспособного состояния оборудования на заданный период времени работы объекта.

На практике решение задач диагностики идет в направлении анализа функционирования объекта с учетом изменений его контролируемых параметров при различных режимах и условиях эксплуатации; определения рациональных алгоритмов диагностирования объекта; уточнения логической и математической моделей по результатам эксплуатации; оптимального прогнозирования сроков последующих диагностических контролей и ремонтов; сбора и обработки статистических данных о показателях надежности; оценки затрат, связанных с проверками работоспособности объекта в процессе эксплуатации.

Основу функционирования автоматизированной системы диагностики составляют алгоритмы и программы диагностирования технического состояния насосов, электродвигателей, задвижек, органически взаимосвязанные с процессами управления технологическим процессом перекачки, технического обслуживания и ремонта. При этом должно обеспечиваться решение следующих основных задач:

- оперативное диагностирование и прогнозирование технического состояния ТС для формирования оптимальных решений в системе управления нефтепроводов;
- выработка долгосрочных рекомендаций по оптимальному техническому обслуживанию и ремонту ТС с учетом морального и физического износа;

- углубленное диагностирование для распознавания неисправностей, которые не могут быть выявлены автоматизированной системой контроля рабочих параметров оборудования.

Надежность и экономичность эксплуатации ТС определяется следующими факторами:

- начальным техническим состоянием используемых в ТС оборудования;
- качеством и своевременностью проведения технического обслуживания и ремонта оборудования;
- надежностью контролирования и достоверностью оценки технического состояния оборудования и нормального функционирования систем при их работе;
- оптимальной организационной структурой ремонта и технического обслуживания оборудования на базе передовой технологии и современных средств механизации ремонта и контроля его качества.

ГЛАВА 2. ДИАГНОСТИКА МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ

Каждый станок после изготовления, а также после ремонта перед пуском в эксплуатацию должен удовлетворять определенному комплексу требований или так называемым техническим условиям.

Согласно действующим общим техническим условиям приемочные испытания станков должны включать:

- 1) внешний осмотр оборудования, проверка комплектации и паспортных данных;
- 2) испытание станка на холостом ходу, проверку работы механизмов;
- 3) испытание станка в работе под нагрузкой, а специальных станков на производительность;
- 4) проверку станка на геометрическую точность, шероховатость поверхности и точность обрабатываемой детали;
- 5) проверку станка на кинематическую точность;
- 4) испытание станка на жесткость;
- 5) испытание на виброустойчивость при резании.

Испытания станка должны производиться в указанной последовательности. Допускается испытание на чистоту обработки и на точность изделия производить одновременно с испытанием станка в работе (до проверки его геометрической точности).

На заводе-изготовителе все указанные испытания производятся обязательно. На заводе-потребителе для новых станков проверка на точность предусматривается только для станков, транспортируемых по частям [3]. Однако многие потребители после установки испытывают, хотя бы по основным проверкам, все вновь получаемые станки, чтобы убедиться в отсутствии случайных повреждений на всех этапах транспортирования, а также проверить отсутствие деформирования станины станков из-за возможного неправильного расположения установочных клиньев или неравномерной затяжки фундаментных болтов.

После капитальных и средних ремонтов станок должен подвергаться всем проверкам по ГОСТ [4].

2.1. Внешний осмотр станка, проверка комплектации и паспортных данных

Целью проведения внешнего осмотра станка является выявление дефектов, неисправностей элементов станка, которые следует устранить до проведения последующих испытаний, как правило, до проверки на холостом ходу, т. е. которые проявляются при подключении электро-, гидро-, пневмопривода, перемещений рабочих органов станка, безопасности работы персонала и безаварийной работы станка.

Под внешним осмотром понимается:

- проверка точности установки;
- проверка привода главного движения;
- проверка уровня смазки;
- проверка электрооборудования;
- проверка механизмов управления станка;
- проверка условий безопасности работы;
- проверка соответствия комплектации и паспортных данных (а при отсутствии его каталогу и чертежам).

Проверка точности установки. Точность установки в продольном и поперечном направлениях определяется соответствующим стандартом. Например, для круглошлифовальных станков при выверке в поперечном направлении отклонение направляющих от параллельности в вертикальной плоскости не должно превышать 0,02 мм на 1000 мм для станков с длиной устанавливаемой заготовки до 500 мм [5].

Жесткость опорных точек установленного для проверки станка достигается применением стальных клиньев или башмаков, опирающихся на испытательный стенд или фундамент.

На заводе-потребителе станок чаще проверяют после установки на рабочем месте, выполненной на цементном полу цеха, только с выверкой на клиньях или с применением подливки, или на фундаменте с затяжкой фундаментных болтов. После капитальных ремонтов в ремонтно-механическом цехе установка станка для проверки аналогична условиям установки на заводе-изготовителе.

Проверка привода главного движения. Необходимо убедиться, прежде всего, в том, что станок находится в исправном состоянии. В частности, следует установить, что натяжение ремней и приводных цепей нормально, подшипники шпинделя и других ответственных валов и клинья направляющих отрегулированы правильно, все трущиеся во время работы поверхности хорошо смазаны и т. п.

Проверка уровня смазки. Проверяется наличие достаточного количества смазки и удовлетворительность состояния смазочных отверстий и масленок, подключение насосных агрегатов, обеспечивающих смазку (особенно для станков с гидро или пневмоопорами), наличие смазочно-охлаждающей жидкости.

Проверка электрооборудования. Наличие заземления и элементов электрозащиты оборудования от скачков напряжения и перегрузки.

Проверка механизмов управления станка проводится для станков с ручным управлением. Проверяется легкость перемещения всех подвижных узлов и рукояток, величина мертвых ходов маховиков, рукояток и винтов.

Проверка условий безопасности работы представляет собой проверку исправности ограждений, наличие всех таблиц и надписей, необходимых для обслуживания станка.

Проверка соответствия комплектации и паспортных данных сводится к проверке:

- наличие принадлежностей к станку
- основных размеров и характеристик станка, характеристик электродвигателей, гидронасосов, гидромоторов и пневмооборудования (диапазон давления в гидравлических (пневматических) механизмах);
- наименьшего и наибольшего габаритов изделий, которые могут быть обработаны на станке;
- величин и количества скоростей и подач диапазон скоростей вращения шпинделя (двойных ходов) и подач;
- кинематической, гидравлической и электрической схем станка, схем смазки и охлаждения;
- величин перебегов в механизмах прямолинейного движения (главного движения, рабочих подач, быстрых ходов);
- спецификации принадлежностей станка; (оснастки, инструмента, измерительных устройств) и т. п.;
- наладок станка (для специальных станков).

2.1.1. Установка станков на предприятии

В настоящее время большинство станков устанавливают на виброопоры (см. рис. 2) [6]. Для проверки горизонтальности или вертикальности установки станка используют уровни (см. раздел 4.1.6. Поверочные уровни).

От правильной установки станка на фундаменте зависит точность его работы, жесткость и виброустойчивость. Конструктивно фундамент может быть оформлен в виде индивидуального устройства (для станков с большими динамическими нагрузками), в виде общего бетонного полотна толщиной 300–400 мм или отдельной ленты толщиной 150–700 мм и шириной 1200–3000 мм (для небольших и средних станков), а иногда и из металлических лаг (из угловой стали, швеллеров и др.), утопленных в бетоне.

Станки высокой точности, а также станки, работающие с большими динамическими нагрузками, следует устанавливать на отдельных фундаментах. Размеры фундаментов указаны в паспорте станка или определяются расчетом. При установке станка на фундаменте с точностью, требуемой условиями эксплуатации, применяют регулирующие приспособления в виде:

- клиньев;
- башмаков;
- металлических подкладок различной толщины;
- фундаментных, плит с регулирующими клиньями.

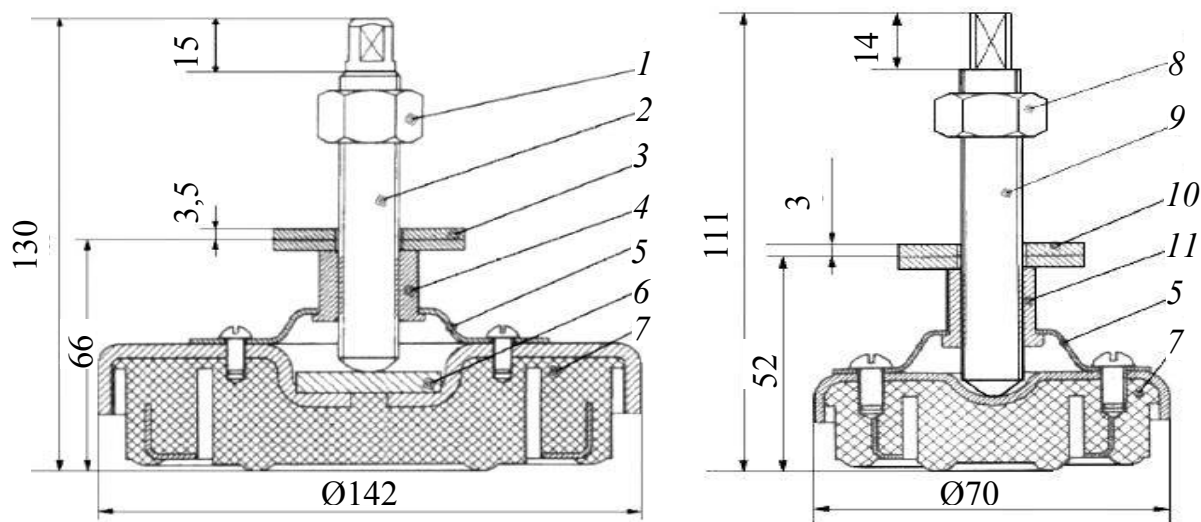


Рис. 2. Примеры конструктивного исполнения виброопор:

а – виброопора ОВ-31; б – виброопора ОВ-70;

1 – гайка М16 ГОСТ 5915–70; 2 – винт М16; 3 – шайба 16 ГОСТ 6958–78 (2 шт.); 4 – гайка М16; 5 – крышка; 6 – подкладка; 7 – резиновый элемент; 8 – гайка М16 ГОСТ 5915–70; 9 – винт М16; 10 – шайба 16 ГОСТ 6958–78 (2 шт.); 11 – гайка М16

Установку станка проверяют уровнем в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, точность выверки в продольном направлении составляет 0,02–0,004 мм на 1000 мм, а в поперечном 0,03–0,05 мм на 1000 мм. Затем станок закрепляют фундаментными болтами и цементным раствором, который подлипают в опалубку у основания.

Вопросы, связанные с проектированием фундамента рассмотрены в следующем разделе – защита от вибрации.

Чтобы выявить, можно ли получить на станке заданную точность, шероховатость поверхности обрабатываемых деталей и производительность, новые и отремонтированные станки при приемке подвергают испытаниям в соответствии с ГОСТом.

2.2. Испытание станков на холостом ходу, проверка работы механизмов

Целью проведения испытания станков на холостом ходу является выявление дефектов и неисправностей элементов станка, которые следует устранить до проведения последующих испытаний, как правило, до проверки под нагрузкой.

2.2.1. Проверка всех органов управления

Перед испытанием станка на холостом ходу должно быть произведено опробование всех органов управления его путем последовательного включения всех запрограммированных циклов, всех скоростей главного движения, всех скоростей подач на одной из скоростей главного движения, и быстрых перемещений. При опробовании станка должна быть проверена правильность взаимодействия механизмов станка и установлена возможность безаварийного проведения дальнейших испытаний.

2.2.2. Проверка рабочих скоростей

Проверка рабочих скоростей станка на холостом ходу производится последовательным включением всех его рабочих скоростей – от наименьшей до наибольшей. На наибольшей скорости станок должен работать непрерывно не менее двух часов. Механизм подач следует испытывать на холостом ходу при включении всех рабочих подач, а также при быстрой подаче, если она имеется.

Фактические значения чисел оборотов, двойных ходов и подач по нормам МСС Н11-1 для станков со ступенчатым регулированием не должны отклоняться от теоретических значений геометрического ряда более чем на $\pm 10 \cdot (\varphi - 1)\%$, где φ – знаменатель геометрического ряда. Для бесступенчатого регулирования погрешность стремиться к нулю.

2.2.3. Проверка температуры подшипников

Температура подшипников шпинделя для всех станков при наибольшем числе его оборотов не должна превышать 60 °С для подшипников скольжения и 70 °С для подшипников качения. В шлифовальных станках со шпинделями, смонтированными на подшипниках скольжения, допускается нагрев до 70 °С. В других механизмах (передачи в коробках скоростей, коробках подач, механизме фартука и т. п.) температура подшипников не должна подниматься выше 50 °С.

Теплообразование и связанные с ним температурные деформации являются одним из факторов, обуславливающих погрешности механической обработки – отклонения размеров и искажения геометрической формы обрабатываемых деталей. В наибольшей степени на точность обработки влияет изменение положения оси шпинделя относительно суппорта (или стола) вследствие температурных деформаций. Поэтому для опытных образцов станков наряду с проверкой нагрева подшипников шпинделя по ГОСТ 7599–82 предусмотрена проверка их температурной стабильности.

2.2.4. Проверка механизмов станка

Испытание станка на холостом ходу заключается:

а) в проверке всех включений переключений и передач органов управления для определения правильности их действия, взаимной блокировки, надежности фиксирования и отсутствия самопроизвольных смещений, отсутствия заедания и провертывания постоянства величины. Усилия на органах ручного управления на всем пути перемещения узлов и деталей станка;

б) проверке безотказности действий и точности работы автоматических устройств, упоров, делительных механизмов (повторяемость размеров при выключении подачи, при делении и т. п.);

в) проверке величины мертвых ходов подающих винтов ручного управления;

г) проверке устройств зажима изделия и инструмента на предмет отсутствия в них заеданий, ослабления зажимающих элементов при многократном включении, при перегрузке и т. п.;

д) проверке, с точки зрения безопасности работы станка, запасной части хода после автоматического выключения механического перемещения стола, суппорта, головки;

е) проверке исправности работы системы смазки после пуска масляных насосов и заполнения масленок: обеспечена ли подача смазки к механизмам станка в момент его пуска, поступает ли масло непрерывно и в достаточном количестве ко всем трущимся поверхностям, надежно ли функционирует система очистки масла, нет ли утечек в насосе, из-под фланцев, крышек, в маслопроводе и из других мест соединения;

ж) проверке работы системы подачи смазочно-охлаждающей жидкости: поступает ли жидкость непрерывно и в достаточном количестве к требуемому месту (или местам), достаточна ли зона обслуживания рабочих участков, удобно ли регулировать подачу жидкости и направление струи, нет ли утечек в системе;

з) проверке равномерности механических и гидравлических подач; (не наблюдается ли скачкообразная подача каких-либо узлов станка);

и) проверке работы электрооборудования: пуска, останова, реверсирования (если оно предусмотрено) и торможения электродвигателей, плавности регулирования оборотов электродвигателей постоянного тока, действия защитных и аварийных блокировок, надежности работы конечных выключателей, нулевой, тепловой защиты, нагрев катушек аппаратов, резисторов и пр.;

к) проверке мощности, затрачиваемой электродвигателем на холостой ход станка;

л) проверке наличия и надежности действия защитных устройств по технике безопасности и охране труда.

2.2.5. Проверка уровня шума и вибрации станка

Механизмы станка должны работать плавно, без толчков, повышенного шума, стука и сотрясений, вызывающих вибрацию станка.

Шум, возникающий при работе станка, является одним из критериев качества изготовления и сборки станка.

Для обеспечения нормальных условий работы людей в производственных помещениях шум каждого станка регламентирован. Цель проверки шумовых характеристик – установить, не превышает ли уровень шума станка допустимого значения. Допустимые значения устанавливаются в зависимости от чувствительности человеческого уха к шумам в различных частотных диапазонах (до 90 дБ – для частот менее 350 Гц, до 75 дБ – для частот выше 4 кГц). Для оценки шума используют шумомеры, реагирующие на звук подобно человеческому уху.

Шум зубчатых колес коробок скоростей и подач, а также других передач станка при работе на всех ступенях скорости должен быть равным и еле слышным на расстоянии 4–5 м от станка при отсутствии других работающих станков в помещении, где производится испытание. Измерение уровня шума производится шумомером (в децибелах) или фонетром (в фонах). Допустимый уровень шума в станках в районе рабочего места 70–80 дБ. Пуск и реверсирование механизмов станка должны происходить без рывков и ударов.

Шум измеряют обычно при наибольшей частоте вращения шпинделя. Три переключаемых корректирующих контура могут изменять частотную характеристику шумомера в зависимости от уровня шума, что позволяет более объективно оценить шум проверяемого станка. Для опытных образцов проводят частотный анализ шума с помощью включения полосовых фильтров, позволяющих определить уровень шума в узких полосах частот. Для точного анализа используют октавные (отношение средних частот соседних полос 1:2) и третьоктавные (отношение 1:1,26) фильтры. Результаты анализа представляют в виде спектра шума, показывающего уровни шума на разных частотах исследуемого диапазона.

Уровень вибраций, возникающих на холостом ходу, измеряют во всем диапазоне частот вращения шпинделя.

В конусное отверстие шпинделя устанавливают регулируемую оправку с биением измерительной шейки менее 3 мкм.

Датчиком (емкостным или индуктивным), установленным на суппорте станка, измеряют относительные колебания и подвергают частотному анализу в диапазоне частот до 1 кГц. Частотный спектр колебаний холостого хода определяется в основном наиболее мощными возбуди-

телями колебаний (неуравновешенные вращающиеся детали привода главного движения станка, погрешности зубчатых и ременных передач, муфт, подшипников качения и др.) и собственными колебаниями элементов упругой системы станка. Колебания холостого хода нормируют по частотным диапазонам: нормы на составляющие спектра, частоты которых лежат ближе к частоте потенциально неустойчивой формы колебаний станка (частота возможных в системе автоколебаний), должны быть более жесткими, чем для других частотных диапазонов.

2.2.6. Проверка станка на ускоренных перемещениях и циклах

Станки, имеющие механизмы для осуществления быстрых (ускоренных) холостых ходов и медленных рабочих перемещений (быстрый ход – рабочая подача – реверсирование), должны быть проверены на:

- а) точность действия автоматических устройств при переключении с одного цикла на другой;
- б) отсутствие задержек при переходе на новый цикл;
- в) плавность работы механизмов в моменты переходов.

2.2.7. Проверка органов ручного управления

Органы ручного управления, смонтированные на перемещающихся узлах станка, должны иметь линейную скорость движения не более 10 м/мин или должны отключаться при быстром перемещении рабочих органов (узлов) станка.

2.2.8. Проверка скоростей главного движения

Приступая к проверке скоростей главного движения (чисел оборотов, чисел ходов), необходимо убедиться, прежде всего, в том, что станок находится в исправном состоянии. В частности, следует установить, что натяжение ремней и приводных цепей нормально, подшипники шпинделя и других ответственных валов и клинья направляющих отрегулированы правильно, все трущиеся во время работы поверхности хорошо смазаны и т. п.

Проверку скоростей главного движения надо начинать с наименьшей скорости, последовательно переходя к скоростям на дальнейших ступенях вплоть до наибольшей. Проверка производится на каждой ступени не менее двух раз.

2.2.9. Проверка величин подач

Проверка величин подач производится в зависимости от вида подачи:

- в миллиметрах на оборот шпинделя
- в миллиметрах в минуту
- в миллиметрах на один двойной ход

Если подачи исчисляются в миллиметрах на оборот шпинделя, проверка осуществляется путем измерения перемещения суппорта, стола или шпинделя за определенное число оборотов последнего. Частное от деления измеренного перемещения в миллиметрах на данное число оборотов шпинделя является искомой величиной подачи в миллиметрах на оборот. Величины перемещения измеряются индикатором и мерами длины, штанген-рейсмасом или штанген-глубиномером (в зависимости от того, какие инструменты наиболее подходят в том или ином случае). До начала измерений суппорту, столу или шпинделю необходимо пройти некоторый путь самоходом, чтобы исключить влияние мертвого хода. Число оборотов шпинделя измеряют подсчетом на глаз при медленном ходе станка или провертывании шпинделя от руки. Для более точного подсчета числа оборотов на шпиндель и на неподвижную часть станка наносят тонкую риску или, сделав на шпинделе тонкую риску с помощью штанг штанген-рейсмаса, дают шпинделю точно определенное число оборотов.

В случае исчисления подач в миллиметрах в минуту проверка производится измерением перемещения стола, суппорта, головки и т. д. за определенный промежуток времени, фиксируемый по секундомеру; путь перемещения измеряется точной масштабной линейкой. Частное от деления измеренного перемещения в миллиметрах на время, зафиксированное секундомером в минутах, дает искомую величину подачи в миллиметрах в минуту.

Подачи в миллиметрах на один двойной ход проверяют аналогично подачам в миллиметрах на один оборот шпинделя.

2.3. Испытание станков в работе под нагрузкой и производительности

Целью испытаний станков в работе под нагрузкой и производительности является выявление качества работы станка в нормальных условиях, а также правильность функционирования и согласованность действия всех его элементов.

Этот метод наиболее часто применяется на производстве, т. к. не требует дополнительного измерительного оборудования и времени, т. е. является методом функциональной диагностики.

2.3.1. Проверка точности деталей, изготовленных на станке

Проверка точности деталей, изготовленных на станке, позволяет выявить точность станка в рабочем состоянии. Выбор образца для испытаний, а также инструмента и режимов резания производят в соответствии с типом, размерами и конструкцией испытываемого станка по соответствующим стандартам. Так, на токарных станках производят:

а) обтачивание закрепленной в патроне заготовки валика диаметром не менее $1/4$ высоты центров и длиной не менее высоты центров, но не более 300 мм;

б) подрезку торца заготовки диаметром не менее высоты центров.

Обработанный валик контролируют на отклонение от овальности и конусообразность с помощью микрометра, а у торцевой поверхности проверяют отклонение от плоскостности с помощью линейки, щупа и мерных плиток.

Полученные отклонения сравнивают с наибольшими допустимыми.

При испытании горизонтальных и универсальных фрезерных станков обрабатывают торцевой фрезой три взаимно перпендикулярные поверхности заготовки из чугуна (см. раздел 2.4.1. Примерные условия проведения испытаний на чистовых режимах для станков).

Проверяют отклонение от плоскостности обработанной поверхности, отклонение от параллельности основанию и отклонение взаимной перпендикулярности с помощью поверочной линейки, щупа, индикатора и угольника.

Проверка производится обработкой образцов на средних ступенях скорости, в соответствии с производственной характеристикой станка, при нагрузке его до номинальной мощности привода путем подбора величины сечения стружки. В этих условиях станок должен показать нормальную мощность (по паспорту или каталогу) и работоспособность при полной нагрузке в течение не менее 30 минут. В процессе испытания допускается кратковременная перегрузка приводного электродвигателя на 25 % сверх номинальной мощности.

Испытание в работе универсальных станков производится в зависимости от их назначения, на обдирочном или чистовом режиме. Если станок предназначен для обдирочных и для чистовых работ он должен испытываться на обоих режимах.

Более подробно условия проверки точности деталей, изготовленных на станке, изложены ниже (см. раздел 2.4. Проверка станков на геометрическую точность, чистоту обработки и точность обрабатываемой детали).

2.3.2. Проверка механизмов станка в работе под нагрузкой

При испытании станка в работе под нагрузкой все механизмы его должны работать исправно. При этом не допускаются вибрации станка, неравномерность (скачкообразность) движений, резкие шумы, перегрев подшипников, заедание шпинделя и валов в опорах, заедание ползуна, кулисных камней и тому подобные явления, а тем более какие бы то ни было повреждения деталей станка.

Устройства, предназначенные для защиты станка от перегрузок, должны работать исправно и надежно.

Передача движения от главного привода должна быть плавной, без шума, толчков и сотрясений, вызывающих вибрацию.

При испытании станка под нагрузкой проверяют работу муфт включения, а также надежность и безотказность действия тормозов.

Главная фрикционная муфта станка должна включаться легко и плавно как при нагрузке, отвечающей номинальной мощности привода, так и при перегрузке станка до 25 %, эта муфта не должна самовыключаться или буксовать. Кроме того, проверяют безотказность работы всех переключений, блокировок, механизмов автоматических перемещений и перестановок.

Суппорты, салазки, столы и тому подобные узлы должны перемещаться при нагрузке станка достаточно легко, без заедания и перекосов. Неравномерность хода, заедание или провертывание органов ручного управления не допускаются. Движение их должно осуществляться одним и тем же усилием в течение всего времени перемещения или вращения соответствующего узла станка.

Положения рукояток управления должны фиксироваться настолько надежно, чтобы не происходило самопроизвольного переключения или перемещения их во время работы станка под нагрузкой.

Электроаппаратура, системы смазки и охлаждения должны функционировать в течение всего времени испытания без перебоев. Не допускается никаких перебоев в работе электроаппаратуры, рубильников, выключателей, реостатов, автоматов и пр.: отказ в действии (даже случайный), недостаточно быстрое включение или выключение, чрезмерный нагрев пускового реостата, гудение реле и т. п.

2.3.3. Проверка скорости главного движения станка

Скорости главного движения станка (числа оборотов шпинделя, скорости перемещения стола, суппорта, каретки, головки, числа двойных ходов ползуна и долбяка в минуту) при номинальной нагрузке станка, оговоренной паспортом или заказом, для каждой ступени не должны отклоняться более чем на 5 % от скоростей главного движения при работе станка на холостом ходу.

2.3.4. Испытание станков на производительность

Специализированные операционные станки, агрегатные станки, автоматы, полуавтоматы и другие станки, заказанные с наладкой, станки с ЧПУ [7] (а также универсальные станки, относительно которых в заказе оговорены испытания путем обработки определенного изделия или образца), испытывают обработкой на станке соответствующего изделия; при этом проверяют, отвечает ли фактически полученная производительность предусмотренной в заказе. Производительность станка определяется количеством изделий, обработанных в единицу времени таким образом, что качество их (точность размеров и формы, степень чистоты поверхностей) отвечает требованиям заказа и приложенных к нему чертежей и образцов изделий.

Если в процессе испытания специализированного станка на производительность нагрузка его резанием при обработке изделий не достигает номинальной величины, необходимо испытать станок под полной нагрузкой путем обработки образцов.

Работа любого технологического автомата характеризуется периодическим повторением основных (рабочих) и вспомогательных (холостых) действий в заданной последовательности, т. е. повторением рабочего цикла. Период рабочего цикла является важным параметром, определяющим цикловую производительность оборудования.

Цикловая производительность $Q_{ц}$ технологического автомата определяется количеством продукции, произведенной в единицу времени

$$Q_{ц} = \frac{1}{T_{ц}} = \frac{1}{t_{от}} + t_{в},$$

где $t_{от}$ – основное технологическое время (время основных ходов по сборке, формообразованию, и др.); $t_{в}$ – время вспомогательных действий (подача изделия в зону сборки, перемещение базовой детали в новую позицию, транспортные, загрузочные, установочные и зажимные действия).

Таким образом, цикловая производительность зависит как от сложности изделия, метода его изготовления, режимов и степени совме-

ния операции, т. е. собственно технологии изготовления, так и от скорости вспомогательных движений, конструктивных особенностей их механизмов и др.

Частным случаем цикловой производительности (идеальный случай при $t_b \rightarrow 0$, например, при совмещении холостых и вспомогательных действий с основными) является технологическая производительность

$$K = \frac{1}{t_{от}}.$$

Она характеризует потенциальные возможности, заложенные в данном технологическом процессе (ТП) изготовления изделия.

Для автоматов различного технологического назначения составляющие $t_{от}$ и t_b , входящие в цикловую производительность, определяться будут по-разному в зависимости от структуры автомата, типа приводов, применяемых в нем, и других особенностей.

Производительность металлорежущих станков с ЧПУ проверяют при обработке детали по контуру.

Недостаточное быстродействие их приводов может стать источником больших динамических погрешностей в местах резкого изменения направления обхода контура. Для снижения их вводят программированное торможение-разгон, что приводит к увеличению времени обработки контура, т. е.

$$t_{пт} = t_{от} + t_p,$$

где Δt_p – время на торможение-разгон.

При этом цикловая производительность уменьшается и будет равна

$$Q'_ц = (t_{от} + \Delta t_p + t_b)^{-1}.$$

Отсюда можно вывести требование к быстродействию привода, определяя его как время торможения (или разгона) от скорости V до V_T . Считая движение равнозамедленным (или равноускоренным), определяем путь торможения Δl (разгона) по формуле

$$\Delta l = \frac{V_T^2 - V^2}{2a},$$

где a – замедление (ускорение); V , V_T – начальная и конечная скорости.

Если контур состоит из n участков, длины которых l_1, l_2, \dots, l_n распределены по равномерному закону и имеют упомянутые выше сопряжения, время обработки без учета торможения (замедления)

$$t = \frac{1}{V_T} \sum_{i=1}^n l_i,$$

где $\sum_{i=1}^n l_i$ – длина контура детали.

С учетом разгона в начале участков и торможений в конце их, время обработки увеличится и будет равным

$$t_{\text{пр}} = \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{V_T} + \frac{V_2^2 - V^2}{2aV_T} = t_{\text{от}} + \Delta t_p,$$

где $\Delta t_p = \frac{V_2^2 - V^2}{2aV_T}$.

Величина Δt_p , снижающая производительность машины, будет тем больше, чем больше перепад скоростей ($V_2 - V$) и чем меньше ускорение, развиваемое приводом.

Выразив время рабочих ходов через ускорение и перепад скоростей, получим относительное уменьшение производительности машины

$$Q_{\text{ц}} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{l_i}{V_T} + \frac{V_2^2 - V^2}{2aV_T} + t_b \right)^{-1} \cdot (V_2^2 - V^2) \cdot (2aV_T)^{-1}.$$

Чтобы исключить уменьшение производительности, связанное с появлением величины, необходимо увеличить быстродействие привода. В идеальном случае время разгона (торможения) должно быть равным или меньшим времени поворота фрезы на один зуб

$$T_p \leq \frac{60}{\omega z},$$

где T_p – время разгона (торможения); ω – частота вращения фрезы, об/мин; z – число зубьев фрезы.

При этом ускорение

$$a \geq \frac{2S}{T_p^2},$$

где S – подача на зуб, мм.

При выполнении неравенств динамические погрешности не будут оказывать существенного влияния на точность обработки сопряжений, и вводить замедления (ускорения) при подходе к ним не потребуется.

При использовании позиционных систем ЧПУ, которые обеспечивают установочные перемещения, в формуле для цикловой производительности будет изменяться время вспомогательных действий t_b , точнее, та его часть, которая определяет установочные перемещения.

Считая, что межосевое перемещение осуществляется одновременно по двум координатам и что при подходе к заданной координате осуществляется одноступенчатое торможение, время на перемещение между двумя центрами отверстия будет равно

$$t_y = \frac{(l - 2l_n)}{V_y + 2t_n},$$

где t_y – время установочных перемещений; t_n – длина пути, на котором осуществляется пуск (торможение); t_n – время пуска (торможения); V_y – скорость установочных перемещений; l – расстояние между двумя координатами.

Скорость установочных перемещений должна удовлетворять неравенству

$$V_{\max n} \geq V_y \geq \frac{1}{kt_{от}},$$

где V_{\max} – максимальная скорость перемещения, допускаемая прочностью кинематических связей привода; $t_{от}$ – время обработки, например, сверления, зенкерования, растачивания; k – коэффициент, характеризующий часть времени $t_{от}$, обычно $k=0,1$.

Время пуска (или торможения) t_n для равномерно ускоренного движения

$$t_n = \sqrt{\frac{2l_n}{a}}.$$

Длина пути пуска может быть выражена через скорость и ускорение

$$l_n = \frac{V_y^2}{2a}.$$

Тогда время пуска $t_n = \frac{V_y}{a}$, а время установочного перемещения между двумя центрами

$$t_y = \frac{1}{V_y} + \frac{3}{2} \cdot \frac{V_y}{a}.$$

Если необходимо произвести n установочных перемещений с длинами l_1, l_2, \dots, l_n . то общее время установочных перемещений

$$t_y = \frac{1}{V_y} \sum_{i=1}^n l_i + \frac{3}{2} n \cdot \frac{V_y}{a}.$$

Учитывая время на установочные перемещения, цикловая производительность может быть записана так:

$$Q_{ц} = \left(t_{от} + t_{х.п} + \frac{1}{V_y} \sum_{i=1}^n l_i + \frac{3}{2} n \cdot \frac{V_y}{a} \right)^{-1}.$$

Таким образом, при использовании позиционных ЧПУ цикловая производительность может быть увеличена за счет увеличения скорости V_y , ускорения a , развиваемого приводом, уменьшения времени на установку (снятие), зажим (разжим) детали.

Однако цикловая производительность не является исчерпывающей характеристикой производительности технологических автоматов и автоматизированных комплексов (например, автоматических линий, автоматизированных участков). Так производительность в течение длительного времени, например смены (фактическая производительность), еще зависит от внецикловых потерь

$$Q_{\phi} = \left(t_{от} + t_{в} + \sum_{i=1}^n t_{вцп} \right)^{-1},$$

где $\sum_{i=1}^n t_{вцп}$ – внецикловые потери.

Под потерями здесь понимается время, в течение которого автомат или комплекс по тем или иным причинам не выпускает продукцию. Если это время не входит в цикл работы автомата, то его относят к внецикловым потерям. Они включают потери времени, связанные со сменой инструмента $t_{и}$, внеочередным ремонтом и регулировкой механизмов $t_{е}$.

Этот вид потерь учитывает недостаточную надежность автоматизированных технологических систем, связанную с отказами; потери на организационное обслуживание $t_{ор}$; потери на контроль и устранение брака $t_{б}$, и потери на переналадку $t_{пер}$.

Увеличение степени автоматизации технологических автоматов и особенно комплексов позволило некоторые из перечисленных операций автоматизировать (например, смену инструмента, замену управляющей программы), ввести активный автоматический контроль с автоподладкой по результатам измерения, но это имеет место не во всех случаях.

В общем виде фактическая производительность

$$Q_{\phi} = (t_{\text{от}} + t_{\text{в}} + t_{\text{и}} + t_{\text{е}} + t_{\text{ор}} + t_{\text{б}} + t_{\text{пер}})^{-1}.$$

Пути увеличения производительности:

- автоматизация;
- совмещение операций;
- правильный выбор конструктивных решений механизмов холостых и вспомогательных действий и увеличение их скорости срабатывания;
- применение в управлении автоматами и комплексами средств вычислительной техники;
- повышение коэффициента загрузки оборудования.

Смену инструмента можно автоматизировать с помощью автоматической смены инструмента (АСИ) различного типа: в виде револьверной головки (до 28 шт.), в виде магазина с автооператором (до 100 шт.). Критерием должна быть стоимость и надежность, ограничение времени смены инструмента ($t_{\text{и}} \leq 0,1 t_{\text{от}}$).

Фактическая производительность для многопозиционных автоматов с различным видом агрегатирования будет записана несколько иначе, так как может измениться время $t_{\text{от}}$.

Для упрощения рассуждений примем некоторые условия идеализации:

- не будем учитывать потери $t_{\text{ор}}$, $t_{\text{б}}$ и $t_{\text{пер}}$ по организационным причинам, на устранение брака и переналадку между операциями по трудоемкости;
- деление между операциями по трудоемкости равномерное и время $t_{\text{в}}$ на вспомогательные операции одно и то же.

Для многопозиционного автомата с последовательным агрегатированием (последовательным расположением рабочих головок и последовательным выполнением операций) фактическая производительность будет определяться по нижеприведенной формуле

$$Q_{\phi} = \frac{1}{\frac{1}{K_0 q} + t_B + \left(\frac{t_y}{q} + t_e\right) \cdot q} = \frac{K_0 q}{1 + K_0 q t_B + K_0 q^2 \left(\frac{t_n}{q} + t_e\right)},$$

где $K_0 = \frac{1}{t_{от(0)}}$ – технологическая производительность для однопозиционного автомата до агрегатирования; q – число последовательных рабочих головок; $t_{от} = \frac{1}{K_0 q}$ – основное технологическое время после введения

последовательного агрегатирования; $q_{опт} = \sqrt{\frac{1}{K_0 t_e}}$.

Для автоматической линии (комплекса) с нежесткой межагрегатной связью и последовательным агрегатированием

$$Q_{\phi} = \frac{K_0 q}{1 + K_0 q t_B + K_0 q \left[\left(\frac{t_n}{q} + t_e\right) \cdot \frac{q}{n} + t_M \right]}.$$

где n – число участков, внутри которых существует жесткая межагрегатная связь, а между участками установлены автоматические накопители, делающие эту связь нежесткой; t_M – коэффициент, учитывающий ограниченную емкость накопителей и конечную их надежность.

Для автоматов с параллельным выполнением операций

$$Q_{\phi} = \frac{p K_0}{1 + K_0 t_B + K_0 p (t_n + t_e)},$$

где p – число параллельно работающих головок.

При работе автоматов в составе автоматизированных производственных модулей и комплексов необходимо не только иметь возможность рассчитать производительность, но и обеспечить некоторую синхронность их работы, т. е. решать обратную задачу: по требуемой производительности определять величину настроечных элементов, что и позволяют приведенные выше формулы.

2.4. Проверка станков на геометрическую точность, чистоту обработки и точность обрабатываемой детали

Целями испытаний станка на геометрическую точность является проверка: чистоты обработки и точности обрабатываемой детали, прямолинейности направляющих, плоскостности столов, горизонтальности или вертикальности установки стоек, направляющих колонн, плит, положение и точности вращения шпинделей, параллельности или перпендикулярности осей между собой или соответствующих направляющих, погрешности ходовых винтов, делительных устройств, чистоты (шероховатости) обработки поверхностей детали при эксплуатационных режимах.

Проверка геометрической точности станка может осуществляться методами:

- а) функциональной диагностики;
- б) тестовой диагностики.

Метод функциональной диагностики – экспресс метод позволяет с малыми временными затратами в условиях производства без применения сложных измерительных устройств оценить точность станка, но не всегда дает ответ какие геометрические погрешности или неправильности взаиморасположения и элементов станка определяет геометрические погрешности детали.

Следует отметить, что эта погрешность может быть также вызвана вследствие дефектов (погрешностей), вносимых используемым приспособлением и инструментом и режимами резания. Погрешность, вносимая при обработке детали, здесь, как бы «априори», в расчет не берется, т. к. деталь выбирается жесткой и из хорошо обрабатываемого материала.

Для уточнения (локализации) возникших погрешностей обработки детали рационально использовать метод тестовой диагностики. Этот метод дополняет метод функциональной диагностики (см. раздел 2.4.3. Проверка геометрической точности станка без нагрузки).

Указанные точностные параметры определяют точность и правильность геометрической формы изготавливаемой детали.

Величина допуска, указанная в проверке, является наибольшей допустимой разницей между крайними показаниями измерительного прибора. В ряде проверок нормы точности определяют не только величину, но и направление допустимых отклонений, что всегда оговорено и тексте проверки. Основанием для установления направления отклонений послужило исследование направления действия рабочих усилий, собственного веса узлов, направлений износа направляющих, подшипников и пр.

Например: у направляющих токарных станков допускается отклонение от прямолинейности только в сторону выпуклости.

Отклонения осей шпинделя и пиноли задней бабки от параллельности направлению движения каретки допускается в вертикальной плоскости только вверх, а в горизонтальной – только в сторону резца.

У поперечно-строгальных станков непараллельность рабочей поверхности стола по направлению перемещения ползуна допускается в указанных пределах только в сторону наклона к станине (рис. 3, а).

У вертикально-сверлильных станков на колонне отклонение от перпендикулярности оси шпинделя к рабочей поверхности стола допускается только к колонне (рис. 3, б) и т. д.

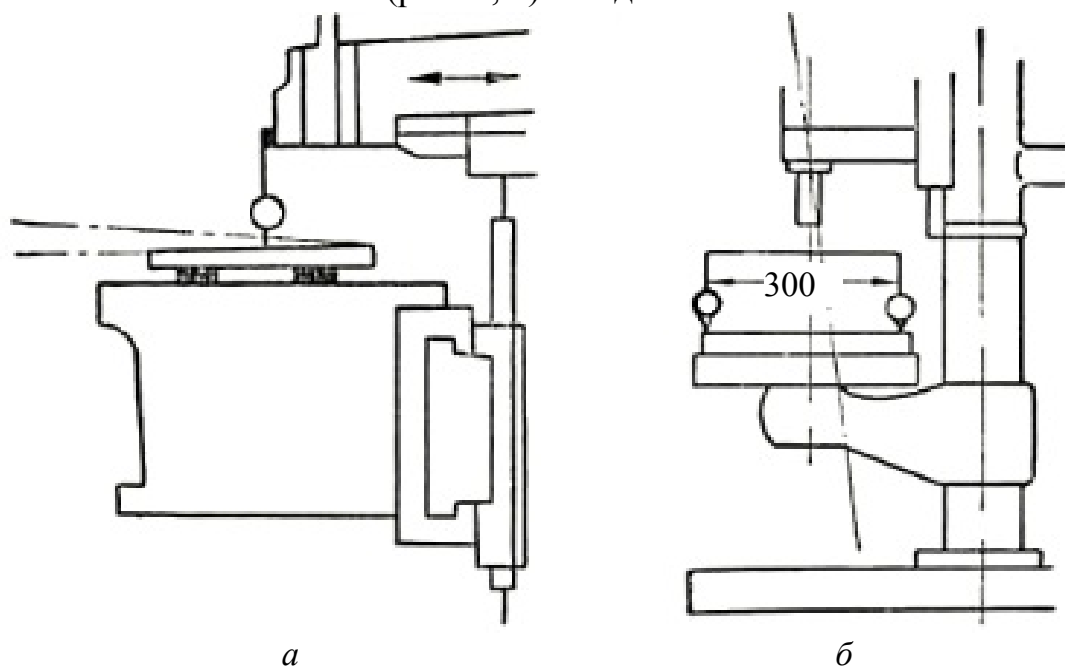


Рис. 3. Эскизы к проверке направления отклонений рабочих поверхностей:
а – строгального станка; б – сверлильного станка

В ГОСТ на точность всех станков оговорены общие условия проведения точностных проверок, указаны технические условия на контрольные оправки (длина рабочей части, диаметр, твердость и чистота поверхности) и дано приложение с определениями понятий «огранка», «радиальное, торцевое и осевое биение», «несовпадение осей» и др.

Методы проверок и средства измерения, указываемые в стандартах на нормы точности станков, являются арбитражными. Это значит, что при испытаниях допускается применять и другие методы и средства при условии, что точность измерений будет не ниже, предусмотренной стандартом. Отступления от рекомендаций ГОСТ вызываются либо отсутствием предусмотренной в них аппаратуры, либо желанием экономить время.

2.4.1. Примерные условия проведения испытаний на чистовых режимах для станков

На токарных и револьверных станках на стальной заготовке диаметром 50–100 мм протачивают последовательно при каждом из имеющихся чисел оборотов шпинделя цилиндрические пояски шириной 10–15 мм при глубине резания $t = 1–1,5$ мм и подаче $s = 0,2–0,3$ мм/об.

На строгальных станках при всех возможных числах двойных ходов, на заготовке прострагивают горизонтальные полосы шириной 15–30 мм при $t = 1–1,5$ мм и $s = 0,2–0,3$ мм/дв. ход.

На круглошлифовальных станках обрабатывают продольными проходами с применением охлаждения стальную заготовку диаметром около 75 мм при скорости окружной подачи до 15 м/мин, продольной подаче, равной 2/3 ширины круга на один оборот заготовки, и поперечной подаче 0,01 мм/дв. ход.

Обработанные таким образом участки поверхности должны быть без видимых невооруженным глазом следов дробления, дрожания или ступенчатости.

Для примера приведем условия испытаний в работе консольно-фрезерных станков 6Н82 (табл. 1) и 6Н12 (табл. 2), которым они подвергаются на заводе-изготовителе.

Таблица 1

Условия испытаний в работе консольно-фрезерных станков 6Н82

№ п/п	Образец	Инструмент	Элементы режима резания							Мощность по ваттметру N_3 , кВт	
		Тип фрезы	D , мм	Z	B , мм	T , мм	n об/мин	V , м/мин	S , мм/мин		S_z , мм/зуб
1	100×200, серый чугун СЧ12-28 $H_B=143–229$	Фреза цилиндрическая составная Б90Х150Х37,5 (ГОСТ 1979-52)	90	8	100	12	47,5	13,5	118	0,31	5–7
2	100×300 сталь 45 $H_B=167–195$	Фреза для скоростного фрезерования (Т15К6)	100	4	50	3	750	235	750	0,25	7–9

Примечания:

1. На режиме №1 провести проверку регулировки предохранительной муфты.
2. На каждом режиме делать не менее двух проходов.
3. Верхние пределы значений мощности по ваттметру даны с учетом затупления фрез.
4. Рекомендуемые формы чугунных образцов для проверки консольно-фрезерных станков на точность в работе приведены в табл. 3 и на рис. 5.

Таблица 2

Условия испытаний в работе консольно-фрезерных станков 6Н82

№ п/п	Образец	Инструмент	Элементы режима резания								Мощность по ваттметру N_3 , кВт
		Тип фрезы	D , мм	z	B , мм	T , мм	n , об/мин	V , м/мин	S , мм/мин	S_z , мм/зуб	
1	100×200, серый чугун СЧ12-28 $H_B=143-229$	Фреза торцевая со вставными зубьями (ВК8)	150	12	100	6	60	28	300	0,53	6–8
2	100×300 сталь 45 $H_B=167-195$	Фреза для скоростного фрезерования (Т15К6)	100	4	50	3	750	235	750	0,25	7–9

Примечания:

1. На режиме № 1 проверять работу компенсирующего устройства винта-гайки в условиях встречного и попутного фрезерования при несимметричном расположении фрезы (рис. 4) отдельно с продольной и поперечной подачами.
2. Режим № 1 служит также для проверки регулировки предохранительной муфты, муфта на данном, режиме срабатывать не должна.
3. На режиме № 2 делать не менее двух проходов.
4. Верхние пределы значений мощности по ваттметру даны с учетом затупления фрез.
5. Рекомендуемые формы чугунных образцов для проверки консольно-фрезерных станков на точность в работе приведены в табл. 3 и на рис. 5.

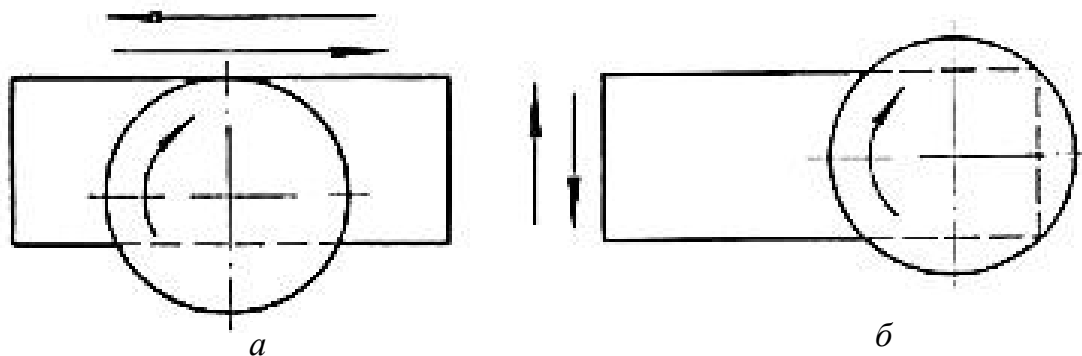


Рис. 4. Рекомендуемые схемы фрезерования при проверке точности деталей, изготовленных на станке при подаче стола:

а – продольной; *б* – поперечной

Таблица 3

Рекомендуемые формы чугунных образцов

При ширине рабочей поверхности стола, мм	B	L	H
До 160	80	160	80
От 160 до 250	100	200	100
Свыше 250	150	200	100

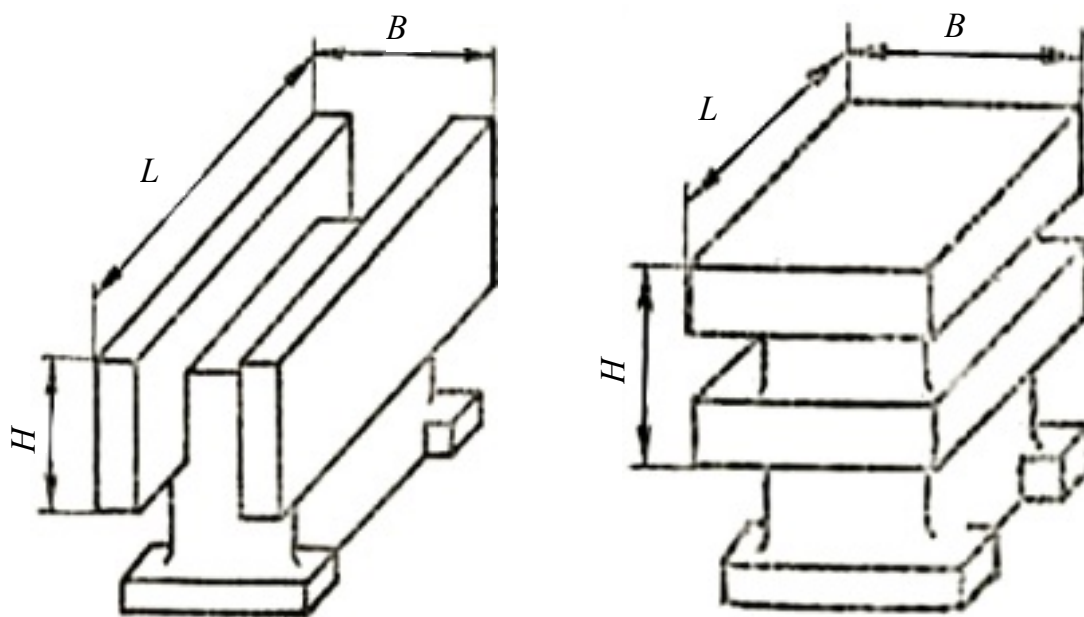


Рис. 5. Рекомендуемые формы чугуновых образцов для проверки консольно-фрезерных станков на точность в работе

Чистовая обработка всех трех поверхностей образца производится за одну установку двусторонней насадной фрезой. Диаметр фрезы должен быть не более $2B/5$ обрабатываемой поверхности.

После чистового фрезерования все обработанные поверхности должны отвечать установленным требованиям.

2.4.2. Испытание станков на чистоту обработки

Под чистотой или шероховатостью поверхности понимается ровность или гладкость ее, характеризующаяся величиной имеющихся на ней неровностей – гребешков и впадин, образующих рельеф поверхности. Практическое применение получили следующие критерии оценки чистоты (микрogeометрии) поверхности:

а) среднее арифметическое отклонение профиля R_a , т. е. по определению [5] среднее значение расстояний точек измеренного профиля поверхности до его средней линии, до линии, делящей измеренный профиль таким образом, что в пределах базовой длины – сумма квадратов расстояний точек профиля до этой линии минимальна;

б) высота R_z неровностей поверхности, т. е. среднее расстояние между находящимися в пределах базовой длины пятью высшими точками выступов и пятью низшими точками впадин, измеренное от линии, параллельной средней линии профиля. Нормативные документы [8] основаны на оценке чистоты поверхности по величине R_a или R_z , выражен-

ной в микронах. Для оценки чистоты поверхности применяются щуповые приборы – профилометры и профилографы [9], интерферометры, двойные микроскопы и другие приборы. Контроль чистоты поверхности с помощью измерительных приборов должен производиться в направлении, которое дает наибольшее значение R_a или R_z , если в технических условиях на данное изделие не указано определенное направление измерения микронеровностей.

Длина, на которой производятся измерения R_a или R_z , должна соответствовать требованиям [8]. В заводских условиях, так же как и при проверке чистоты обработки поверхностей деталей станков, наиболее простым и экономичным методом быстрой оценки чистоты поверхности (микргеометрии) обработанных на станке образцов является сравнение их с эталонами чистоты поверхности.

2.4.3. Проверка геометрической точности станка без нагрузки (тестовый метод)

Цели проверки геометрической точности станка тестовым методом в отличие от вышерассмотренного – выявление точностных параметров изготовления и сборки отдельных элементов станка, которые невозможно определить при обработке детали, вследствие наложения дефектов (погрешностей), вносимых используемым приспособлением и инструментом и режимами резания.

подавляющее большинство проверок правильности расположения или перемещения какой-либо части или узла станка относительно другой его части или узла основано на использовании приема, при котором стойку с индикатором укрепляют на одной из деталей, а мерительным штифтом индикатора касаются другой детали. Затем перемещают (или вращают) одну из деталей, фиксируя при этом величину ошибок их взаимного расположения.

Испытания на геометрическую точность заключается в проверке соответствия реальных точностных параметров и указанных в паспорте станка, в зависимости от класса точности станка (Н, П, В, А, С).

Точность нормируется ГОСТами «Нормы точности», построенными на предположении, что геометрические погрешности данного станка являются систематическими, которые полностью переносятся на обрабатываемую деталь. Это позволяет не проводить анализ результирующей погрешности на детали в целях выявления влияния только геометрических погрешностей станка.

При проведении испытаний большое значение имеют условия, при которых проводят измерения. Проверку нужно проводить при температуре 20 °С; колебания температуры не должны превышать ±0,5 °С для

станков класса точности С, ± 1 °С для станков класс А и В и ± 2 °С для станков класса П и Н.

Существует перечень параметров, характеризующих геометрическую точность станков, регламентированы методы их проверки и допустимые отклонения параметров.

По характеру проверки можно разбить на следующие группы:

а) точность движения: радиальное и осевое биение шпинделя, торцевое и осевое биение планшайбы (поворотного стола), прямолинейность перемещения рабочих органов, постоянство углового положения рабочей поверхности стола при его перемещении, точность дискретных перемещений и т. д.;

б) точность взаимного положения и движения: параллельность движения суппорта оси шпинделя, перпендикулярность оси шпинделя к поверхности стола, соосность или параллельность двух шпинделей, взаимная перпендикулярность продольного и поперечного перемещения стола и т. д.;

в) точность позиционирования (для станков с ЧПУ): точность перемещения в заданное положение, точность фиксации углового положения рабочих органов при повороте и т. д.

г) точность поверхностей, определяющих правильность положения заготовки и инструмента: плоскостность рабочей поверхности стола, точность Т-образных пазов стола и их параллельность, торцевое и радиальное биение базовых поверхностей шпинделя и др.;

д) точность направляющих поверхностей.

Приведенные виды проверок не исчерпывают всех видов измерений. Первые четыре группы непосредственно связаны с выходными параметрами станка, т. е. характеристиками траекторий перемещений формообразующих узлов. Оценка точности направляющих поверхностей определяет точность движения формообразующих узлов станка. Все проверки проводят без внешней нагрузки.

В ГОСТ 22267–76 [10] приведены схемы и способы измерения геометрической точности. Однако допускается замена указанных способов другими, обеспечивающими не меньшую точность измерений.

Основные проверки связаны с определением погрешностей движения формообразующих узлов, так как от этого зависит реализуемая на станке точность обработки.

Поскольку точность положение твердого тела в пространстве определяется шестью степенями свободы, необходимо в общем виде определять шесть погрешностей, характеризующих отклонение этого движения от идеального. При этом каждая из погрешностей участвует в формировании погрешностей детали.

На рис. 6 приведены схемы для оценки погрешностей движения двух основных типов формообразующих узлов станка при поступательном (рис. 6, а) и вращательном (рис. 6, б) движениях. При поступательном движении стола (суппорта, ползуна и т. п.) вдоль оси X (рис. 6, а), во-первых, возникают погрешности линейного положения, которые отнесены к опорной точке O стола. Они определяют погрешность позиционирования δx в направлении движения и погрешности δy и δz , характеризующие отклонение от прямолинейности в двух взаимно перпендикулярных направлениях (по осям Y и Z). Во-вторых, возникают угловые отклонения в движении стола относительно соответствующих осей. Угловая погрешность $\delta\varphi(x)$ относительно оси X связана с «извернутостью» направляющих или с погрешностями тел качения. Колебания относительно поперечной оси $\delta\varphi(y)$ и вертикальной оси $\delta\varphi(z)$ («рыскание») также связаны в основном с погрешностью формы и положения направляющих, а при движении под нагрузкой также и с жесткостью системы.

При вращательном движении (рис. 6, б) имеет место аналогичная картина: возникают угловые погрешности $\delta\varphi(z)$, связанные с точностью позиционирования, и угловые погрешности $\delta\varphi(x)$ и $\delta\varphi(y)$, определяющие перекося при движении относительно осей X и Y . Линейные погрешности, отнесенные к центру планшайбы, – это осевое (δz) и радиальное (δx и δy) биение.

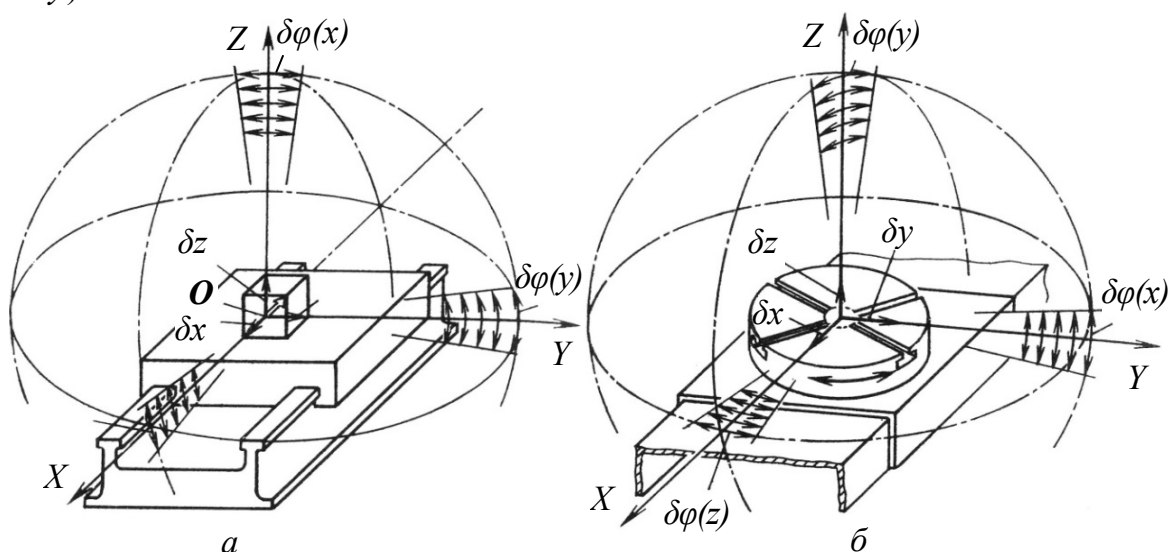


Рис. 6. Погрешности, возникающие при движении формообразующих узлов станка

Для станков нормальной точности, как правило, измеряют не все погрешности, а лишь те, которые в наибольшей степени влияют на точность обработки (например, точность позиционирования стола, радиальное и осевое биение шпинделя). Чем выше требования к точности

станка (выше его класс точности), тем измеряют большее число параметров, характеризующих положение и движение узла.

Для определения геометрической точности станка применяют разнообразные метрологические средства и оснастку. Если при основных проверках, характеризующих выходные параметры станка, примененный метод измерения позволяет оценить эти параметры не только при перемещении узлов без нагрузок, но и при рабочих режимах станка (в процессе обработки), то полученные результаты будут полностью характеризовать точность станка с учетом его силовых и тепловых деформаций. Для этой цели обычно не пригодны контактные измерительные приборы, часто применяемые при проверке геометрической точности станка.

Численные значения допустимых отклонений при различных проверках зависят от типа, размера и класса точности станка. В среднем порядок отклонений для станков средних размеров нормальной точности находится в пределах 10–30 мкм. Для станков классов П, В, А и С эти отклонения от нескольких микрометров до десятых долей микрометра и выше.

2.4.4. Примеры проверок геометрической точности станков

2.4.4.1. Схема проверки геометрической точности токарного станка

При проверке на точность станка проверяют [11]:

- прямолинейность продольного перемещения суппорта в горизонтальной плоскости;
- одновысотность оси вращения шпинделя передней бабки и оси отверстия пиноли задней бабки по отношению к направляющим станины в вертикальной плоскости;
- радиальное биение центрирующей поверхности шпинделя передней бабки под установку патрона;
- осевое биение шпинделя передней бабки и др.

Прямолинейность продольного перемещения суппорта в горизонтальной плоскости проверяют с помощью цилиндрической оправки, закрепленной в центрах передней и задней бабки, и индикатора, установленного на суппорте (см. рис. 7, а). Смещением задней бабки в поперечном направлении добиваются, чтобы показания индикатора на концах оправки были одинаковы или отличались не более чем на 0,02 мм на 1 м хода суппорта.

Одновысотность оси вращения шпинделя передней бабки и оси отверстия пиноли задней бабки по отношению к направляющим станины в вертикальной плоскости проверяют при удалении задней бабки от передней на $1/4$ наибольшего расстояния между центрами (рис. 7, б).

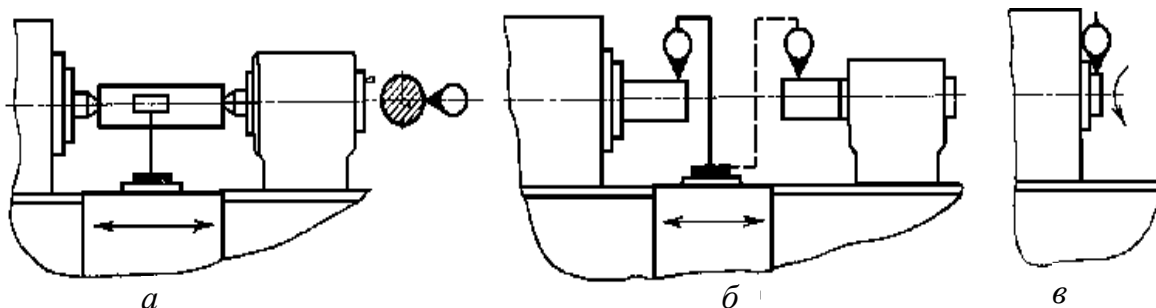


Рис. 7. Схемы проверки геометрической точности токарного станка:
 а – прямолинейности продольного перемещения суппорта в горизонтальной плоскости; б – одновысотности оси вращения шпинделя передней бабки и оси отверстия пиноли задней бабки по отношению к направляющим станины в вертикальной плоскости; в – радиального биения центрирующей поверхности шпинделя передней бабки под патрон

Проверку выполняют с помощью цилиндрических оправок, вставленных в отверстия шпинделя и пиноли задней бабки, и индикатора, установленного на суппорте. Наибольшее показание индикатора на образующей оправки шпинделя определяют возвратно-поступательным поперечным перемещением суппорта в горизонтальной плоскости относительно линии центров. Не изменяя положения индикатора, таким же способом определяют его показания на образующей оправки задней бабки. Разница в показаниях индикатора не должна превышать 0,06 мм у станков для обработки деталей с наибольшим диаметром 400 мм. Допускается только превышение оси отверстия пиноли над осью шпинделя передней бабки.

Радиальное биение центрирующей поверхности шпинделя передней бабки под патрон проверяют с помощью индикатора (рис. 7, в). При этом измерительный стержень индикатора устанавливают перпендикулярно образующей центрирующей шейки шпинделя. Радиальное биение шейки вращающегося шпинделя для патрона с наибольшим диаметром обрабатываемой детали 400 мм не должно превышать 0,01 мм.

Осевое биение шпинделя передней бабки измеряют с помощью оправки, вставленной в отверстие шпинделя, и индикатора, установленного на станке при вращающемся шпинделе (см. рис. 8, а). Измерительный стержень индикатора с плоским наконечником упирается в шарик, который установлен в центровое отверстие оправки. Осевое биение шпин-

деля для установки деталей с наибольшим диаметром 400 мм не должно превышать 0,01 мм.

Радиальное биение конического отверстия шпинделя передней бабки проверяют с помощью оправки длиной $L=300$ мм, вставленной в отверстие шпинделя, и индикатором, установленным в резцедержатель станка при вращающемся шпинделе (рис. 8, б). Для станков с наибольшим диаметром обрабатываемой детали 400 мм радиальное биение оправки у торца шпинделя (положение 1) не должно превышать 0,01 мм, а на расстоянии $L=300$ мм от торца шпинделя (положение 2) – 0,02 мм.

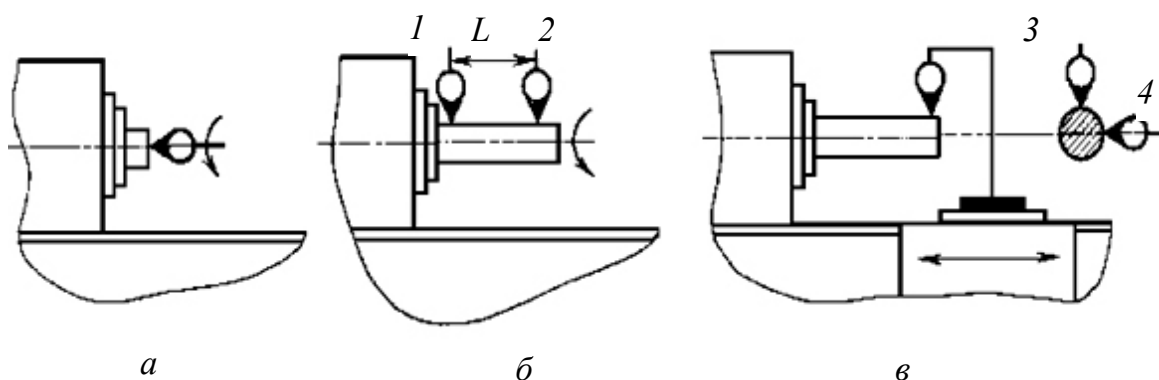


Рис. 8. Схема проверки геометрической точности токарного станка: а – осевого биения шпинделя передней бабки; б – радиального биения конического отверстия шпинделя передней бабки; в – параллельность оси вращения шпинделя передней бабки продольному перемещению суппорта

Параллельность оси вращения шпинделя передней бабки продольному перемещению суппорта проверяют с помощью оправки длиной $L = 300$ мм, установленной в отверстие шпинделя, и индикатором, установленным на суппорте станка (рис. 8, в). Измерение производят по образующей оправки в вертикальной (положение 3) и горизонтальной (положение 4) плоскостях. При этом снимают показания индикатора по двум диаметрально расположенным образующим оправки (при повороте шпинделя на 180°), перемещая суппорт с индикатором от торца шпинделя на расстояние $L = 300$ мм. Затем определяют среднеарифметическое значение отклонений, измеренных по двум образующим (отдельно для горизонтальной и для вертикальной плоскостей). Для станков с наибольшим диаметром обрабатываемой детали 400 мм допустимая непараллельность оси шпинделя направлению продольного перемещения суппорта в вертикальной плоскости не должна превышать 0,03 мм (причем непараллельность должна быть направлена только вверх), а в горизонтальной плоскости – 0,012 мм (непараллельность должна быть направлена только в сторону суппорта).

2.4.4.2. Схемы контроля геометрической точности сверлильного станка

При проверке на точность сверлильного станка проверяют [12]:

- плоскостность рабочей поверхности стола;
- радиальное биение поверхности шпинделя под инструмент;
- перпендикулярность оси шпинделя к рабочей поверхности стола;
- перпендикулярность перемещения гильзы шпинделя к рабочей поверхности стола.

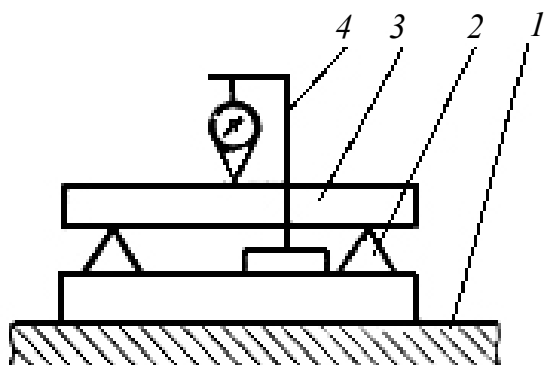


Рис. 9. Схема проверки станка на плоскостность рабочей поверхности стола:

1 – стол; 2 – опоры; 3 – поверочная линейка; 4 – измерительный прибор

Для проверки плоскостности рабочей поверхности стола 1 на рабочей поверхности устанавливаются в двух точках заданного сечения две опоры 2 (рис. 9), на которые рабочей поверхностью кладут поверочную линейку 3 (см. рис. 45, б) так, чтобы расстояния от проверяемой поверхности до рабочей поверхности линейки у ее концов были равны. Измерительный прибор 4 устанавливают на проверяемую поверхность так, чтобы его измерительный наконечник касался рабочей поверхности линейки и был перпендикулярен ей.

Измерительный прибор перемещают по проверяемой поверхности вдоль линейки. В выбранных точках измерительным прибором измеряют расстояния от отдельных точек измеряемого сечения поверхности до рабочей поверхности линейки. Отклонение от плоскости равно наибольшей алгебраической разности показаний измерительного прибора во всех сечениях.

Радиальное биение под инструмент проверяют как внутреннего конуса шпинделя – у торца шпинделя и на расстоянии L (см. рис. 10, а), так и наружного конуса – в середине длины образующей конуса (см. рис. 10, б).

При этом индикатор 2 устанавливается таким образом, чтобы его измерительный штифт касался либо наружной поверхности контрольной оправки А (см. рис. 10, а), либо посадочной поверхности шпинделя В (см. рис. 10, б) и был перпендикулярен оси шпинделя. Шпиндель 1 приводят во вращение со скоростью, позволяющей регистрировать показания измерительного прибора.

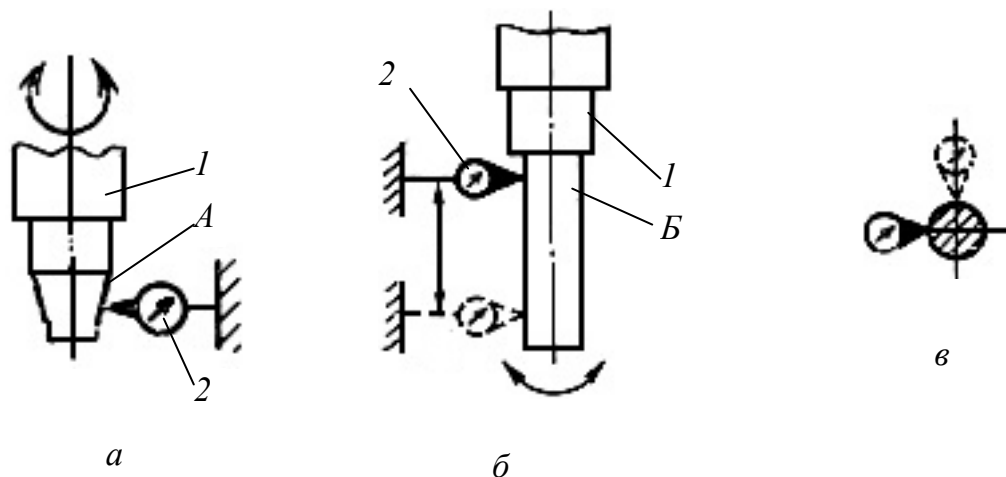


Рис. 10. Схема проверки станка на радиальное биение конуса шпинделя:
 1 – шпиндель; 2 – индикатор;
 А – наружная поверхность контрольной оправки;
 Б – посадочная поверхность шпинделя

Измерения проводят в двух взаимно перпендикулярных плоскостях (рис. 10, в).

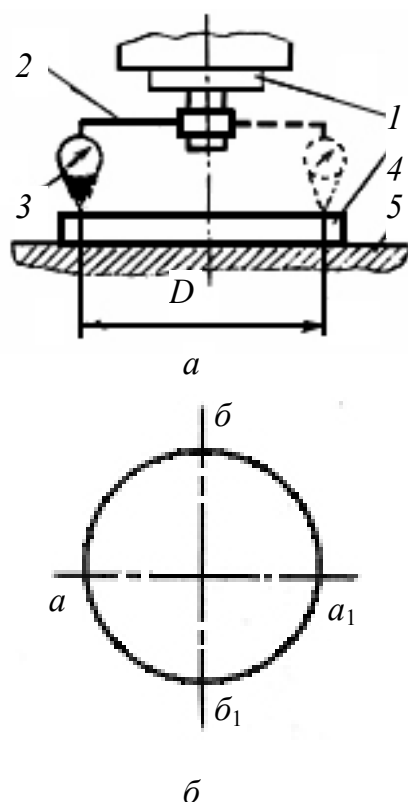


Рис. 11. Схема проверки перпендикулярности оси шпинделя рабочей поверхности стола

При проверке перпендикулярности оси шпинделя 1 к рабочей поверхности стола на конус шпинделя одевается оправка 2 (рис. 11). На оправке укрепляется индикатор 3 так, чтобы его штифт касался верхней части линейки 4, установленной на столе 5.

Шпиндель поворачивается на 180° .

Измерения проводятся:

- а) в продольной плоскости;
- б) в поперечной плоскости.

Погрешность определяется разностью показаний индикатора в точках a и a_1 или $б$ и $б_1$, отнесенной к диаметру окружности D , описанной штифтом индикатора.

Перпендикулярность α перемещения гильзы шпинделя к рабочей поверхности стола проверяется следующим образом. На шпинделе укрепляется индикатор так, чтобы его материальный штифт касался поперечной грани угольника установленного

на рабочей поверхности стола при вдвинутом положении гильзы (рис. 12). Гильза шпинделя перемещается на всю длину хода.

Измерения производятся в продольной (рис. 12, а) и поперечной плоскостях станка (рис. 12, б).

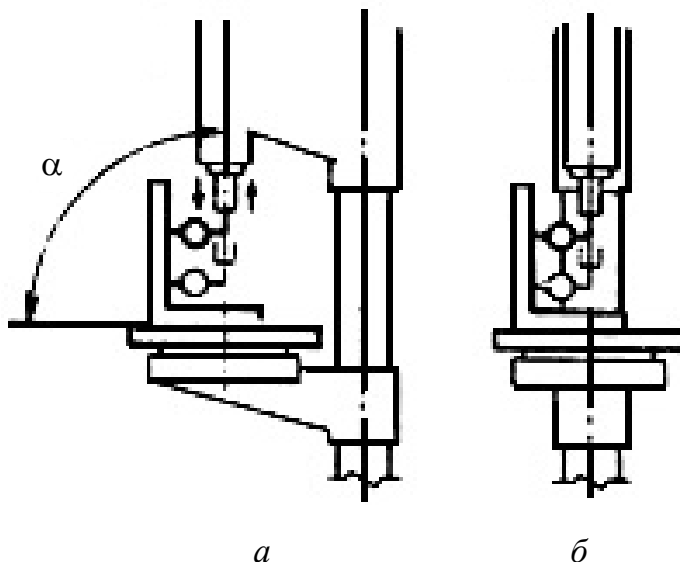


Рис. 12. Схема проверки перпендикулярности перемещения гильзы шпинделя рабочей поверхности стола

2.4.4.4. Схемы контроля геометрической точности вертикального консольно-фрезерного станка

Перед проверкой на нормы точности станок должен быть выверен по уровню относительно горизонтальной или другой заданной плоскости.

К каждому изготовленному заводом-изготовителем станку прилагается акт технической приемки, в котором указаны методы проверки станка на точность. Предельные значения допустимых отклонений при проверке на геометрическую точность станков определяются по ГОСТ 17734–88 [13].

Консольно-фрезерные станки подвергают проверкам на:

- радиальное биение наружной центрирующей шейки шпинделя;
- осевое биение шпинделя;
- перпендикулярность оси вращения шпинделя рабочей поверхности стола (для вертикальных станков)
- радиальное биение оси конического отверстия шпинделя;
- плоскостность рабочей поверхности стола;

- параллельность рабочей поверхности стола продольным направляющим;
- параллельность рабочей поверхности стола направляющим консоли

и др. (всего около 20 проверок).

Радиальное биение поверхности шпинделя под инструмент прове-

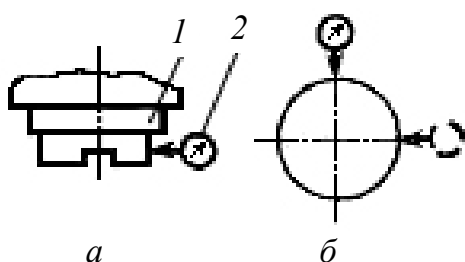


Рис. 13. Схема проверки радиального биения шпинделя

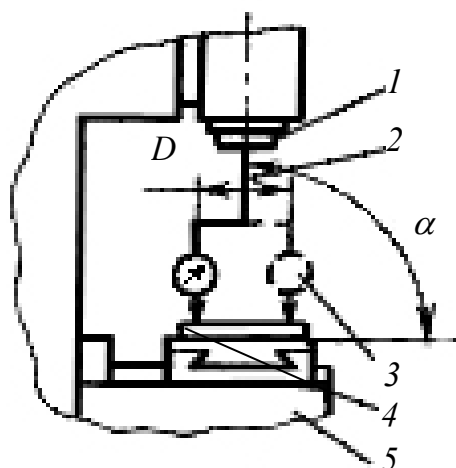


Рис. 14. Схема проверки перпендикулярности оси вращения шпинделя рабочей поверхности стола:

1 – шпиндель; 2 – оправка;
3 – индикатор; 4, 5 – стол

ряют по нижеприведенной схеме (рис. 13) методом, аналогичным как для схем рис. 10. Индикатор устанавливается так, чтобы его измерительный штифт 2 касался посадочной поверхности шпинделя 1 и был перпендикулярен к ней в середине. Шпиндель приводится во вращение. Измерения проводят в двух взаимно перпендикулярных плоскостях (рис. 13, б).

Схема проверки перпендикулярности оси вращения шпинделя рабочей поверхности стола представлена на рис. 14. Метод проверки аналогичен рассмотренному ранее (см. рис. 11). На шпинделе закрепляется оправка 2 (рис. 11). На оправке укрепляется индикатор 3 так, чтобы его штифт касался верхней части линейки 4, установленной на столе 5. Шпиндель поворачивается на 180° . Измерения проводятся:

- а) в продольной плоскости;
- б) в поперечной плоскости.

Погрешность определяется разностью показаний индикатора отнесенной к диаметру окружности D , описанной штифтом индикатора.

2.4.4.5. Проверка плоскостности рабочей поверхности стола

На рабочую поверхность стола по различным направлениям кладут линейку 1 поверочной гранью на две калиброванные плитки 2 равной высоты (рис. 15). Щупом и плоскими плитками (концевые меры длины) проверяется просвет между нижней гранью линейки и поверхностью стола 3.

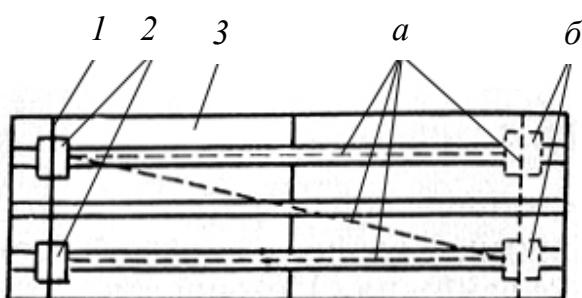


Рис. 15. Схема проверки плоскостности рабочей поверхности стола:

1 – линейка, 2 – калиброванные плитки, 3 – стол; а, б – возможные положения линейки и калиброванных плиток

2.4.4.6. Проверка параллельности рабочей поверхности стола направлению его перемещения

Проверке подвергается параллельность рабочей поверхности стола: а) продольному перемещению. Индикатор закрепляется на неподвижной части станка так, чтобы его измерительный штифт касался рабочей поверхности стола (рис. 15, а). Стол перемещают по продольным направляющим на всю длину хода. Консоль застопорена на станине, а салазки – на консоли;

б) поперечному перемещению; Индикатор закрепляется на неподвижной части станка так, чтобы его измерительный штифт касался рабочей поверхности стола (рис. 15, б). Стол перемещают по поперечным направляющим на всю длину хода. Консоль застопорена на станине.

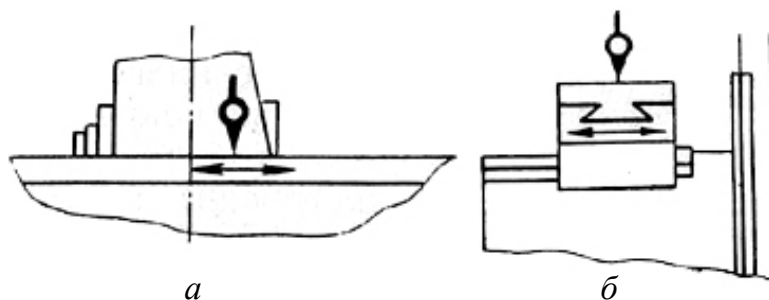


Рис. 16. Проверка параллельности рабочей поверхности стола направлению его перемещения: а – продольного; б – поперечного

2.5. Кинематическая точность станков

Цель проверки кинематической точности станка – определение уровня отклонения значений фактических перемещений рабочих органов станка, выполняющих взаимосвязанные формообразующие движения, к номинальным, определяемым заданной взаимной зависимостью.

2.5.1. Метод определения точности зубообрабатывающих станков

Кинематическая погрешность определяется как разность между угловым положением выходного вала идеального механизма и реальным (измеренным) угловым положением выходного вала [14].

В зависимости от величины кинематической погрешности в стандартах качества установлены различные классы точности станка или редуктора. Кинематическая погрешность является функцией поворота выходного вала.

На рис. 17 показан типичный график кинематической погрешности цепи обката-деления зубофрезерного станка на 1 обороте стола. На горизонтальной оси показано угловое перемещение стола (в оборотах), на вертикальной оси – кинематическая погрешность, в угловых секундах. В идеальном механизме кинематическая погрешность равна нулю и график представляет собой горизонтальную прямую линию, проходящую через 0. В реальном механизме из-за погрешности изготовления и монтажа зубчатых колес угол поворота выходного вала не равен расчетному. Это приводит к возникновению кинематической погрешности. Анализируя функцию кинематической погрешности, можно определить какие звенья передаточного механизма вносят наибольший вклад в погрешность. Также можно сравнить величину погрешности с допуском и сделать вывод о техническом состоянии механизма без его разборки.

Проверку проводят измерительно-диагностическим прибором – кинематометром (см. раздел 4.2.3. Кинематометр), который предназначен для контроля кинематической точности различных типов зубообрабатывающих и резьбообрабатывающих станков, зубчатых, винтовых и червячных передач, в частности для контроля различных типов:

- зубообрабатывающего оборудования (зубофрезерных, зубодолбежных станков) на соответствие допускам по параметрам кинематической точности [15, 16];
- для контроля различных типов зубчатых и червячных передач, редукторов на соответствие допускам [17, 18] для следующих параметров: кинематической, накопленной и циклической погрешностей; величине бокового зазора (при реверсе).

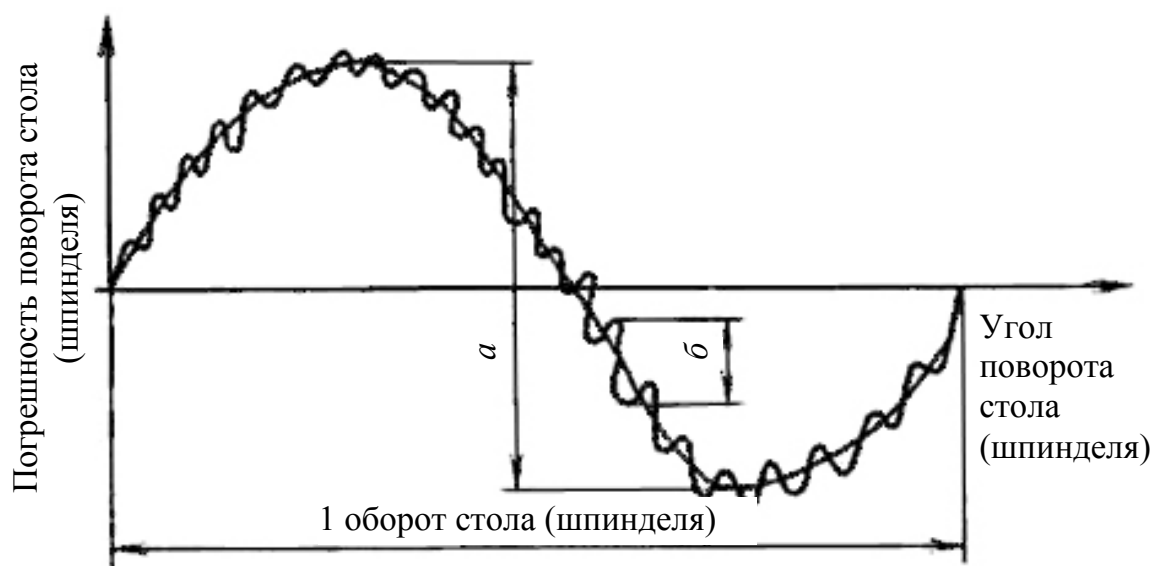


Рис. 17. Точность кинематической цепи взаимосвязанного поворота стола (шпинделя) относительно инструментального шпинделя:
 a , $б$ – накопленная и периодическая погрешности поворота

При этом без разборки станка выявляются эксцентриситеты, циклические погрешности и местные дефекты зубьев, зазоры и перекосы в передачах и ряд других дефектов, приводящих к снижению точности станка.

Для проведения измерения на входной и выходной вал проверяемого механизма устанавливаются датчики угла поворота – энкодеры. Затем механизм приводится в движение, и измерительный блок фиксирует угловое перемещение входного и выходного вала. Данные измерения передаются в компьютер, в котором вычисляется функция кинематической погрешности и выполняется ее анализ.

В результате анализа выявляются звенья кинематической цепи, которые вносят наибольший вклад в погрешность механизма. Составляющие кинематической погрешности сравниваются с допуском, и делается вывод о соответствии механизма паспортным нормам точности. При этом без разборки механизма выявляются эксцентриситеты, циклические погрешности и местные дефекты зубьев, зазоры и перекосы в передачах, и ряд других дефектов, приводящих к снижению точности.

Как видно из рис. 18, на столе и шпинделе штосселя станка с помощью специальных юстировочных приспособлений (входят в комплект поставки) были установлены датчики угловых перемещений типа ЛИР.

Конструкция указанных приспособлений позволяет проводить выставку датчиков в радиальном и торцовом направлениях точностью до 0,005–0,02 мм, что обеспечивает возможность измерения кинематической точности зубодолбёжного станка погрешностью не превышающей 2,5–3".

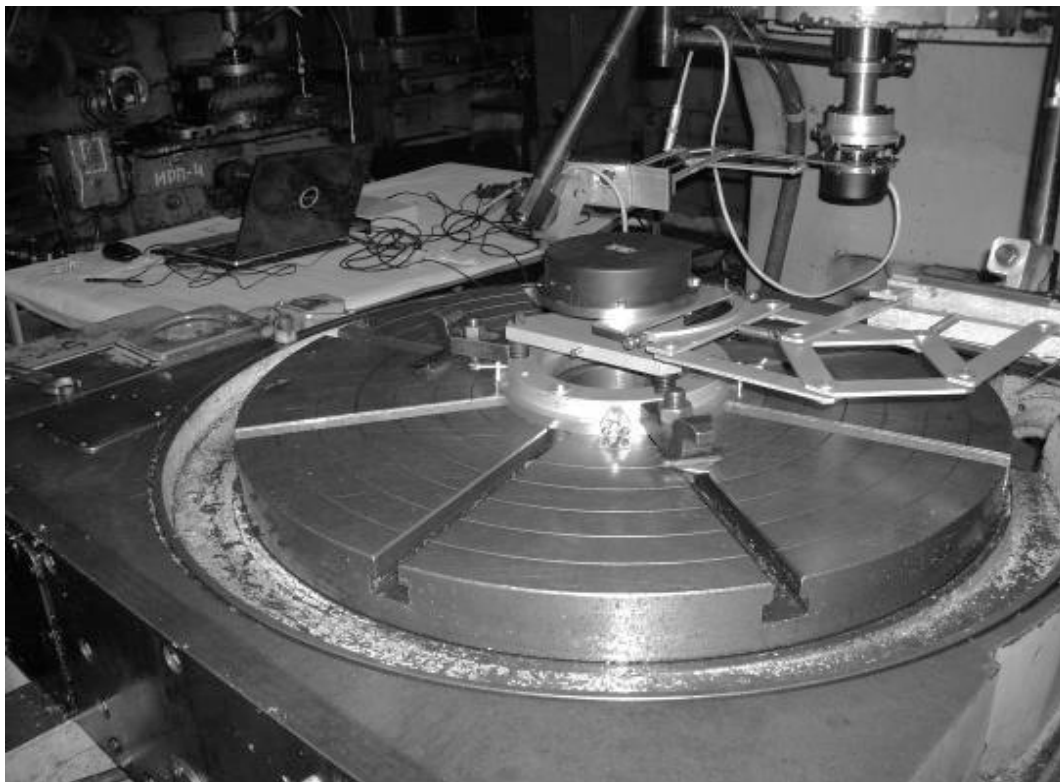


Рис. 18. Проверка кинематической точности зубодолбёжного станка мод. 5М150 ПФ

Датчики фиксируются от проворота с помощью пантографов, конструкция которых позволяет исключить дополнительную погрешность измерения, которая может иметь место при наличии оставшегося после выставки радиального биения датчика. На заднем плане (рис. 18) видна аппаратная часть кинематомера (измерительно-вычислительный блок и компьютер), которая соединена с датчиками с помощью кабелей.

В результате были выявлены следующие дефекты станка:

- местные дефекты зубьев червячных делительных колёс стола и штоселя;
- радиальное (или возможно торцовое) биение червячного делительного колеса штоселя;
- заедание в подшипниках шпинделя штосселя;
- заедание в упорных подшипниках делительного червяка стола, имеющее место при вращении стола по часовой стрелке;

- кинематический и/или геометрический эксцентриситет цилиндрического зубчатого колеса.

На рис. 19 показан пример измерения кинематической погрешности станка SN-8.

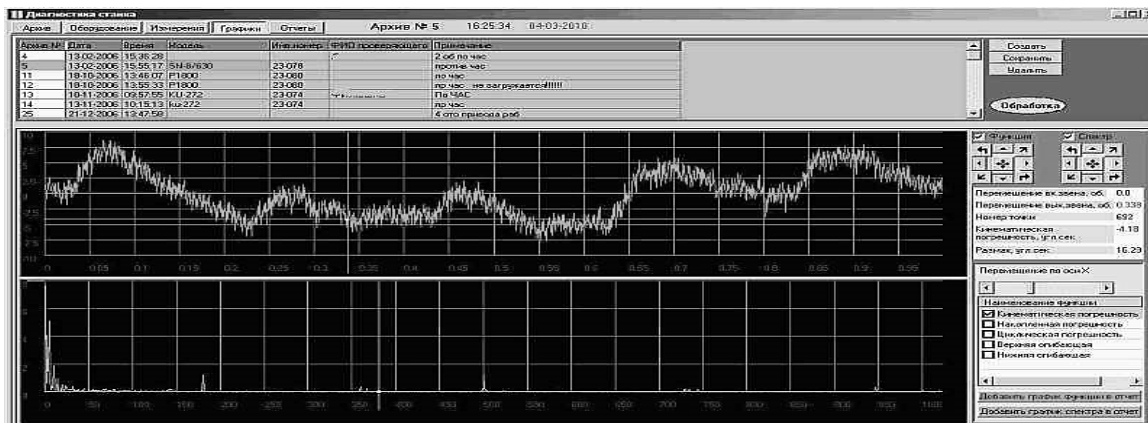


Рис. 19. Пример измерения кинематической погрешности станка SN-8

2.5.2. Методы определения точности резьбообрабатывающих станков

Существует два основных метода для определения точности резьбообрабатывающих станков:

- при помощи образцовой детали и датчика линейных перемещений (метод № 1);
- при помощи кинематомера (метод № 2).

Метод № 1. Средствами измерения являются: образцовая деталь, датчик линейных перемещений. Схема измерения приведена ниже (см. рис. 20).

Проведение измерений. Станок настраивается на выполнение взаимосвязанных формообразующих движений рабочих органов станка по программе, приведенной в нормативной документации. На место обрабатываемой детали устанавливается образцовая деталь 1, а на рабочем органе 2 закрепляется датчик 3 так, чтобы его наконечник находился в функциональной точке 4, совмещенной с рабочей поверхностью детали.

При выполнении взаимосвязанных формообразующих движений рабочих органов станка через заданные интервалы определяют значения перемещений измерительного наконечника датчика, которые регистрируются устройством 5. Погрешность кинематики на заданном интервале определяется наибольшим значением перемещения наконечника датчика. При необходимости учитываются данные паспорта на образцовую деталь.

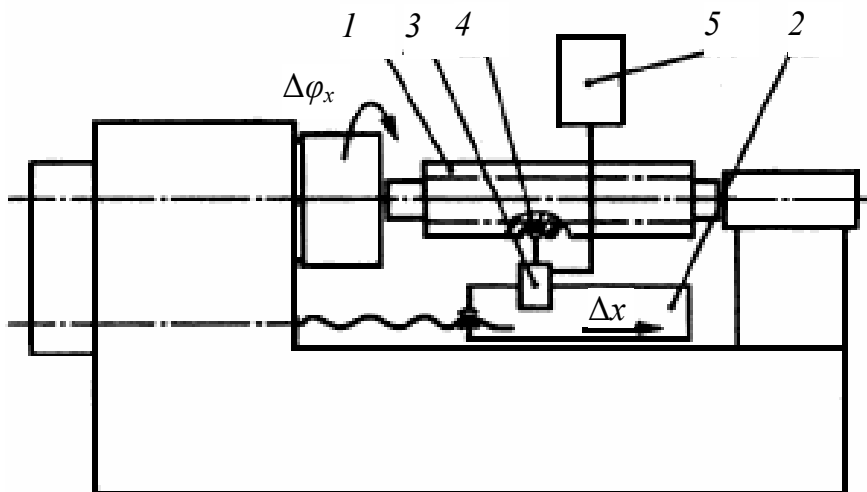


Рис. 20. Схема измерения при помощи образцовой детали и датчика линейных перемещений:

1 – образцовая деталь; 2 – рабочий орган; 3 – датчик;
4 – функциональная точка; 5 – регистрационное устройство

Метод № 2. Средства измерения – кинематомер. Схема измерения приведена на рис. 21.

Проведение измерений. Станок настраивается на выполнение взаимосвязанных формообразующих движений рабочих органов станка по заданной программе, приведенной в нормативной документации. Датчики 1 и 2 кинематомера устанавливаются таким образом, чтобы каждый из них контролировал перемещение соответствующих рабочих органов 3 и 4 станка.

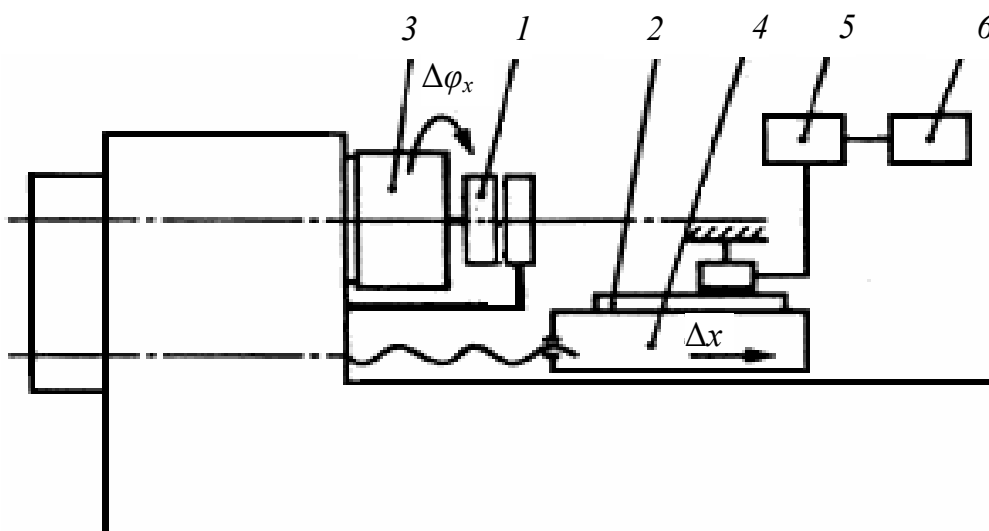


Рис. 21. Схема измерения при помощи кинематомера:

1, 2 – датчики; 3, 4 – рабочие органы; 6 – регистрационное устройство

При этом соединение датчиков и рабочих органов станка должны быть выполнены таким образом, чтобы исключить или свести к минимуму погрешности измерения, связанные с неточностью монтажа. При выполнении взаимосвязанных формообразующих движений рабочих органов станка первичная информация от датчиков поступает в устройство 5 и регистрируется устройством 6 через заданные интервалы. Погрешность кинематики на заданном интервале определяют как разность фактических и номинальных значений взаимосвязанных перемещений рабочих органов станка.

Представляет интерес метод, сущность которого аналогична рассмотренным, рассмотренного в работах [14].

Точность нарезаемой резьбы проверяют на образце 1 (диаметр которого примерно равен диаметру ходового винта станка), закрепленном в центры станка 6 и 7, при нарезании трапецеидальной резьбы длиной не более 500 мм с шагом, примерно равным шагу ходового винта станка (рис. 22).

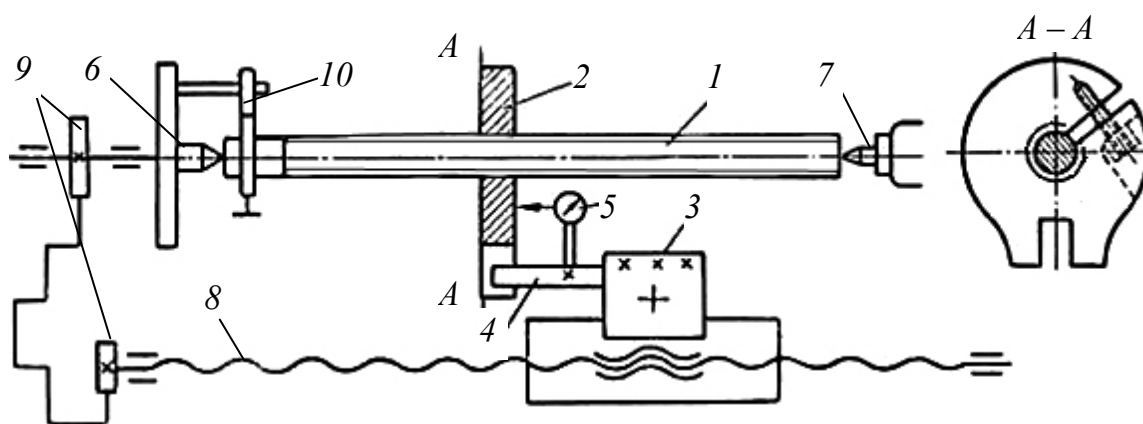


Рис. 22. Схема проверки точности нарезаемой на образце:

- 1 – образец; 2 – разрезная гайка; 3 – резцедержатель; 4 – специальная державка;
 5 – индикатор; 6 – передний центр; 7 – задний центр;
 8 – ходовой винт; 9 – сменные зубчатые колеса; 10 – поводковый патрон

При этом ходовой винт 8 непосредственно соединяют со шпинделем через сменные зубчатые колеса 9 с отключением механизма коробки подач. После чистовой обработки проверяют равномерность резьбы с помощью соответствующих приборов и методов проверки. По результатам измерений определяют накопленную погрешность шага резьбы – разность между фактическим и заданным расстоянием между любыми одноименными (не соседними) профилями витка резьбы в осевом сечении по линии, параллельной оси винта. Величина накопленной погрешности шага резьбы не должна превышать 0,04 мм на длине 300 мм.

2.6. Испытание жесткостных характеристик узлов станка

Цель проведения испытаний – выявление дефектов, неисправностей элементов станка, которые могут быть вызваны дефектами несущих элементов станка (трещины, раковины и т. п.), низким качеством пригонки стыковых поверхностей, состояния регулирующих деталей (клиньев, компенсаторных колец, планок), качества сборки.

Для обеспечения более точной обработки детали следует уменьшить приращение перемещения системы в направлении действия силы P_y (см. рис. 23).

Жесткость большей части элементов технологической системы определяется экспериментально, жесткость заготовки простой конфигурации (гладкие валы, планки) и некоторых типов инструментов можно найти расчетным путем.

Жесткость узлов новых станков достигается 20–40 кН/мм. В отдельных случаях жесткость узлов изношенных и разрегулированных станков бывает ниже 10 кН/мм. Жесткость узлов бывает неодинакова в различных направлениях. Существует несколько методов определения жесткости металлорежущих станков или их отдельных узлов, основные из которых:

- а) статистический (испытание на неработающем станке);
- б) производственный (испытание при обработке заготовки);
- в) динамический (испытание в процессе колебаний).

С увеличением жесткости повышается точность и производительность обработки.

Увеличение жесткости достигается следующими основными путями:

а) уменьшение количества станков в конструкции станков и приспособлений;

б) предварительной затяжки станков постоянно контактируемых деталей посредством резьбовых соединений;

в) улучшение качества сборки узлов, тщательной пригонкой сопряженных поверхностей и регулировкой зазоров;

г) повышением жесткости деталей технологической системы вследствие уменьшения их высоты или вылета и увеличения размеров опорной поверхности;

д) использованием дополнительных опор, люнетов и других опорных элементов для заготовок и инструментов.

Характерные примеры отклонения от заданной формы при токарной обработке за счет недостаточной жесткости отдельных элементов металлорежущего станка:

а) конусность обработанной цилиндрической поверхности детали в сторону передней бабки, при недостаточной жесткости задней бабки;

б) конусность обработанной цилиндрической поверхности детали в сторону задней бабки;

в) вогнутость обработанной цилиндрической поверхности детали из-за недостаточной жесткости передней и задней бабок.

Способность системы противостоять действию силы, вызывающей деформации, характеризует ее жесткость.

Жесткостью узла станка называется его способность сопротивляться появлению упругих отжаты под нагрузкой. Аналитически жесткость определяется по формуле

$$j = \frac{P}{\delta},$$

где P – нагрузка, приложенная к узлу в заданном направлении; δ – соответствующее упругое отжатие узла, измеренное в направлении действия отжимающей силы P .

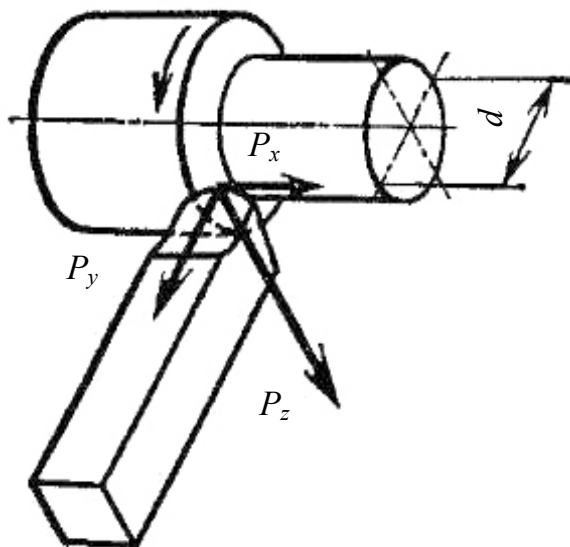


Рис. 23. Схема токарной обработки

На рис. 23 приведена схема сил, действующих в звеньях упругой технологической системы. Если бы под действием этих сил система не деформировалась, то заготовка после обработки имела бы форму цилиндра диаметром d . Однако под действием сил P_z , P_y , P_x упругая система подвергается деформации, в результате чего диаметр заготовки после обработки будет отличным от заданного на размер Δd (где Δd характеризует погрешность заданного размера d). Эта погрешность тем больше, чем больше действующие в процессе обработки силы P_z , P_y и P_x .

Следует иметь в виду, что сила резания P_z (тангенциальная), а в ряде случаев и P_x (осевая) также влияют на жесткость упругой системы. Так, например, жесткость суппорта токарно-винторезного станка при одновременном действии сил P_y и P_x оказывается более высокой, чем при действии только силы P_y ; при нагружении передней и задней бабки сила P_z уменьшает их жесткость.

Следует иметь в виду, что сила резания P_z (тангенциальная), а в ряде случаев и P_x (осевая) также влияют на жесткость упругой системы. Так, например, жесткость суппорта токарно-винторезного станка при одновременном действии сил P_y и P_x оказывается более высокой, чем при действии только силы P_y ; при нагружении передней и задней бабки сила P_z уменьшает их жесткость.

В различных точках обрабатываемой поверхности жесткость технологической системы различна. Различна и жесткость отдельных звеньев системы. Так, под *жесткостью станка* понимают способность узлов станка противостоять действию сил деформации, причем заготовку и инструмент в этом случае принимают абсолютно жесткими. Под

жесткостью инструмента или *приспособления* понимают способность того или другого противостоять действию сил деформации при абсолютно жестких станке и заготовке. В зависимости от условий работы при расчете деформаций учитывают не только силы P_z , P_y и P_x , но и массу обрабатываемых заготовок, а также влияние центробежных сил неуравновешенных вращающихся частей станка. Жесткость обрабатываемых заготовок определяют обычно по формулам курса «Сопротивление материалов».

Для облегчения расчетов жесткости технологической системы введено понятие податливости W , т. е. величины обратной жесткости (мм/Н)

$$W = \frac{1}{j}.$$

Если исходить из определения жесткости всех звеньев технологической системы и ее элементарных связей, то общая формула для расчета жесткости системы будет иметь вид

$$W = W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + \dots + W_n$$

или

$$\frac{1}{j} = \frac{1}{j_1} + \frac{1}{j_2} + \frac{1}{j_3} + \dots + \frac{1}{j_n}.$$

Жесткость технологической системы важна для процесса механической обработки главным образом по следующим соображениям:

а) чем меньше жесткость системы, тем сильнее отклоняются размеры и форма детали под действием различных причин, т. е. тем ниже точность обработки;

б) чем меньше жесткость системы, тем легче возникают и сильнее бывают вибрации во время резания, которые не только снижают качество деталей, производительность, стойкость инструмента и т. п., но подчас вынуждают совсем прекратить работу.

Поэтому всякие мероприятия по увеличению жесткости направлены в то же время и к повышению производительности.

Исследования [14] показали, что деформации самих деталей узлов станка играют незначительную роль в общей величине его отжима под действием нагрузки. Поэтому упругие отжатия зависят главным образом от качества пригонки стыковых поверхностей, состояния регулирующих деталей (клиньев, компенсаторных колец, планок) и качества сборки.

Жесткость станка можно определить тестовым методом (статическим, лабораторным), т. е. нагружением узлов неработающего станка, и методом функциональной диагностики (производственным методом) – путем испытания на жесткость работающего станка.

Статический метод заключается в постепенном нагружении узлов станка силами, соответствующими тем, которые возникают в процессе работы станка, с производством замеров деформаций.

При производственном методе испытания на жесткость проводят в процессе обработки заготовки с разной глубиной резания и неизменными остальными параметрами режима резания. Обработку ведут на коротких участках, после чего измеряют высоту уступа на обработанной поверхности. Разница размеров уступов является следствием различного отжатия заготовки, обусловленного глубиной резания. Чем меньше отжатие детали, тем меньше погрешность, тем выше жесткость станка или жесткость технологической системы (деформацией заготовки при испытании пренебрегают).

2.6.1. Тестовый метод определения жесткости

Экспериментальное определение жесткости состоит в последовательном нагружении узла различными по величине нагрузками, совпадающими по точке приложения и направлению с рабочим усилием, и измерении соответствующих упругих отжатий.

Методика проведения испытания заключается в следующей последовательности [14].

Сначала устанавливают динамометр так, чтобы создаваемые в последующем нагрузки, как указывалось выше, возможно точнее совпадали по характеру с рабочим усилием.

Индикатор укрепляют на части станка, относительно которой измеряют деформации испытуемого узла. Затем его мерительный штифт подводят к поверхности узла, дают натяг не менее одного оборота стрелки и устанавливают шкалу на нуль. Далее последовательно дают нагрузки, возрастающие ступенями через 100, 500 или 1000 Н вплоть до максимально возможного рабочего усилия. Чем выше значение этого усилия, тем крупнее выбирают ступени. При каждой нагрузке фиксируют величину отжима, занося получаемые данные в протокол. Разгрузку узла производят в обратном порядке.

При нулевом значении нагрузки стрелка индикатора, как правило, не возвращается до нулевого значения, показывая наличие и величину остаточных деформаций узла. Они являются следствием смятия вершин гребешков на недостаточно приработавшихся сопряженных поверхностях, смятием различных забоин, инородных включений, случайно попавших встык, выжиманием излишней смазки и главным образом дей-

ствием сил трения в стыках. Поэтому нагрузку и разгрузку повторяют второй, а иногда и третий раз.

Проверка станков на жесткость с целью ускорения проведения испытаний предусматривает предварительную выборку всех зазоров и прочих неупругих деформаций. Для этого узел сначала нагружают усилием, на 25 % превышающим максимальное. Затем его снимают, но не полностью, а оставляют контрольную нагрузку в 50–80 Н. После этого индикатор замера отжатий устанавливают на нуль и испытание далее проводят обычным путем.

Для определения суммарного зазора, величина которого обычно тоже нормируется, не переставляя индикатор, нагружают узел в обратном направлении. Если рабочее усилие реально может действовать на узел и в противоположном направлении, то и испытание на жесткость повторяют нагружением в обратном направлении. В заключение строят график зависимости $\delta = f(P)$.

На рис. 24 приведен типовой график отжатий.

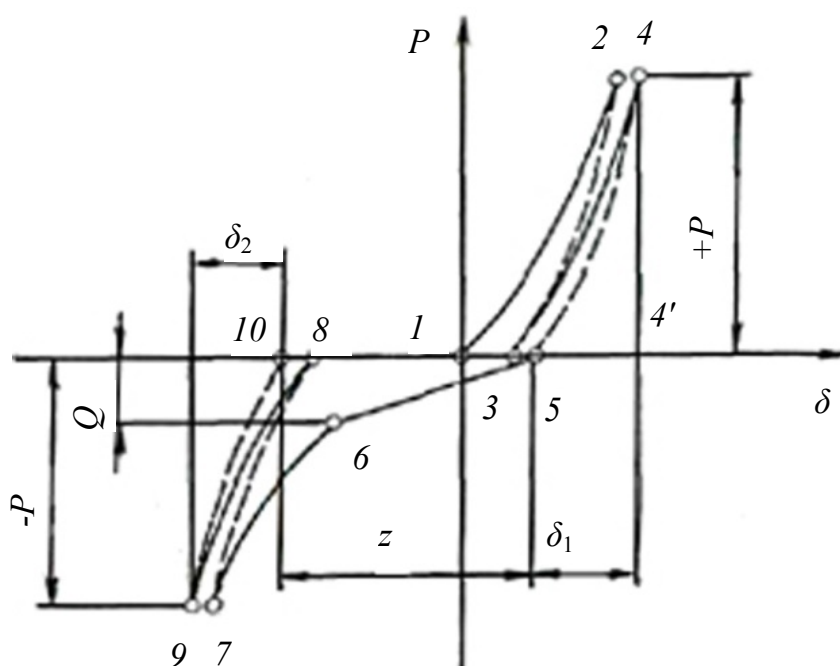


Рис. 24. Принципиальный вид графика отжатий, получаемых при испытаниях на жесткость

Конечные точки отдельных этапов испытания перенумерованы в порядке построения. Участок 1–2 представляет первую нагрузку, участок 2–3 – первую разгрузку. Отрезок 1–3 характеризует остаточные деформации в узле. Кривые 3–4 и 4–5 являются соответственно нагрузочной и разгрузочной ветвями повторного испытания. Остаточные деформации (отрезок 3–5).

Жесткость узла в условно положительном направлении:

$$j = +\frac{P_1}{\delta_1},$$

где P_1 , – максимальная нагрузка при испытании; δ_1 – упругая деформация, равная проекции на горизонтальную ось последней разгрузочной ветви (отрезок 5–4).

Площадь, заключенная между нагрузочной и разгрузочной ветвями (петля гистерезиса), соответствует работе внутреннего трения в стыках данного узла.

Остальная часть построения относится к случаю проведения испытания с нагрузкой обратного направления. Обычно оно проводится сразу же как продолжение предшествующего испытания. Тогда прямая 3–6 отражает выборку зазоров в узле, участок 6–7 – криволинейную часть нагрузочной ветви, 1–8 – разгрузочную часть участка 8–9 и 9–10 – то же при повторном испытании.

Аналогично предыдущему жесткость в условно отрицательном направлении будет

$$j = -\frac{P_2}{\delta_2},$$

При испытаниях в большинстве случаев наибольшую нагрузку в обе стороны сохраняют одинаковой, т. е.

$$|P_1| = |P_2|.$$

На полном графике отжатий следует различать еще две величины:

а) z – разрыв характеристики или «перетяжку» – характеризует суммарную величину зазоров в стыках узла; наряду с величиной жесткости разрыв характеристики является основным показателем качества сборки: чем он меньше (в пределах нормальных условий работы узла), тем лучше;

б) Q – усилие, необходимое на передвижение узла в зоне люфта; оно возрастает, например, при затяжке клиньев, плохой смазке направляющих и др.

Для ускорения проведения испытаний на жесткость можно фиксировать одни нагрузочные ветви, а из разгрузочных – только последнюю (участки 4–5 и 9–10).

В действительных кривых испытаний на жесткость встречается различный вид нагрузочной и следующей за ней разгрузочной ветвей. Вогнутый характер этих кривых (см. рис. 24) показывает наличие в узле

слабой детали, которая вначале оказывает небольшое сопротивление усилиям, а с увеличением нагрузки – более значительное. Например, клинья с увеличением прилагаемого усилия деформируются, площадь их прилегания увеличивается и жесткость возрастает. При проверке жесткости шпинделей консольно-фрезерных станков аналогичную картину вызывают роликовые подшипники, тела качения, которых не все сразу вступают в работу.

Заметно влияет постепенное изменение длины действующих плеч ряда элементов узла в процессе их деформации под действием усилий.

Действительно, рассматривая вал, лежащий в подшипниках скольжения, или, например, деталь, зажатую в кулачках патрона станка, логично считать, что место плотного соприкосновения деталей находится не у самого края, а на некотором расстоянии от края (рис. 25, а). По мере деформации детали эта точка смещается, плечо уменьшается (рис. 25, б), а жесткость несколько возрастает.

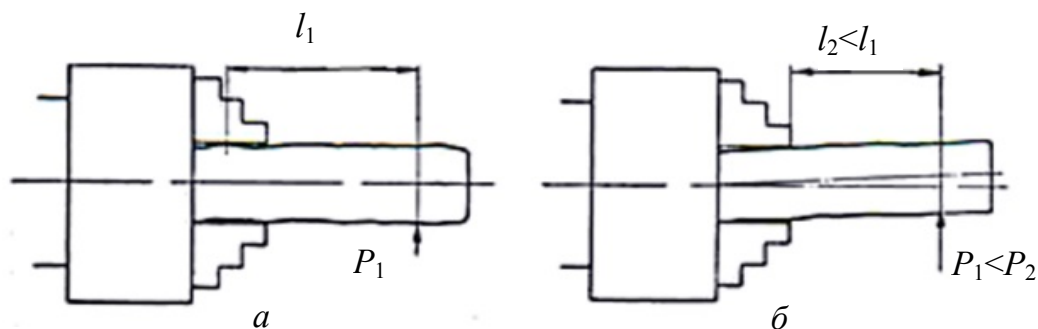


Рис. 25. Схема изменения длины действующих плеч при изменении нагрузки:

а – при малой нагрузке; б – при большой нагрузке

Выпуклый характер кривой показывает, что жесткость узла сначала выше, а с увеличением нагрузки снижается. Указанное явление, большей частью, получается от предварительного натяга.

Как показывает практика, недостаточная жесткость узлов станков, как правило, получается из-за наличия в них одного, максимум – двух слабых сопряжений.

Действительно, если жесткость всех звеньев и стыков узла высока, предположим не менее 50 кН/мм, и лишь одного из них – 8 кН/мм, то суммарная жесткость узла будет ниже 8 кН/мм. Достаточно повысить жесткость слабого элемента, как резко возрастет жесткость узла в целом. Поэтому при низкой жесткости испытуемого узла важно уметь быстро выявить слабое звено.

В малодоступных узлах, как, например, шпиндельный узел, сделать это помогает приведенный анализ графиков отжатий. Если элементы

узла более доступны, например, у суппорта, то надежнее и быстрее выявить слабое звено экспериментально, подведя к каждому из них отдельный индикатор. Тогда, кроме общей жесткости, сразу будет получена полная картина жесткости каждого элемента.

Методика проведения испытаний аналогична испытаниям обычной жесткости. Для проверки, например, жесткости привода главного движения первый валик с приемным шкивом заклинивают намертво. Нагрузку на шпиндель задают ступенями посредством динамометра через планшайбу сначала в одну, затем в другую стороны. Графики углов закручивания имеют вид, совершенно идентичный графикам отжатий, только разрывы характеристик здесь получаются обычно значительно больше (зазоры в зубчатых колесах, шлицевых соединениях и пр.).

2.6.2. Бесконтактный метод измерения жесткости

При определении жесткости в работе главную сложность представляет измерение упругих деформаций движущихся узлов. Схема измерения в процессе обработки деформаций вращающихся элементов системы станок – инструмент – деталь бесконтактным методом показана на рис. 26.

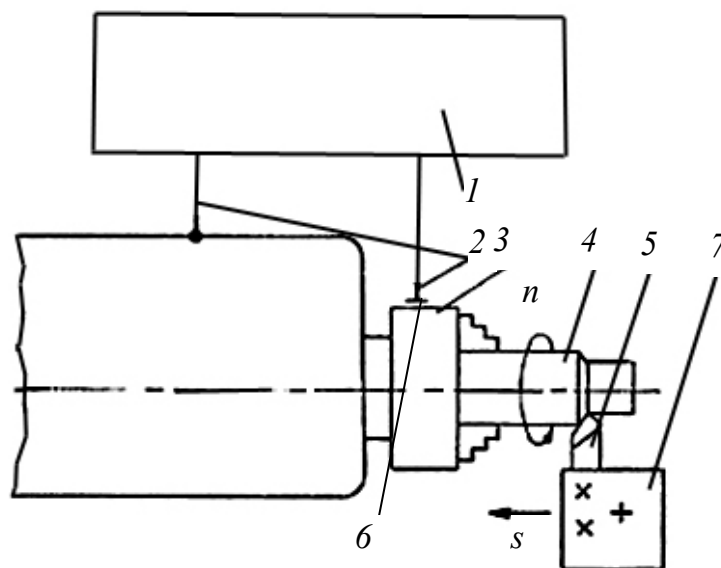


Рис. 26. Схема прибора для измерения отжатий вращающихся деталей:

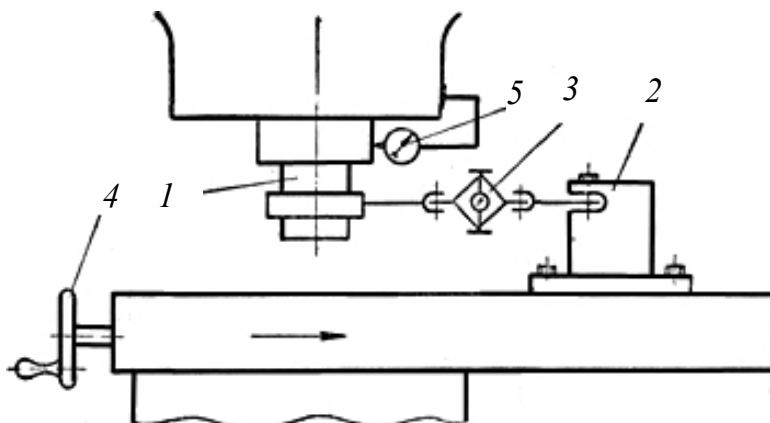
1 – микрометрическое устройство; 2 – информационные каналы; 3 – кулачковый патрон; 4 – заготовка; 5 – резец; 6 – электропроводная пластина; 7 – резцедержатель

Измерительный прибор 1 связан информационными каналами с корпусом шпинделя и кулачковым патроном 3 (через электропроводную пластину датчика б), в котором установлена заготовка 4.

Прибор удобнее устанавливать с нерабочей стороны станка. Для измерения микрометрическое устройство укрепляется на жестком штативе или кронштейне пластиной б против места измерения. Зазор должен быть минимальным, но несколько больше максимально возможной деформации. После установки и включения прибора на станке начинают обработку образца или детали на желаемом режиме; при этом снимают показание прибора, который фиксирует величину деформации (отжатия) патрона.

2.6.3. Метод измерения жесткости шпиндельного узла вертикально-фрезерного станка

На рис. 27 дана схема установки приборов при испытании на жесткость шпиндельного узла вертикально-фрезерного станка. В шпинделе станка укреплена специальная оправка 1, а на столе станка – стойка 2. Между ними установлен динамометр 3, работающий при испытании на растяжение (при определении жесткости в обратном направлении стойку и динамометр переносят на левую сторону). Нагрузка на шпинделе создается через динамометр, с помощью рукоятки 4 винта продольной подачи стола. Величину отжатий шпинделя измеряют индикатором 5.



*Рис. 27. Схема установки приборов для проверки жесткости шпиндельного узла вертикально-фрезерного станка:
1 – оправка; 2 – стойка; 3 – динамометр;
4 – рукоятка; 5 – индикатор*

2.6.4. Нормы жесткости станков (примеры)

В табл. 4–6 приведены некоторые из норм жесткости для станков [14].

Таблица 4

Нормы жесткости для токарных станков общего назначения

Узел	Условия испытания							
	$H < 150$ мм $P_y = 2000$ Н		$H = 200$ мм $P_y = 3000$ Н		$H = 300$ мм $P_y = 4000$ Н		$H = 400$ мм $P_y = 5000$ Н	
	j , Н/мм	z , мм	j , Н/мм	z , мм	j , Н/мм	z , мм	j , Н/мм	z , мм
Шпиндель на подшипниках скольжения	30000–50000	0,02	50000–100000	0,03	80000–15 000	0,04	150000 – 180000	0,05
Шпиндель на подшипниках качения	50000–100000	0,02	80000–120000	0,02	120000–160000	0,03	166000–220000	0,03
Суппорт по высоте центров	5000–10000	0,08	8000–10000	0,08	20000–30000	0,10	50000–100000	0,10
Примечание: динамометр укреплен в суппорте и за шпиндельную оправку с небольшим вылетом, индикатор упирается в середину центрирующей шейки шпинделя, а в суппорт – резцедержателя								
Пиноль задней бабки при вылете, равном 0,5 Н, в закрепленном состоянии	20000–25000	0,05	25000–50000	0,05	50000–100000	0,08	80000–100000	0,10
Примечание H – высота центров станка, P_y – наибольшая испытательная нагрузка, j – норма жесткости, z – допустимая величина суммарного зазора.								

Таблица 5

Нормы жесткости для фрезерных станков общего назначения

Узел и условия его испытания	$P = 3000$ Н	
	j , Н/мм	z , мм
Шпиндель на подшипниках качения	100000–120000	0,03
Узел консоли в продольном направлении (Динамометр укреплен за специальную стойку на столе станка и за шпиндельную оправку; индикатор в первом случае укреплен на корпусе шпиндельной головки и упирается в шпиндель, во втором случае укреплен на станине и упирается в угольник, закрепленный на столе).	50000–80000	0,10
Шпиндельная головка вертикально-фрезерных станков (Крепление динамометра такое же, индикатор укреплен на станине и упирается в корпус шпиндельной головки)	60000–100000	0,03

Таблица 6

Нормы жесткости для внутри шлифовальных станков

Узел и условия его испытания	i , Н/мм	z , мм
Суппорт поперечной подачи	40000–100000	0,005
Шпиндель шлифующего круга	50000–100000	0
Примечание: динамометр крепится за конец шпинделя позади шлифующего круга и за кронштейн приспособления для правки; индикатор в первом случае крепится на станине и упирается в корпус шлифовальной головки, а во втором крепится на гильзе шпинделя и упирается в шпиндель; испытательная нагрузка $P = 50$ кг		
Шпиндель вращения изделия	60000–120000	0
Шпиндель вращения изделия с патроном	50000–100000	0,005
Примечание: в патрон станка зажимается деталь с оправкой; динамометр крепится за эту оправку и за кронштейн приспособления для правки; индикатор крепится к станине и упирается в одном случае в шпиндель, в другом – в зажимной патрон; испытательная нагрузка $P = 1000$ Н		

Многошпиндельные токарные автоматы с диаметром прутка до 50 мм (при $P = 5000$ Н) ориентировочно должны иметь следующую жесткость узлов:

- а) шпиндели – 150000–200000 Н/мм;
- б) шпиндельный блок – 400000–500000 Н/мм;
- в) продольный суппорт – 80000–100000 Н/мм;
- г) поперечные суппорты – 50000–70000 Н/мм.

Шлифовальные станки, работающие шлифовальными кругами на керамической связке со скоростями резания до 25 м/сек, должны иметь жесткость:

- а) круглошлифовальные станки – 10000–12000 Н/мм;
- б) бесцентрово-шлифовальные станки – 9000–11000 Н/мм;
- в) плоскошлифовальные станки, работающие периферией круга – 700–900 Н/мм;
- г) плоскошлифовальные станки, работающие торцом круга – 1200–1400 Н/мм.

При проведении испытаний с целью их ускорения следует при каждой установке динамометра за один цикл нагружений, где возможно сразу параллельно определять жесткость нескольких узлов станка или их элементов, для чего к каждому из них нужно подвести отдельный индикатор.

Проверка жесткости станков с применением динамометров представляет относительно продолжительную операцию. Однако наиболее существенным недостатком определения так называемой статической жесткости является ее несоответствие жесткости, которую реально имеют узлы станка в работе.

2.6.5. Проверка жесткости станка методом функциональной диагностики

Точность работы токарных станков проверяют при обработке образцов [14]. На станках с наибольшим диаметром обрабатываемой детали 400 мм точность геометрической формы цилиндрической поверхности проверяют при обработке образцов длиной 200 мм.

Предварительно обработанный образец с тремя поясками, расположенными по концам и в середине образца, устанавливают в патрон или в центры станка и обрабатывают по наружной поверхности поясков.

Проверяют постоянство диаметра в любом поперечном сечении, при этом разность между измеренными максимальным и минимальным значениями не должна превышать 0,02 мм. Измерение производят микрометром или другими инструментами.

Плоскостность торцовой поверхности проверяют при обработке образцов диаметром $d = 200$ мм, установленных в кулачки патрона. Торцовая поверхность образца может иметь кольцевые канавки (у периферии, в середине и в центре) и должна быть предварительно обработана.

После проточки торцовой поверхности образец не снимают со станка. Результаты обработки могут быть проверены индикатором, установленным на суппорте так, чтобы наконечник индикатора был перпендикулярен измеряемой поверхности. Измерение производят путем перемещения в поперечном направлении верхней части суппорта на длину, равную или больше D .

Отклонение, определяемое как половина наибольшей алгебраической разности показаний индикатора, не должно превышать 0,016 мм. Плоскостность торцовой поверхности можно также проверить, касаясь наконечником индикатора контрольной линейки, приложенной к обработанному торцу образца. Линейку прикладывают в разных осевых сечениях проверяемой поверхности и определяют отклонение так же, как описано выше.

Точность нарезаемой резьбы проверяют на образце (диаметр которого примерно равен диаметру ходового винта станка), закрепленном в центры станка, при нарезании трапецеидальной резьбы длиной не более 500 мм с шагом, примерно равным шагу ходового винта станка. При этом ходовой винт непосредственно соединяют со шпинделем через сменные зубчатые колеса с отключением механизма коробки подачи.

После чистовой обработки проверяют равномерность резьбы с помощью соответствующих приборов и методов проверки. По результатам измерений определяют накопленную погрешность шага резьбы – разность между фактическим и заданным расстоянием между любыми

одноименными (не соседними) профилями витка резьбы в осевом сечении по линии, параллельной оси винта. Величина накопленной погрешности шага резьбы не должна превышать 0,04 мм на длине 300 мм.

При обработке на токарном станке жесткость резца в направлении действия усилия P_y несоизмеримо велика по сравнению с жесткостью станка и обрабатываемой детали, поэтому ее можно не принимать во внимание. Валы диаметром, более 70 мм при отношении длины к диаметру менее 4 практически можно считать абсолютно жесткими. Тогда жесткость упругой системы станок – приспособление – инструмент – деталь (СПИД) сведется к жесткости станка, т. е.

$$J_{\text{спид}} = J_{\text{ст}}.$$

В процессе обточки ступенчатой заготовки изменяется усилие P_y соответственно изменению глубины резания с t_1 на t_2 , а значит изменяется и отжатие узлов станка. Изменение глубины резания (неточность заготовки) копируется на детали. Отношение неточности заготовки Δ_3 к неточности детали Δ_d называется уточнением, обозначаемым буквой ε . Уточнение ε показывает, во сколько раз в результате обработки уменьшилась неточность заготовки.

При неизменной геометрии инструмента, постоянной подаче и определенном положении обрабатываемой поверхности на станке уточнение характеризует жесткость станка при положении резца в рассматриваемом сечении i .

В этом случае жесткость технологической системы и уточнение ε , при работе в один проход, связаны пропорциональной зависимостью

$$j_{ci} = k \cdot C_{pz} \cdot s^{0,75} \cdot \varepsilon,$$

где $k = \frac{P_y}{P_z}$ – коэффициент, зависящий от значений главного угла в плане φ и отношения $\frac{s}{t}$; C_{pz} – коэффициент, характеризующий материал

детали.

Определив жесткость станка (в Н/мм) для каждого из 3-х положений резца, можно рассчитать порознь жесткости узлов станка по нижеприведенным формулам:

$$\frac{1}{j_{\text{суп}}} = 2 \cdot \frac{1}{j_{c2}} - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{j_{c3}} + \frac{1}{j_{c1}} \right),$$

$$\frac{1}{j_{з.б.}} = 2 \cdot \frac{1}{j_{c2}} + \frac{1}{2} \left(3 \frac{1}{j_{c3}} + \frac{1}{j_{c1}} \right),$$

$$\frac{1}{j_{п.б.}} = 2 \cdot \frac{1}{j_{c2}} - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{j_{c3}} + 3 \frac{1}{j_{c1}} \right),$$

где $j_{суп.}$, $j_{з.б.}$, $j_{п.б.}$ – жесткости суппорта, задней бабки и передней бабки, j_{c1} , j_{c2} , j_{c3} – жесткости станка при трех положениях суппорта (у передней бабки, посередине и у задней бабки) (рис. 28).

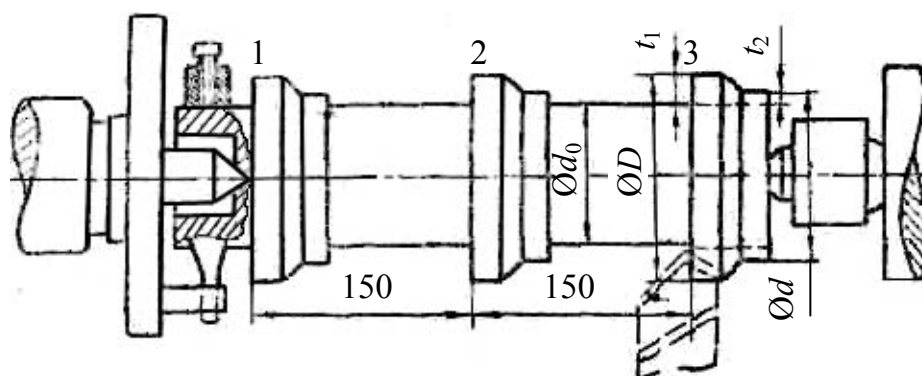


Рис. 28. Схема установки заготовки на станке 1К62

Неточность заготовки Δ_3 определяется как полуразность диаметров (рис. 28)

$$\Delta_3 = \frac{D - d}{2}.$$

Измерения диаметров ступеней до обточки производятся штангенциркулем. Неточность детали определяется непосредственно на станке после обработки заготовки. Для этого на суппорт устанавливают стойку с индикатором, настраивают его по одному диаметру.

Разность показаний индикатора Δ при измерении диаметров D' и d' (рис. 29) характеризует Δ_D

$$\Delta_{И} = \Delta_D = \frac{D' - d'}{2}.$$

Для уменьшения влияния погрешности формы детали измерения каждого диаметра проводят в 3-х сечениях, расположенных под углом 120° и рассчитывают среднеарифметическое значение диаметра $\Delta_{и.}$

Порядок проверки жесткости станка методом функциональной диагностики следующий.

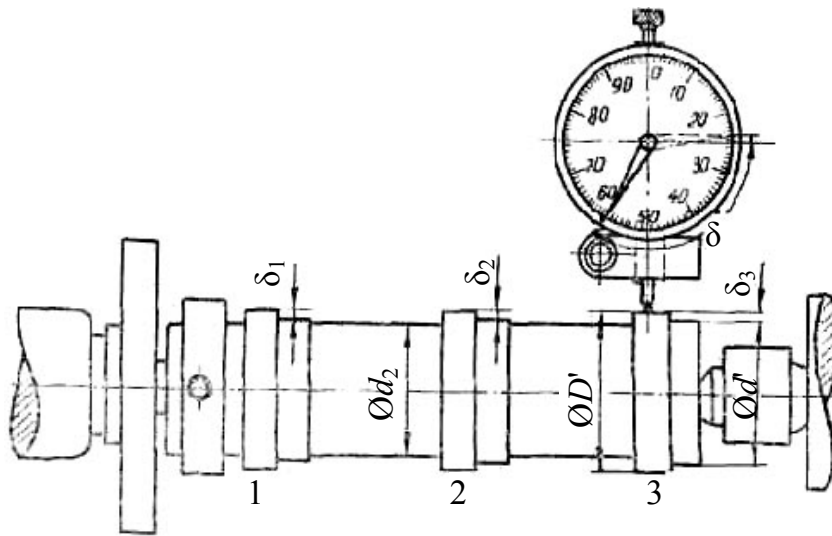


Рис. 29. Схема измерения неточности детали на токарном станке

Заготовку устанавливают в центрах станка 1К62. Для устранения погрешностей установки все ступени перед проведением опыта протачивают, обеспечивая перепад диаметров $D - d = 6$ мм.

Протачивают в один проход три ступени, снимая на каждой ступени припуск $t_1 = 3,5$ мм и $t_2 = 0,5$ мм. Рекомендуемый режим обработки: $s = 0,1 - 0,15$ мм/об, $V = 100 - 110$ м/мин.

Измеряют неточность детали (рис. 29).

Для получения правильных данных при проведении эксперимента необходимо весьма тщательно измерять погрешность детали Δ_d и не допускать затупления режущего лезвия резца. Вылет пиноли установить не выше 10–15 мм, вылет резца не выше 20 мм. Расстояние от опорной поверхности резца до линии центров 25 мм.

Например, при одном из методов проверки жесткости токарных станков обтачивают эксцентричный буртик длиной 5–10 мм или такой же ширины кольцо, насаженное на конусную оправку. Материал кольца – сталь марки 45. Чтобы жесткость заготовки была выше жесткости станка, диаметр оправки принимают порядка 75–100 мм при длине 300 мм. Эксцентricность кольца равна обычно 2,5–3 мм, т. е. биение заготовки при измерении индикатором в центрах составляет 5–6 мм.

Весь процесс определения жесткости станка вместе с расчетом занимает 10–15 мин.

Этим методом можно определять отдельно жесткость задней бабки, передней бабки и суппорта, для чего на оправку насаживают три кольца для обточки соответственно около задней бабки, передней бабки в середине.

2.6.6. Методы повышения жесткости

Для повышения жесткости шпиндельных узлов, например, очень широко применяется создание предварительного натяга у шпиндельных подшипников качения. Для этого осевым смещением колец с помощью специального приспособления в снятом с шпинделя подшипнике создается нужной величины натяг. В таком напряженном состоянии торцы обоих колец шлифуются «заподлицо». Если теперь подшипник освободить, то торцы внутреннего и наружного колец окажутся смещенными. При монтаже осевой затяжкой вновь достигается совпадение торцов обоих колец, чем в подшипнике создается предварительный натяг заданной величины. Это особенно удобно осуществлять на радиально-упорных и радиальных подшипниках, монтируемых на валах рядом (попарно). При другом варианте того же можно достигнуть постановкой между кольцами подшипников распорных втулок различной длины.

Жесткость узлов можно и нужно повышать за счет следующих факторов:

- геометрическая правильность стыковых поверхностей (плоскостность, цилиндричность) и чистота их обработки, – чем выше степень выполнения этих условий, тем больше поверхность прилегания и, следовательно, выше жесткость;
- уменьшения числа стыков;
- конструкция, состояние и расположение некоторых слабых звеньев узла, например, регулирующего клина направляющих, т. к. жесткость узла со стороны расположения клина всегда меньше. Это надо учитывать при работе на станке, особенно со значительными усилиями. Продольную подачу стола на консольно-фрезерных станках лучше производить так, чтобы усилие подачи воспринималось стороной без клиньев (подразумеваются поперечные направляющие стола и вертикальные – консоли);
- центричность приложения нагрузки к стыку, внецентричная нагрузка ухудшает условия работы, износа и снижает жесткость за счет усиления деформации поверхностных слоев; причиной этого является получающаяся неравномерность удельного давления по длине стыка – в одном конце оно меньше среднего, а в другом – значительно больше;
- создание предварительного натяга, – он ослабляет влияние деформаций, вызываемых приложением силы P , так как эта сила

должна сначала преодолеть действие предварительного натяга и лишь потом может вызывать деформацию.

2.7. Особенности погрешностей станков с ЧПУ и методы их измерения

Ошибки, влияющие на точность работы станков с ЧПУ различного назначения, разнообразны, но механизм их влияния примерно одинаков.

2.7.1. Причины возникновения погрешностей в станках с ЧПУ

Причины возникновения погрешностей в станках с ЧПУ рассмотрены в работах [7, 19–22]. Наиболее полно он изучен [21, 22] для металлорежущих станков, оснащенных контурными системами ЧПУ, поэтому остановимся на них.

Погрешности из-за потерь информации при ее передаче в систему ЧПУ (СЧПУ) как по каналу связи (в задающей и управляющей частях) рассчитывают, используя положения теории информации. Но погрешности, вызванные несовершенством приводов, намного больше погрешностей задающей и управляющей частей СЧПУ, так как они обуславливаются в основном широким спектром частот управляющего сигнала. Информационная часть СЧПУ (задающая и управляющая) может без искажения передавать сигнал в несколько мегагерц, тогда как силовой привод имеет полосу пропускания в несколько десятков герц.

Поэтому основное внимание уделим погрешностям СЧПУ, связанным с несовершенством их приводов.

Основной погрешностью СЧПУ с замкнутым контуром (с точным датчиком обратной связи) является погрешность по рассогласованию, которую можно определить как разность математического ожидания выходного и входного сигналов

$$\delta_e = M_{\text{вып}}(t) - M_{\text{вх}}(t).$$

В линеаризованных системах выходной сигнал можно определить через входной, умножив его на передаточную функцию системы.

При обработке по контуру можно выделить типовые режимы: обработка прямолинейного участка, обработка прямых участков сопряжения с нерезким изменением направления скорости движения; сопряжения типа «прямой угол» (с резким изменением движения).

При обработке прямолинейного участка контура (см. рис. 30, а):

$$\begin{aligned} M(t) &= \operatorname{tg} \alpha \cdot V_p; \\ y &= \operatorname{tg} \alpha x; \end{aligned}$$

$$\delta V_x = V_x(1 - D_{1x}), \quad \delta V_y = V_y(1 - D_{1y});$$

$$V_x = V_p \cos \alpha, \quad V_y = V_p \sin \alpha;$$

$$D_{1x} = \frac{1}{k_{V_x}}, \quad D_{1y} = \frac{1}{k_{V_y}};$$

где V_p , V_x , V_y – скорости движения соответственно: результирующая вдоль контура, по оси x и оси y ; δ_{V_x} и δ_{V_y} – погрешности скорости по оси x и y ; D_{1x} , D_{1y} – добротность по скорости по соответствующим координатам.

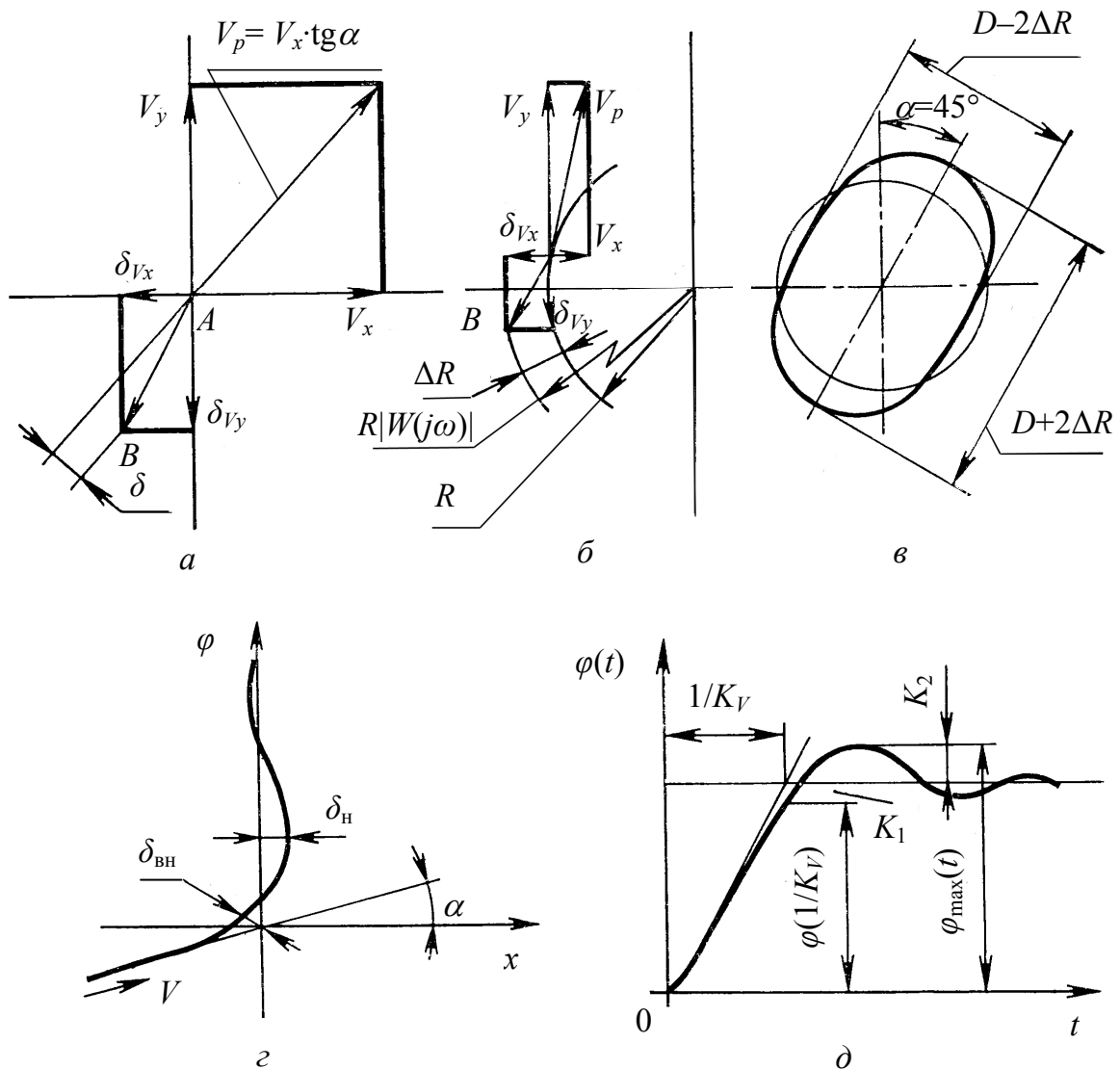


Рис. 30. Схемы к расчету погрешностей воспроизведения контура на оборудовании с ЧПУ:

a – участка прямой; b – дуги окружности; $в$ – характерные погрешности на окружности; $г$ – воспроизведение «прямого угла»; $д$ – определение коэффициентов K_1 и K_2

Решая систему уравнений, находим погрешность δ_V , значение которой соответствует наикратчайшему расстоянию до контура

$$\delta_V = 0,5V_p |D_{1x} - D_{1y}| \cdot \sin 2\alpha.$$

Данная формула показывает, что погрешность пропорциональна скорости вдоль контура V_p , степени неидентичности настройки системы по координатам (по добротностям) $|D_{1x} - D_{1y}|$ и углу наклона контура α . Углом α управлять не можем, скорость нужно стремиться сохранить (она задана на основании техпроцесса), а разность $(D_{1x} - D_{1y})$ должна быть выдержана в зависимости от требуемого значения δ_V . Значение D_1 можно определить, пользуясь ЛАЧХ, по величине ω , которая получается при условном продолжении низкочастотной ЛАЧХ до пересечения с осью частот.

Аналогичная картина получается при воспроизведении плавных сопряжений прямолинейных участков. Для них (см. рис. 30, б) характерно ($A = \text{const}$ – ускорение):

$$M_{\text{вх}}(t) = 0,5At^2;$$

$$\delta_V = 0,5[V_p|(D_{1x} - D_{1y})| + A|(D_{2x} - D_{2y})|] \sin 2\alpha.$$

Анализ этой погрешности показывает, что она зависит не только от статических параметров V_p , D_{1x} , D_{1y} , но и от динамических: ускорения A , добротностей по ускорению (коэффициенты погрешностей ускорения по соответствующим координатам). Из условий на обработку (значение δ_V) можно установить допуски на идентичность настройки системы по координатам x и y , по величинам $|(D_{1x} - D_{1y})|$ и $|(D_{2x} - D_{2y})|$.

Величину D_2 можно определить по ЛАЧХ, продолжая сопрягающий участок низкочастотной ЛАЧХ со среднечастотной (частота ω_2) до линии частот.

Однако не всегда удается выполнить качественную настройку, не изменяя величины V_p . Для некоторых СЧПУ существует ограничение на перепад скоростей $\Delta V_{\text{доп}}$, поэтому приходится снижать значение V_p и вводить команду «торможение», а затем (после прохода сопряжения) – команду «разгон».

В третьем режиме – обработка сопряжения типа «прямой угол» (см. рис. 30, з) входная функция по скорости и ускорению близка к скачкообразной, т. е.

$$M_{\text{вх}}(t) = \sum^n M_{\text{вх}}^{(n)}(t).$$

При этом различают внутреннюю $\delta_{в}$ и наружную $\delta_{н}$ погрешности, которые можно вычислить, зная уравнение, описывающее действительную траекторию центра фрезы. Погрешность $\delta_{вн}$ определяется как расстояние между началом координат и пересечением траектории с биссектрисой угла. Точка пересечения b имеет координаты

$$x_b = V_p \left[\varphi(t) - \frac{1}{k_V} \right] \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, \quad y_b = V_p \left[t - \frac{1}{k_V} \cos \theta (1 - \cos \theta) \varphi(t) \right];$$

$$\delta_{вн} = 2V_p k_1 \sin(\alpha) 2, \quad \delta_{н} = V_p k_2 \sin \alpha;$$

где

$$k_1 = \varphi(t) - \varphi\left(\frac{1}{k_V}\right), \quad k_2 = \varphi_{\max}(t) - \varphi\left(\frac{1}{k_V}\right).$$

Значение $\varphi_{\max}(t)$ берется по кривой переходного процесса. Обработка дуг окружностей (см. рис. 30, б)

$$M_{вх_x}(t) = R \cos \omega t, \quad M_{вх_x}(t) = R \sin \omega t,$$

где $\omega = V_p/R$; R – радиус обрабатываемой дуги.

Погрешности по координатам:

$$\delta_x(t) = |W_x(j\omega)| \left\{ R \cos[\omega t + \phi_x(j\omega)] - R \cos \omega t \right\};$$

$$\delta_y(t) = |W_y(j\omega)| \left\{ R \sin[\omega t + \phi_y(j\omega)] - R \sin \omega t \right\}.$$

Для одинаковых подсистем по координатам, у которых $W_x(j\omega) = W_y(j\omega)$, записанные выше уравнения представляют собой разность параметрических уравнений окружности радиуса R и радиуса $R|W(j\omega)|$. Погрешность определяется уравнением

$$\delta = R[1 - |W(j\omega)|].$$

Даже при идентичных подсистемах погрешность возникает, поэтому вместо окружности получается эллипс (см. рис. 30, в) с разностью полуосей

$$\Delta = kR \left[|W_y(j\omega)| - |W_x(j\omega)| \right].$$

Значение коэффициента k получают из преобразования исходных данных.

2.7.2. Методики проверки точности станков с ЧПУ

2.7.2.1. Проверка точности позиционирования для станков с ЧПУ

Для станков с ЧПУ, по сравнению с обычными станками, предусмотрены дополнительные проверки.

Проверка точности позиционирования подвижных исполнительных узлов станка (столов, суппортов, салазок, стоек) является одной из основных проверок его точности [14]. Точность позиционирования характеризуют следующие статистические показатели:

- накопленная погрешность A позиционирования;
- среднее квадратичное отклонение S_j погрешности позиционирования.

Накопленная погрешность позиционирования A определяется как алгебраическая разность наибольшего δ_{\max} и наименьшего δ_{\min} (на аттестуемой длине l) среднеарифметических значений погрешностей позиционирования (отклонений фактического положения узла от заданного программой)

$$A_j = \delta_{j\max} - \delta_{j\min};$$
$$\delta_{j\max} = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_{j\max i}}{n}, \quad \delta_{j\min} = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_{j\min i}}{n};$$

где A_j – накопленная погрешность позиционирования в j -й контрольной точке; $\delta_{j\max}$, $\delta_{j\min}$ – среднеарифметические значения погрешности в j -й точке; $\delta_{j\max i}$, $\delta_{j\min i}$ – погрешности позиционирования в j -й контрольной точке ($j = 1, \dots, m$) при i -м испытании ($i = 1, \dots, n$); при проверке опытных образцов станков $n = 10$, серийных $n = 5$;

Среднее квадратичное отклонение S_j погрешности позиционирования в j -й контрольной точке при многократных подходах подвижного узла к запрограммированному положению:

$$S_j = \frac{R_j}{dn};$$
$$R_j = \delta_{j\max} - \delta_{j\min},$$

где R_j – размах варьирования погрешностей позиционирования в j -й точке при повторных испытаниях (подходах); dn – коэффициент, зависящий от значения n (при $n = 5$, $dn = 2,326$; при $n = 10$, $dn = 3,078$).

Первый из показателей характеризует систематическую погрешность позиционирования на аттестуемой длине l перемещения, второй – случайную погрешность, которая в данном случае является функцией положения позиционируемого узла.

Статистические показатели определяют на основании результатов измерений погрешностей позиционирования в m контрольных точках на аттестуемой длине l перемещения узла. Число точек, в которых выполняют измерения, обычно равно 10–20. Проверку осуществляют на скорости быстрого перемещения с запрограммированными остановками в контрольных точках.

Измерения проводят с помощью штриховой меры, установленной на перемещающемся узле, и микроскопа, закрепленного на специальной оправке в шпинделе станка. Для измерения погрешностей позиционирования можно использовать лазерный интерферометр с цифровым выходом.

Среднеарифметическая погрешность δ_j на длине l (при $j = 1, \dots, m$) может иметь явно выраженный периодический характер с шагом, например, равным шагу ходового винта станка. Другими источниками (кроме ходового винта) этой циклической погрешности могут быть шаговый двигатель, зубчатые передачи в приводе подачи, не охваченные датчиками обратной связи.

Периодическое отклонение при позиционировании проверяют теми же средствами на длине l , равной двум шагам этой погрешности с интервалами в 0,1 шага.

Периодическое отклонение представляет собой составляющую систематической погрешности позиционирования, текущее значение которой повторяется через одинаковые интервалы (шаг). Периодическое отклонение δ и наименьшей δ_{\min} среднеарифметических ошибок позиционирования на длине l , т. е.

$$B = \delta_{\max} - \delta_{\min}.$$

Средние значения погрешностей позиционирования δ_i в j -й точке могут оказаться разными при подходе подвижного узла в эту точку с двух противоположных направлений – справа ($\delta_{j\text{спр}}$) и слева ($\delta_{j\text{сл}}$). Разность $U_j = |\delta_{j\text{спр}} - \delta_{j\text{сл}}|$ определяет зону нечувствительности при позиционировании. При испытании станка с ЧПУ значение U_j определяют в трех контрольных точках, расположенных на длине, равной $1/5$, $1/2$ и $4/5$ длины рабочего перемещения узла. Из трех полученных значений U_j определяют наибольшее U_{\max} , которое характеризует зону нечувствительности проверяемого станка.

Для станков с контурными системами ЧПУ предусмотрена проверка отработки прямолинейной траектории под углом к осям координат. Проверку выполняют для трех углов $\alpha = 5^\circ; 26,5^\circ; 45^\circ$.

В качестве базовой плоскости используют рабочую поверхность синусной линейки, закрепленной на столе станка.

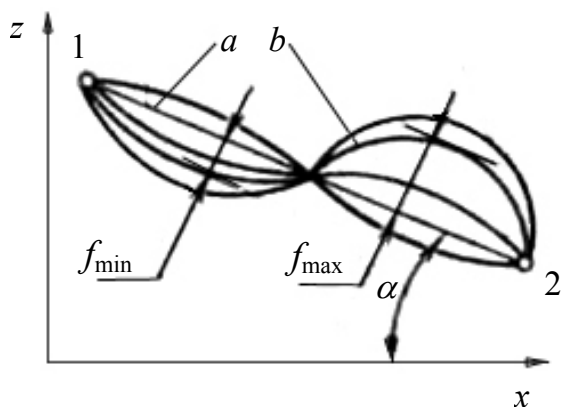


Рис. 31. Отклонение фактических траекторий перемещения b стола от идеальной a

траектории от идеальной. Алгебраическая разность $\Delta f = f_{\max} - f_{\min}$ является оценкой проверяемого показателя станка

2.7.2.2. Контроль обработки системой привода подач станка единичных импульсов

Следующая проверка связана с контролем обработки системой привода подач станка единичных импульсов программы. Проверяемому узлу сообщают движение единичными импульсами сначала в прямом, а потом в обратном направлении. Число импульсов не менее 20. С помощью многооборотного стрелочного индикатора или какого-либо другого датчика перемещения фиксируют отклонения фактического перемещения узла от номинального значения импульса (дискреты). Наибольшая величина этого отклонения является оценкой точности обработки системой единичного импульса.

В число дополнительных проверок станков с ЧПУ на холостом ходу входит также проверка времени смены инструмента с помощью имеющегося на станке манипулятора.

2.7.2.3. Контроль обработки системой привода подач и выявление погрешностей в санках с ЧПУ

Программное обеспечение для диагностики станков с ЧПУ позволяет автоматически распознавать погрешности контролируемого станка [23]. При проведении диагностики станка выдается совокупность вышеназванных погрешностей, так что их точное описание достаточно затруднено. В графическом изображении они накладываются друг на друга так, что конкретную погрешность сложно выделить из полученных данных. Поэтому для получения точного анализа измерение необходимо проводить в двух направлениях.

Измерения проводят с помощью какого-либо датчика относительных перемещений, установленного на шпинделе станка. При перемещении стола с линейкой из точки 1 в точку 2 под углом α к оси x (рис. 31) и обратно отклонение фактической траектории от базовой плоскости линейки непрерывно фиксируется датчиком перемещений и записывается. Повторение испытания несколько раз позволяет найти среднеарифметические значения f_j отклонений фактической



Рис. 32. Система измерения удерживается с помощью магнита между шпинделем и столом

Датчик измерительной системы (рис. 32) через интерфейс подключается к компьютеру (Подробнее данная система рассмотрена в разделе 4.2.1. Беспроводная система QC20-W ballbar). Далее в станок вводится программа интерполяции окружности. Во время прохождения программы, т. е. описания окружности, измеряются значения проверяемых параметрах станка.

Погрешности станка устанавливаются на основании характерных признаков – отклонений от измеряемой окружности.

На рис. 33 показаны примеры данных, полученных в результате диагностики станка.

На рис. рис. 33, а показана картина, характеризующая наличие в станке люфтов (отклонение от окружности). Если присутствует люфт, то его можно компенсировать вводом соответствующих параметров в системе управления. Контрольное измерение покажет действенность этих мероприятий.

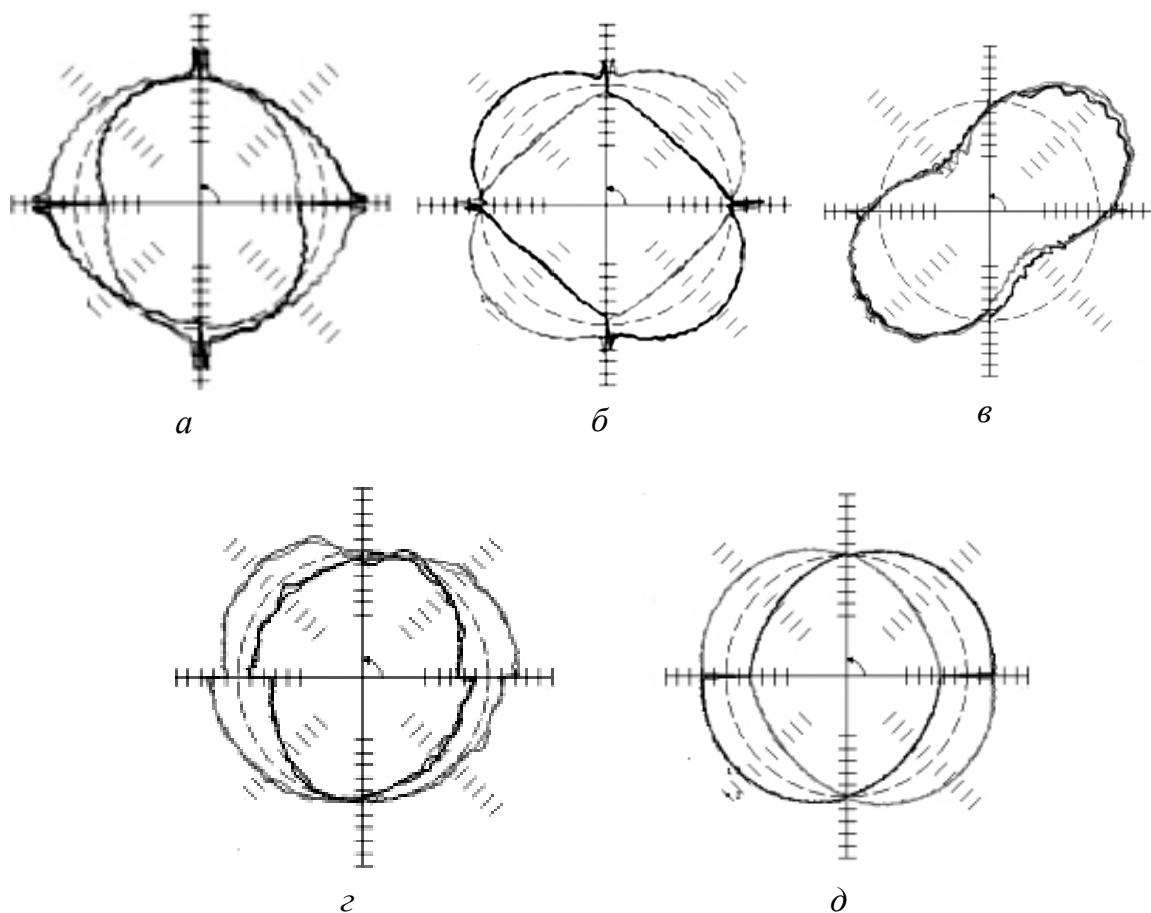
На рис. 33, б изображен график отклонений, характерный для ошибки «рассогласования привода», возникающей в том случае, когда линейные скорости перемещения, установленные в приводах осей, динамически не выровнены по отношению друг к другу и имеются различия в скорости взаимного перемещения («отставания или перебеги»). Эти отклонения от заданной траектории образует два зависящих от направления перемещения (по или против часовой стрелки) овала, основные оси которых сдвинуты на 45° по отношению к осям станка. Эта погрешность относительно часто выявляется на обрабатывающих станках, находящихся в работе длительное время.

Наклонность под углом 45° в одном направлении обеих овалов указывает на наличие погрешности перпендикулярности (см. рис. 33, в).

Наличие бокового люфта будет характеризоваться различием в диаметрах полученных окружностей при измерении в разных направлениях (см. рис. 33, г).

Качество проведенной диагностики можно оценить визуально. На экране в виде графика отображаются как полученные данные, так и график, построенный на основе математически рассчитанных данных.

При совпадении графиков делается вывод о точной интерпретации полученных результатов измерения (рис. 33, д).



*Рис. 33. Виды погрешностей, определенные программными средствами:
 а – люфт осей; б – рассогласование привода; в – погрешность перпендикулярности; г – боковой люфт; д – картина проверки точности интерпретации полученных результатов измерения*

В связи с небольшим расходом времени на одно измерение имеется возможность проводить достаточно большое количество измерений через короткие интервалы времени (например, в рамках технического обслуживания оборудования). Такой подход позволяет, практически не останавливая процесс производства, оценивать технологическую точность имеющегося на предприятии парка станков с соответствующей оценкой, изменение точности во времени, без прерывания процесса производства.

Таким образом, можно принять меры, прежде чем возникнет брак в процессе производства. При наличии сведений об актуальном состоянии станочного парка детали могут обрабатываться в соответствии с требованиями точности на «достаточно точных» в данный момент станках и

оптимально использовать имеющиеся в распоряжении финансовые средства.

Тест определения отклонения от круглости, как метод для измерения точности станка с помощью системы QC-10, значительно упрощает оценку точности станков, благодаря автоматической диагностике погрешностей. Так в течение нескольких минут все точностные параметры представляются в числовом и графическом видах. Графическое представление результатов измерения позволяет визуально оценить состояние станка. Характерная форма отклонения от круглости дает показания о погрешности.

Автоматическое программное обеспечение для диагностики ясно показывает погрешности станка.

Регулярные измерения предупредительного контроля точности станков, проведение которых требуется службам главного технолога, контроля качества и главного механика, производиться с малыми затратами времени и дают актуальную картину состояния технологического оборудования на предприятии.

Разработка новой версии программного обеспечения (Ballbar 5HPS) – позволяет создавать ретроспективные отчеты о рабочих характеристиках станка, представляя их в графической форме. Благодаря этому можно установить закономерность изменения рабочих характеристик станка, заблаговременно планировать работы по его техническому обслуживанию. Тем самым, уменьшается количество незапланированных простоев, и техобслуживание станка не проводится без нужды. Таким образом, новое программного обеспечения позволяет поставить станку исчерпывающий «диагноз».

2.7.3. Проверка на безотказность станков с ЧПУ

Станки с ЧПУ проверяют на безотказность при обработке по специальной программе типичной детали в течение 2 часов для серийных станков и 4 часа для опытных образцов. Программа должна быть составлена с максимальным учетом возможностей станка, и она обычно сложнее программ, используемых при эксплуатации станка. Отказы при работе станка не допускаются, а обрабатываемая заготовка должна соответствовать требованиям чертежа.

2.8. Испытания на виброустойчивость

Испытание станков на виброустойчивость связано с анализом и оценкой тех динамических процессов, которые возникают в станке при его работе, особенно в процессе резания. Эти процессы оказывают непосредственное влияние на параметры точности обработанных поверхностей (точность формы, волнистость, шероховатость), а также могут привести к недопустимым явлениям (резонансу, возникновению интенсивных автоколебаний), исключающим возможность работы станка с определенными режимами обработки.

2.8.1. Методы испытаний станков на виброустойчивость

Специфика работы металлорежущих станков заключается в том, что на возникновение колебаний определяющее влияние оказывает процесс резания. Фундаментальные исследования в этой области были проведены профессором В.А. Кудиновым, который при оценке динамической устойчивости рассматривает станок как многоконтурную замкнутую систему, учитывающую процессы резания, трения и процессы в приводе [24]. Эти исследования послужили основой для развития методов испытания станков на виброустойчивость.

2.8.1.1. Метод определения виброустойчивости по амплитудно-фазовой частотной характеристике

Наибольшее развитие получили испытания, связанные с получением амплитудно-фазовой частотной характеристики (АФЧХ) [24], которая позволяет оценить запас устойчивости станка и выявить влияние основных конструктивных и технологических факторов на динамические характеристики системы.

Для снятия этих характеристик применяют специальные вибраторы (контактные и бесконтактные), которые обеспечивают силовые воздействия на упругую систему станка по заданному, обычно синусоидальному закону в определенном диапазоне частот. Отклик системы на данное воздействие (ее колебание с некоторой амплитудой и смещением по фазе по отношению к воздействующему сигналу) позволяет при помощи АФЧХ выявить ее динамическую характеристику.

При проведении таких испытаний обычно используют бесконтактные электромагнитные вибраторы, прецизионные измерительные преобразователи и соответствующую аппаратуру для измерения виброперемещений.

Оценивая развитие исследований и методов оценки динамического качества станков, следует отметить, что наибольшее распространение получили методы, позволяющие выявить области неустойчивой работы

станка, определить допустимый диапазон режимов работы, указать слабые элементы, снижающие динамические характеристики системы. Все это необходимо, но недостаточно. Следует также оценивать влияние виброперемещений узлов станка на параметры качества обработанных изделий в зоне устойчивой работы станка. Это необходимо, потому что в пределах устойчивой работы станка характеристики его качества могут быть весьма различными и не всегда удовлетворять потребителя.

2.8.1.2. Метод определения виброустойчивости при работе станка на холостом ходу

Характерным показателем качества изготовления и сборки станка является уровень его колебаний на холостом ходу. Наибольший интерес представляют измерения относительных колебаний инструмента и заготовки, непосредственно влияющих на точность обработки. При испытании опытных образцов станков относительные колебания измеряют во всем диапазоне частот вращения шпинделя. В конусное отверстие шпинделя устанавливают регулируемую оправку с биением измерительной шейки менее 3 мкм.

Датчиком (емкостным или индуктивным), установленным на суппорте станка, измеряют относительные колебания и подвергают их частотному анализу в диапазоне частот до 1 кГц. Частотный спектр колебаний холостого хода определяется в основном наиболее мощными возбудителями колебаний (неуравновешенные вращающиеся детали привода главного движения станка, погрешности зубчатых и ременных передач, муфт, подшипников качения и др.) и собственными колебаниями элементов упругой системы станка. Колебания холостого хода нормируют по частотным диапазонам: нормы на составляющие спектра. Требования к уровню вибрации на частотах, значения которых лежат ближе к частоте потенциально неустойчивой формы колебаний станка (частота возможных в системе автоколебаний), должны быть более жесткими, чем для других частотных диапазонов. Для серийных станков эту проверку проводят на частоте вращения шпинделя, соответствующей чистой обработке.

2.8.1.3. Метод определения виброустойчивости исследованием плавности медленных перемещений узлов станка

Особым видом испытаний, связанных с быстропротекающими процессами, является оценка плавности медленных перемещений узлов станка: столов и суппортов прецизионных станков, когда изменение условий трения в направляющих может привести к релаксационным колебаниям и оказать влияние на точность позиционирования.

2.8.1.4. Метод оперативной оценки виброустойчивости элементов технологической системы

Одна из методик испытания станка для обработки заготовки типа тел вращения на виброустойчивость, в результате реализации которой строятся АФХЧ, основана на применении специально разработанного устройства (рис. 34, 35) [25].

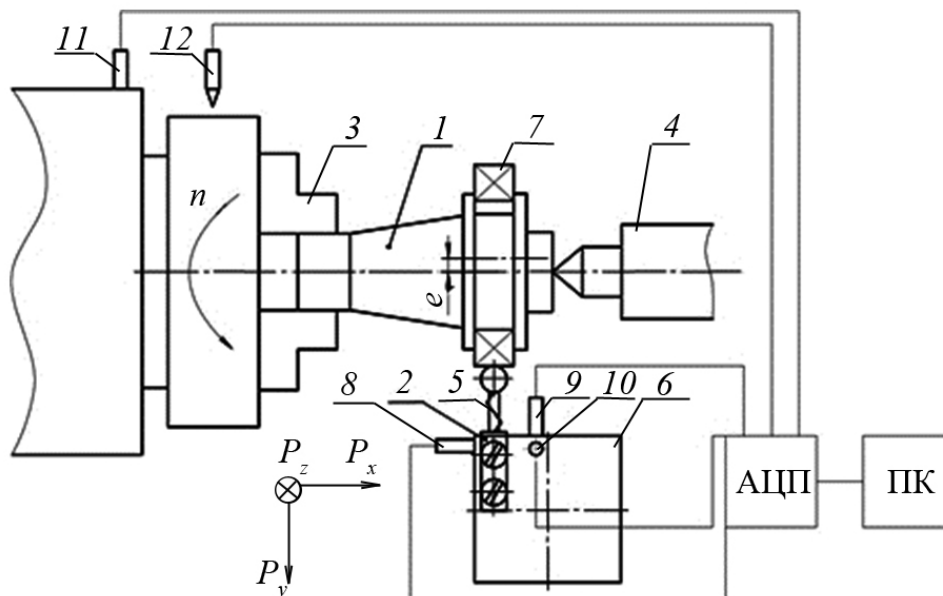


Рис. 34. Принципиальная схема устройства оперативной диагностики технологической системы:

- 1 – эксцентриковый вал; 2 – державка с упругим элементом; 3 – трехкулачковый патрон;
4 – задний центр; 5 – упругий элемент; 6 – резцедержатель; 7 – подшипник;
8–11 – акселерометры; 12 – датчик оборотов;
АЦП – аналогово-цифровой преобразователь; ПК – персональный компьютер;
 P_x , P_y , P_z – направления действия составляющих силы резания
(применительно к токарно-винторезному станку мод. 16К20)

Эксцентриковый вал 1, закрепленный в трехкулачковом патроне 3 и заднем центре 4, при вращении на заданной частоте n контактирует с упругим элементом 5 державки 2, воздействуя на резцедержатель 6 и суппорт станка. Для проведения эксперимента был применен многоканальный виброизмерительный комплект К-5101, внесенный в реестр средств измерений Российской Федерации, и специальное программно-математического обеспечения «Виброрегистратор-Ф» производства компаний ООО «Витэк», (г. Санкт-Петербург) и ООО «Витэк-Сибирь» (г. Томск), созданное в среде графического программирования National Instruments LabVIEW. Прибор состоит из четырех акселерометров 8–11, которые устанавливаются по трем направлениям действия нагрузок (P_x , P_y , P_z) на резцедержатель 6 и шпиндель 3; датчика оборотов 12, контро-

лирующего частоту вращения; аналогово-цифрового преобразователя и портативного компьютера.

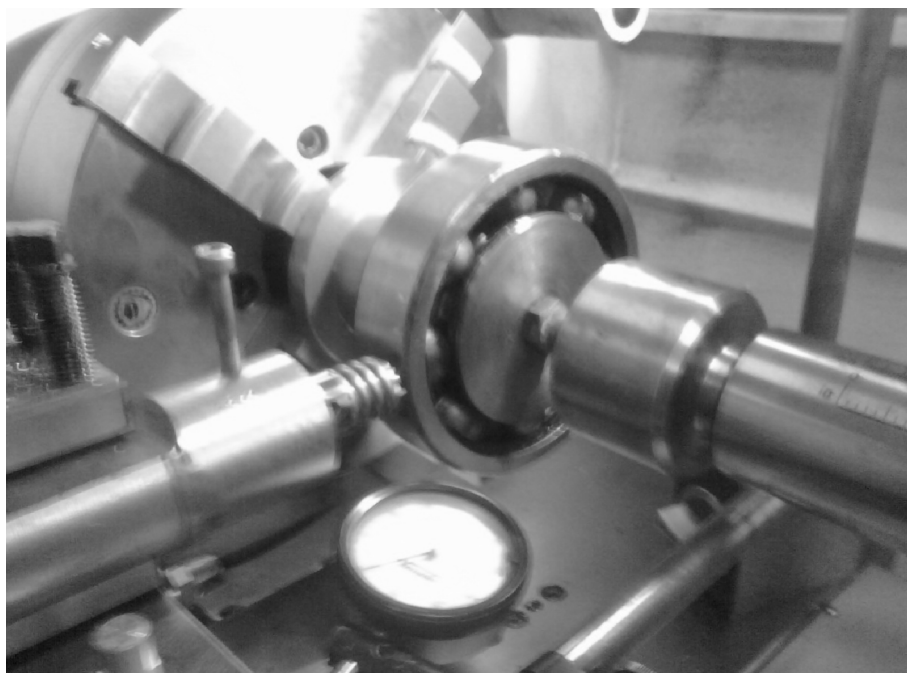


Рис. 35. Устройства оперативной диагностики ТС, установленное на токарно-винторезном станке мод. 16К20

Параметры устройства (рис. 35) регулируются в следующем диапазоне:

- эксцентриситет вала e – 0–2 мм;
- жесткость упругого элемента c – 2–5 Н/мм;
- угол ориентации державки в резцедержателе – 0–15°.

Варьированием указанных параметров, определяются режимы работы ТС, при которых уровень вибрации наименьший.

Нагрузка, создаваемая таким устройством оперативной диагностики, содержит как постоянную P_0 так и переменную dP составляющие (см. рис. 36), так происходит выбор всех «люфтов» задействованных рабочих узлов ТС и условия их работы приближены к реальным рабочим нагрузкам. Эти факторы особенно значимы, т.к. жесткость всех элементов [26], нелинейная, а величина «люфтов» существенно влияет на динамические характеристики узлов ТС.

Рассматриваемый метод можно отнести к методу тестовой диагностики, но в отличие от имеющихся методов все элементы работают при тех же динамических нагрузках, что и при реальной обработке, а вход-

ное воздействие может быть организовано с известными параметрами, например гармоническим сигналом.

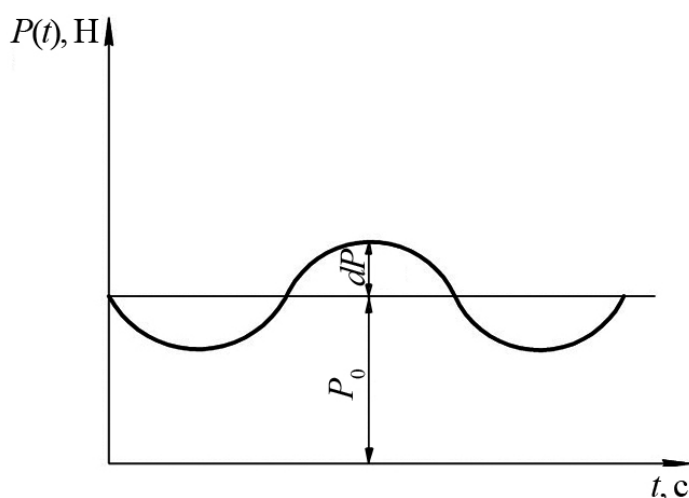


Рис. 36. Параметры экспериментального нагружения ТС

Здесь имеется в виду нагрузка, возникающая при обработке детали на станке с учетом не только работы привода главного движения и подачи, но и возникающих при этом динамических процессов имеющих сложную природу формирования и требующих значительных затрат на исследования [27, 28] (динамика резания и формирования стружки, динамика взаимодействия различных колебательных контуров элементов ТС.)

Применение данного метода оправдывает себя при диагностике несущих элементов ТС, а также оптимизации режимов обработки нержавеющей, жаропрочных, тугоплавких сталей и титановых сплавов, т. к. перечисленные материалы имеют склонность в наклепу обрабатываемых поверхностей, что приводит к возникновению значительного уровня вибраций в технологической системе.

Применение рассмотренного устройства позволяет существенно сократить временные затраты и повысить точность выявления дефектных узлов ТС и определения оптимальных режимов обработки с минимальным уровнем вибрации.

2.8.2. Причины вибрации в технологической системе

Современная машиностроительная промышленность уделяет огромное внимание вопросам виброустойчивости станков. Виброустойчивость станков тесно связана с их жесткостью и оба фактора часто определяют достижимую производительность. Вибрации ограничивают допустимые режимы резания при обработке (особенно скорость и глубину резания), приводят к получению у детали волнистой или дробленой поверхности, повышенного наклепа ее поверхностных слоев, снижению точности обработки, стойкости режущего инструмента, расстройству соединений станка и его ускоренному износу. При возникновении значительных вибраций работу, как правило, приходится прекращать.

Основные виды колебаний, встречающиеся в системе станок-инструмент-деталь, и причины их приведены ниже.

1. Колебания, передаваемые извне (от соседства кузнечного оборудования, зубонасечных или зубодолбежных станков, мощных двигателей и т. п.). В этих случаях частота возникающих при резании колебаний та же или в целое число раз больше частоты возбуждающих колебаний. С указанным явлением особенно часто приходится встречаться при установке станков на слабых перекрытиях, галереях и т. п.

2. Колебания, вызываемые дисбалансом быстровращающихся частей станка или обрабатываемой детали. В этих случаях центробежная сила меняет направление, что и вызывает колебания. Частота колебаний равна числу оборотов неуравновешенной детали в секунду.

3. Колебания, вызываемые дефектами передач станка. Неправильно нарезанные, плохо смонтированные или изношенные зубчатые колеса вызывают возникновение периодических сил, передающихся на подшипники, а, следовательно, на шпиндель и станину станка, что при некоторых условиях может быть причиной появления вибраций. Иногда такой же эффект вызывают грубая сшивка ремней, пульсация жидкости в трубопроводах станка и прочие дефекты передач.

4. Колебания, вызываемые переменным сечением среза или прерывистым характером процесса резания. Типичным примером указанных возбуждающих причин является: фрезерование, точение эксцентричных шеек у валов, обточка квадратных штанг на круглые, обработка прерывистых поверхностей и т. п.

Для многих процессов механической обработки более или менее прерывистый характер резания является их характерной особенностью. Сюда относятся фрезерование, протягивание, долбление, работа шлифующего круга, неравномерно затупившегося по окружности, и др. Частота колебаний при этом равна или кратна частоте возмущающей силы. Обычно явление оказывается более сложным из-за взаимодействия этих вынужденных колебаний с так называемыми автоколебаниями.

Возникновение колебаний объяснимо во всех рассмотренных случаях, это наличие периодической возмущающей силы. По этой же причине такие колебания носят общее название вынужденных колебаний.

Вынужденные колебания небольших амплитуд всегда имеют место при работе на станках. Они представляют серьезную опасность только для высокоточных станков. Для других станков при нормальных условиях эксплуатации они нарушают работу лишь в случае резонанса.

Весьма редко в станках наблюдаются параметрические колебания, которые возникают вследствие переменной жесткости отдельных элементов привода главного движения. Например, причиной таких колеба-

ний могут оказаться работающие на изгиб валы, значительно ослабленные шпоночными канавками.

Чаще можно встретить релаксационные (разрывные) колебания, которые преимущественно возникают в цепях подач суппортов, кареток, столов токарных, расточных, фрезерных и других станков. Такие колебания нередко известны под названием «неравномерной подачи». Релаксационные колебания проявляются в виде ритмичных скачкообразных перемещений узла вместо равномерного поступательного движения. Указанное явление наблюдается, когда кинематическая цепь подачи обладает малой крутильной жесткостью, а силы трения в направляющих узла велики.

В результате кинематическая цепь закручивается подобно пружине, затем рывком сдвигает узел, который, пройдя некоторый путь, вновь затормаживается, и явление повторяется. Дополнительным условием возникновения и поддержания такого рода колебаний является условие, чтобы коэффициент трения движения был меньше коэффициента трения покоя (что имеет место в подавляющем большинстве случаев).

Самым распространенным видом вибраций при работе на металло-режущих станках являются автоколебания.

Автоколебательным или «самовозбуждающимся» называется такой процесс, при котором могут возбуждаться незатухающие колебания за счет источника энергии, не обладающего колебательными свойствами. Такая связь колеблющегося элемента с источником энергии носит название обратной связи.

Внешняя сторона явления в этих случаях состоит в том, что при обработке вполне уравновешенной детали на вполне исправном станке с массивным фундаментом могут иметь место сильные вибрации. Они возникают сразу после начала резания и пропадают при его прекращении. Следовательно, причина вибраций таится именно в самом процессе резания. Автоколебания чаще и легче возникают при сливной стружке. Характерно, что их частота остается неизменной при изменении скорости резания в широких пределах.

Начало автоколебаний может быть «жестким» или «мягким». В первом случае колебания начинаются вследствие изменения силы резания в результате любой причины: не совсем равномерного припуска, наличия твердого включения в металле, неравномерности движения механизма подачи и др. Изменение силы резания, главным образом ее составляющей P_y , вызывает дополнительный отжим инструмента. Колебания возникают сразу в полную силу и поддерживаются далее за счет энергии привода станка. При «мягком» начале автоколебания начинают возрастать от нуля постепенно, причем причиной их возбуждения счи-

тается поведение металла впереди лезвия в момент среза, перед передней гранью образуется пластическая «застойная» зона, величина и форма которой зависят от многих факторов и которая непосредственно влияет на величину усилия резания. Чтобы возникшие колебания не затухали, необходимым условием должно являться неравенство (неоднозначность) величины усилия резания при врезании лезвия в металл и при его отходе, т. е. должно иметь место неравенство $P_y^{\text{отхода}} > P_y^{\text{врезания}}$, так как иначе работа силы за полный цикл колебания (врезание и отход лезвия) будет равна нулю (рис. 37).

В 40–50-х годах профессор А.П. Соколовский подтвердил это экспериментально, получив совместные осциллограммы перемещений резца при свободном течении стальных дисков широкими резцами с поперечной подачей и изменений усилия P_y во времени (см. рис. 38).

Осциллограммы подвергнуты обработке, заключающейся в определении P_y для последовательных значений y в пределах одного цикла колебаний (лежат на одних и тех же вертикалях). После перенесения этих значений в координатную систему $P_y - y$ получается замкнутая кривая зависимости $P=f(y)$ (рис. 37).

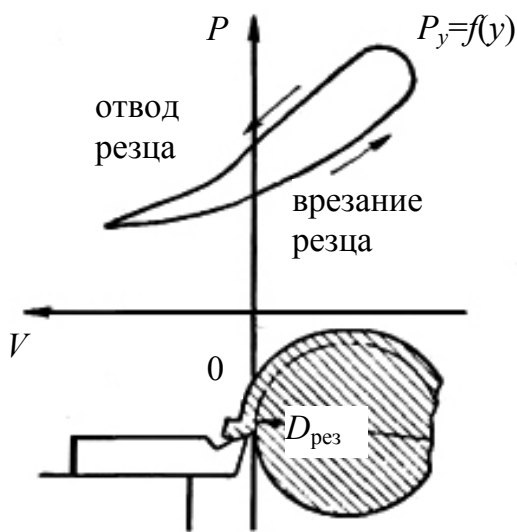


Рис. 37. Зависимость между величиной перемещения резца y и P_y

Это экспериментально подтвержденное условие имеет и вполне логические объяснения.

1. Резец при колебании в моменты углубления встречает свежие недеформированные слои металла. В моменты отхода (отталкивания) перед его передней гранью оказываются более твердые слои только что наклепанного металла. Поэтому усилие резания при врезании резца меньше, чем при отходе, это считается одной из основных причин колебаний усилия резания, а значит и самого явления автоколебаний.

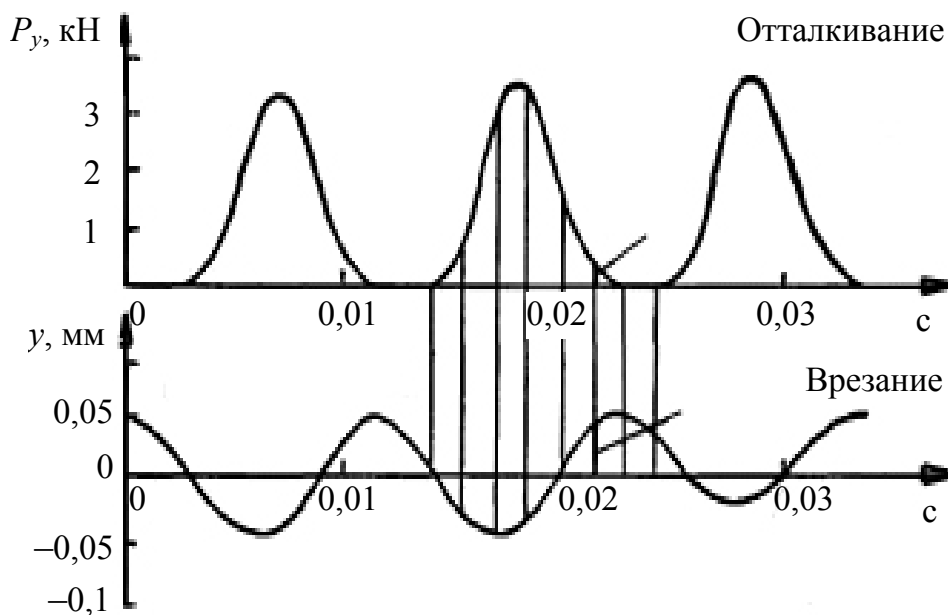


Рис. 38. Временные диаграммы усилий P_y и перемещения резца y

2. Между передней гранью резца и стружкой, а также между задней гранью и обрабатываемой деталью имеет место переменность сил трения. Коэффициент трения поверхностей зависит от скорости их относительного скольжения. С увеличением скорости он падает. Скорость перемещения стружки относительно передней грани в моменты врезания резца при колебаниях возрастает, а в моменты отхода падает, что влияет на переменность силы P_y .

Анализ, возникающих сил трения, показывает, что их изменение связано также с изменением температуры, которая в свою очередь тоже является функцией скорости относительного скольжения стружки и резца. Далее рассматривается система резец – изделие вообще как система с переменным трением, и проводится аналогия с моделью Ван дер Поля с отрицательным трением (рис. 39, а).

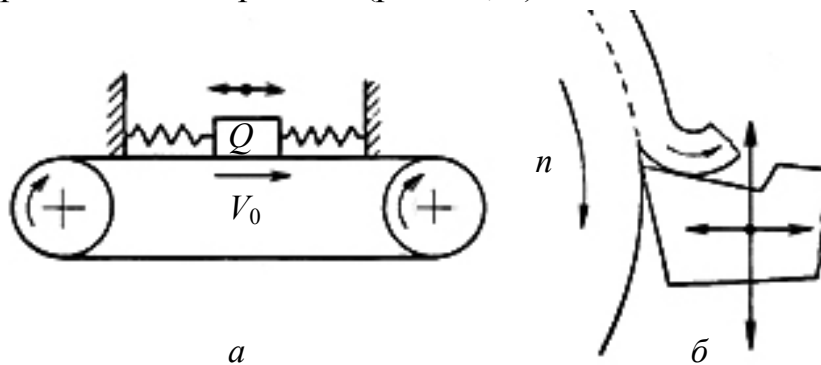


Рис. 39. Схемы моделей с отрицательным трением:
а – модель Ван дер Поля; б – система резец-изделие-стружка

На движущейся с постоянной скоростью V_0 бесконечной ленте лежит груз Q , упруго прикрепленный двумя пружинами к неподвижным стенкам. Вначале груз силой трения покоя увлекается вместе с лентой. Когда сопротивление пружин окажется больше силы трения, груз остановится и начнет двигаться в обратном направлении, пока уменьшающаяся от этого сила сопротивления не станет меньше силы трения груза о ленту. Груз остановится, и цикл повторяется. Модель называется с «отрицательным трением» ввиду того, что сила трения в этом случае не тормозит движение (колебательное) как обычно, а создает и поддерживает его.

На рис. 39, б сбегающая стружка может рассматриваться как движущаяся лента, а резец вместе с суппортом – как упруго закрепленное твердое тело.

Такая схема объясняет радиальные автоколебания. Однако действительности интенсивные автоколебания инструмента протекают главным образом в направлении тангенциальной составляющей силы резания, где жесткость системы резец – суппорт наименьшая. Они возникают уже под воздействием сил трения на задних гранях инструмента. Роль движущейся ленты при этом исполняет поверхность обрабатываемой детали. Справедливость последнего подтверждается простым экспериментом

В резцедержатель был зажат стальной стержень такого же сечения, как резец и с тем же вылетом. Стержень прижимался к вращающейся болванке, при этом возникали автоколебания той же частоты, что и при резании резцом.

3. Во время вибраций периодически изменяется фактическая геометрия инструмента, как в связи с волнистым характером обрабатываемой поверхности (см. рис. 40), которая получается такой при всех последующих оборотах детали после возникновения вибраций, так и из-за тех, хотя бы и незначительных, радиальных колебаний резца, которые все же имеют место (см. рис. 41). Периодическое изменение геометрии инструмента приводит к периодическому изменению величины сил резания.

4. Наконец, волнистость обрабатываемой поверхности приводит к переменности сечения среза при последующих оборотах или проходах инструмента, а значит и к периодическому колебанию той же величины силы резания.

В работах [14, 29, 30] показано, что роль изменения сечения среза при автоколебаниях можно оценить в 85 %, а роль всех остальных причин только в 15 %. Таким образом, указанный фактор является вторичной, но наиболее мощной причиной поддержания вибраций.

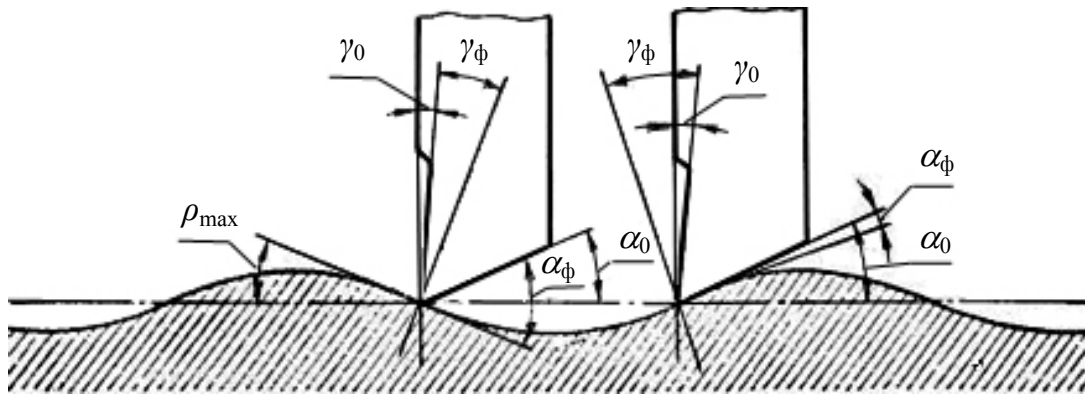


Рис. 40. Изменение действительной геометрии инструмента из-за волнистости обрабатываемой поверхности при вибрациях:
 γ_0, α_0 – угол заточки; α_ϕ, γ_ϕ , – фактические углы при резании;
 ρ_{\max} – угол наибольшей крутизны поверхностных волн;
 $\gamma_\phi = \gamma_0 \pm \rho$; $\alpha_\phi = \alpha_0 \pm \rho$

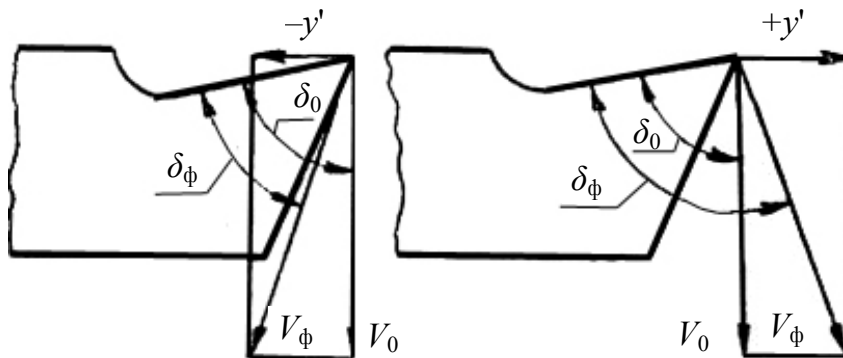


Рис. 41. Изменение действительной геометрии инструмента из-за его радиальных колебаний при вибрациях:
 $a - \delta_\phi < \delta_0$; $b - \delta_\phi > \delta_0$;
 V_0 – окружная скорость детали; V_ϕ – действительная скорость резания;
 y' – скорость колебательного движения резца в радиальном направлении)

Уместно отметить, что общая работа всех переменных сил, поддерживающих автоколебания, составляет 1–3 % от работы, затрачиваемой на снятие стружки.

Частота вибраций типа автоколебаний равна или близка к собственной частоте колебаний одного из элементов системы станок-инструмент-деталь. Так, на токарных станках вибрации происходят с частотами, близкими к собственной частоте изделия, закрепленного в шпинделе, и резца – в резцедержателе, на консольно-фрезерных станках частота вибраций близка к собственной частоте колебаний фрезерной оправки, хобота, консоли и др.

ГЛАВА 3. ТИПОВЫЕ СХЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ И ПРАВИЛЬНОСТИ ВЗАИМОРАСПОЛОЖЕНИЯ И ДВИЖЕНИЯ СБОРОЧНЫХ ЕДИНИЦ И ЭЛЕМЕНТОВ СТАНКА

3.1. Неплоскостность и непрямолинейность поверхности

Геометрические погрешности поверхностей столов и направляющих линейек станков характеризуются неплоскостностью, которая обнаруживается в виде щели f_0 между исследуемой поверхностью и поверхностью поверочной линейки, установленной на стол (рис. 42).

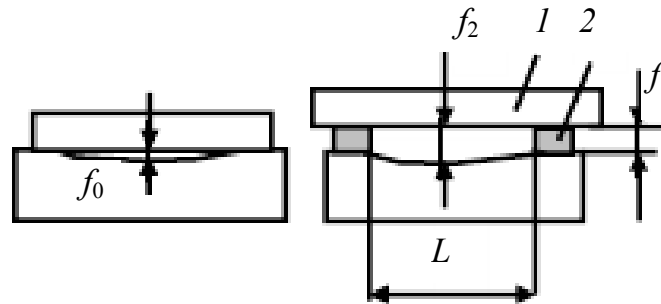


Рис. 42. Схема измерения плоскостности:
1 – поверочная линейка; 2 – опоры

При измерении неплоскостности обычно поверочную линейку 1 устанавливают на опоры 2 (плоскопараллельные концевые меры длины) одинаковой толщины и зазор f_2 щели измеряют щупами. Для измерения ищут максимальный зазор щели. Неплоскостность измеряют в продольном, поперечном и диагональных направлениях. Наибольшая стрела кривизны f_0 определяется как разность между наибольшим зазором f_2 и толщиной опор f_1

$$f_0 = f_2 - f_1.$$

3.2. Непрямолинейность траектории перемещения

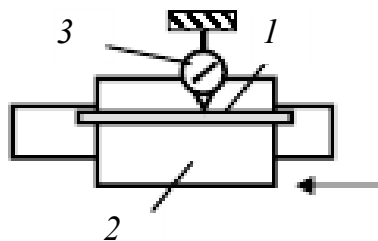


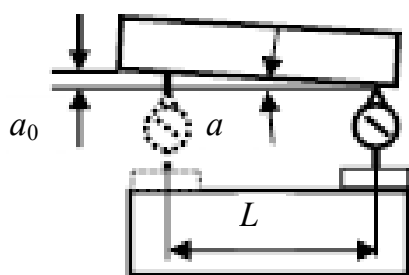
Рис. 43. Схема измерения непрямолинейности траектории перемещения стола

Траектории перемещений суппортов, столов и кареток должны быть прямолинейны. Погрешности траектории перемещения измеряются поверочной линейкой и индикатором часового типа. Поверочная линейка 1 (рис. 43) устанавливается на стол 2 так, чтобы в крайних положениях стола индикатор 3, контактирующий с линейкой, показывал ноль. При испытании стол перемещают из одного крайнего положения в другое и фик-

сируют показания индикатора. Максимальное показание индикатора показывает кривизну траектории перемещения на длине поверочной линейки. Затем делается перерасчет кривизны, относя ее к 1000 мм хода стола.

3.3. Непараллельность элементов и перемещений

Непараллельное расположение элементов станка выражается величиной уклона a на длине 1000 мм. Измеряется непараллельность с помощью уровня, нутромера или индикатора (рис. 44). Если на длине элемента L станка найти величину уклона a_0 , то перерасчет на стандартную



длину выполняется с использованием следующих выражений:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{a_0}{L} = \frac{a}{1000};$$

$$a = \frac{1000 \cdot a_0}{L};$$

Рис. 44. Схема измерения непараллельности элементов

где a_0 и a – величина непараллельности в мм на длине соответственно L и 1000 мм.

3.4. Неперпендикулярность относительного положения элементов

Взаимная неперпендикулярность элементов станка определяется отклонением положения от прямого угла на величину n_0 на длине L . Измерение величины n_0 производят с помощью поверочного угольника с углом 90° , который плотно подводят к обеим контролируемым поверхностям, и щупа или индикатора. Перерасчет непараллельности на стандартное значение производят по формуле:

$$n = 1000 \frac{n_0}{L},$$

где L – расстояние, мм, от основания поверочного угольника до места измерения зазора n_0 мм.

3.5. Несоосность валов

Несоосность валов характеризуется несовпадением их геометрических осей. Численной характеристикой несоосности служит величина эксцентриситета e , мм. Соосность измеряют индикатором, закрепленным струбциной на одном из валов так, чтобы мерительный стержень индикатора упирался в поверхность второго вала. При измерении вал с индикатором медленно поворачивают и индикатором фиксируют от-

клонения величины эксцентриситета. Максимальное значение отклонения принимается за величину несоосности.

3.6. Радиальное и осевое биение

Радиальное биение шеек шпинделей, валов, роликов, мест посадки режущих инструментов определяется индикатором как разность максимального и минимального отклонений при медленном поворачивании вала. Для измерений индикатор неподвижно устанавливают на станине станка и измерительный стержень подводят в контакт с исследуемой поверхностью. Затем вал медленно поворачивают на полный оборот и фиксируют максимальное и минимальное показания индикатора в мм. Осевое биение зажимных фланцев определяют с помощью индикатора, измерительный стержень которого устанавливают перпендикулярно к поверхности фланца у его периферии. При повороте вала на один оборот находят максимальное отклонение в мм.

ГЛАВА 4. ОСНОВНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРИ ИСПЫТАНИИ СТАНКОВ

4.1. Методы проверки геометрической точности станков

Приведены примеры схем для измерения геометрической точности станков, используемых в стандартных проверках, и современных методов, позволяющих оценить параметры траекторий формообразующих узлов станка.

Контактные методы требуют во многих случаях применения специальных контрольных оправок и точной оснастки (угольники, линейки, эталонные ходовые винты и др.), вносящих дополнительные погрешности в получаемые результаты. Этими методами, как правило, измеряют предельные отклонения и они мало приспособлены для измерения параметров траекторий узлов станка. Стандартные проверки позволяют оценить лишь нахождение данного параметра в пределах допуска.

Бесконтактные методы измерения обеспечивают более широкие возможности оценки выходных параметров станка, характеризующих его точность. Они позволяют автоматизировать процесс измерения и получить массив данных при многократных измерениях, фиксировать результаты графически, на дисплее или в виде протокола испытаний, перерабатывать информацию с оценкой более широкой номенклатуры показателей, характеризующих точность станка.

Для проведения испытаний – проверки на геометрическую точность – необходимо иметь ряд инструментов и приборов. Для всех станков и каждой проверки в ГОСТ конкретно указаны необходимые измерительные средства. Рассмотрим из них основные.

4.1.1. Поверочные линейки

Поверочные линейки [31] с широкой рабочей поверхностью и лекальные. Первые применяются для контроля прямолинейности или плоскостности рабочих поверхностей столов, плит, направляющих и т. п. методом линейных отклонений (при помощи щупов) или проверкой «на краску». Из линеек с широкой рабочей поверхностью преимущественно применяются чугунные двутаврового сечения и чугунные мостики длиной 500–4000 мм, стальные двутавровые линейки по особому заказу изготавливаются длиной до 6000 мм,

Лекальные линейки всех видов – плоские с односторонним или двусторонним скосом, трех- и четырехгранные – изготавливаются на стали и применяются для контроля «на просвет» небольших плоскостей. Длина таких линеек обычно не превышает 300 мм.

Момент инерции сечения поверочных линейек должен быть таким, чтобы обеспечить им надлежащую жесткость: линейки, концы которых свободно лежат на опорах, не должны прогибаться под собственным весом более чем на 10 мкм на 1 м длины линейки. Наибольшая величина естественного прогиба линейки должна быть указана на одной из ее сторон. При пользовании поверочными линейками с параллельными рабочими сторонами между точками опоры линейки должно быть расстояние $5/9$ ее общей длины; эти точки опоры должны быть отмечены на линейке рисками. На рис. 45 приведены примеры конструктивного исполнения поверочных линейек.



Рис. 45. Примеры конструктивного исполнения поверочных линейек: а – в виде мостика; б – двутаврового сечения; в – четырехгранные; г – трехгранные; д – прямоугольные

При проверке шаброванных линейек по краске число пятен в квадрате со стороной 25 мм должно быть не менее: 30 – для линейек класса 0; 25 – для линейек класса 1.

Расположение пятен должно быть равномерным по всей рабочей поверхности.

4.1.2. Поверочные угольники

Поверочные угольники [32] применяются для проверки взаимной перпендикулярности расположения или движения отдельных узлов и деталей станков. Они удобны из-за устойчивости при установке. Наиболее распространены угольники размером 200×300 мм.

Имеется несколько типов поверочных угольников (см. рис. 46).

Угольник, представляющий собой опорную плоскость и ребро, перпендикулярное этой плоскости показан рис. 46, а. Этот угольник может также иметь ребра жесткости.

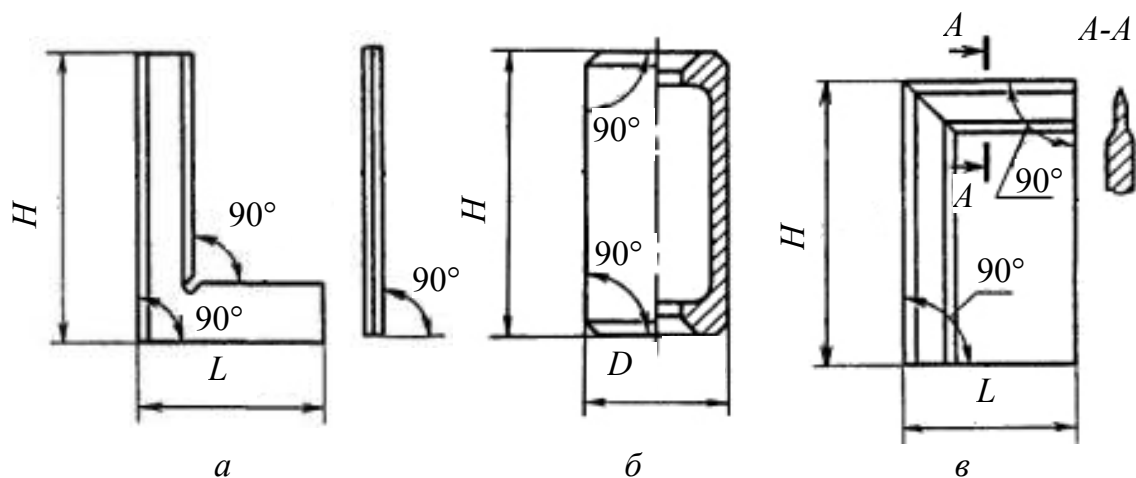


Рис. 46. Примеры конструктивного исполнения поверочных угольников: а – с плоским основанием; б – цилиндрической формы; в – прямоугольной формы

Цилиндрический угольник с торцовыми плоскостями, строго перпендикулярными оси их цилиндрической поверхности (рис. 46, б) изготовить проще обычных, кроме того, угольники со снятыми нерабочими цилиндрическими боками позволяют получить большую длину опорной плоскости при том же весе.

Четырехсторонний угольник с двумя призматическими рабочими сторонами (рис. 46, в) удобен при проверке перпендикулярности перемещения суппорта, стола, бабки, головки и т. п. к оси, валу, призматической направляющей и т. п. т. е. При этом угольник одной из V-образных сторон опирается на вал, ось, оправку, направляющую, а по другой плоской стороне проверяется перпендикулярность перемещения. Особенностью четырехстороннего угольника является получение при измерении им точного результата даже в том случае, если его стороны не точно перпендикулярны между собой. В этом случае необходимо произвести замеры перпендикулярности проверяемых перемещений по всем четырем сторонам угольника и взять среднее алгебраическое из четырех отклонений.

Размеры угольников, применяемых при проверке станков, обычно не выходят за пределы 500–600 мм при больших размерах они тяжелы для пользования, поэтому предпочитают применять более практичные в этом случае оптические методы.

4.1.3. Щупы

Щупы [34] применяются для определения зазоров между сопряженными плоскостями деталей станка или между проверяемой поверхностью и контрольной линейкой. Щупы выпускаются в виде наборов, снабженных общей ручкой или кольцом (рис. 47). Наборы включают от 8 до 16 стальных пластин толщиной от 0,03 до 1 мм при длине 50, 100 или 200 мм. Для испытания станков наиболее пригоден набор №3, состоящий из пластин толщиной от 0,03 до 0,5 мм, длиной 50 или 100 мм. Чтобы измерить отклонения меньше

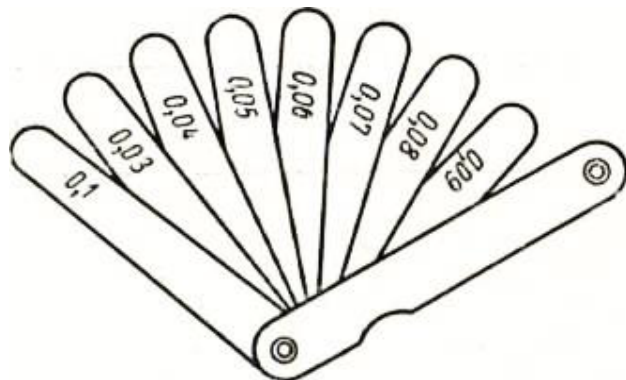


Рис. 47. Щупы (набор № 1)

отклонения меньше 0,03 мм или с точностью свыше 0,01 мм, необходимо пользоваться концевыми плоскопараллельными мерами. Контрольную линейку в таком случае ставят концами на две одинаковые плитки. Подбирая высоту плиток, можно производить измерения в значительном интервале с точностью до 0,005 мм.

4.1.4. Оправки

Оправки – контрольные приспособления, особенно широко применяющиеся при изготовлении и приемке станков. Контрольные оправки должны иметь поверхностную твердость не ниже HRC 52 и чистоту поверхности рабочей части не ниже R_a 1,0–2,5. Центровые отверстия должны быть шлифованными и иметь защитный конус. У оправок допускается овальность, конусность или биение не более 0,005 мм, а у предназначенных для прецизионных станков – не более 0,003 мм. Применяются оправки двух типов:

а) консольные, имеющие на одном конце конус, соответствующий конусу шпинделя проверяемого станка, делительной головки и т. п. – применяются для проверки совпадения оси конического отверстия шпинделя с осью вращения шпинделя и для проверки положения самой оси шпинделя в станке;

б) цилиндрические центровые, которые применяются для проверки положения линии центров станка и проверки расположения направляющих относительно этой линии центров.

Размеры и расположение рабочих поверхностей контрольных оправок должны позволять измерять отклонения на длинах, к которым отне-

сен допуск. Диаметры оправок должны быть достаточными, чтобы исключить влияние прогибов от собственного веса.

Рекомендуемые длины и диаметры контрольных оправок приведены ниже.

Таблица 7

Рекомендуемые длины и диаметры контрольных оправок

Длина контрольной части оправки, мм	Рекомендуемые наружный и внутренний диаметры оправок D и d , мм	
	Консольные оправки	Центровые оправки
150	$D = 25$	$D = 25$
300	$D = 40$	$D = 40$
500	$D = 60$	$D=80; d=50$
1000	–	$D = 100$ $d = 120$ } $d = 60$

Для уменьшения прогиба оправок их часто изготавливают полыми. Прогиб оправки от давления на нее измерительного стержня индикатора, не превышающего 1 Н, в расчет не принимается. Для этого оправки значительных размеров делают полыми, их концы забиваются заглушками, на которых и наносятся базовые центровые отверстия.

4.1.5. Индикаторы и микрокаторы

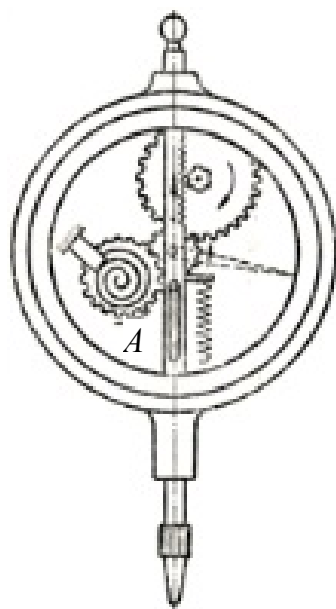


Рис. 48. Индикатор часового типа

Индикаторы являются наиболее широко применяемыми универсально-измерительными инструментами. При проверках пользуются преимущественно индикаторами часового типа [35] или рычажно-зубчатыми индикаторами [36] с ценой деления 0,01 мм. Кроме того, имеются индикаторы с ценой деления 0,002 мм и специальные «микронные» с ценой деления 0,001 мм. Для точных измерений небольших отклонений можно пользоваться головками миниметров, что, однако, менее удобно. Схема индикатора часового типа дана на рис. 48, где он показан со стороны задней крышки. Для устранения люфта в механизме индикатора предусмотрена добавочная шестеренка A со спиральной пружиной на оси. Индикатор закрепляется на специальном штати-

ве, удерживающий рычаг которого может быть удлинен за счет добавочных звеньев. Таким образом, индикатор можно быстро и удобно подвести к различно расположенным контролируемым поверхностям.

При измерениях, после подвода индикатора к поверхности до касания, прибору необходимо дать предварительную нагрузку, приблизив его еще на 1–2 мм (1–2 оборота стрелки), после чего установить шкалу на нуль поворотом ее за обод. Рекомендуется после установки индикатора на нуль осторожно несколько раз оттянуть его мерительный штифт за пуговку и вновь опустить без удара.

Измерительное давление индикатора составляет 40–100 г.

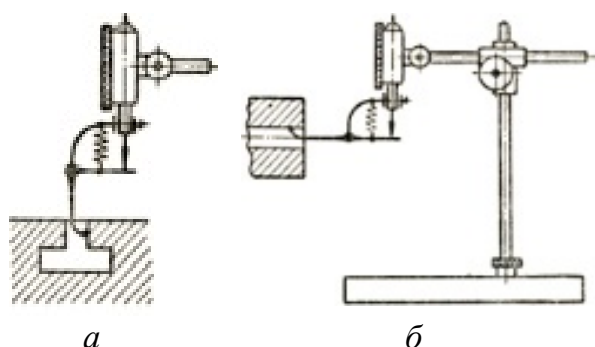


Рис. 49. Индикатор с приставками для внутренних измерений

Для внутренних измерений к индикатору прикрепляются специальные равноплечие рычаги (рис. 49, а и б), позволяющие промерять поверхности небольших отверстий диаметром 8–12 мм и боковые стороны различных пазов.

Допускаемые погрешности показаний индикатора зависят от типа индикатора и регламентированы [35, 36]

4.1.6. Поверочные уровни

Уровни [37] служат для проверки горизонтальности или вертикальности установки станка, прямолинейности направляющих и столов, взаимного расположения на станине стоек, бабок, извернутости станин и других проверок. По конструкции уровни бывают горизонтальные обыкновенные, горизонтальные регулируемые, рамные, рукавные и специальные.

Первые три типа уровней отличаются только конструктивным оформлением. Принципиально их устройство одинаково: запаянная стеклянная трубка, изогнутая по большому радиусу, наполнена спиртом так, что в ней оставлен пузырек воздуха. Трубка заделана в массивную металлическую оправу с тщательно обработанным основанием.

При горизонтальном положении основания пузырек находится точно по середине центрального деления трубки. При продольном циклоне основания пузырек переместится по трубке в сторону подъема. По числу делений, на которое переместится пузырек, судят о величине уклона. Для испытания станков чаще применяют рамные уровни с це-

ной деления 0,04 мм или 0,02 мм на 1 метре при длине основания не менее 200–300 мм (рис. 50).

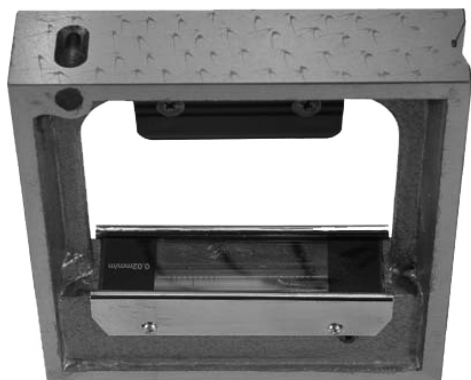


Рис. 50. Рамный уровень

Основание уровней для удобства их установки и на цилиндрических поверхностях обычно имеет центральный V-образный паз. Для контроля во время измерений правильности установки уровня в поперечном направлении у них наряду с основной трубкой должна иметься еще небольшая поперечная.

Показание уровня относится лишь к направлению измерения, т. е. к направлению вдоль уровня, поэтому при проверке правильности плоскостей уровень следует устанавливать в различных направлениях. При измерении уровнем возможны значительные ошибки.

Соблюдение следующих рекомендаций позволяет уменьшить их до минимума:

а) при измерениях нельзя допускать заметных изменений температуры уровня, поэтому не разрешается касаться или дышать на ампулу уровня, между измерениями долго держать уровень в руках, допускать прямого падения на прибор солнечных лучей, наличие сквозняка и т. п.;

б) метод чтения показаний уровня в течение проверки данного станка должен быть однообразным или обоими глазами, или одним, или вертикально над ампулой, или под одним и тем же небольшим углом и т. д.;

в) основание уровня должно плотно прилегать к проверяемой поверхности; в противном случае результаты проверки уровнем будут неверными. Можно рекомендовать применение специальной шлифованной трехопорной подставки под уровень (рис. 51), которая помогает быстро и правильно установить его не только на стол или направляющие станка, но даже и на необработанные поверхности. Выверка опор легко производится их подвинчиванием.

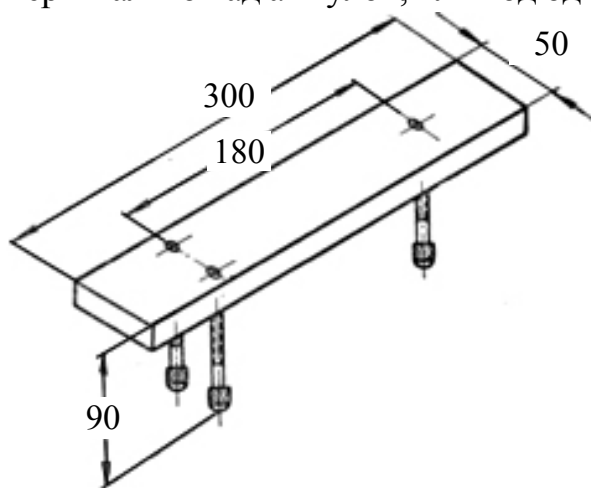


Рис. 51. Подставка под уровень

Чтобы убедиться в исправности уровня, следует повернуть его на плоскости на одном месте на 180°.

Изменение показания при этом не должно превышать $\pm \frac{1}{4}$ деления шкалы.

Если при измерениях отклонения от горизонтальности окажутся настолько большими, что пузырек совсем уйдет из пределов шкалы, то нужно под опущенный конец уровня подложить пластину щупа такой толщины, при которой пузырек вернется в положение, близкое к нулевому. Затем величина уклона (мм/м) определяется по формуле

$$i = 1000 \frac{x}{l} \pm nc,$$

где x – толщина подложенного щупа, мм; l – длина подошвы уровня, мм; n – число делений, на которое положение пузырька не совпало с нулевым делением после подкладывания щупа; c – цена деления уровня.

Знак плюс соответствует случаю недохода пузырька до середины шкалы уровня, а знак минус – случаю перехода.

Регулируемый уровень отличается от обыкновенного наличием микрометрического винта, которым можно изменять наклон трубки имеет с особой оправой. Отклонение от горизонтальности определяется по величине подъема или опускания винта для возвращения пузырька в среднее положение.



Рис. 52. Сверточный уровень

В настоящее время имеются сверточные уровни с ценой деления 0,01 мм на 1 м (рис. 22). Наблюдение за установкой пузырька в них производится через специальную оптическую систему.

Рукавные и специальные уровни работают по принципу сообщающихся сосудов. Схема рукавного уровня дана на рис. 53. Он состоит из двух вертикальных сосудов с градуировкой, соединенных эластичным шлангом. Такие уровни применяются для проверки больших плит, станин, столов, которые проверяются по участкам или квадратам путем перестановки одного из сосудов при оставлении второго неподвижным.

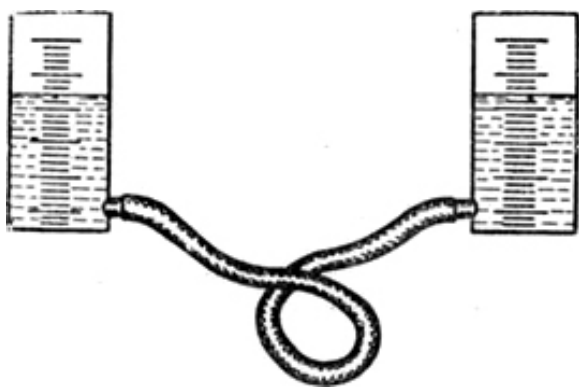
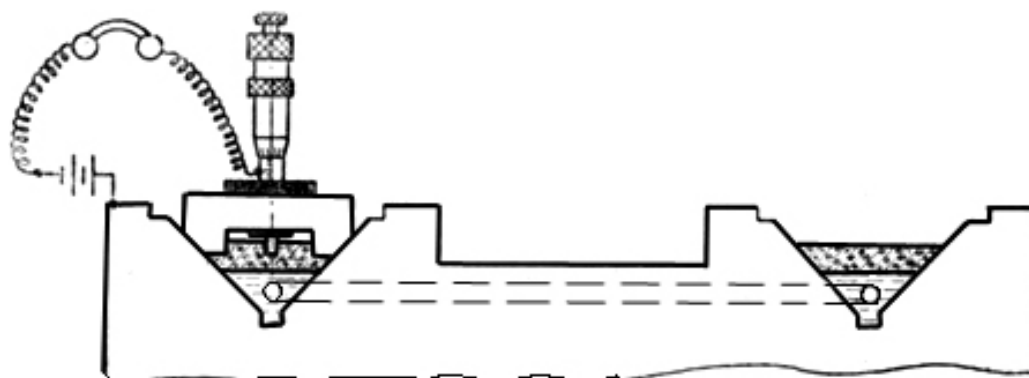


Рис. 53. Схема рукавного уровня

Примером специального уровня может служить приспособление для проверки прямолинейности и горизонтальности длинных направляющих (рис. 54).

Специальная вставка с микрометрическим винтом переставляется по направляющим. Через определенные равные отрезки производят отсчет отклонения от выбранного начала, которым служит поверхность воды. При V-образных

направляющих вода после замазки их концов наливается прямо на направляющие, а при других видах направляющих – в отдельный параллельно установленный желоб.



54. Схема специального уровня для проверки V-образных направляющих

Чтобы уровень воды в обеих направляющих или во всех желобах был одинаковым, они должны быть соединены шлангами. Для повышения точности отсчетов момент касания острия винта с водой фиксируют по щелчку в телефоне или по отклонению стрелки вольтметра. Для улучшения проводимости воду следует брать подсоленную. Втулка микрометрического винта при этом безусловно должна быть изолирована от корпуса ползушки. После окончания измерений по полученным отклонениям можно построить в увеличенном масштабе продольный профиль направляющих или определить неправильность их установки.

4.1.7. Проверочные мостики

Проверочные мостики применяются для контроля направляющих. Мостики могут иметь различную конструкцию, однако их длина не должна быть больше длин рабочих частей станка, перемещаемых по этим направляющим. Для иллюстрации на рис. 55 показан мостик с опорными роликами большого диаметра для проверки V-образных направляющих, контур которых условно нанесен пунктиром. При опоре на выпуклую призматическую направляющую короткая сторона мостика оснащается двумя парами роликов небольшого диаметра, укрепленных строго параллельно между собой, так, чтобы они охватывали направляющую.

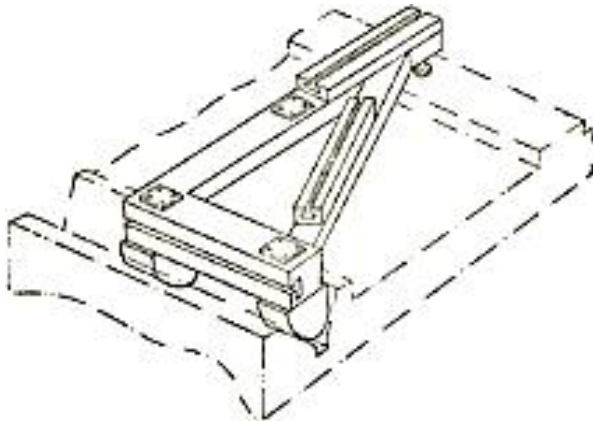


Рис. 55. Проверочный мостик

Начальная горизонтальная выверка мостика производится регулировкой винта, опирающегося на плоскость. Для установки уровней на мостике имеются тщательно обработанные площадки, а для закрепления различных измерительных приборов (индикатора, микроскопа при контроле со струной) предусмотрены Т-образные пазы.

4.1.8. Оптические приборы (коллиматоры)

Оптические приборы применяются для контроля длинных направляющих. Из них кратко рассмотрим зрительную трубу с коллиматором и автоколлиматор [14].

При контроле по первой схеме (см. рис. 56) зрительная труба 1 устанавливается неподвижно так, чтобы ее оптическая ось была направлена вдоль проверяемой направляющей 3. Зрительная труба снабжена прозрачным экраном с темным перекрестьем, нити которого имеют деления. На направляющую устанавливается коллиматор, играющий роль световой метки. Коллиматор 2 представляет осветительное устройство, из которого световые лучи выходят параллельным пучком.

В начале испытания установкой приборов добиваются точного совпадения изображения перекрестья коллиматора с перекрестьем зрительной трубы. Далее, при перемещении коллиматора по проверяемой направляющей, он будет следовать отклонениям ее профиля, вследствие чего между оптическими осями трубы и коллиматора появится некоторый небольшой угол θ . Это в свою очередь вызовет соответствующее

смещение изображения перекрестья коллиматора на экране зрительной трубы.

Из-за малости углов смещения принимают линейное смещение изображения равным

$$\Delta S = f_1 \cdot \theta,$$

где f_1 – фокусное расстояние объектива зрительной трубы.

Величину этих отклонений наблюдают и отсчитывают через окуляр зрительной трубы после каждой перестановки коллиматора; для удобства перестановку всегда производят на одинаковое расстояние (100–200 мм). Чувствительность этого способа контроля составляет 0,02–0,04 мм/м.

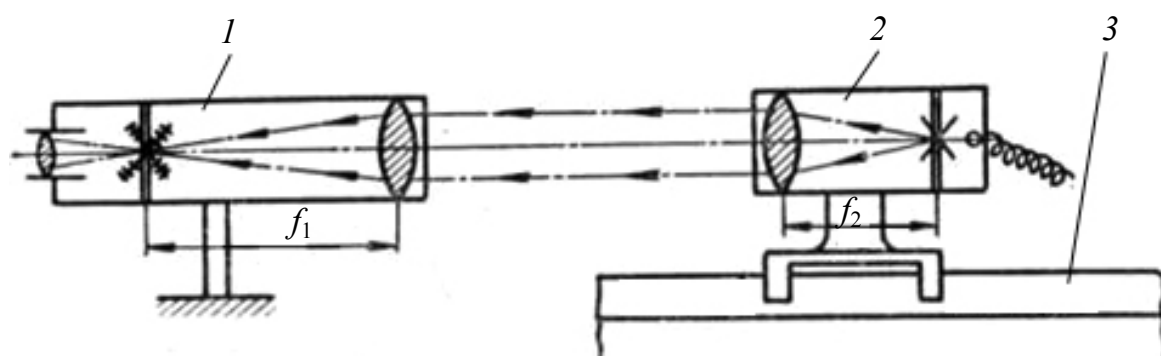


Рис. 56. Схема проверки прямолинейности направляющих посредством зрительной трубы и коллиматора:

1 – зрительная труба; 2 – коллиматор; 3 – направляющие

Изменение расстояния между коллиматором и трубой не влияет на резкость изображения перекрестья, потому что между ними, как отмечалось, идет пучок параллельных лучей.

Автоколлиматор 1 представляет собой прибор, в котором объединены зрительная труба и коллиматор, а элементом, улавливающим отклонения направляющих 3 и вызывающим соответствующие отклонения изображения перекрестья на экране, служит плоское зеркало 2 на подставке (см. рис. 27). Свет от бокового источника падает на наклонный прозрачный экран и, отразившись от него, проходит через основной экран, на котором нанесено темное перекрестье. Изображение перекрестья в виде пучка параллельных лучей выходит из трубы попадает на зеркало, отражается от него и, возвращаясь через объектив, становится видимым на том же основном экране.

В начале испытания установкой приборов добиваются совмещения отраженного изображения перекрестья с самим перекрестьем. Это имеет место, когда плоскость зеркала перпендикулярна оптической оси авто-

коллиматора. Во время проверки неточности направляющих вызывают наклоны зеркала, что в свою очередь опять-таки приводит к смещению отражения перекрестья на экране.

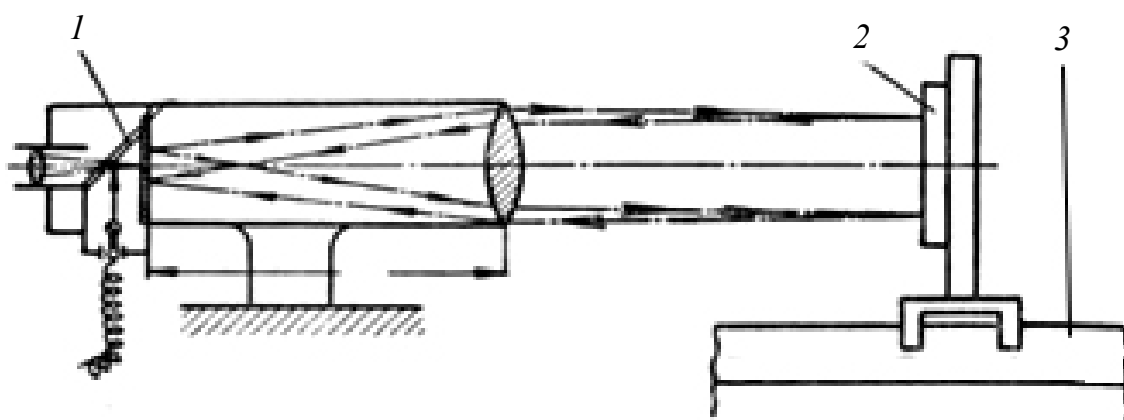


Рис. 57. Схема проверки прямолинейности направляющих посредством автоколлиматора:

1 – автоколлиматор; 2 – зеркало; 3 – направляющие

При наклоне зеркала на небольшой угол θ соответствующее линейное перемещение принимают равным

$$\Delta S = 2 f_1 \cdot \theta .$$

Отсюда следует, что измерения с помощью автоколлиматора могут быть произведены вдвое точнее, чем в предыдущем случае, а именно до 0,01 мм/м. Для более точного отсчета смещения ΔS следует применять микроскоп с окулярмикрометром. Изменение расстояния от объектива до зеркала на работу прибора не влияет.

4.1.9. Динамометры

При испытаниях на жесткость можно применять динамометры различных конструкций. Большое распространение в силу их простоты имеют кольцевые динамометры [14].

Динамометры трех размеров на 2, 50 и 8 кН (см. рис. 58). Основу динамометра составляет широкое закаленное стальное кольцо 1. В середине к нему медью припаяна вилка 2, в прорези которой болтиком закрепляется индикатор 3, так чтобы его мерительный шпindel с натягом упирался в противоположную сторону кольца. Снаружи к кольцу приварен штифт с резьбой 4, входящий в правую половину стяжной гайки 5. Во вторую половину гайки, имеющую обратную резьбу, ввинчена тяга 6, которая отверстием может присоединяться к зажиму типа струбцины или непосредственно к базовой части станка. Диаметрально противоположно штифту приварено ушко 7 для присоединения винтового при-

хвата 8, позволяющего быстро и надежно закрепить динамометр за оправку любого диаметра. После установки динамометра нагрузка на узел создается подвинчиванием стяжной гайки 5. Каждый прибор предварительно тарируется.

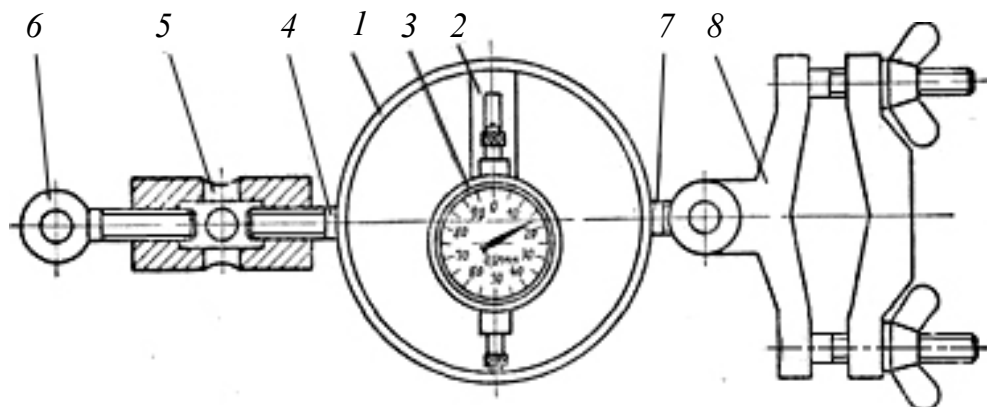
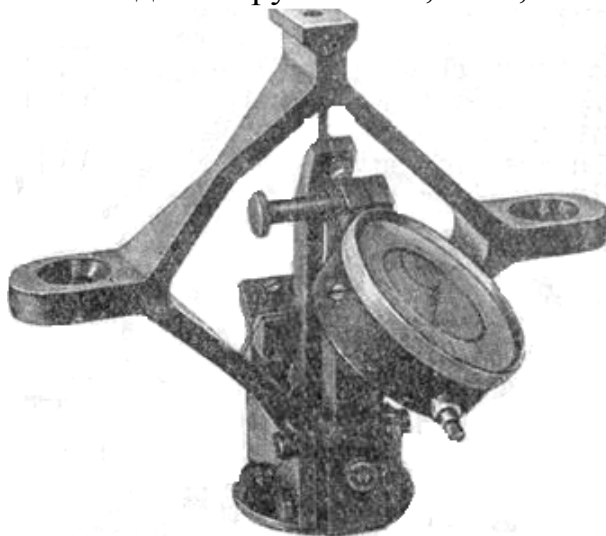


Рис. 58. Кольцевой динамометр:

*1 – стальное кольцо; 2 – вилка; 3 – индикатор; 4 – штифт;
5 – стяжная гайка; 6 – тяга; 7 – ушко; 8 – винтовой прихват*

Хорошими являются динамометры системы Н. Г. Токарь, изготовляемые для нагрузок 1000, 2500, 5000, 10000 и 50000 Н.



*Рис. 59. Динамометр системы
Н.Г. Токарь*

Так, универсальный динамометр на 10 кН может работать как на растяжение, так и на сжатие (рис. 59). Основу его составляет изготовленная закаленная стальная квадратная рамка. При нагружении деформации рамки фиксируются по индикатору, укрепленному диагонально внутри прибора посредством пластинчатых пружин и специальной системы рычагов.

Динамометры системы Н.Г. Токарь имеют почти прямолинейную характеристику, по которой производят определение нагрузки в зависимости от показаний индикатора. Нагружение динамометра производится либо ходовыми винтами станка, либо, при испытании столов и суппортов, специальными натяжными устройствами.

4.2. Современные приборы и аппаратно-программные комплексы для измерения геометрической точности

4.2.1. Беспроводная система QC20-W ballbar

В состав системы QC20-W ballbar (рис. 61) [23] входит прецизионный линейный датчик компании Renishaw 2 для измерения изменений значений радиуса при вращении системы ballbar 4 вокруг неподвижной точки.

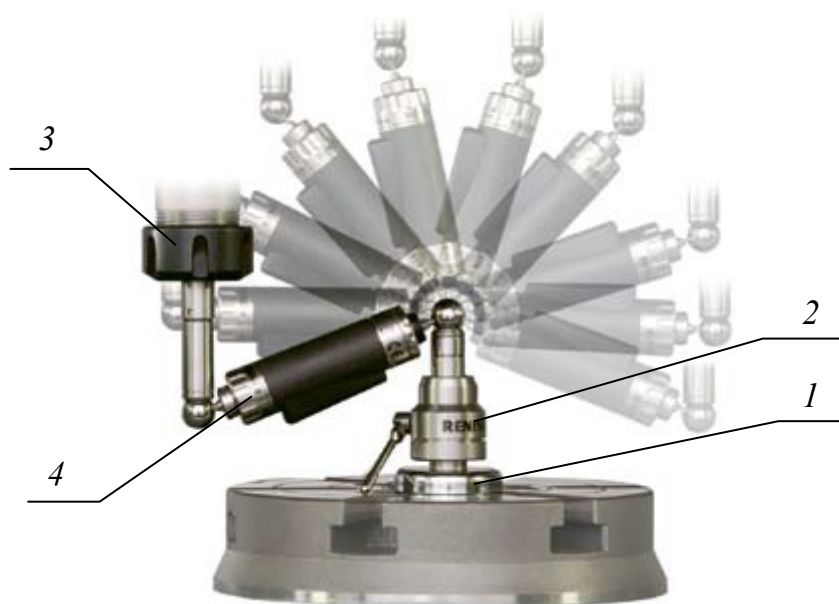


Рис. 61. Беспроводная система QC20-W ballbar:
1 – магнитная опора; 2 – прецизионный линейный датчик;
3 – держатель; 4 – система ballbar

Технические характеристики системы:

- разрешение датчика – 0,1 мкм;
- точность датчика ballbar при 20 °С – $\pm 0,5$ мкм;
- точность измерений при 20 °С – $\pm 1,25$ мкм;
- диапазон измерений датчика – $\pm 1,0$ мм;
- максимальная частота считывания – 1000 Гц;
- передача данных при обычных условиях – 10 м;
- температура эксплуатации 0–40 °С.

Пример применения системы QC20-W ballbar на практике рассмотрен в разделе «2.7.2.3. Контроль отработки системой привода подач и выявление погрешностей в санках с ЧПУ».

Полученные данные используются для расчета общих показателей, характеризующих качество контурной обработки (круглость, отклонение от окружности) на станках с ЧПУ.

Предусмотренное для системы программное обеспечение позволяет получать подробный анализ ошибок, вносимых отдельными источниками. Результаты диагностики выводятся в графическом и численном виде.

Обработка сигналов осуществляется внутри системы ballbar, после чего данные передаются через модуль Bluetooth® класса 2 на компьютер с соответствующими характеристиками.

Программное обеспечение позволяет оценивать эффективность предполагаемой настройки или ремонта станка. Программа моделирования графиков дает возможность просматривать результаты тестов на экране, а затем изменять различные геометрические характеристики, люфт и динамические параметры станка для опробования различных сценариев на графиках и оценки их влияния на отклонение от окружности (круглость) и точность позиционирования. Исходные результаты теста хранятся отдельно и остаются неизменными, независимо от того, какие сценарии проверяются в программе моделирования.

Достоинствами данной системы являются [23]:

- сбор данных в реальном времени;
- анализ и отображение результатов тестов в соответствии с требованиями всех основных стандартов;
- расчет допуска на точность позиционирования;
- отчеты с результатами анализа данных.

4.2.2. Автоколлиматор цифровой двухкоординатный ОПТРО-АК-014 (Dual Axis Digital Autocollimator)

Автоколлиматор ОПТРО-АК-0114 (рис. 60) [37], предназначенный для высокоточных двухкоординатных измерений малых углов в цеховых, заводских и учебных лабораториях широкого профиля, имеет следующие технические характеристики:

- дискретность выходных данных – 0,1"–0,01";
- диапазон измерений угла – $\pm 40'$;
- средняя квадратическая случайная погрешность измерения углов по каждой из осей в пределах диапазона измерений – не более $\pm 0,05''$ при цикле накопления не более 10 с;
- полная погрешность измерений в нормальных условиях в диапазоне

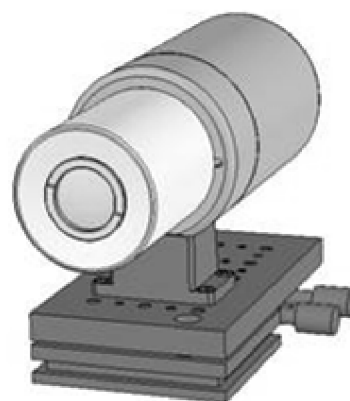


Рис. 60. Автоколлиматор ОПТРО-АК-0114

измерений угла $\pm 20'$ по горизонтальной и вертикальной осям и $\pm 20'$ и по вертикальной оси – не более $\pm 1''$;

- полная погрешность измерений в диапазонах измерений более $20'$ – не более $\pm 2''$;
- фокусное расстояние объектива – 100 мм, световой диаметр объектива – 30 мм;

6. Погрешности измерения нормируются для нормальных условий выполнения линейно - угловых измерений и расстояния до зеркала не более 0.5 м.

7. Приемным светочувствительным элементом является КМОП-камера. Блоком обработки данных является ПК (или ноутбук) (в комплект поставки не входит).

4.2.3. Кинематомер

Кинематомер предназначен для измерения кинематической погрешности и ее анализа [38].

Кинематомер состоит из:

- двух или нескольких датчиков, каждый из которых контролирует перемещение рабочих органов станка, выполняющих взаимосвязанные формообразующие движения;
- устройства, принимающего и обрабатывающего первичную информацию о перемещениях рабочих органов станка;
- регистрирующего устройства, фиксирующего отклонения значений фактических перемещений от номинальных значений.

При помощи кинематометра можно также определить дефектные звенья передаточных механизмов, например, погрешность изготовления и монтажа зубчатых колес. В данном случае кинематическая погрешность будет функцией поворота выходного вала, т. к. в реальном механизме из-за погрешности изготовления и монтажа зубчатых колес угол поворота выходного вала не равен расчетному, что и приведет к возникновению кинематической погрешности.

Анализируя функцию кинематической погрешности, можно определить какие звенья передаточного механизма вносят наибольший вклад в погрешность. Можно сравнить величину погрешности с допуском и сделать вывод о техническом состоянии механизма без его разборки.

Рассмотрим принцип действия кинематометра на примере «Диакин-3» [38].

В состав кинематометра «Диакин-3» (рис. 61) входят:

- два датчика угловых перемещений – энкодера типа ЛИР-1170 (погрешность $\pm 1,5''$) или ЛИР-190 (погрешность $\pm 5''$);

- измерительный блок на базе платы NI6210 фирмы National Instruments;
- ноутбук;
- специализированное программное обеспечение.

Методика определения кинематической погрешности зубообрабатывающего станка при помощи кинематометра описана выше (раздел «2.5.1. Метод определения точности зубообрабатывающих станков»).

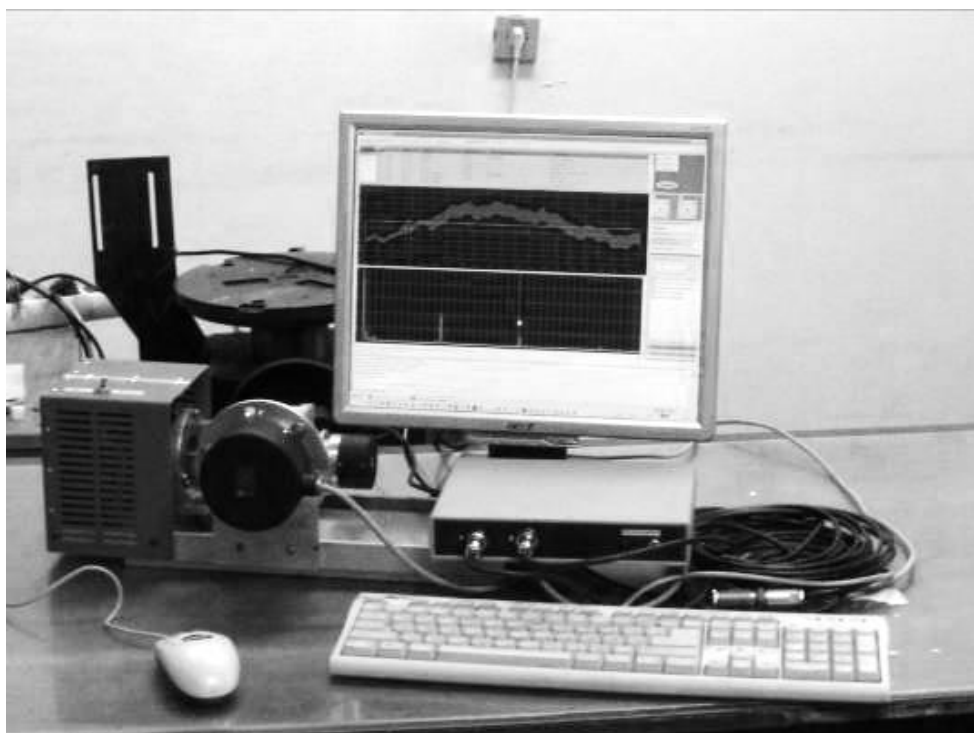


Рис. 61. Кинематометр «Диакин-3» при проверке редуктора

При работе комплекса используются два импульсных преобразователя угловых перемещений, которые с помощью механических приспособлений соединяются с конечными звеньями контролируемой кинематической цепи механизма. Перемещение звеньев преобразуется измерительными преобразователями в электрические сигналы (последовательности импульсов). Сигналы с преобразователей поступают на соответствующие входы блока кинематомера, в котором с помощью аппаратных счетчиков по каждому фронту сигнала преобразователей осуществляются операции суммирования или вычитания, изменяющие общее содержимое счетчиков.

Структурная схема комплекса «Диакин-3» приведена на рис. 62.

Полученные массивы отсчетных значений в соответствии с выбранным алгоритмом, учитывающим передаточное отношение контро-

лируемой цепи, подвергаются программной обработке, в результате которой формируется необходимая измерительно-диагностическая информация, выдаваемая пользователю в виде текстовых и/или графических документов на дисплее ПЭВМ или принтере.

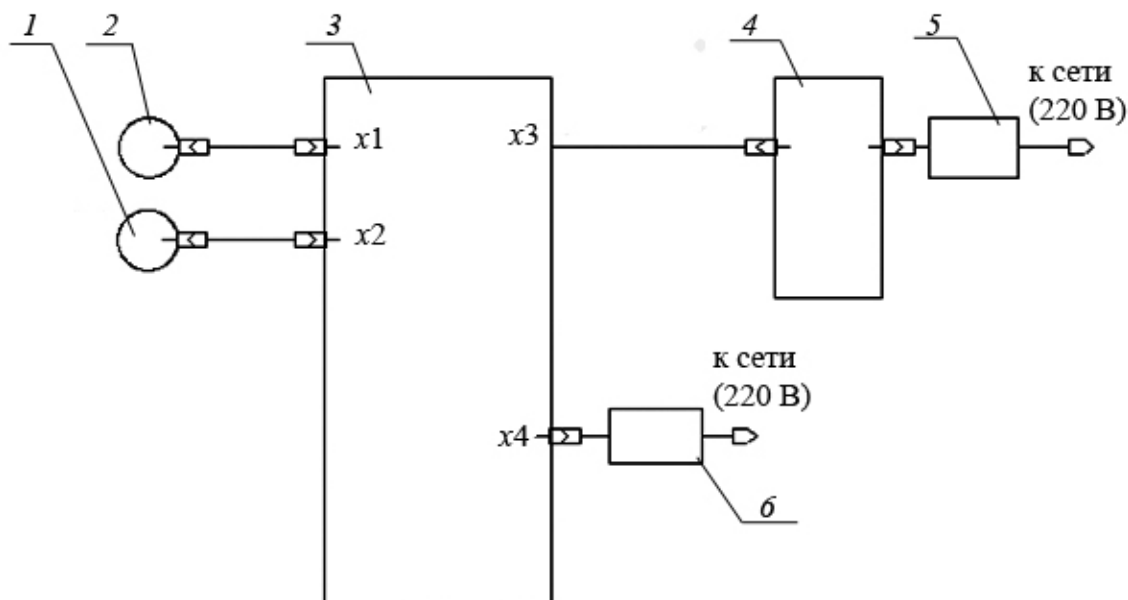


Рис. 62. Структурная схема комплекса «Диакин-3»:
1, 2 – энкодеры входного и выходного звеньев; 3 – блок кинематометра; 4 – ноутбук;
5, 6 – блоки питания ноутбука и кинематора

Программное обеспечение комплекса позволяет осуществлять в автоматизированном режиме следующие функции:

- измерение кинематической погрешности или погрешности координатных перемещений;
- обработку результатов измерения с получением временной функции и спектра кинематической погрешности;
- обработку временной функции кинематической с целью выделения накопленной и циклической погрешностей;
- спектральный анализ временной функции кинематической погрешности;
- диагностирование дефектных звеньев-источников кинематической погрешности, выполняемое путем сопоставления расчетного и измеренного спектров;
- формирование и распечатку протокола проверки проверяемого объекта;
- линейные и угловые измерения с использованием ССD-камер;
- исследование точности позиционирования изображения на ССD-камере;

- цифровой двухкоординатный автоколлиматор с разрешением 0,001";
- калибровка двухкоординатного цифрового автоколлиматора.

4.2.4. Лазерная измерительная информационная система

Лазерная измерительная информационная система (ЛИИС) предназначена для измерения геометрических параметров, контроля точности, аттестации, испытаний, сертификации и диагностики металлорежущих станков, станочных комплексов и их основных узлов (редукторов, винтов и винтовых передач и др.) [39]. ЛИИС включает в себя оптоэлектронные круговые и линейные измерительные преобразователи (ИП), блок системы обработки измерительной информации, трехканальный IBM PC-совместимый интерфейс и соответствующее программно-математическое обеспечение, ориентированное на конкретную задачу измерения, контроля и диагностики. ЛИИС построена по агрегатно-модульному принципу, все ИП имеют унифицированные выходные сигналы. ЛИИС осуществляет измерение, контроль и диагностику объектов с любой комбинацией до шести измеряемых перемещений: линейных и круговых. Это позволяет охватить широкую гамму технологического оборудования по типуажу (токарные, фрезерные, координатно-расточные, резьбо- и зубообрабатывающие станки и др.), по габаритам (с длиной линейных перемещений до 10 м) и по точности (все классы точности, включая А и С).

Линейный ИП представляет собой гетеродинный лазерный интерферометр со следующими характеристиками:

- диапазон измерения – до 10 м;
- дискретность отсчета – 0,1 мкм;
- скорость контролируемых перемещений до 20 м/мин;
- относительная погрешность измерения 10–6;
- источник излучения – стабилизированный He-Ne лазер.

Конструктивно линейный ИП выполняется в виде трех узлов: лазерной головки, блока интерферометра и подвижного отражателя. Узлы имеют следующие габариты:

- лазерная головка (устанавливается на объекте или вне его) – 50×55×450 мм³;
- блок интерферометра (устанавливается на неподвижном органе объекта) – 40×40×80 мм³ (с учетом оптоволоконного разъема);
- подвижный отражатель – 40×40×40 мм³;

- блок интерферометра соединен с выносным электронным блоком обработки измерительной информации волоконно-оптическим кабелем (длиной 10 м).

Круговые ИП, входящие в комплект ЛИИС, представляют собой растровые фотоимпульсные датчики (типа «Heidenhain»).

ЛИИС может работать в режиме «кинематомера», когда одна из координат – линейная или круговая – является синхронизирующей (задающей интервал отсчета).

Возможно изготовление линейного ИП в двух- и трехкоординатном исполнении с теми же метрологическими характеристиками по каждой координате. Допустимо расширение функциональных возможностей линейного лазерного ИП для измерения отклонений от прямолинейности, плоскостности и, в общем случае, объемной точности станков.

Интерфейс выполнен на новейших программируемых логических интегральных схемах с высокой степенью интеграции и обеспечивает 6-канальный ввод измерительной информации от ИП в персональный компьютер.

ЛИИС снабжается пакетом программно-математического обеспечения, реализующего процедуры статистической обработки измерительной информации; спектрального, корреляционного, регрессионного методов анализа (в том числе, в их робастных версиях); параметрической диагностики; графического представления результатов измерения, контроля, диагностики в реальном масштабе времени.

Разработаны оригинальные методики диагностики станков, позволяющие выявлять отклонения геометрических параметров звеньев кинематических цепей, дефекты сборки и наладки станков по результатам измерения линейных и круговых перемещений узлов станка.

ЛИИС может быть выполнен как управляющий комплекс, предназначенный для управления технологическими процессами по результатам измерения, контроля, диагностики.

ЛИИС может использоваться как измерительное средство, встраиваемое в оборудование.

Основной особенностью предлагаемой ЛИИС является ее универсальность, позволяющая посредством комплексирования соответствующих количества и типов измерительных преобразователей в единую систему решать широкий круг измерительных задач: контроль точности и диагностика металлорежущих станков различных типоразмеров и классов точности, включая высшие, кинематометрия узлов технологических машин, контроль геометрических параметров деталей различной формы (кулачков, резьб, червяков, шестерен), аттестация, калибровка, сертификация и диагностика средств измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 20911–89. «Техническая диагностика. Термины и определения».
2. ГОСТ 27.002–89. «Надёжность в технике. Основные понятия. Термины и определения».
3. ГОСТ 8–82. «Станки металлорежущие. Общие требования к испытаниям на точность».
4. ГОСТ 27.410–87. «Надежность в технике. Методы контроля показателей надежности и планы контрольных испытаний на надежность».
5. ГОСТ 11654–90. «Станки круглошлифовальные. Основные параметры и размеры. Нормы точности».
6. Залаева С.Ш., Рыбка О.А. Производственная санитария и гигиена труда. Часть 1. Производственное освещение. Вибрация: учебное пособие. – Белгород, 2008. – 180 с.
7. Иванов Ю.В., Лакота Н.А. Гибкая автоматизация производства РЭА с применением микропроцессоров и роботов. – М.: Радио и связь, 1987. – 464 с.
8. ГОСТ 2789–73 «Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики».
9. ГОСТ 9504–60. «Приборы щуповые для определения шероховатости поверхности. Типы. Основные параметры и нормы точности».
10. ГОСТ 22267–76. «Станки металлорежущие. Схемы и способы измерений геометрических параметров».
11. ГОСТ 18097–93. «Станки токарно-винторезные и токарные. Основные размеры. Нормы точности».
12. ГОСТ 370–93. «Станки вертикально-сверлильные. Основные размеры. Нормы точности и жесткости».
13. ГОСТ 17734–88. «Станки фрезерные консольные. Нормы точности и жесткости».
14. Болдин Л.А. Металлорежущие станки. Вопросы эксплуатации. – М.: МАШГИЗ – 1957. – 260 с.
15. ГОСТ 658–89. «Станки зубодолбежные вертикальные для цилиндрических колес. Основные параметры и размеры. Нормы точности».
16. ГОСТ 659–89. «Станки зубофрезерные вертикальные для цилиндрических колес. Основные параметры и размеры. Нормы точности».
17. ГОСТ 1643–81. «Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски».
18. ГОСТ 3675–81. «Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи червячные цилиндрические. Допуски».

19. Руководство по проектированию виброизоляции машин и оборудования / ЦИНИСК им. В.А. Кучеренко. – М.: Стройиздат, 1972. – 160 с.
20. Средства защиты в машиностроении. Расчет и проектирование: справочник / С.В. Белов и др.; под ред. С.В. Белова. – М.: Машиностроение, 1989. – 368 с.
21. Юркевич В.В., Схиртладзе А.Г. Надежность и диагностика технологических систем. – М.: Издательский центр «Академия», 2011. – 304 с.
22. Трофимов А. Н. Концепция обратной связи в динамике механических систем и процессы динамического гашения колебаний. Автореферат дисс. к.т.н. – Иркутск, 2012.
23. Компания Renishaw: [Электронный ресурс]. 2001–2013. URL: www.msu.ru. (Дата обращения: 26.07.2013).
24. Кудинов В.А., Сабиров Ф.С. и др. Устройство для исследования динамических характеристик металлорежущего станка // А.С. СССР № 634145. G01M15/00; G06G7/48. БИОТЗ № 43, 1978., Кудинов В.А. Динамика станков. – М: Машиностроение, 1967. – 350 с.
25. Гаврилин А.Н., Мойзес Б.Б. Метод оперативной диагностики металлорежущего станка для обработки заготовок типа тел вращения // Контроль. Диагностика. – № 9. – 2013. – С. 81–84.
26. Завгородский В.И., Маслов А.Р. Управление виброустойчивостью технологической системы // ИТО. – № 10. – 2009. – С. 22–25.
27. Вибрация в технике: справочник в 6 т. / под ред. В.Н. Челомея. – М: Машиностроение, 1978. Т. 6. – 456 с.
28. Козочкин М.П., Сабиров Ф.С. Роль виброакустической диагностики в исследовании и отладке шпиндельных узлов // ИТО. – № 1. – 2009. – С. 21–23.
29. Махаринский Е.И., Горохов В.А. Основы технологии машиностроения: учебник. – Мн.: Высш. шк., 1997. – 423 с.
30. Надежность и диагностика технологических систем: учебник / В.А. Синопальников, С.Н. Григорьев. – М.: Высш. шк., 2005. – 343 с.
31. ГОСТ 8026–92. «Линейки поверочные. Технические условия».
32. ГОСТ 3749–77. «Угольники поверочные 90°. Технические условия».
33. ТУ 2-034-225-87. «Щупы. Модели 82002, 82102, 82202, 82302. Технические условия».
34. ГОСТ 577–68. «Индикаторы часового типа с ценой деления 0,01 мм. Технические условия».
35. ГОСТ 5584–75. «Индикаторы рычажно-зубчатые с ценой деления 0,01 мм. Технические условия».

36. ГОСТ 9392–89. «Уровни рамные и брусковые. Технические условия».

37. Компания ООО «Опротех»: [Электронный ресурс]. 2013. URL: www.optrotech.ru. (Дата обращения: 27.07.2013).

38. Компания ООО «Кинематика»: [Электронный ресурс]. 2013. URL: www.oookin.ru. (Дата обращения: 28.07.2013).

39. Научная деятельность в МГТУ «СТАНКИН»: [Электронный ресурс]. 2001-2002. URL: dmpol.nm.ru/NICHSite/index.html. (Дата обращения: 28.07.2013).

Учебное издание

ГАВРИЛИН Алексей Николаевич
МОЙЗЕС Борис Борисович

ДИАГНОСТИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Часть 1


Учебное пособие

Издано в авторской редакции

Научный редактор
*доктор технических наук,
профессор Б.И. Капранов*

Компьютерная верстка *В.П. Аршинова*
Дизайн обложки *А.И. Сидоренко*

Подписано к печати 23.12.2013. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 9,01. Уч.-изд. л. 8,16.
Заказ 1468-13. Тираж 100 экз.

ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ . 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru