

Лекция №8

Металлорежущие станки

Измерения статической жесткости станков, исследование температурных деформаций, акустический контроль станков

Содержание

- 1 Статическая жесткость металлорежущих станков**
- 2 Контроль температурных деформаций металлорежущих станков**
- 3 Акустический контроль станков**
- 4 Заключение**

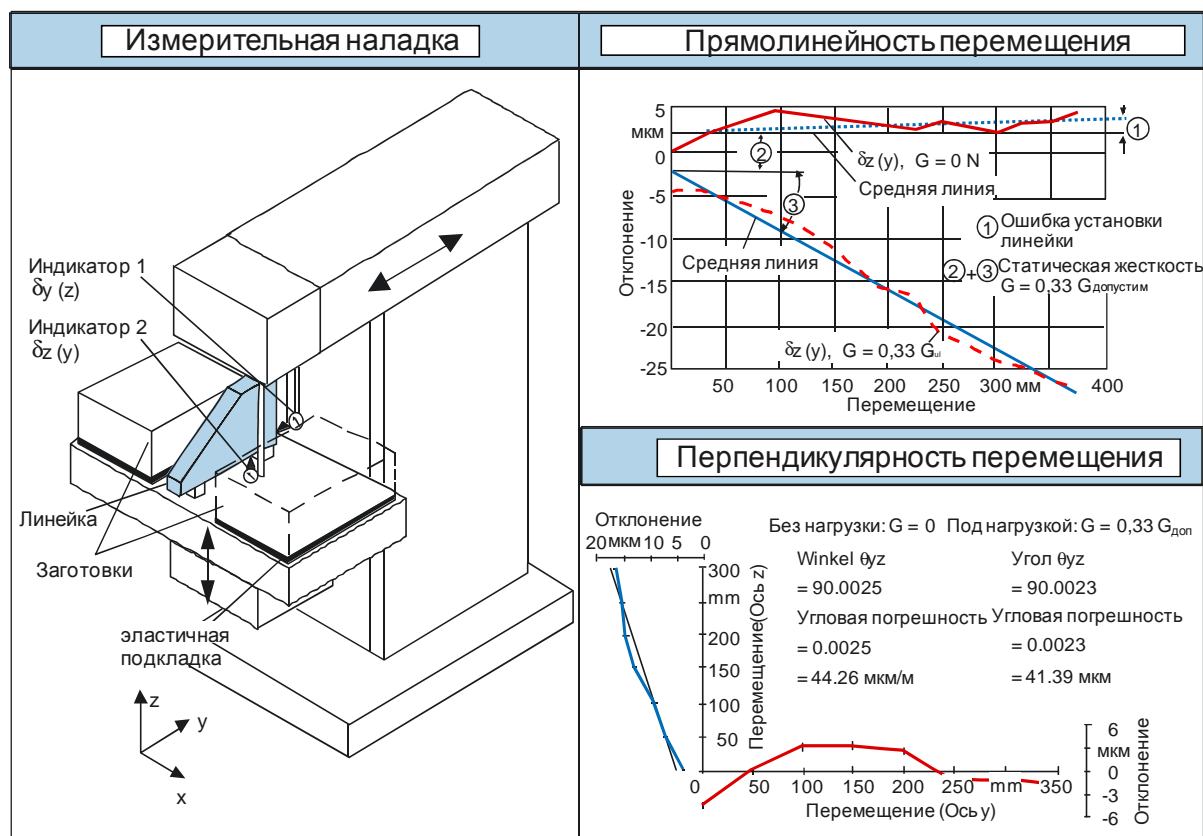


Рис. 8-1: Воздействие веса заготовки на геометрическую точность станка

Влияние веса заготовки на результаты измерений геометрической точности станков, как правило, не учитывается. Это справедливо в случаях, когда вес заготовки значительно меньше усилий, возникающих при обработке (например, при обработке давлением). Кроме того, если размеры заготовки значительно меньше размеров подвижного стола небольшого фрезерного станка или диаметра опорной системы шпинделя малого токарного станка. Напротив, при обработке на средне- и крупногабаритных станках вес заготовки может оказывать значительное воздействие на точность станка. К примеру, тяжелая заготовка, установленная на рабочий стол фрезерного станка, давит на стол станка, на направляющие, на станину и фундамент. Все компоненты станка, находящиеся в потоке сил, подвергаются в большей или меньшей степени упругой деформации. На Рис. 8-1 показана схема измерительной наладки для выявления влияния веса заготовки на прямолинейность перемещения стола, а также взаимоперпендикулярность перемещений стола и ползуна. Как видно на графике, под действием веса заготовки стол оседает на определенную величину. При перемещении стола в рабочем пространстве станка, вектор силы тяжести заготовки также смещается. Вследствие этого изменяются реактивные силы и моменты на направляющих консоли, закрепленных на станине, что вызывает изменяющиеся деформации в станке.

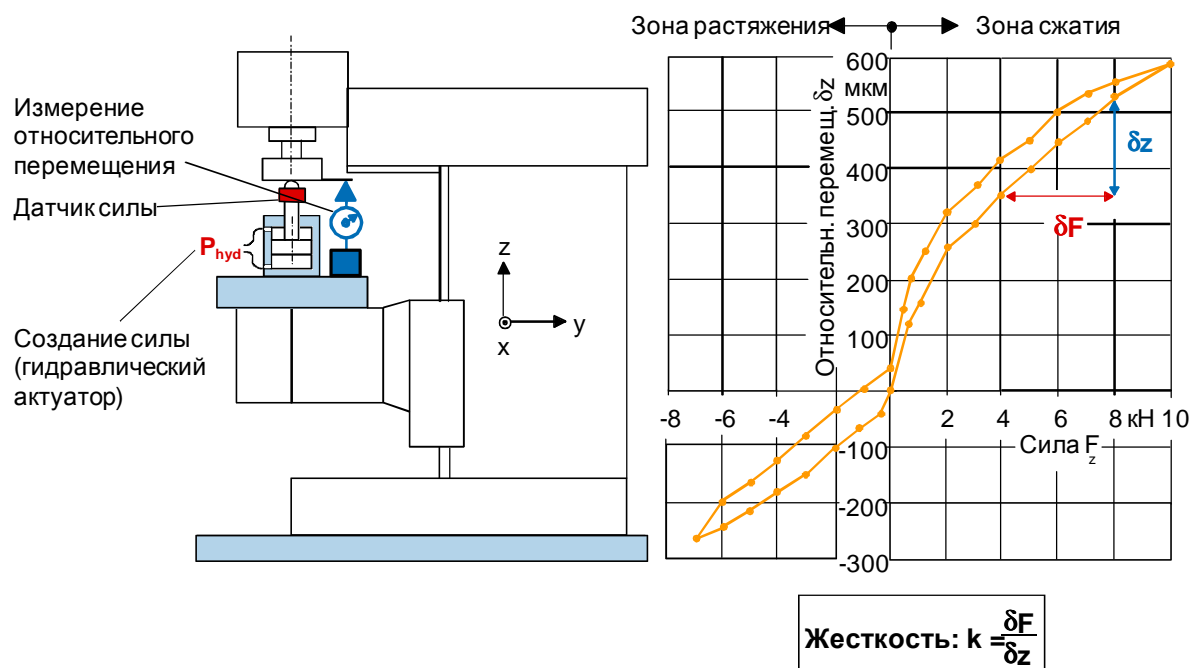


Рис. 8-2: Определение статической жесткости в центре инструмента консольного вертикально-фрезерного станка

Для измерения статической жесткости станка между инструментом и столом устанавливается источник силы, осуществляющий статическое силовое нагружение станка. Величина деформации структуры станка определяется с помощью датчика перемещения, устанавливаемого между инструментом и столом. На Рис. 8-2 показана схема измерительной наладки для определения жесткости консольного фрезерного станка по оси z . Результаты измерения представляются в виде кривой жесткости. В результате приложения статической силы удаляется люфт в подшипниках, направляющих и в резьбовых соединениях, а площадь контактной поверхности увеличивается, что ведет к нелинейному повышению жесткости структуры станка. При снятии нагрузки измененное состояние зон контакта часто ведет к образованию гистерезиса кривой жесткости. Для определения величины пространственной статической податливости структуры необходимо последовательно провести измерения податливости между шпинделем и столом по трем координатам. Перемещения в зоне «шпиндель – стол» складываются из деформаций всех находящихся в силовом потоке деталей и их сопряжений.

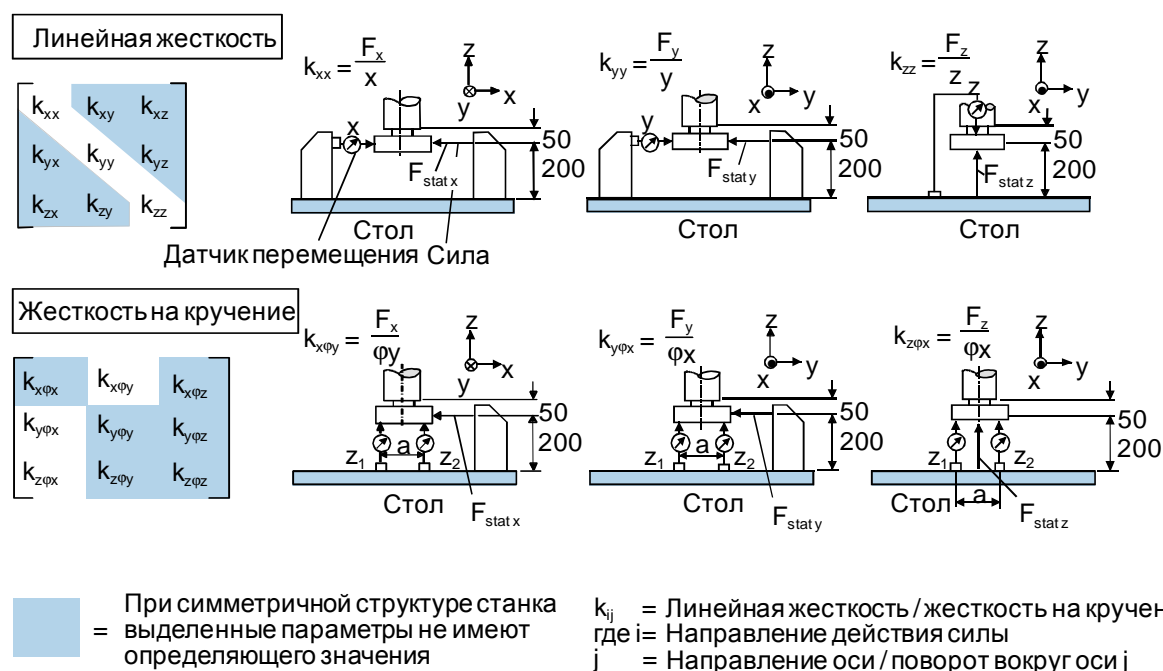


Рис. 8-3: Контроль линейной жесткости и жесткости на кручение под действием статического усилия

На Рис. 8-3 показаны схемы измерительных наладок для определения жесткости структуры станка в соответствии с техническими нормами DIN V 8602. С правой стороны рисунка показано взаимное расположение источника силы и датчика перемещения для проведения измерений статической жесткости в различных направлениях осей координат. Слева показаны матрицы жесткости структуры, позволяющие оценить величину деформации при действии пространственной силы. На главной диагонали матрицы располагаются функции непосредственной жесткости (направление действия силы и измерения совпадают). За пределами главной диагонали находятся поперечные жесткости (действие силы в направлении одной координатной оси, измерение перемещения осуществляется в направлении одной из двух других координатных осей). В зависимости от конструктивного исполнения станка, не все жесткостные характеристики являются одинаково важными для описания поведения структуры. При симметричной конструкции станка, жесткости, не имеющие существенного значения, выделены темным фоном.

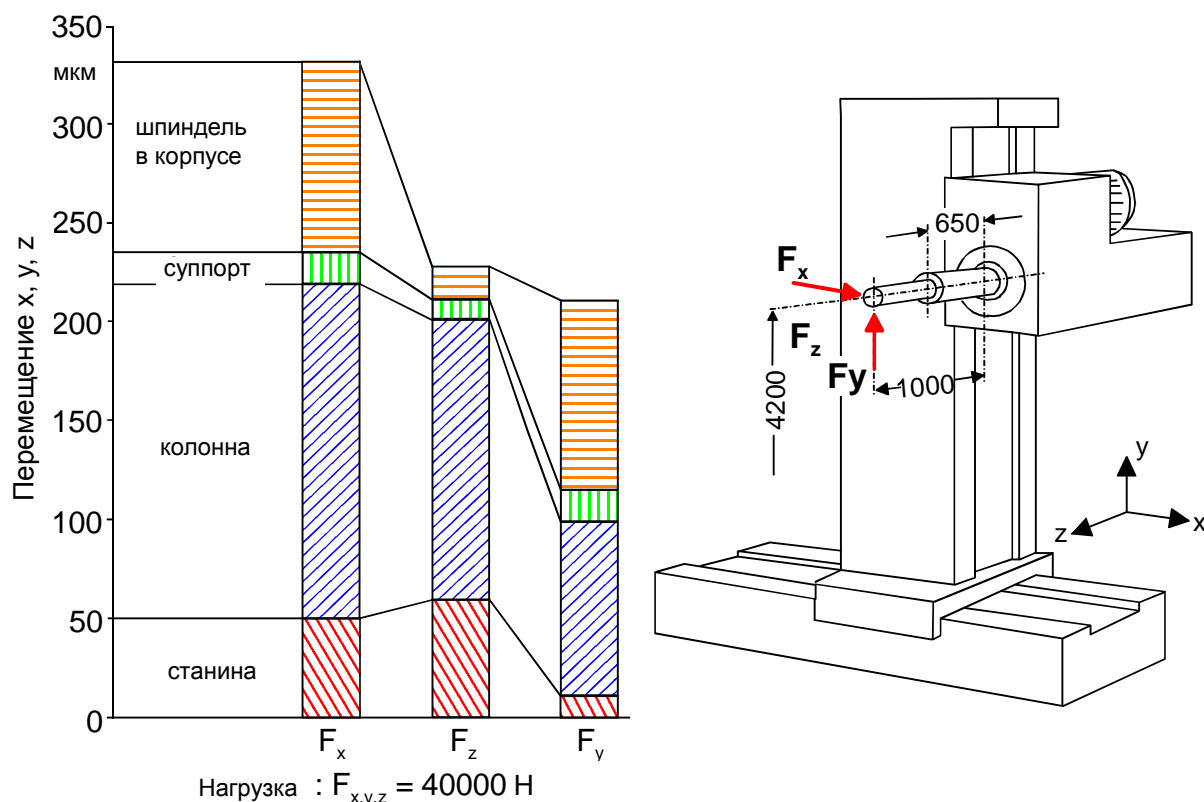


Рис. 8-4: Анализ деформации горизонтально-расточного станка

Описанные на предыдущих страницах методы определения статической жесткости станков ограничиваются ее измерением между инструментом и столом заготовки. С помощью этих методов невозможно выявить детали и узлы станка, оказывающие наибольшее влияние на податливость структуры. Для анализа статической деформации отдельных компонентов необходимо измерение относительных и абсолютных перемещений в области стыков компонентов. Только так можно установить удельный вес деформации отдельного компонента в суммарной деформации структуры. Проведение такого рода измерений связано с чрезвычайно большими затратами. Вокруг станка выстраивают мелкоячеистую клеть из жестких трубчатых элементов. Измерение величины деформации компонентов станка производится относительно лежащих напротив точек на решетке клетки. Температурная деформация, вибрации фундамента и собственная податливость клетки оказывают негативное воздействие на точность измерений. Из результатов измерений, приведенных на Рис. 8-4, можно установить долю деформации каждого компонента в суммарной деформации структуры. Расчет производится путем определения деформации каждого компонента и сравнения с деформацией, наблюдаемой в точке действия сил резания (относительная деформация между инструментом и столом заготовки).

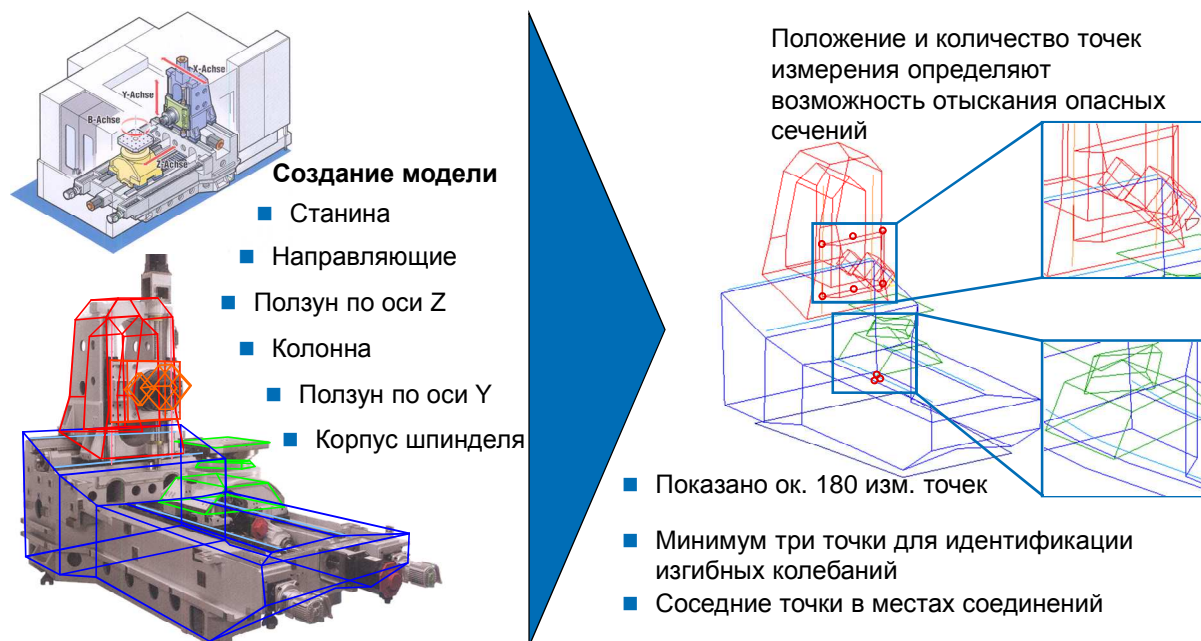


Рис. 8-5: Анализ жесткости станков под действием квазистатических нагрузок

Величина деформации отдельных компонентов станка при наложении статической силы между инструментом и заготовкой, может быть установлена с помощью модального анализа, обычно применяемого для визуализации динамических форм колебаний структуры станка (Рис. 8-5). Путем математической обработки («Curve-Fitting») экспериментально установленных амплитудно-фазово-частотных характеристик (АФЧХ) податливости станка в области низких частот (менее 10 Гц) возможно определить степень деформации каждого компонента и его долю в суммарной деформации структуры станка. Измерение АФЧХ производится приложением в зоне между инструментом и заготовкой силового сигнала низкой частоты синусной формы, и регистрацией абсолютных перемещений отдельных точек структуры станка по трем координатным осям датчиками пути, скорости или ускорения, которые устанавливаются с помощью магнитов или наклеиваются на станок, что позволяет отказаться от сооружения вокруг станка измерительной клетки.

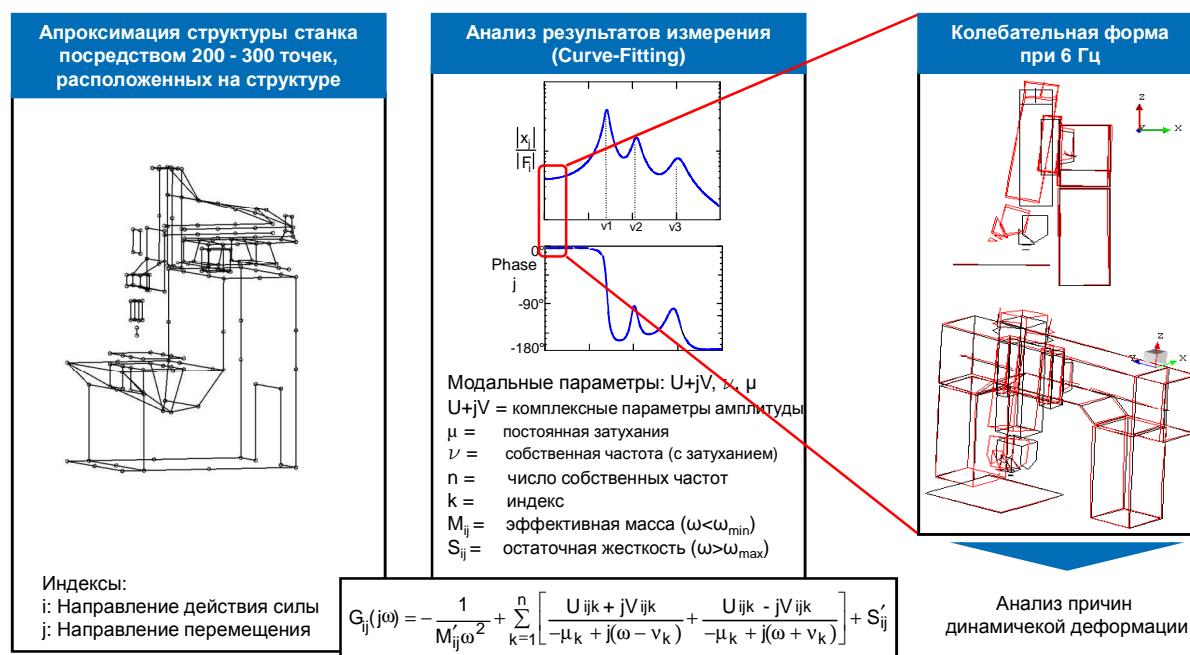


Рис. 8-6: Результаты анализа жесткости станков под действием квазистатических нагрузок

Результаты измерения представляются в форме, аналогичной обработке результатов модального анализа. Визуализация низкочастотных колебательных форм дает наглядное представление о степени деформации отдельных компонентов (Рис. 8-6). Количественное описание податливости структуры в каждой точке модели содержится в передаточных функциях, рассчитываемых на основе измерения податливости для каждой точки. Для количественной оценки податливости должна быть известна величина силы, действующая по каждой координатной оси станка.

Содержание

- 1 Статическая жесткость металлорежущих станков**
- 2 Контроль температурных деформаций металлорежущих станков**
- 3 Акустический контроль станков**
- 4 Заключение**



Рис. 8-7: Причины термоэластичной деформации

Распределение температурных полей в структуре станка и связанные с ним температурные деформации отдельных компонентов зависят от большого числа конструктивных и технологических факторов (Рис. 8-7). Источниками тепла, воздействующими на структуру станка, являются внутренние источники в станке, а также источники окружающей среды. Компоненты станка, их взаимное расположение и термоэластичные свойства, расположение источников тепла – все это формирует нестабильное и неоднородное температурное поле. Определяющей для точности обработки является величина относительной деформации между инструментом и заготовкой в точке резания. Она определяется длиной компонентов, подверженных температурной деформации, коэффициентами их линейного расширения, конструктивным исполнением (наличие ребер жесткости, толщина стенок), взаимным расположением компонентов, а также видом и расположением координатной измерительной системы. Кроме величины температурной деформации инструмента и заготовки в точке резания, существенным для точности обработки является направление векторов температурной деформации.

Под внутренними источниками тепла в станке понимаются источники, присутствующие в процессе эксплуатации станка как под нагрузкой, так и на холостом ходу. К ним относятся компоненты станка, в которых происходят потери мощности, например, подшипники, двигатели, коробки скоростей и т.д. Кроме того, сам процесс резания представляет собой интенсивный источник тепла. Часть тепла, выделяющегося в процессе резания, расходуется на нагрев инструмента и заготовки. Однако большая часть тепла отводится со стружкой, которая вызывает нагрев компонентов станка при контакте с ними. Еще одним внутренним источником тепла является смазочно-охлаждающая жидкость, попадающая в процессе обработки практически на все компоненты станка, составляющие его рабочее пространство. Если потоки СОЖ направлены в рабочем пространстве произвольно, это может привести к случайному распределению температур. С другой стороны, СОЖ может применяться для создания заданного температурного поля в рабочем пространстве станка. Целенаправленное воздействие на температуру отдельных компонентов осуществляется путем их охлаждения (например, шпиндель, ходовой винт, двигатель), что опосредованно оказывает воздействие и на температурное поле всего станка.

К внешним источникам тепла относятся, прежде всего, температура воздуха в цехе, колебание температуры в зависимости от времени суток, вертикальные и горизонтальные температурные градиенты в цехе. Колебания температуры воздуха в цехе, частые запуски и остановки шпинделя и т.п. препятствуют установлению

стабильного температурного состояния в рабочем пространства станка. Вертикальные температурные градиенты оказывают особенно заметное воздействие на структурные компоненты крупногабаритных станков. Кроме того, важным фактором, воздействующим на температурное поле станка, является прямое воздействие солнечных лучей, наличие в непосредственной близости радиаторов отопления, а также других станков и производственных установок.

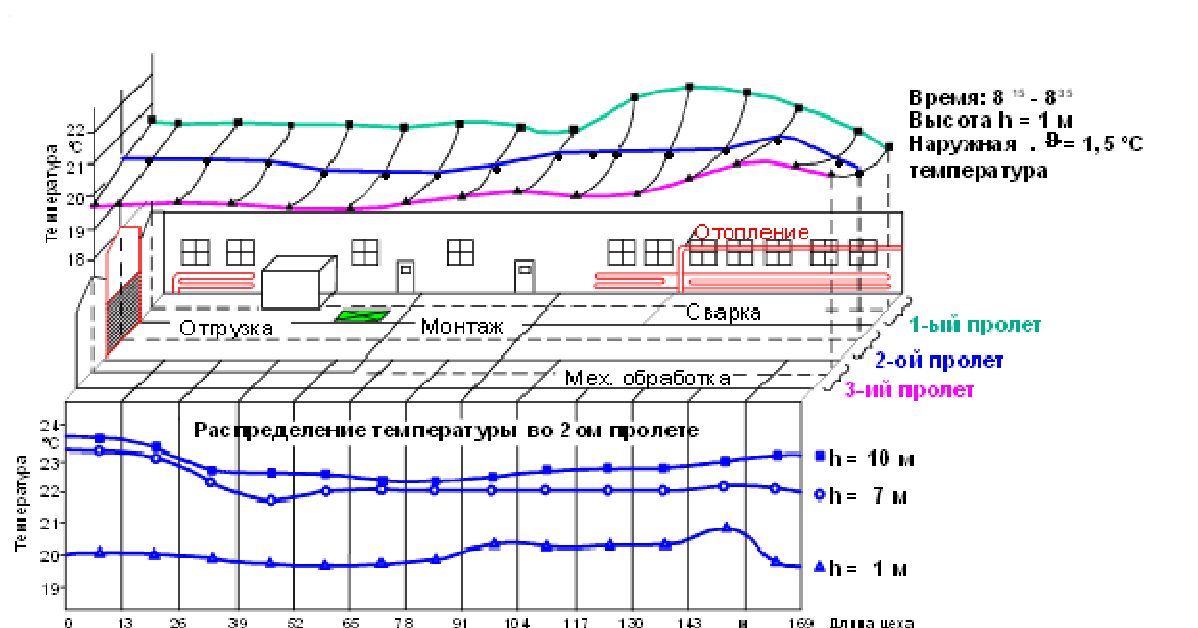


Рис. 8-8: Распределение температуры в цехе

Распределение температуры в производственном цехе, как правило, крайне неоднородно. На Рис. 8-8 представлено распределение температуры в различных частях производственного цеха – в зоне механической обработки, сварки, сборки и отруски, причем разница в температуре составляет $\Delta t = 2$ °С. Как видно из рисунка, выбор места установки станка является важным фактором, влияющим на величину суммарной температурной деформации структуры. Кроме того, температура воздуха в цехе значительно меняется по высоте цеха, в особенности вблизи ворот, так как в этой области установлен тепловентилятор. К тому же, открывание ворот также ведет к значительным изменениям температуры.

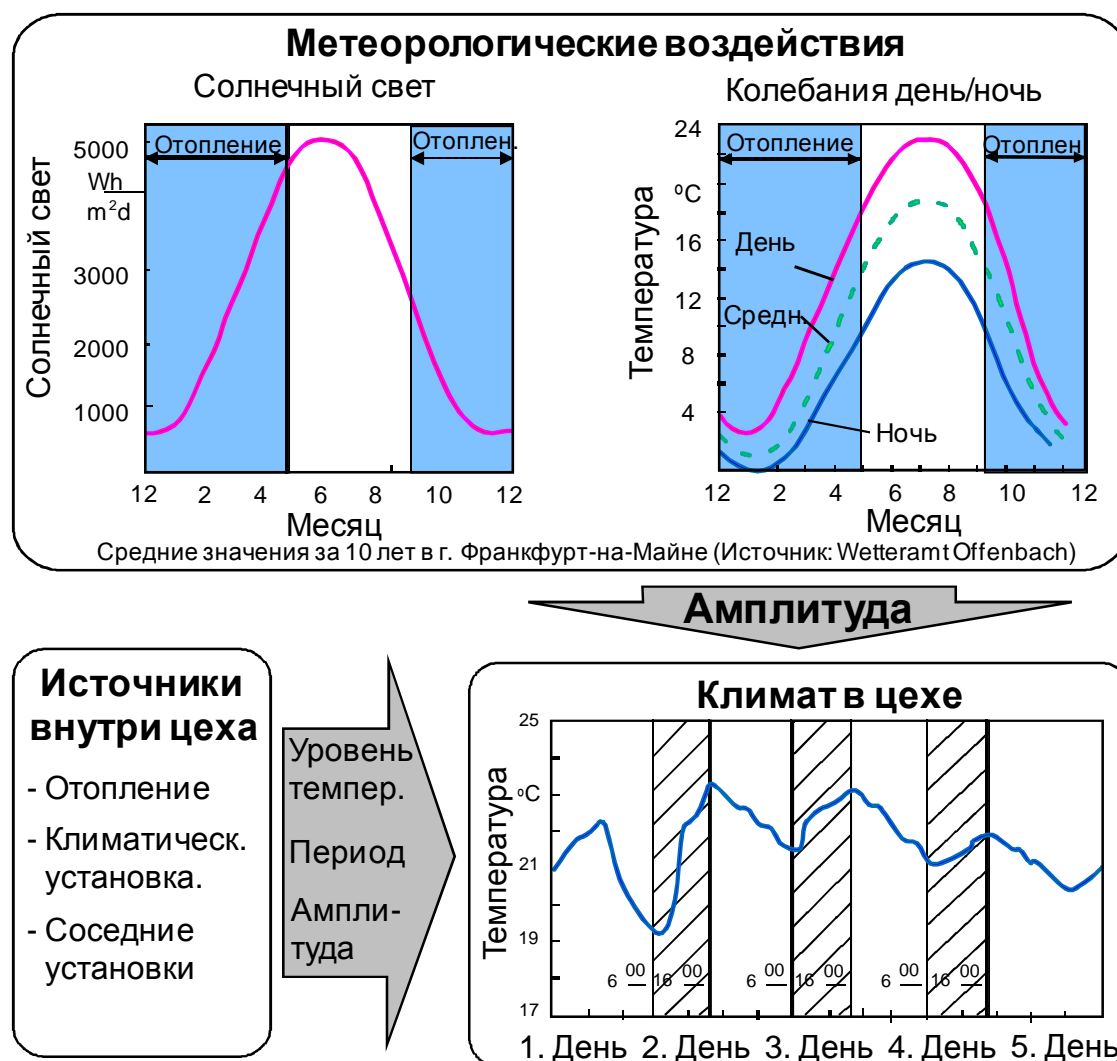


Рис. 8-9: Факторы, оказывающие воздействие на распределение температуры в цехе

На Рис. 8-9 представлено изменение температуры в цехе под действием прямого солнечного света и колебаний температуры в дневное и ночное время в течение года. Эти внешние факторы вызывают дополнительное колебание цеховой температуры в течение дня, изначально достигнутой работой систем отопления, кондиционирования и вентиляции, а также количеством тепла, выделяемого производственным оборудованием. На представленных графиках отображен цикл включения системы кондиционирования в 6 часов утра и ее выключение в 16 часов. В зависимости от температуры окружающей среды, наблюдаются колебания Δt от 1°C до $4,5^{\circ}\text{C}$.

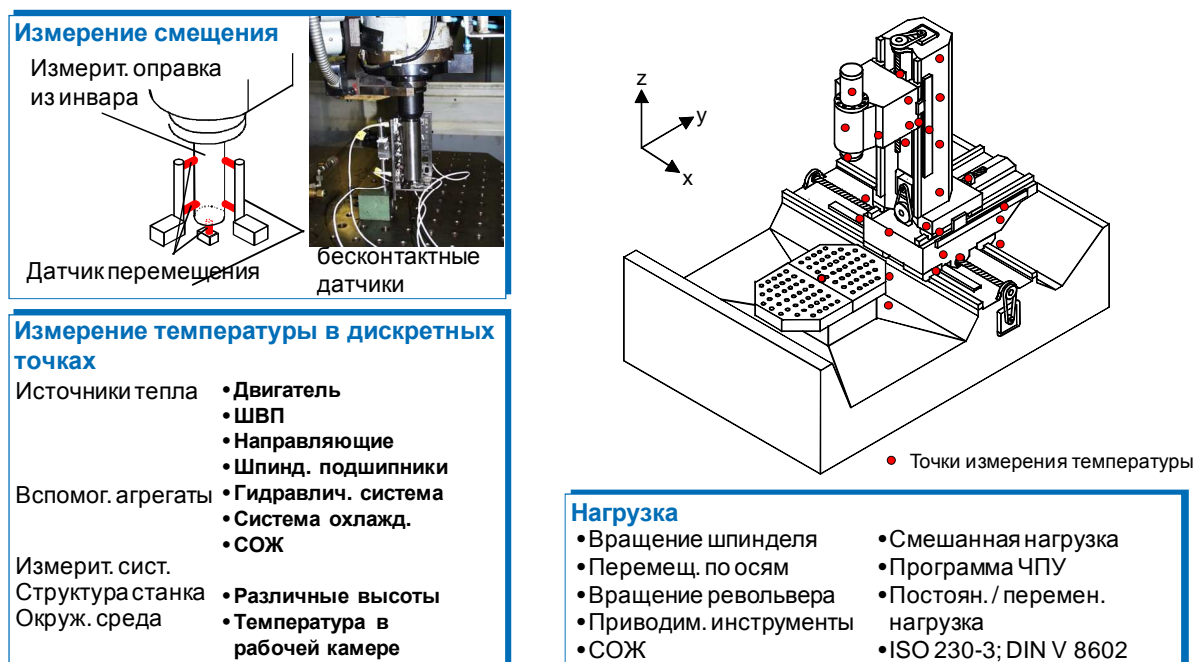


Рис. 8-10: Измерительная наладка для исследования температурной деформации станка

Для принятия оптимальных конструктивных решений по улучшению термостабильности станков необходимо знать величины температурной деформации отдельных компонентов и их долю в суммарном смещении центра инструмента относительно заготовки в точке резания (Рис. 8-10). Линейные dx , dy , dz и угловые $d\alpha_x$ и $d\alpha_y$ отклонения инструмента регистрируются с помощью нескольких датчиков перемещения по координатным осям x , y , z . В качестве инструмента применяется цилиндрическая оправка. Измерения производятся, как правило, с помощью бесконтактных датчиков. Для предотвращения возникновения погрешностей измерения вследствие собственной температурной деформации оправки и приспособления для установки датчиков изготавливаются из материалов с малым коэффициентом линейного расширения (например, инвар). Одновременно производятся измерения нагрева во многих точках структуры станка с помощью контактных температурных датчиков. Кроме того, измерение температуры производится на внутренних источниках тепла (как то двигатели, ШВП, танкетки направляющих, подшипники), в местах крепления координатных измерительных систем, во вспомогательных агрегатах, а также в пространстве вокруг станка на разной высоте. В качестве датчиков температуры могут применяться термопары и термометры сопротивления.

В случае, когда станок долгое время находится в работе и выполняет однообразные циклические операции (например, в крупносерийном производстве), температуры и температурные деформации становятся почти стабильными. Время, необходимое для достижения стабильного состояния, зависит от компоновки и габаритов станка и может достигать 8 часов. Это обуславливает целесообразность применения автоматических систем измерения температуры. При работе универсальных станков, в тех случаях, когда станок работает с частой сменой управляющих программ или со значительными колебаниями нагрузки, наступление стабильного состояния не наблюдается. Температурные распределения и деформации являются в данном случае динамическими величинами.

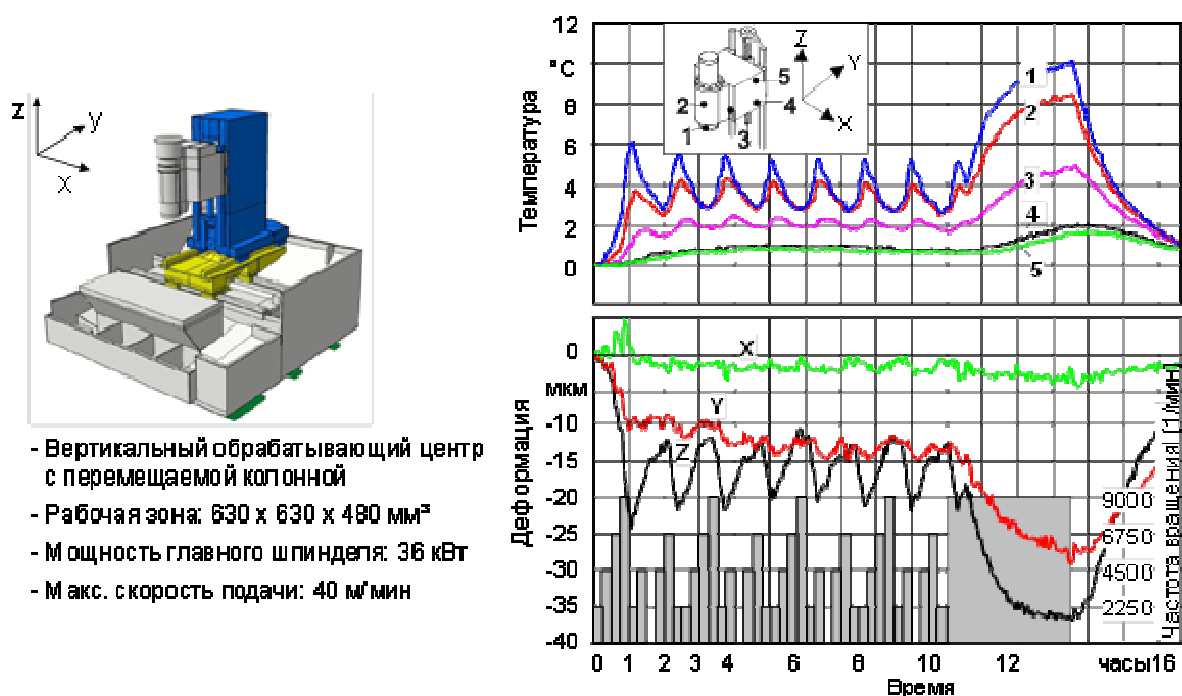


Рис. 8-11: Температура и деформация ОЦ при вращении шпинделя

На Рис. 8-11 представлены графики изменения температуры и величины температурной деформации, измеренных за 10 часов работы шпинделя в диапазоне скоростей, указанным в стандарте DIN V 8602, и следующих 3-х часов вращения на максимальной частоте. Основным источником тепла в исследуемом станке является передний подшипник шпинделя. Излучаемое им тепло нагревает весь корпус шпинделя. Из графиков видно, что изменение температуры в исследуемых точках, расположенных на большем удалении от переднего подшипника, значительно меньше, а температурная инертность выше. Изменение схемы нагружения оказывает заметное воздействие только на температуру в точках T1, T2, T3. Величина температурной деформации показана в нижней части графика. Благодаря симметричной компоновке станка деформация по оси x относительно мала. Деформация по оси y вызвана постепенным нагревом корпуса шпинделя, что обуславливает сильную сглаженность колебаний температуры, ярко выраженную вблизи переднего подшипника. Величина температурной деформации по оси z непосредственно связана с нагревом передней стенки корпуса шпинделя. Величина температурной деформации также подвержена значительным колебаниям при изменениях нагрузки, на что указывают кривые температур T1 и T2 (Рис. 8-11).

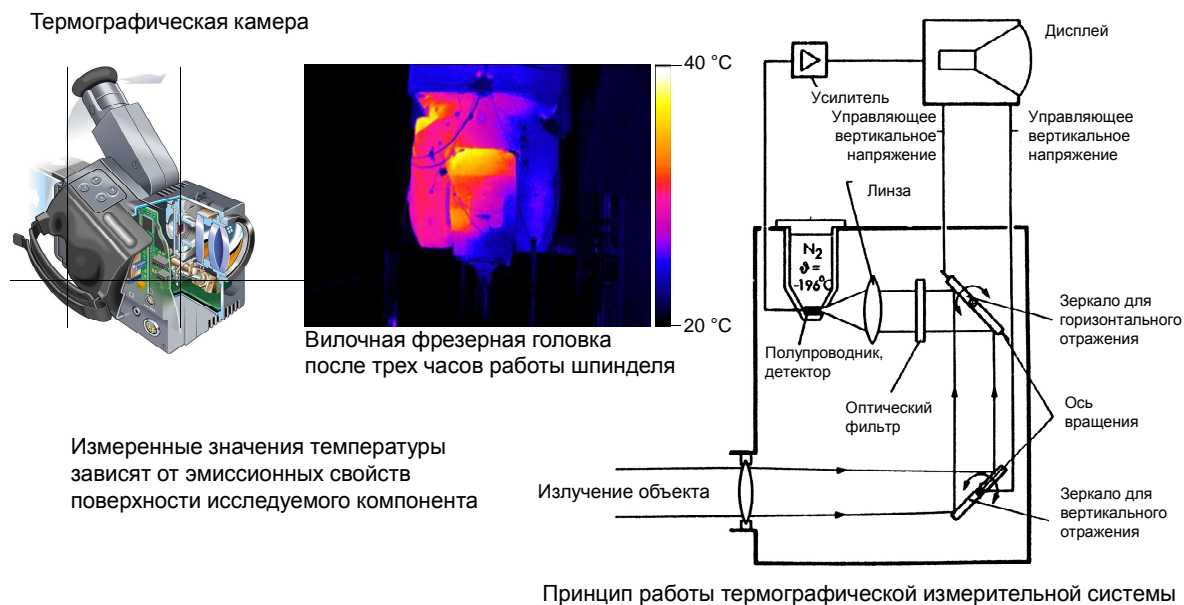


Рис. 8-12: Термографическая измерительная система

Несмотря на разнообразие конструктивных исполнений контактных температурных датчиков область их применения ограничена. Довольно часто для решения технических задач необходимо применение бесконтактных средств для измерения температуры. К ним относятся, например, инфракрасный термометр и термографическая камера. К достоинствам данных приборов относятся их применимость для измерения очень высоких температур, температур тел с низкой теплопроводностью и теплоемкостью, движущихся тел (шпинделей), а также для проведения измерений в труднодоступных частях конструкций. Определение температуры осуществляется на основе регистрации теплового излучения. Точность измерения в значительной степени зависит от эмиссионных характеристик поверхности исследуемого тела. Неправильное применение таких средств измерения приводит к ошибочным результатам. Как правило, точность бесконтактных способов измерения ниже точности контактных и составляет примерно $\pm 1^\circ\text{C}$ (Рис. 8-12).

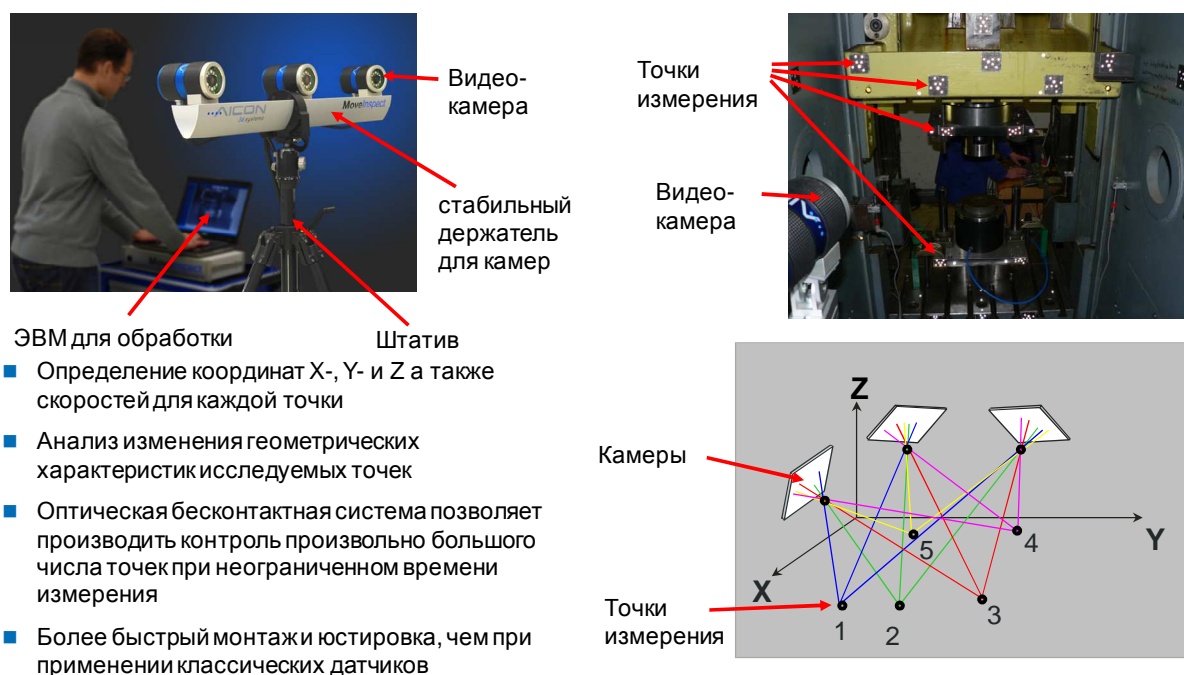


Рис. 8-13: Наладка для измерений тепловой структурной деформации

Фотограмметрия – измерение объекта с помощью обработки его фотоизображений. Фотограмметрия позволяет регистрировать динамические деформации объекта и их последующую обработку (Рис. 8-13). Для проведения измерения на исследуемый объект в заранее выбранных точках наклеиваются маркеры. Затем производится калибровка системы с помощью фотоснимков исследуемого объекта с установленными на нем калибрующими линейками известного размера. Фотосъемка производится с различных углов. По принципу прогрессивного пространственного сечения (зеленая линия на Рис. 8-13) определяется соотношение между исследуемыми точками в фиксированной системе координат. Для регистрации изменения положения исследуемого объекта существуют два метода. Предположим, что исследуемый объект представляет собой твердое недеформируемое тело. Тогда при фотосъемке с помощью одной фотокамеры возможно распознать как поступательные перемещения объекта (x , y , z), так и ориентацию (качение, рыскание или вращение) объекта в принятой системе координат (принцип обратного пространственного сечения). Второй метод предусматривает применение нескольких фотокамер или углов съемки, относительное расположения которых известно (например, камеры расположены на специальной калиброванной подставке). При одновременной фотосъемке исследуемого объекта с помощью фотокамер по принципу прогрессивного пространственного сечения возможно определить координаты каждой исследуемой точки объекта. При этом исследуемый объект вполне может быть гибким телом, т.е. при данном методе регистрации допустима деформация самого объекта.

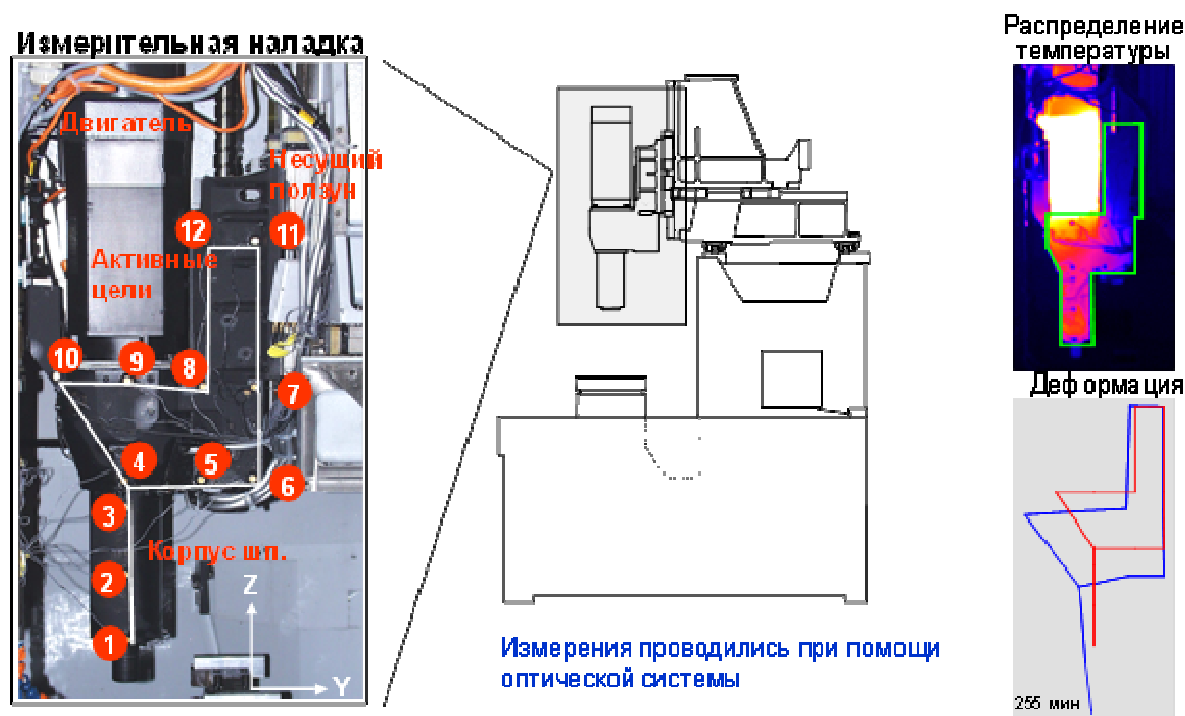
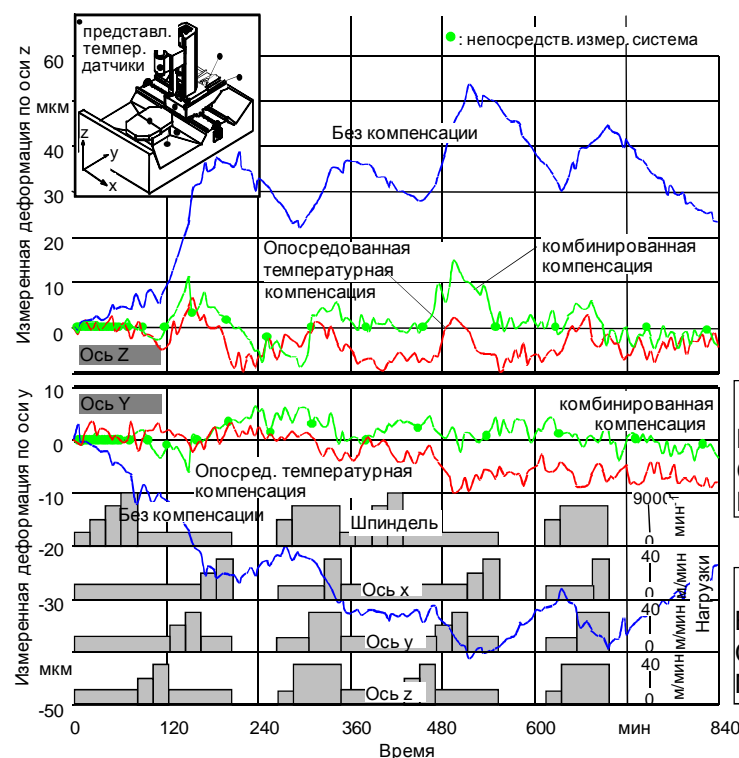


Рис. 8-14: Деформация корпуса шпинделя при реверсивной работе главного привода

Для целенаправленного принятия конструктивных мер по улучшению тепловой стабильности металлообрабатывающих станков, необходимо определение доли деформации отдельных компонентов в величине суммарной температурной деформации станка. Проведение измерений только вблизи зоны резания недостаточно. Применение контактных датчиков на решетчатой клетке требует значительных затрат. Для упрощения проведения подобных исследований был разработан специальный оптический метод с применением световых диодов (LED). Структура станка аппроксимируется с помощью наклейки световых диодов в заданных точках. Положение диодов регистрируется в процессе измерения системой фотокамер. Данная схема включает два плоских оптических датчика, регистрирующих положение центра светового пучка световых диодов на своей рабочей поверхности. Исходя из положения светового пятна на поверхности диодов, а также их взаимного расположения, в измерительной системе проводится расчет пространственного положения светодиода. Активация отдельных диодов производится последовательно с помощью прибора Стробера. Для предотвращения смещения оптических датчиков вследствие действия температуры, они крепятся на термостабильной подложке. Для повышения точности измерения применяются различные компенсационные модели, тарирование которых осуществляется непосредственно перед проведением измерения. Кроме того, при проведении измерения применяется дифференциальный метод, позволяющий устранить внешние помехи. Для этого фотосъемка осуществляется сначала с выключенными светодиодами, а затем с включенными. Далее производится вычитание интенсивности свечения обоих изображений. Специальное программное обеспечение производит расчет перемещения всех узловых точек с установленными светодиодами. Структура станка представляется в данном случае как сетчатая модель. Визуализация результатов измерения позволяет распознать геометрическую форму температурной деформации структуры и выявить компоненты с высоким соотношением собственной и суммарной деформации. На Рис. 8-14 показан пример измерения температурной деформации вертикального ползуна, несущего шпиндельный узел. Кроме суммарной деформации данный метод позволяет графически представить деформацию отдельных компонентов и их воздействие на макроскопическое поведение структуры станка. На рисунке справа вверху показано термографическое изображение структуры, а ниже - вид возникающей вследствие действия температуры деформации. Форма ползуна была упрощенно

представлена моделью, содержащей 12 светодиодов, расположение которых показано на Рис. 8-14 слева. Главный источник тепла здесь – двигатель, температура которого поднимается до 70°C. Вторым источником тепла является передний подшипник шпинделя, который отчетливо виден на изображении после 255 минут работы. Оба источника тепла вызывают сильный, но неравномерный нагрев несущего ползуна, который ведет к линейному расширению по осям y и z. Ярво выраженный температурный градиент дополнительно вызывает наклон корпуса шпинделя. Кроме ошибки углового положения шпинделя температурный градиент ведет к смещению центра инструмента в положительном направлении оси y компенсируя, таким образом, долю температурной деформации по оси y вследствие нагрева несущего ползуна.



Линейная компенсация
при эксплуатации станка
на холостом ходу

$$\Delta x = \alpha * \sum_{i=1}^n \frac{\Delta T_i + \Delta T_{i-1}}{2} (x_i - x_{i-1}) = \sum_{i=1}^n C_i * \Delta T_i$$

Вид компенсац.:	Ось y		
	без	опоср.	комб.
Ср. ошибка [мкм]:	28,7	5,0	2,5
Макс. ошибка [мкм]:	41,4	10,1	6,3

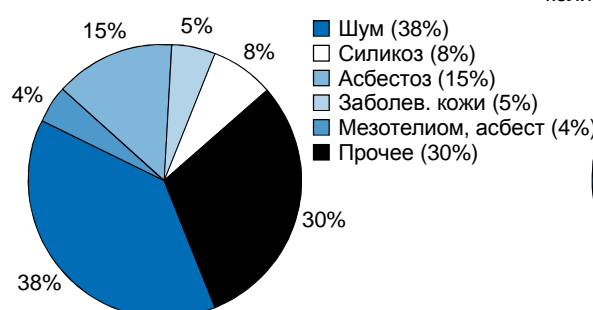
Вид компенсац.:	Ось z		
	без	опоср.	комб.
Ср. ошибка [мкм]:	32,8	4,9	4,0
Макс. ошибка [мкм]:	53,3	9,7	14,6

Рис. 8-15: Компенсация температурной деформации

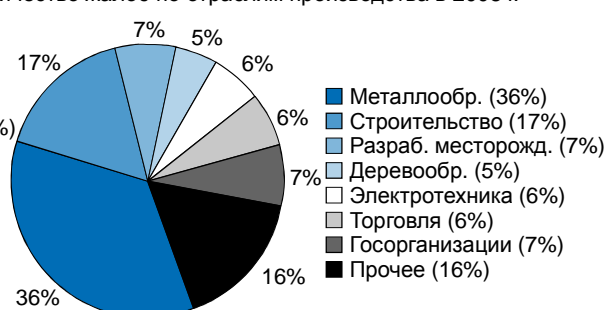
Пример проведения опосредованной компенсации температурной деформации станка с помощью системы ЧПУ представлен на Рис. 8-15. Для воспроизведения рабочих условий на станке осуществлялись ходы подачи и вращение шпинделя в соответствии с показанным на рисунке рабочим циклом на холостом ходу, т.е. при отсутствии нагрузки. На представленных графиках показана температурная деформация центра инструмента без компенсации, с опосредованной и с комбинированной компенсацией. Остаточные смещения контрольной оправки в шпинделе определялись с помощью установленной на столе станка системой датчиков. Применение опосредованной и комбинированной компенсации температурной деформации позволило добиться значительного снижения величины деформации по осям y и z. В опосредованном методе компенсации температурной деформации в качестве исходных данных для моделирования используются представленные на рисунке датчики температуры, установленные на структурных компонентах станка. Комбинированный метод включает рабочий принцип опосредованного метода компенсации, расширенный за счет применения непосредственного измерения величины деформации на контрольной оправке. Это позволяет полностью устранить воздействие температурной деформации. Для проведения температурного тарирования необходимо прерывать процесс резания, что является недостатком прямого измерения. Однако полная компенсация температурных деформаций (с нулевым смещением) возможна только с применением прямого измерения.

- 1 Статическая жесткость металлорежущих станков
- 2 Контроль температурных деформаций металлорежущих станков
- 3 Акустический контроль станков
- 4 Заключение

Причины профессиональных заболеваний в 2011 году



„развитие глухоты“
частные и государственные организации:
количество жалоб по отраслям производства в 2008 г.



Допустимый уровень эмиссии за пределами зданий:

a) Индустриальная область 70 dB		с) Жилые районы		d) Курорты, больницы, санатории	
b) Промышленный район		день	50 dB(A)	день	45 dB(A)
день	65 dB(A)	ночь	35 dB(A)	ночь	35 dB(A)
ночь	50 dB(A)				

Источник: Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften, Richtlinie TA-Lärm 1998

Рис. 8-16: Профессиональные заболевания – риск заболевания из-за повышенного шума

Высокий уровень шума на рабочем месте ведет к развитию профессиональных заболеваний у рабочих. Страховые компании, страхующие риски несчастных случаев на производстве, определяют потерю слуха как самое распространенное профессиональное заболевание. Измерение и оценка уровня шума производится по двум направлениям – изучение воздействия шума на человека и изучение шумовой эмиссии от различных источников, например металлообрабатывающих станков (Рис. 8-16).

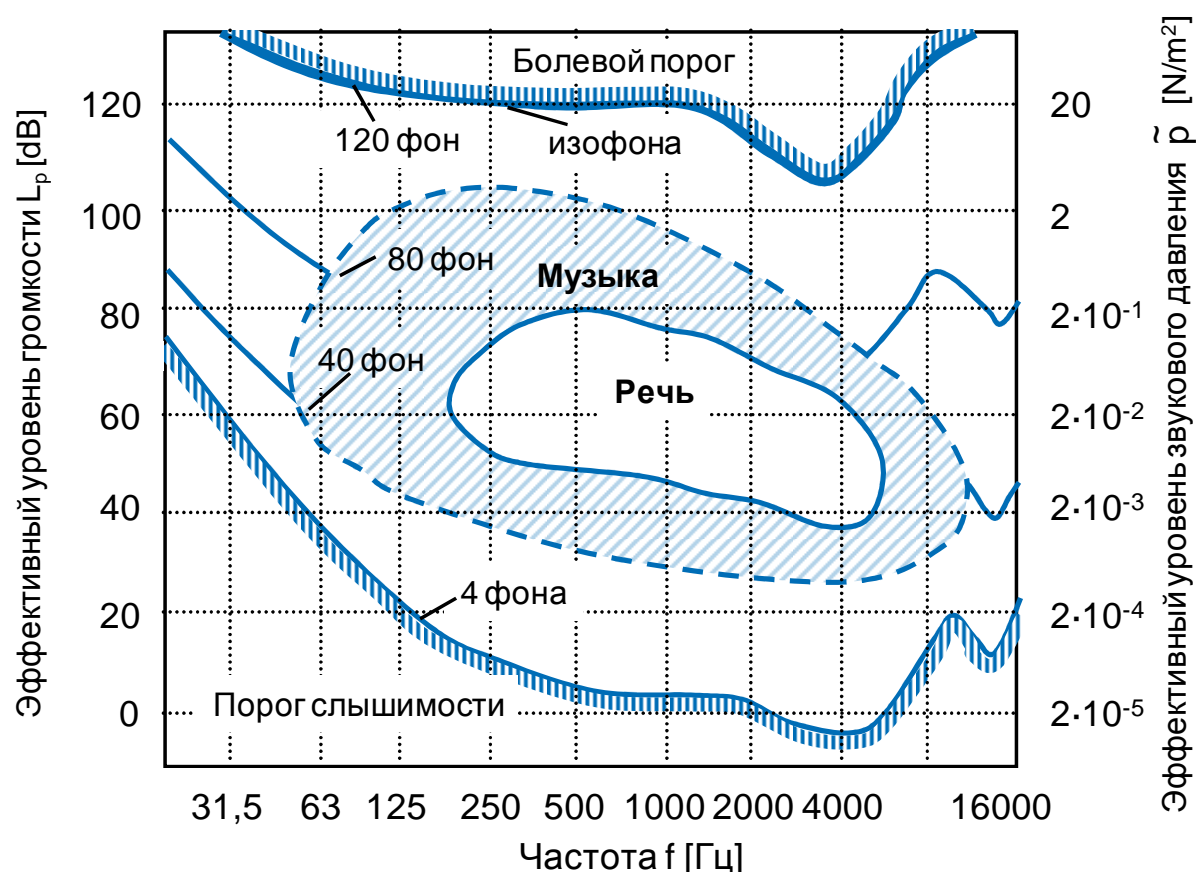


Рис. 8-17: Слуховое поле

Звук воспринимается человеческим ухом в широком диапазоне акустического давления. При частоте 1000 Гц граница слышимости лежит в пределах величины давления $2 \cdot 10^{-5}$ Н/м². Болевой порог составляет 20 Н/м². Оба пороговых значения показаны на Рис. 8-17 как функция частоты звуковых колебаний. На рисунке приведены значения звукового давления и частоты, характерные для устной речи и музыки. В технической акустике для характеристики звука применяется логарифмическая шкала, описывающая уровень акустического сигнала. Обозначение этой безразмерной величины – децибел (дБ). Важными акустическими характеристиками источника звука, кроме того, являются уровень громкости звука L_p и мощности L_w .

Характеристика:	Переменная:	Формула:
Эффективное звуковое давление	\bar{p}	$\bar{p} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T p^2(t) dt} \quad T \rightarrow \infty$
Эффективная скорость звука	\bar{v}	$\bar{v} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T v^2(t) dt} \quad T \rightarrow \infty$
Интенсивность звука	I	$I = \bar{p} \cdot \bar{v} = \frac{\bar{p}^2}{\rho \cdot c}$
Мощность звука	P	$P = I \cdot S = \frac{\bar{p}^2}{\rho \cdot c} \cdot S$
Уровень звукового давления	L_p	$L_p = 10 \lg \frac{I}{I_0} = 20 \lg \frac{\bar{p}}{\bar{p}_0}$ $\text{mit : } \bar{p}_0 = 2 \cdot 10^{-5} \frac{\text{N}}{\text{m}^2}; \bar{v}_0 = \frac{\bar{p}_0}{\rho \cdot c} = 5 \cdot 10^{-8} \frac{\text{m}}{\text{s}}$ $I_0 = \bar{p}_0 \cdot \bar{v}_0 = 10^{-12} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$
Уровень мощности звука	L_w	$L_w = 10 \lg \frac{P}{P_0} = L_p + L_s = 20 \lg \frac{\bar{p}}{\bar{p}_0} + 10 \lg \frac{S}{S_0}$ $\text{mit : } S_0 = 1 \text{ m}^2; P_0 = I_0 \cdot S_0 = 10^{-12} \text{ W}$

Рис. 8-18 Характеристики звуковых колебаний

Уровень громкости определяется с помощью следующей формулы:

$$L_p = 10 \lg \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \lg \frac{p}{p_0} \quad (8-1)$$

Базовой величиной звукового давления принимается величина $p_0 \approx 2 \cdot 10^{-5} \text{ N/m}^2$. Для уровня мощности звука L_w справедливо:

$$L_w = 10 \lg \frac{P}{P_0} \quad (8-2)$$

Где P - мощность звукового сигнала и $P_0 = 1 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}$ - величина базовой мощности. Мощность звука P есть мощность излучаемой источником звуковой волны, измеряемой в ваттах, или же интеграл интенсивности звука в пределах огибающей поверхности S :

$$P = \oint I d\vec{S} \quad (8-3)$$

Интенсивность звука есть энергия звука, излучаемая за единицу времени через единицу площади. Данный параметр рассчитывается как произведение давления и скорости звуковой волны:

$$I = \bar{p} \cdot \bar{v} \left[\frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}} \right] \quad (8-4)$$

Измерение скорости звука является сложной технической задачей. При измерении на достаточном удалении давление и скорость звука пропорциональны друг другу, так что справедливо следующее выражение:

$$\bar{v} = \frac{\bar{p}}{\rho \cdot c} \quad (8-5)$$

Где $\rho \cdot c$ – звуковой импеданс Z_0 (в воздухе 408 Нс/м^3), ρ есть плотность среды, а c – скорость звука (в воздухе 330 м/с^2). Применяя вышесказанное, скорость звука возможно выразить в зависимости от звукового давления.

Интенсивность можно рассчитать с помощью выражения:

$$I = \frac{\tilde{p}^2}{\rho \cdot c} \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right] \quad (8-6)$$

Мощность звука рассчитывается исходя из интенсивности I и фактической площади S .

$$P = I \cdot S = \tilde{p} \cdot \tilde{v} \cdot S = \frac{\tilde{p}^2}{\rho \cdot c} \cdot S \quad (8-7)$$

Уравнение (8-7) справедливо только в том случае, если звуковое давление $p(t)$ и скорость звука $v(t)$ имеют одинаковую фазу. Данное условие выполняется на достаточно большом удалении от источника звука.

Уровень мощности звука определяется с помощью уравнения 8-8:

$$L_W = 10 \lg \frac{\tilde{p}^2}{\tilde{p}_0^2} + 10 \lg \frac{S}{S_0}, \text{ где } S_0 = 1 \text{ м}^2 \quad (8-8)$$

Уровень мощности звука зависит, таким образом, от звукового давления и площади огибающей поверхности.

Обзор параметров, необходимых для описания звуковых волн, представлен на Рис. 8-18.

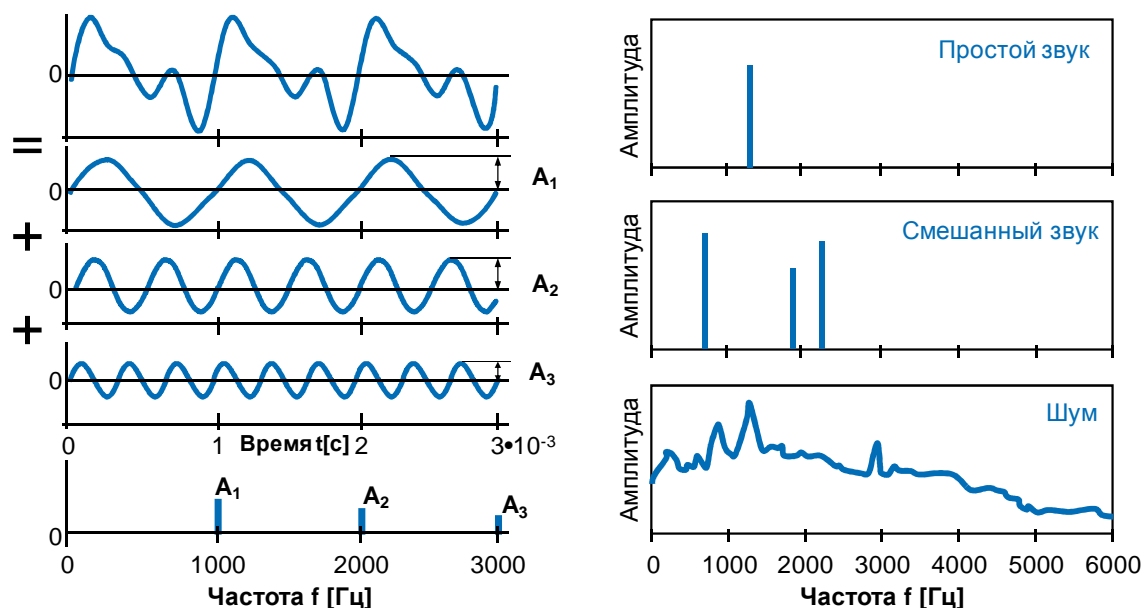


Рис. 8-19: Взаимосвязь между сигналами во временном и частотном доменах

На Рис. 8-19 представлен произвольный сигнал как функция времени. С помощью разложения функции в ряд Фурье или путем применения специальных фильтров возможно выделить отдельные гармонические частотные составляющие сигнала и установить их амплитуду и сдвиг фаз. В показанном примере суммарный сигнал составляется из трех отдельных гармонических синусных колебаний частотой 1000 Гц, 2000 Гц и 3000 Гц. Показанный в нижней части рисунка спектральный график позволяет однозначное разложение временной функции на частотные составляющие. График фазово-частотной зависимости здесь не показан. Различным источникам звука соответствуют определенные спектральные графики. Так, простому звуку соответствует звуковое колебание одной частоты. Смешанный звук состоит из нескольких тонов произвольной частоты. Звучанием обозначается звук, состоящий из гармонических полутонов. Шум – звук с непрерывным спектром или смешанный звук, частоты колебаний в котором образуют нецелочисленные дроби друг с другом.

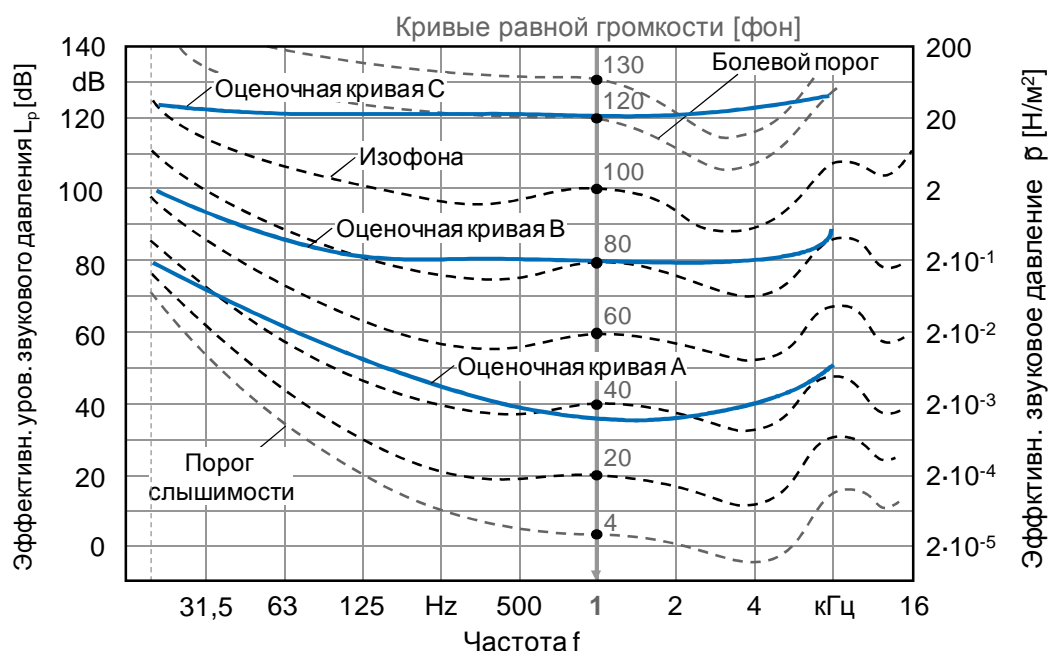


Рис. 8-20: Кривые одинаковой громкости, воспринимаемой человеком

Зависимость уровня громкости от уровня звукового давления и частоты описывается кривыми одинаковой громкости (изофонами). Такие кривые показывают, какой уровень должен иметь звуковой сигнал заданной частоты для того, чтобы иметь такую же громкость, как сигнал на частоте 1000 Гц с заданным уровнем звукового давления. Звуковой тон с частотой 50 Гц и уровнем звукового давления в 80 дБ воспринимается таким же громким, как стандартный звук с частотой 1 кГц и 60 дБ. Уровень громкости такого звука составляет 60 Фон. Для того, чтобы учесть зависящую от частоты восприимчивость человеческого уха, измерение шума осуществляется в зависимости от частоты сигнала. Оценочные кривые A, B, и C (Рис. 8-20, непрерывные линии) позволяют провести нормированную оценку уровня шума. По кривой A, приближенно описывающей кривые равной громкости, производится оценка шума с уровнем звукового давления менее 55 дБ. По кривой B – для звукового давления от 55 до 85 дБ, а по кривой C – более 85 дБ. В настоящий момент принято международное соглашение по зависящей от частоты оценке по кривой A, что позволяет унифицировать результаты измерений, проведенных в различных странах. Поскольку такой метод оценки использует идеализированные изофоны, обозначение единицы измерения в Фонах не разрешается. Поэтому уровень звукового давления приводится в дБ, причем оценка осуществляется путем индексирования величины уровня давления, например, $L_{pA} = 85$ дБ.

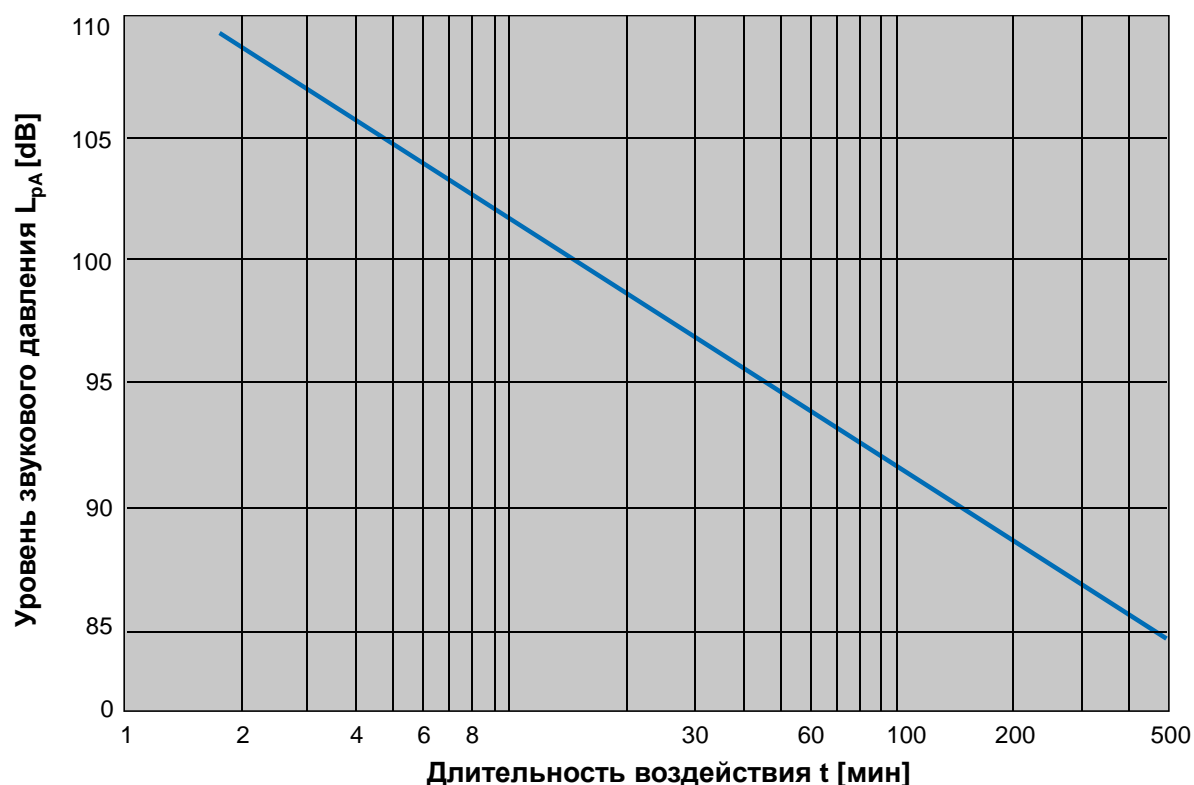


Рис. 8-21: Допустимый уровень звукового давления как функция длительности воздействия

Основной задачей проведения исследований параметров шума состоит в снижении негативного воздействия шумовой эмиссии на человека, с тем, чтобы предотвратить нанесение вреда здоровью. По результатам обширных медицинских исследований были установлены допустимые значения различных параметров звука. На Рис. 8-21 показан график зависимости допустимого звукового уровня в зависимости от длительности воздействия на человека. При восьмичасовом рабочем дне (480 минут) максимально допустимый постоянно действующий уровень звукового давления составляет 85 дБ. При превышении этого уровня, в соответствии с предписаниями техники безопасности, работодатель обязан предоставить персоналу средства шумовой защиты. Из представленного графика видно, что изменения уровня громкости звука на 3 дБ снижает допустимую длительность воздействия в два раза.

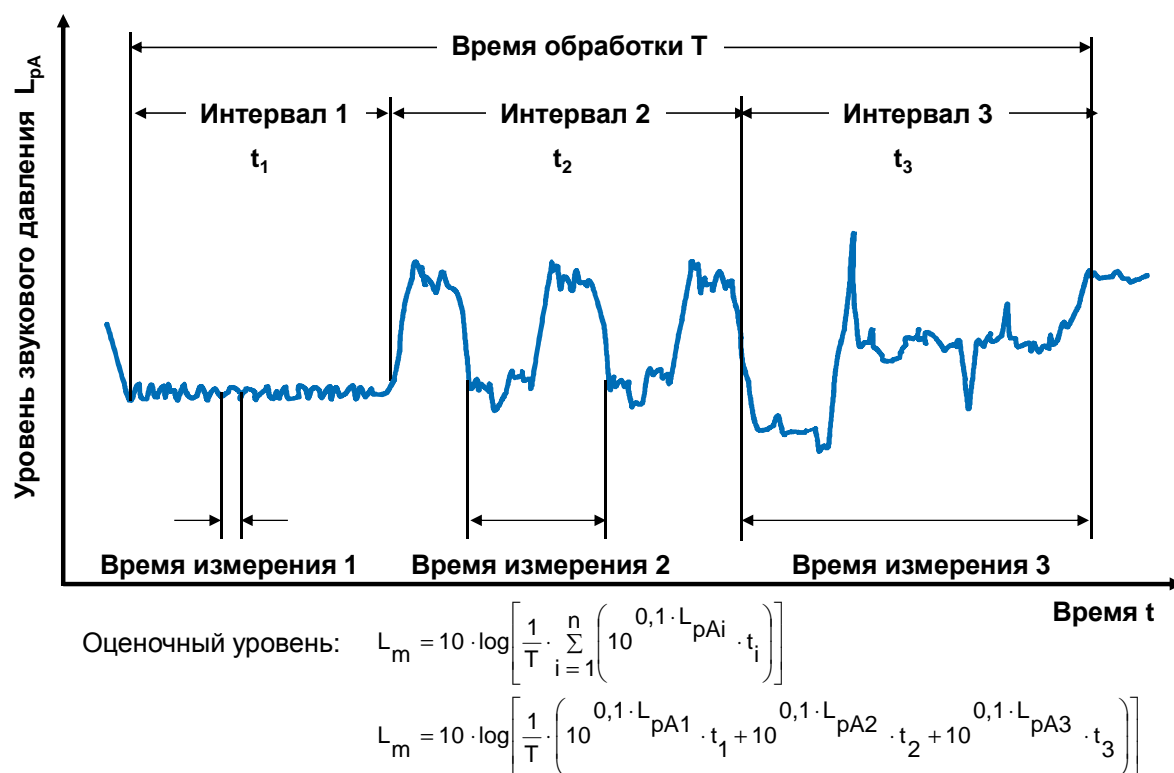


Рис. 8-22: Оптимальное распределение уровней громкости звука по времени наблюдения

Уровень громкости звука, как правило, не постоянен, а меняется в течение времени. В соответствии со стандартом DIN 45641, для оценки воздействия на человека рассчитывается средний уровень громкости L_m по назначенным временным интервалам, звуковая энергия которого равна энергии замещающего постоянного во времени шума (Рис. 8-22). Такие шумы имеют так называемый эквивалентный энергетический уровень. Промежуточные отрезки времени t_i определяются таким образом, чтобы объединить сходные по виду звуковые воздействия. В особенности, стационарные и периодические виды звуковых воздействий. Время измерения в пределах промежуточных временных отрезков определяется равномерностью изменения уровня громкости. Как видно из рисунка, на первом промежуточном отрезке достаточно относительно короткого времени измерения, так как уровень громкости практически не меняется. На втором отрезке время измерения должно охватывать, по меньшей мере, один цикл изменения уровня громкости. Время измерения на третьем отрезке должно быть равно самой протяженности отрезка, так как здесь присутствует неравномерное изменение уровня громкости. Среднее значения уровня громкости L_m , которое можно впоследствии сравнить с допустимыми значениями, может быть рассчитано с помощью формул, представленных на рисунке. Расчет ведется по значениям уровня громкости и длительности воздействия (Рис. 8-22).

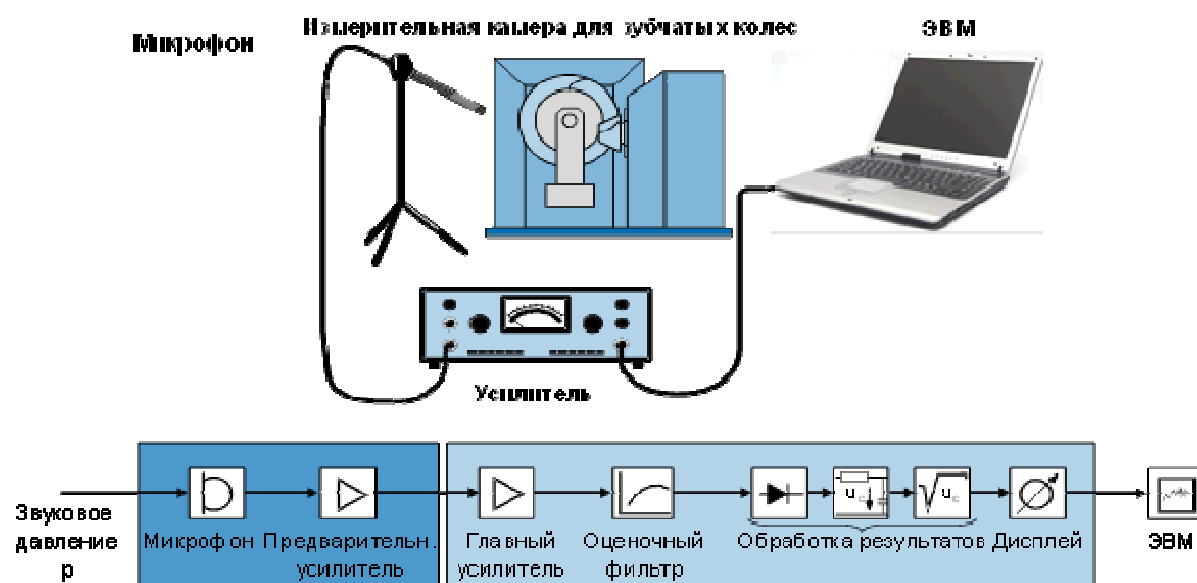


Рис. 8-23: Измерение громкости звука по DIN IEC 651

Для измерения уровня громкости, звуковое давление, создаваемое источником, воспринимается микрофоном и трансформируется в электрический сигнал. После прохождения через усилитель, сигнал поступает в ЭВМ, где производится его обработка. Схема измерения представлена на Рис. 8-23. Измеренное значение звукового давления корректируется в соответствии с кривыми зависимости громкости от частоты и постоянными времени. Показанная на рисунке схема измерительной наладки включает усилитель, снабженный фильтрами А, В и С (в соответствии с оценочными кривыми), и встроенный интегратор. Определение спектрального состава измеренного сигнала производится с помощью трансформации Фурье на базе ЭВМ. Современные компьютеры позволяют отказаться от применения внешних усилителей, поскольку зачастую имеют встроенные усилители сигнала. В зависимости от вида изменения сигнала по времени, определение среднего значения громкости, а также оценка допустимой шумовой нагрузки, могут быть сопряжены со значительными трудностями. Вследствие этого были разработаны специальные измерительные приборы, например, шумовые дозиметры, позволяющие произвести дигитализацию и, с помощью встроенного ЭВМ, последующую обработку уровня громкости. С помощью данных устройств оценка степени переменной во времени шумовой нагрузки на окружающую среду значительно упрощается (Рис. 8-23).

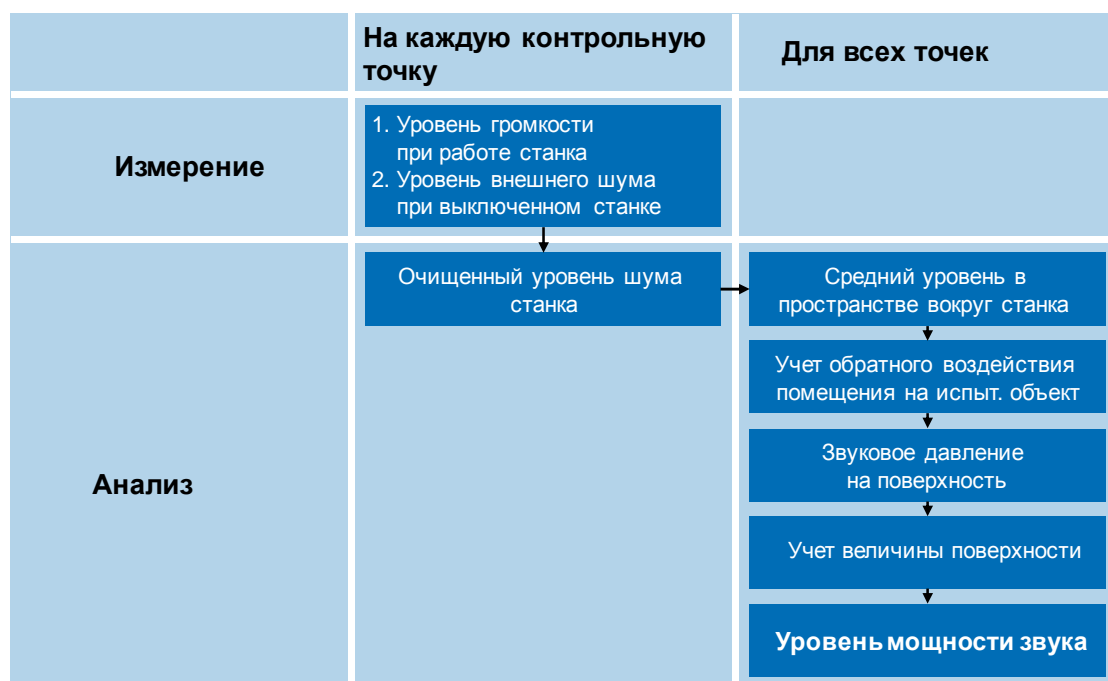


Рис. 8-24: Определения уровня мощности звука

В процессе приведения существующих европейских и международных норм к единому виду, действующий в ФРГ стандарт DIN 45635 постепенно замещается международными требованиями. Международные стандарты определения уровня шума на производстве разделяются на три категории:

1. Способы определения уровня громкости шума на рабочих местах по ISO 11200 ff
2. Способы определения мощности шума по ISO 3740 ff и ISO 9614
3. Специальные стандарты для определения шумности металлообрабатывающих станков

Последняя категория стандартов базируется, по большей части, на стандарте DIN 45635. Последние указания в области нормирования уровня шума на производстве даны в восьмом отчете комиссии по охране труда и стандартизации. Применение стандарта DIN 45635 по-прежнему широко распространено, поскольку европейские и международные нормы не покрывают все области права по защите труда. Различают два наиболее распространенных способа для определения уровня громкости шума на производстве: DIN 45635-01 (часть 1 – способ огибающей поверхности) и DIN 45635-16 (металлообрабатывающие станки).

Методика определения уровня мощности шума

При измерении мощности шума на определенном расстоянии от объекта (измерительное расстояние) задается огибающая поверхность. В точках, расположенных на данной поверхности, производится определение уровня громкости шума по оценочной кривой A, создаваемого источниками объекта и внешними источниками. Далее производится отдельное измерение уровня шума от внешних источников. На первом этапе обработки результатов определяется корректирующий фактор K1, рассчитываемый по разности вышеназванных уровней шума. С помощью корректирующего фактора в каждой точке огибающей поверхности производится расчет уровня громкости с поправкой на внешний шум. На следующем этапе обработки рассчитывается их среднее значение, описывающее средний уровень громкости по всей огибающей поверхности. Отражающее воздействие помещения, где проводится исследование, учитывается при помощи корректирующего фактора K2. После вычета этого фактора определяется уровень громкости по измерительной поверхности. Размер поверхности определяется фактором LS, который прибавляется к уровню громкости по измерительной поверхности. В результате определяется искомый уровень мощности шума по оценочной кривой A – LWA (Рис. 8-24).

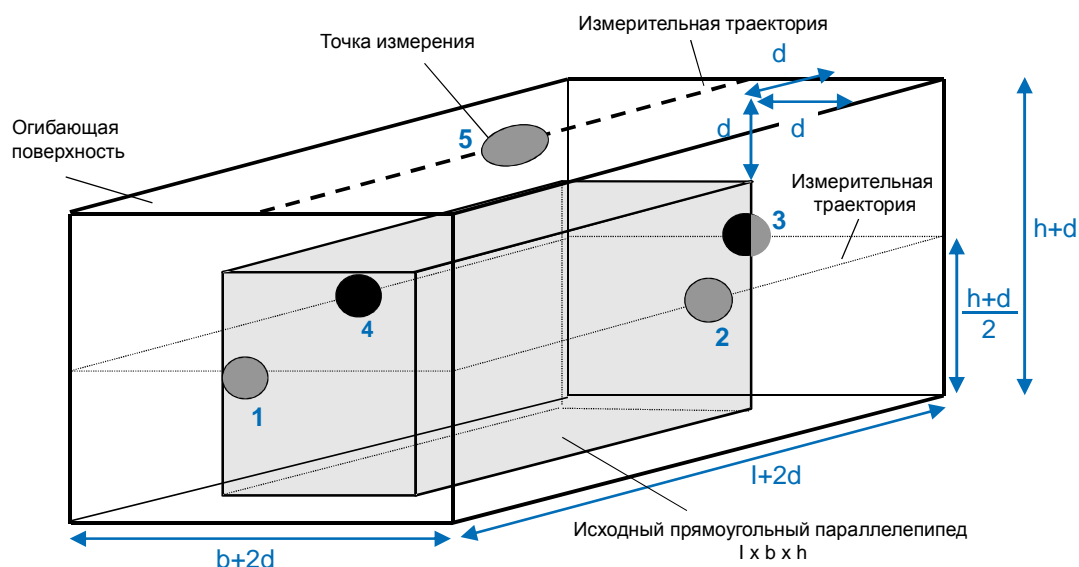


Рис. 8-25: Пример упрощенной схемы измерения мощности звука методом огибающей поверхности

На Рис. 8-25 показан пример упрощенного расположения точек измерения для металлообрабатывающего станка среднего размера. Пять измерительных точек располагаются в центре тяжести каждой грани огибающей поверхности. Расположение последней выбирается таким образом, чтобы минимальное расстояние к объекту измерения, представленного в виде прямоугольного параллелепипеда, составляло не менее $d=1$ м. За счет равномерного распределения точек измерения общий уровень звуковой эмиссии определяется с достаточной точностью, несмотря на локальные различия в громкости генерируемого шума. Для проведения более точных измерений расположение измерительных точек должно выбираться в соответствии с предписаниями стандарта DIN 45635. Воздействие окружающей среды учитывается с помощью корректирующих коэффициентов K_1 и K_2 . Для определения коэффициента K_2 существуют различные методы, например, посредством измерения времени отзвука или с применением нормализованных источников звука. При проведении измерений по 3-му классу точности, коэффициент K_2 определяется исходя из размера помещения и наличия предметов обстановки. Степень воздействия помещения наглядно демонстрирует падение уровня громкости при увеличении расстояния до источника звука. В помещениях с идеальной отражаемостью величина падения составляет 0 дБ, а в помещениях с малой отражаемостью, когда звуковые волны могут свободно распространяться – 6 дБ (например, на открытом пространстве, в измерительных камерах с малой отражаемостью).

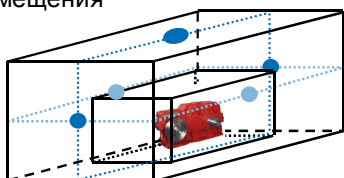
Способ измерения звукового давления

■ Преимущества

- Простое измерительное оборудование

■ Недостатки

- Измерения на малом удалении содержат погрешности
- Необходима корректировка воздействия внешних шумов
- Необходима корректировка воздействия помещения

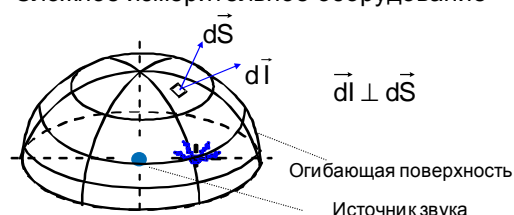
**Способ измерения интенсивности звука**

■ Преимущества

- Измерения на малом удалении не представляют трудностей
- Автоматическая корректировка воздействия внешних шумов
- Автоматический учет воздействия помещения

■ Недостаток

- Сложное измерительное оборудование

**Рис. 8-26: Способы определения мощности звука**

Еще один способ определения мощности источников шума состоит в измерении интенсивности звука. На Рис. 8-26 приведены основные характеристики известных способов определения мощности звука - конвенционального способа определения звукового давления и способа контроля интенсивности звука. Основное различие двух методов заключается в способе определения скорости звука. В первом случае расчет производится посредством звукового импеданса $Z_0 = \rho L \times c L$. Во втором – как векторная величина, на основе разности звукового давления, регистрируемого с помощью двух микрофонов, установленных на расстоянии Δr . Отсюда следует, что и на малом удалении от источника возможно корректное определение параметров звуковых колебаний. На практике для определения средних значений интенсивности шума по времени и в пространстве микрофоны перемещаются вдоль огибающей поверхности таким образом, чтобы источник звука находился с ними на одной прямой. Градиенты давления от источников звука, находящихся в пределах огибающей поверхности и проникающие за пределы огибающей, берутся с одинаковым алгебраическим знаком относительно направления измерения. С помощью расположенных друг за другом микрофонов доли внешних шумов, проникающих в пределы огибающей поверхности, проходящих через нее и снова переходящих во внешнюю среду, взаимно уничтожаются путем выбора соответствующего алгебраического знака градиента. Установленный таким образом уровень громкости в значительной степени независим от внешних шумов и воздействий окружающей среды, даже в случае, когда уровень громкости этих воздействий превышает уровень громкости самого исследуемого объекта.

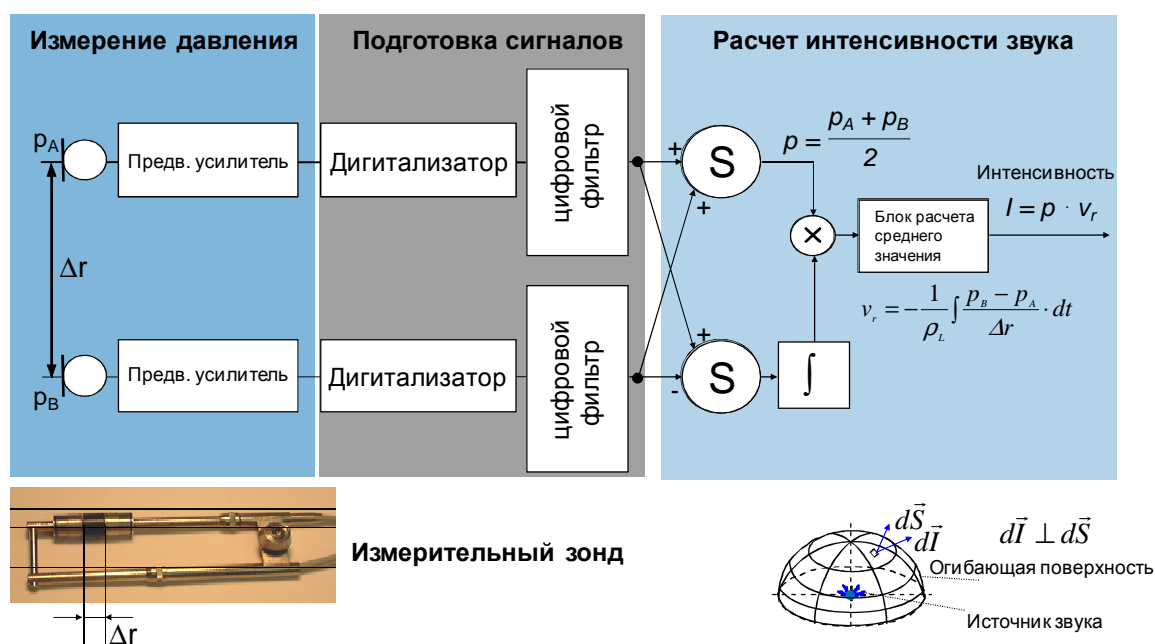


Рис. 8-27: Схема системы для измерения интенсивности звука

Измерительная установка, необходимая для обработки сигналов от двух микрофонов, как было описано на предыдущей странице, представлена на Рис. 8-27. Электрические сигналы, генерируемые микрофонами, проходят через усилитель, цифровой преобразователь, фильтры и далее обрабатываются с помощью ЭВМ. С помощью представленных на рисунке уравнений производится расчет среднего значения интенсивности звука, математическое интегрирование которой дает значение мощности звука при заданной площади измерительной поверхности. Применение фильтров позволяет установить спектральный состав интенсивности звука. По нему возможно установить источник звука и степень его воздействия на общий шумовой фон. Установка микрофонов, используемых для измерения, осуществляется с помощью специального измерительного зонда, представленного в нижней части рисунка. Относительное положение между микрофонами задается размером проставки Δr .

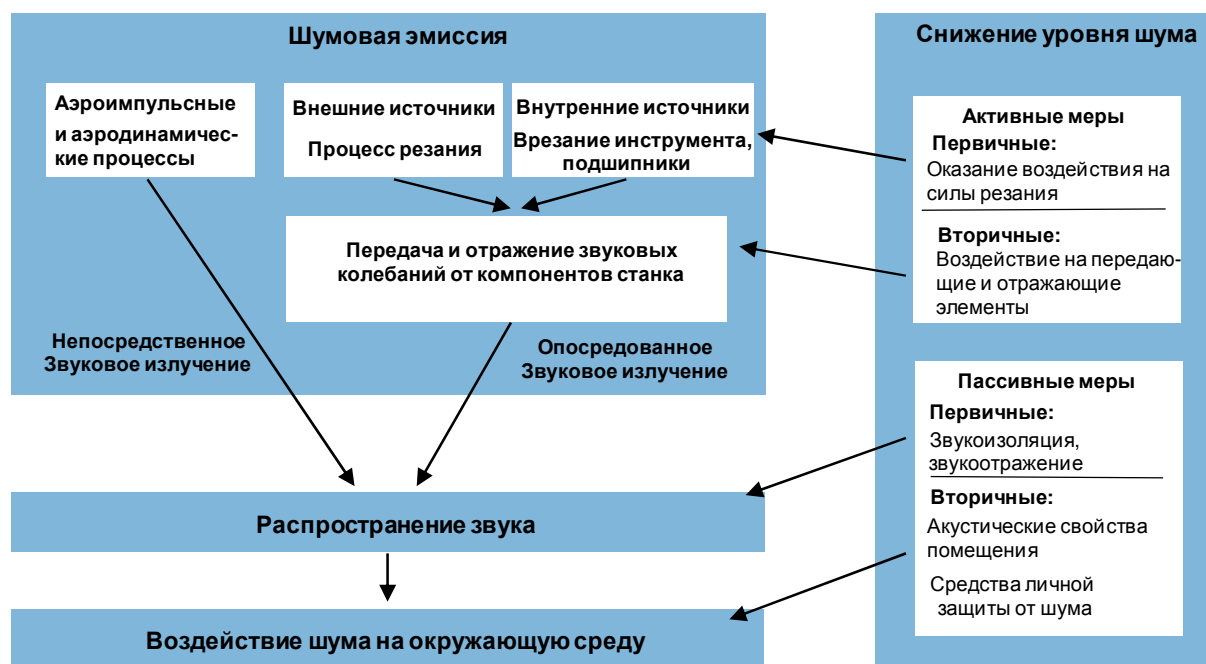
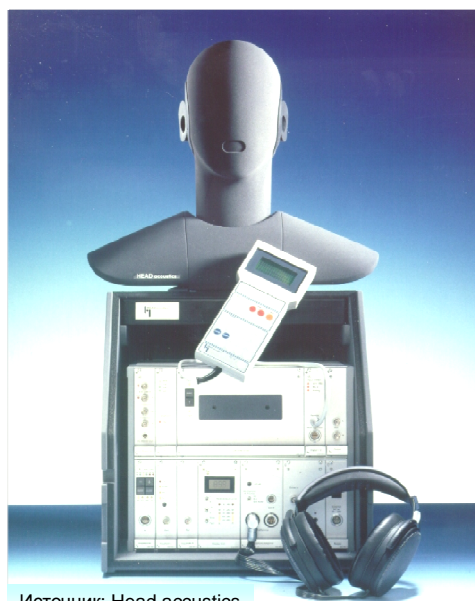


Рис. 8-28: Шумовая эмиссия и меры по снижению шума

Для акустического контроля отдельного металлорежущего станка, необходимо произвести измерение его шумов и сравнить результаты с показателями современных, сходных по типу, конструкции и размерам, станков. При проверке токарных или фрезерных станков измерения осуществляются во время типовых эксплуатационных циклов – в течение обработки, холостого хода, ускоренного перемещения подачи, пуска шпинделя и, если возможно, автоматической смены инструмента. Уровень шума в процессе резания на холостом ходу определяется по DIN 45635 с помощью огибающей поверхности. Параметры резания устанавливаются из расчета 50%-ной мощности шпинделя в номинальном режиме работы. Исследование уровня шума на холостом ходу осуществляется при максимальной частоте вращения шпинделя. Кроме того, значительный уровень шума может возникать, например, при перемещении ползунов или пуска шпинделя. Меры по снижению уровня шума представлены на Рис. 8-28.



Источник: Head accustics

измерение шума внутри автомобиля



Изучение восприятия звука с помощью манекена

- Расположение микрофонов в левом и правом искусственном ухе
- Учет фильтрующих свойств головы и ушных раковин
- Корректное отображение направления распространения звука

Рис. 8-29: Измерительная система с применением манекена

Для регистрации шума таким, каким его воспринимает человеческое ухо, необходимы специальные измерительные инструменты. Строение внешнего уха (ушная раковина, ушной проход до барабанной перепонки) обуславливает направленность восприятия звука. С учетом этих особенностей в 80-х годах прошлого столетия были разработаны специальные измерительные инструменты, интегрированные в модель человеческой головы. Данные методы являются стандартными в современном автомобилестроении и применяются для оптимизации акустических характеристик автомобилей. На Рис. 8-29 показан измерительный прибор, состоящий из источника звука, блока регистрации и пластмассового манекена, служащего для реалистичного измерения параметров звука.

- Целью применения психоакустических характеристик является расчет шумовой нагрузки и ее субъективная оценка.
- Определение:
“Шумовая нагрузка - это некомфортное ощущение, связываемое с определенными обстоятельствами, от которых индивид или группа индивидов ожидает негативного воздействия”.
- Психоакустические параметры
 - громкость
 - острота
 - резкость
 - сила модуляции
 - постоянство звука
 - субъективная длительность и ритм

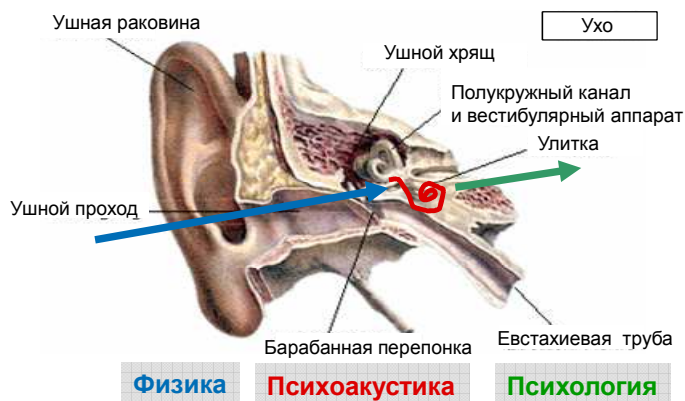


Рис. 8-30: Психоакустические характеристики

Сила звука и громкость [сон]

- Громкость и сила звука учитывают частотную зависимость восприимчивости человеческого уха



76.7 dB(A)

14.0 сон

Низкая громкость



76.6 dB(A)

38,8 сон

Высокая громкость

Резкость [акум]

- Резкость характеризует соотношение между высокими и низкими частями шумового спектра.
- Чем выше высокочастотная составляющая звукового сигнала, тем выше резкость.



86,4 dB(A)

6,3 акум

Низкая резкость



90,5 dB(A)

7,9 акум

Высокая резкость

Источник: Head accustics

Величина модуляции

- При частоте модуляции ниже 20 Гц человеческое ухо воспринимает каждое изменение в отдельности

Неровность

- Акустическое впечатление от неровного звука характеризуется колебаниями огибающей звукового сигнала с частотой 20-300 Гц

Постоянство звука

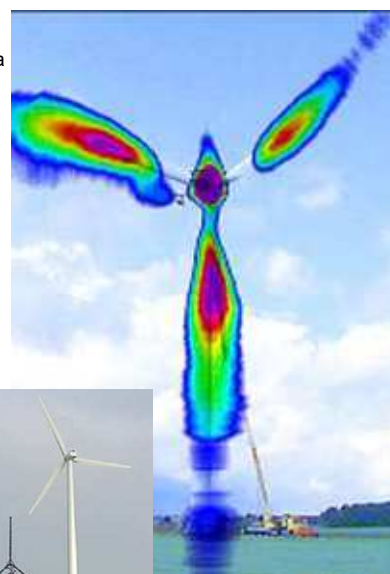
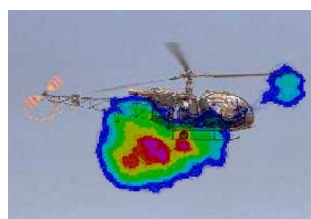
- мерой выражения четко различимых звуков в шуме

Рис. 8-31: Психоакустические характеристики**Принцип работы:**

- Видеокамера записывает оптические изображения объекта, эмитирующего звуковые волны
- Одновременно производится запись звуковых колебаний с помощью микрофона
- Расчет звукового поля на основе временной разницы между звуковыми волнами
- Видеозапись с частотой до 92.000 кадров/с



Цифровая видеокамера

микрофоны
расположены
по окружности**Рис. 8-32: Акустическая камера - визуализация звука**

- 1 Статическая жесткость металлорежущих станков
- 2 Контроль температурных деформаций металлорежущих станков
- 3 Акустический контроль станков
- 4 **Заключение**

Контроль статической жесткости станков

- Вес заготовки и статическая жесткость структуры влияют на геометрическую точность станков и точность обработки.
- Деформация структуры станка, вызывающая смещения инструмента и детали в точке резания, зависит от статической составляющей усилия резания и от статической податливости станка.
- Изучение квазистатических характеристик станка позволяет установить величину статической жесткости отдельных компонентов и их долю в суммарной деформации.

Температурная деформация станков

- Термоэластичные характеристики станка оказывают значительное влияние на точность обработки.
- Температурная деформация определяется параметрами внутренних и внешних источников тепла. Данные параметры определяются с помощью иных методов измерения.
- Конструктивные и компенсационные меры для уменьшения температурной деформации.

Акустический контроль станков

- Повышенный уровень шума является основной причиной профессиональных заболеваний.
- Широкий спектр слышимых частот требует разделения звукового давления по уровням.
- Оценка звукового давления по частотам необходима для воспроизведения слышимых звуков .
- Мощность звука - объективный фактор сравнения станков.
- Представление о новейших методах измерений и способы снижения уровня шума.