

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ (МАМИ)»

С.Н. Иванников, И.В. Манаенков

**НАДЕЖНОСТЬ И ДИАГНОСТИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО  
ОБОРУДОВАНИЯ. ЧАСТЬ 2 (теплоустойчивость)**

Учебное пособие к лекциям и лабораторным работам для студентов,  
обучающихся по специальностям 151002.65, 151003.65, 220301.65 и  
направлению 151000.68 по очной и заочной формам обучения

Одобрено методической комиссией по УГС  
150000 металлургия, машиностроение,  
материалобработка

Москва 2013

УДК 621.9.06-192+621-192

Разработано в соответствии с Государственным образовательным стандартом ВПО 2000 г. для специальностей 151003.65, 151003.65, 220301.65 и направлению 151000.68 на основе примерных рабочих программ дисциплины «Надежность и диагностика технологических систем»

Рецензенты: профессор кафедры «Технология машиностроения»

Университета машиностроения к.т.н. В.Н. Балашов

Доцент кафедры «Автоматизированные станочные системы и инструменты» Университета машиностроения к.т.н. Сидоров С.Г.

Работа подготовлена на кафедре «Автоматизированные станочные системы и инструменты»

Надежность и диагностика технологического оборудования. Часть 2 (теплоустойчивость), учебное пособие / С.Н.Иванников, И.В.Манаенков – М.: Университет машиностроения, 2013

В учебном пособии изложен материал для изучения студентами теоретических и экспериментальных методов исследования тепловых смещений шпиндельных узлов, оказывающих влияние на параметрическую надежность технологического оборудования, ознакомления с техническими средствами диагностики теплового состояния оборудования и способами повышения его теплоустойчивости.

УДК 621.9.06-192+621-192

© С.Н. Иванников, И.В. Манаенков  
© Университет машиностроения

Содержание	Стр
1. Влияние тепловых смещений ШУ на параметрическую надежность технологического оборудования	4
2. Модели для расчета тепловых смещений ШУ	5
2.1 Полиномиальная модель	6
2.2 Экспоненциальная модель	9
2.3 Упрощенная модель	12
2.4 Статистическое моделирование тепловых смещений ШУ	13
3. Экспериментальное исследование тепловых смещений ШУ	15
4. Технические средства диагностики теплового состояния технологического оборудования	21
4.1 Средства для контактного измерения температур	21
4.2 Средства для бесконтактного измерения температур	23
5. Способы управления тепловыми смещениями технологического оборудования	26
5.1 Выбор компоновки оборудования	27
5.2 Выбор типа опор ШУ	28
5.3 Применение тепловых труб	29
6. Методические указания к лабораторной работе «Исследование тепловых смещений ШУ токарно-винторезного станка»	31
Литература	39

## **1. Влияние тепловых смещений ШУ на параметрическую надежность технологического оборудования**

Важнейшим условием обеспечения высокой параметрической надежности технологического оборудования является его устойчивость к тепловым воздействиям и минимизация в процессе эксплуатации связанных с этими воздействиями смещений его элементов.

Вместе с тем, тепловые смещения элементов технологического оборудования и, прежде всего, его шпиндельных узлов (ШУ), при использовании интенсивных режимов резания могут достигать (а в некоторых случаях даже превосходить) значения, соизмеримые с допустимыми отклонениями параметров точности изготавливаемых деталей.

Многочисленные исследования по оценке тепловых смещений в технологическом оборудовании, оказывающих влияние на его параметрическую надежность, показывают, что до 80% этих смещений, непосредственно сказывающихся на точности изготавливаемых деталей, приходится на ШУ.

В соответствии с современными тенденциями развития технологического оборудования, скорости резания, например, на станках средних типоразмеров могут возрасть до 10000 м/мин [1]. Высокоскоростное резание, обеспечивающее многократный рост эффективности процессов изготовления деталей, стало возможным в результате освоения новых прогрессивных режущих инструментов, но не может быть реализовано без существенного повышения частот вращения ШУ, а это, в свою очередь, приведет к созданию дополнительных тепловых нагрузок на ШУ и, следовательно, к увеличению его тепловых смещений.

Таким образом, диагностика теплового состояния и определение тепловых смещений ШУ, как самых теплонагруженных и одновременно наиболее ответственных элементов станков, имеют важное значение для решения задачи обеспечения параметрической надежности технологического оборудования.

## **2. Модели для расчета тепловых смещений ШУ**

Тепловые смещения (ШУ) оказывают определяющее влияние на параметрическую надежность технологического оборудования в процессе его эксплуатации.

Существующие расчетные методы оценки тепловых смещений ШУ, как правило, трудоемки и не всегда позволяют получать достоверные результаты, т.к. в большинстве случаев основаны на весьма приближенных допущениях. Поэтому на практике более предпочтительными могут быть полуэмпирические модели, которые, учитывая физическую природу тепловых смещений, используют обобщенные данные натурных испытаний и, в конечном итоге, достаточно адекватно описывают изменение во времени выходных параметров точности ШУ вследствие тепловыделения.

При выборе математической модели для описания поведения выходных параметров технологического оборудования в процессе его эксплуатации необходимо учитывать характерные особенности изменения во времени тепловых смещений ШУ.

Поскольку ШУ имеет собственные источники тепловыделения, то изменение его выходных параметров точности можно описать (аппроксимировать) экспонентой, а в отдельных случаях - суммой экспонент (рис. 1 а, б).

В тоже время, вследствие недостаточной тепловой инерции ШУ, возможных перерывов в работе (запланированных и незапланированных) и варьирования режимов обработки в широких пределах, особенно частоты вращения шпинделя, тепловые смещения ШУ приобретают переменный характер (рис. 1 в). Поэтому в более общем случае изменение выходных параметров точности ШУ целесообразно описывать полиномиальной зависимостью.

В некоторых случаях, для приближенной оценки выходных параметров точности пригодны упрощенные модели, учитывающие изменение температуры характерных точек ШУ.

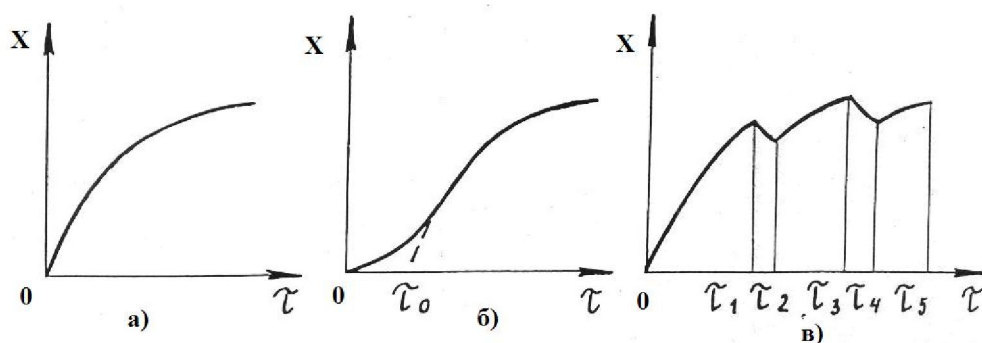


Рис.1 Описание тепловых смещений ШУ: а) экспонентой; б) суммой экспонент; в) полиномом

## 2.1 Полиномиальная модель

При разработке моделей для расчета тепловых смещений ШУ универсальных токарных станков необходимо учитывать варьирования частоты вращения шпинделей в весьма широких пределах, которые, в частности, для высокоточного токарного станка мод. 16K20ВФ1 составляют 12,5-1600 мин<sup>-1</sup>. Статистические характеристики частоты вращения шпинделей станков данного типоразмера в реальных условиях производства составляют: средне-выборочное значение  $\bar{n} = 425 \text{ мин}^{-1}$ , закон распределения – логарифмически нормальный ( $\lg n = 2.57, \sigma_{\lg n} = 0.28$ ) [2].

В таких случаях при описании тепловых смещений наиболее универсальной представляется математическая модель, основанная на полиномиальной зависимости вида:

$$f(\tau) = C_0 + C_1\tau + C_2\tau^2 + \dots + C_n\tau^n = C_0 + \sum_{i=0}^n C_i\tau^i \quad (1)$$

где  $\tau$  – время (аргумент функции),  $C_i$  – коэффициенты полинома,  $n$  – степень полинома.

Так как тепловые смещения оцениваются в функции времени  $\tau$ , то для построения математической модели требуется определить значения величин смещений шпинделя в некоторые фиксированные моменты времени  $\tau_i$ , после чего получить функцию для всего диапазона изменения  $\tau$ . Задача аппроксимации в такой постановке рассматривается как частный случай идентификации.

В результате натурных испытаний накапливаются совокупности реализаций тепловых смещений шпинделя при различных частотах его вращения. Каждая реализация описывается функциями  $x = f(\tau)$  и  $y = f(\tau)$ , где  $x$  и  $y$  – радиальные смещения соответственно в горизонтальном и вертикальном направлениях.

На рис.2 представлены реализации тепловых смещений в функции времени при конкретном значении частоты вращения шпинделя  $n = 400 \text{ мин}^{-1}$

станка мод.16K20ВФ1:по координатным осям  $x$  (рис 2 а) и  $y$  (рис 2 б), а так же в плоскости  $XOY$  (рис 2 в). На рис 2 г приведена фотография теплового тренда траекторий движения оси шпинделя в плоскости  $XOY$ , иллюстрирующая величину и характер смещения за первые 60 мин.(через каждые 10 мин.) непрерывной работы ШУ при  $n=400 \text{ мин}^{-1}$ .Общее время наблюдений составило 250 мин. Оценку смещений траекторий целесообразно производить с интервалами  $\Delta\tau = 5, 10, 15 \text{ мин.}$ , величина которых может возрастать по мере увеличения времени наблюдений и снижения интенсивности тепловых смещений.

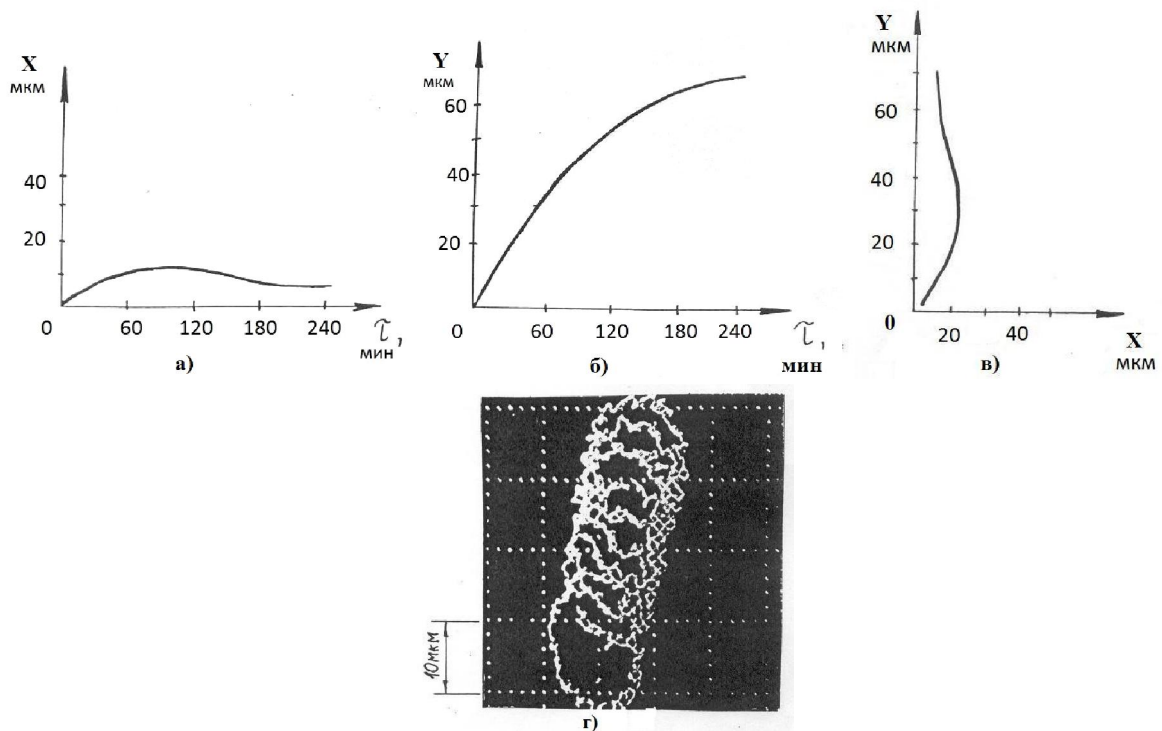


Рис.2 Реализация тепловых смещений ШУ при  $n=400 \text{ мин}^{-1}$ : а) по оси  $x$ ; б)по оси  $y$ ; в) в плоскости  $XOY$ ; г)смещение траекторий движения оси шпинделя за  $\tau=60 \text{ мин}$

После предварительных теоретических исследований было установлено, что функции  $(x \text{ и } y) = f(\tau)$  целесообразно аппроксимировать полиномом четвертой степени по методу наименьших квадратов, т.е.

$$f(\tau) = C_0 + \sum_{i=1}^4 C_i \tau^i \quad (2)$$

Построение полиномиальной математической модели для оценки тепловых смещений шпинделя имеет свои особенности, связанные с выбором средств, позволяющих наиболее адекватно описывать исследуемый процесс.

Так, например, согласно [3] в общей задаче наименьших квадратов один из наиболее надежных методов вычисления коэффициентов основан на матричной факторизации, называемой сингулярным разложением. Поэтому при разработке полиномиальной математической модели была использована программа SVD сингулярного разложения матрицы, текст и описание которой приведены в работе [3].

Существуют другие способы решения задачи нахождения коэффициентов полинома, причем, некоторые требуют меньшего машинного времени и объема памяти. Однако, они менее эффективны с точки зрения учета ошибок исходной информации, округления и, в конечном итоге, точности результатов вычислений. Кроме того, программа SVD обладает несомненным достоинством в смысле машинной независимости.

Основные вычисления, связанные с аппроксимацией функции и определением коэффициентов полинома для каждой конкретной частоты вращения шпинделя, могут производиться с помощью разрабатываемых специальных подпрограмм.

С учетом выполненных преобразований, результатом аппроксимации тепловых смещений шпинделя для любого произвольного значения  $n$ , лежащего в пределах диапазона регулирования частоты вращения, будет функция:

$$f(\tau) = C_1 + \frac{C_2(\tau - CH)}{ZN} + C_3 \left[ \frac{(\tau - CH)}{ZN} \right]^2 + C_4 \left[ \frac{(\tau - CH)}{ZN} \right]^3 + C_5 \left[ \frac{(\tau - CH)}{ZN} \right]^4 = C_1 + \sum_{i=2}^5 \left[ \frac{(\tau - CH)}{ZN} \right]^{i-1} \quad (3)$$

Специфика составления массива коэффициентов в подпрограмме требует того, чтобы пять коэффициентов полинома четвертой степени получили номера не с  $C_0$  по  $C_4$ , а с  $C_1$  по  $C_5$ . После определения коэффициентов полинома  $C_1$ - $C_5$  и нормирующих параметров  $CH$  и  $ZN$  для заданной частоты вращения шпинделя математическая модель тепловых смещений принимает конкретный вид. Например, для значения  $n=400 \text{ мин}^{-1}$  функция  $x = f(\tau)$  принимает вид

$$x = 7.711 - \frac{1.718(\tau - 125)}{36} - 0.0848 \cdot \left[ \frac{(\tau - 125)}{36} \right]^2 + 0.198 \cdot \left[ \frac{(\tau - 125)}{36} \right]^3 - 0.00856 \cdot \left[ \frac{(\tau - 125)}{36} \right]^4 \quad (4)$$



Для функции  $y = f(\tau)$  при том же значении  $n$  получим:

$$y = 56.1 + \frac{8.985(\tau - 125)}{36} - 1.425 \cdot \left[ \frac{(\tau - 125)}{36} \right]^2 + \\ + 0.0516 \cdot \left[ \frac{(\tau - 125)}{36} \right]^3 - 0.00856 \cdot \left[ \frac{(\tau - 125)}{36} \right]^4 \quad (5)$$

Величины тепловых смещений шпинделя в заданные промежутки времени определяются путем подстановки в выражения (4) и (5) соответствующих значений  $\tau_i$ .

Полином четвертой степени позволяет с достаточной точностью аппроксимировать тепловые смещения ШУ. Суммарная погрешность аппроксимации определяется по формуле:

$$R = \sqrt{\sum_{i=1}^m [x_i - f(\tau_i)]^2} \quad (6)$$

где:  $x_i$  -экспериментальное значение параметра, характеризующего тепловое смещение, в момент времени  $\tau_i$ ;  $f(\tau_i)$  -расчетное значение параметра;  $m$  -количество точек.

Таким образом, выражениями, аналогичными (4) и (5), описываются функции  $x=f(\tau)$  и  $y=f(\tau)$  при любых значениях  $n$  и при любом характере тепловых смещений ШУ, независимо от режимов его работы. В этом несомненно достоинство предлагаемых математических моделей.

## 2.2 Экспоненциальная модель

При наличии достаточно сильного источника тепловыделения и односторонней направленности тепловых смещений ШУ, которые в относительно стабильных условиях эксплуатации узла принимают монотонный характер, изменение выходных параметров точности подчиняется экспоненциальному закону. Это дает возможность в качестве модели тепловых смещений траекторий движения оси шпинделя, определяемых параметром  $x_i$ , использовать зависимость:

$$X_i = f(\tau) = A \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\tau}{T}\right) \right] \quad (7)$$

где:  $A$ - установившееся значение (при  $\tau \rightarrow \infty$ ) теплового смещения ШУ;  $T$ -тепловая постоянная времени ШУ.

На рис.3 приведена схема изменения во времени параметра  $x_i$ . Величина  $A$  характеризуется средним значением  $\bar{A}$  и средним квадратическим отклонением  $\sigma_A$  и подчиняется нормальному закону распределения, т.к. рассеивание величин установившихся тепловых смещений ШУ зависит от большого числа случайных факторов. К этим факторам относятся избыточная температура, мощность источника тепловыделений в ШУ, (которая, в свою очередь, является функцией параметров опор шпинделя), частота вращения и другие. Расчетным путем учесть все факторы весьма сложно, поэтому целесообразно статистические характеристики  $\bar{A}$  и  $\sigma_A$  устанавливать для конкретных условий экспериментально.

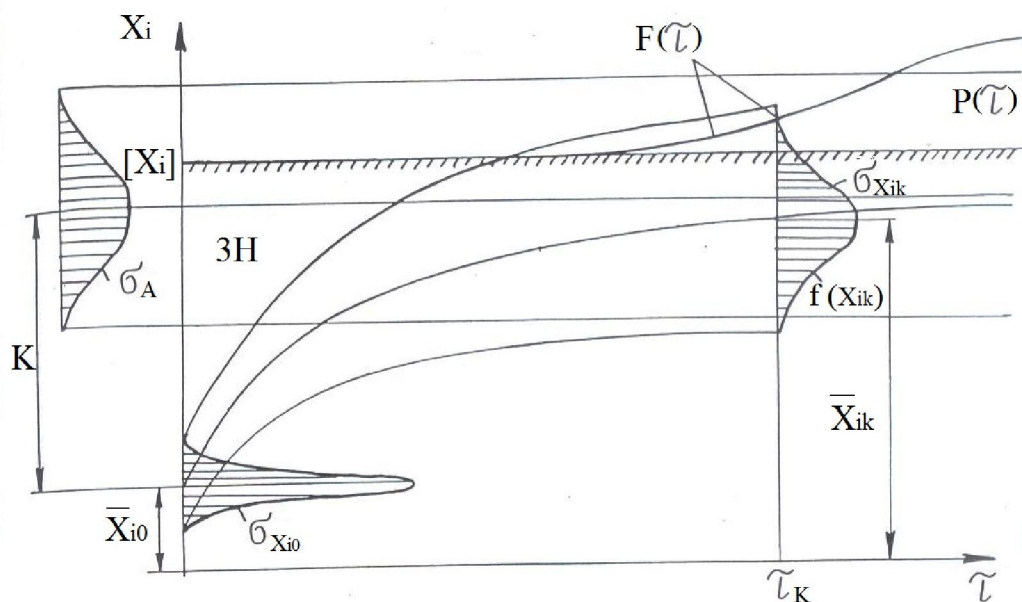


Рис.3 Прогнозирование параметрической надежности при тепловых смещениях ШУ

Кроме того, имеет место первоначальное рассеивание исследуемого параметра  $x_{i0}$ , которое подчиняется нормальному закону распределения с характеристиками:  $x_{i0}$  -среднее значение,  $\sigma_{x_{i0}}$  -среднее квадратическое отклонение. Рассеивание параметра  $x_{i0}$  вызвано воздействием на ШУ большого числа факторов и неоднозначностью начального состояния узла.

С течением времени  $\tau$  рассеивание  $\sigma_{x_i}$  выходного параметра и его среднее значение  $x_i$  растут, поскольку происходит вероятностное сложение начальных отклонений параметра и его изменений в результате нагрева. Так как оба эти закона подчиняются нормальному распределению, то, согласно теории вероятностей, результирующее распределение для центрированных законов также будет нормальным.

Таким образом, изменения выходного параметра  $x_i$  при нагреве в конце заданного отрезка времени  $\tau_k$  описываются его статистическими характеристиками:

$$X_{ik} = x_{io} + A \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\tau_k}{T}\right) \right] \quad (8)$$

$$\sigma_{xik} = \sqrt{\sigma_{xio}^2 + \sigma_A^2 \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\tau_k}{T}\right) \right]^2} \quad (9)$$

Приведенные ниже выражения позволяют определять среднее значение  $X_i$  и среднее квадратическое отклонение  $\sigma_{xi}$  параметра  $x_i$  в любые произвольно выбранные моменты времени  $\tau_i$ . Это, в свою очередь, дает возможность находить решения задач, связанных с прогнозированием параметрической надежности технологического оборудования.

В качестве примера уместно привести распространенный случай, когда для выходного параметра  $x_i$  (теплового смещения переднего конца шпинделя токарного станка в традиционной компоновке) в соответствии с предъявляемыми к точности обработки требованиями устанавливается предельно допустимое значение  $[x_i]$  (рис.3). В результате нагрева ШУ происходит постепенное изменение параметра  $x_i$  по экспоненциальной зависимости и, с учетом его рассеивания, в некоторый момент времени  $\tau_k$  область состояний параметра  $x_i$  выходит за пределы области работоспособности, определяемой значением  $[x_i]$ . Это вызывает параметрический отказ, т.е. в данный момент времени  $\tau_k$  существует вероятность того, что точность обработки на станке не будет удовлетворять предъявляемым к ней требованиям. Вероятность отказа  $F(\tau)$  будет численно равна площади кривой  $f(x_i)$ , находящейся за пределами  $[x_i]$ . Поскольку рассеивание параметра подчиняется нормальному закону распределения, то вероятность параметрического отказа определяется как

$$F(\tau) = 0.5 - \Phi \left[ \frac{[x_i] - \overline{x_{io}} - \overline{A} \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\tau_k}{T}\right) \right]}{\sqrt{\sigma_{xio}^2 + \sigma_A^2 \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\tau_k}{T}\right) \right]^2}} \right] \quad (10)$$

где  $\Phi$ - нормированная функция Лапласа.

Величина  $[x_i]$  устанавливается в соответствии с требованиями к качеству обработки;  $x_{io}$  и  $\sigma_{xio}$ ,  $\bar{A}$  и  $\sigma_A$ , - определяется по результатам натурных испытаний.

### 2.3 Упрощенная модель

Для приближенной оценки тепловых смещений ШУ, допускающей погрешности в пределах 50% и более, применяются упрощенные модели, основанные на учете изменения температур характерных точек и геометрических параметров (характерных размерах) шпиндельной бабки в процессе разогрева ШУ.

Разработке таких моделей предшествовали предварительные экспериментальные исследования, в том числе, выполненные с помощью тепловизора, в результате которых, во-первых, выявлено место нахождения характерных температурных точек 1,2,3 и 4 (рис.4) и, во-вторых установлено, что в направлении характерных размеров  $l_k$ ,  $l_y$  изменение которых определяет смещение оси шпинделя в плоскости XOY, температура при нагреве шпиндельной бабки распределяется равномерно (без скачков). Наиболее нагретые точки 1 и 2 располагаются на передней и задней опорах шпинделя, т.е. в местах интенсивного теплообразования, определяющего температурный режим ШУ. Причем, вследствие конвективного переноса тепла в гидростатических опорах ШУ станка мод. 16K20ВФ1 эти точки находятся под шпинделем. Низкотемпературные точки 3 и 4, учитываемые при оценке тепловых смещений, располагаются на торцевых передней и задней стенках шпиндельной бабки в местах ее стыковки с передней направляющей станка.

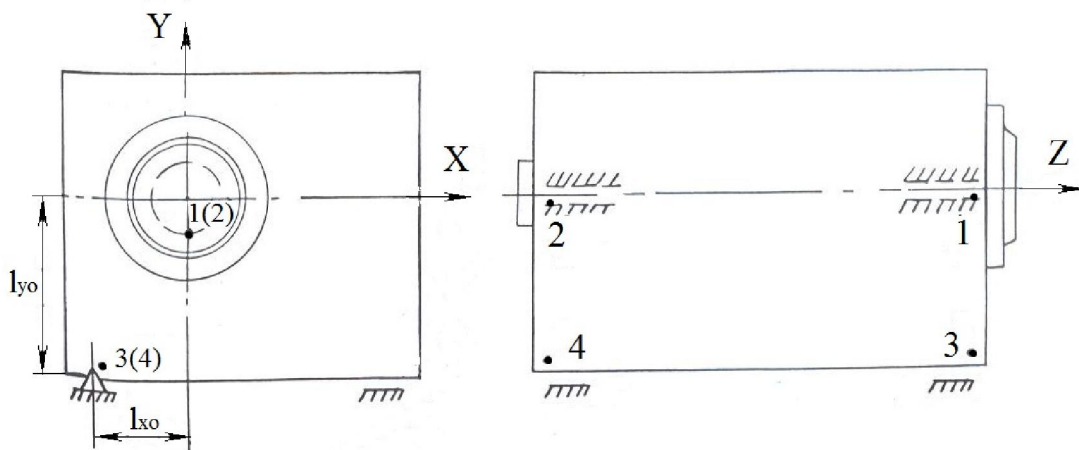


Рис.4 Расположение температурных характерных точек в ШУ

Тепловые смещения переднего конца шпинделя в координатной плоскости ХОУ, в которой происходит формирование поперечного профиля изготавливаемых деталей, являются, прежде всего, функциями температур характерных точек 1 и 3 и определяются следующим образом.

Изменение характерных размеров  $\Delta l_{xi,yi}(\tau)$  шпиндельной бабки, вследствие его разогрева, в общем виде описывается выражением:

$$\Delta l_{xi,yi}(\tau) = \beta \cdot l_{xo,yo} \cdot V(\tau) \quad (11)$$

где:  $\beta$ - коэффициент линейного расширения материала передней бабки( $1/^\circ\text{C}$ );  $l_{xo,yo}$ - первоначальное значение характерных размеров при  $V(\tau)=0$  (мм);  $V(\tau)$ - избыточная температура характерных точек, отчитываемая от температуры окружающей среды( $^\circ\text{C}$ ).

Тогда для оценки смещений переднего конца шпинделя по координатным осям  $x$  и  $y$  относительно исходного положения ,определяемого начальными размерами  $l_{xo}$  и  $l_{yo}$  , получаем выражение:

$$x(\tau) = \Delta l_{xi}(\tau) = \beta \cdot l_{xo} \cdot V_{1-3}(\tau) \quad (12)$$

$$y(\tau) = \Delta l_{yi}(\tau) = \beta \cdot l_{yo} \cdot V_{1-3}(\tau) \quad (13)$$

Избыточная температура устанавливается либо экспериментально, либо расчетным путем с использованием выражения:

$$V(\tau) = \frac{P}{Cm} \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\alpha \cdot F}{C \cdot m} \cdot \tau\right) \right] \quad (14)$$

где:  $p$ - мощность источника тепловыделения (Вт), определяемая в соответствии с рекомендациями работ;  $c,m$ - удельная теплоемкость ( $\text{кДж} \backslash \text{кг} \text{ } ^\circ\text{C}$ ) и масса (кг) элементов ШУ;  $\alpha,F$  - коэффициент ( $\text{Вт} \backslash \text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ ) и площадь ( $\text{м}^2$  ) теплопередачи;  $\tau$ - время.

## 2.4 Статистическое моделирование тепловых смещений ШУ

Вследствие вероятностной природы формирования выходных параметров ШУ под воздействием случайных факторов исследование тепловых смещений и получение о них статистической информации представляет собой сложную задачу, одним из универсальных методов решения которой может быть принято статистическое моделирование [4].

При статистическом моделировании, путем проведения серий численных статистических испытаний над математическими моделями, описывающими тепловые смещения (см. п. 2.1, 2.2, 2.3), на ЭВМ (машинных экспериментов) осуществляется моделирование случайных реализаций выходных параметров смещений ШУ, по совокупности которых производится оценка их вероятностных характеристик. Данный метод можно одинаково успешно применять при описании процесса формирования выходных параметров ШУ в виде различных функций, получая при этом результаты, практически недоступные при использовании других методов исследования. Машинные эксперименты позволяют в широких пределах осуществлять независимое варьирование учитываемых факторов, имеющее важное значение для наиболее полной оценки выходных параметров ШУ, что существенно ограничивается возможностями натурных испытаний, важной особенностью которых при исследовании тепловых смещений ШУ, помимо трудоемкости, является их продолжительность, связанная с длительными периодами времени разогрева оборудования.

Статистическое моделирование, хотя и не отличается высокой точностью результатов, однако, дает возможность существенно сократить время накопления требуемого объема данных (выборок), необходимых для получения статистической информации о тепловых смещениях ШУ и оценки его параметрической надежности. Эффективность применения метода статистического моделирования в решении поставленных задач возрастает в связи с дальнейшим развитием вычислительной техники, позволяющей с высоким быстродействием выполнять большой объем различных вычислительных операций.

### 3. Экспериментальное исследование тепловых смещений ШУ

Экспериментальное исследование позволяет получать наиболее достоверную информацию о тепловых смещениях ШУ технологического оборудования, хотя и является весьма трудоемким и дорогостоящим процессом.

Для экспериментального исследования тепловых смещений ШУ высокоточного токарно-винторезного станка может быть применена методика подробно изложенная в [5]. В соответствии с предложенной методикой тепловое смещение ШУ в горизонтальной плоскости определяется параметром  $X_1^{III}$ , оказывающим непосредственное влияние на размерную точность изготавливаемых на станке деталей (рис.5 и 6)

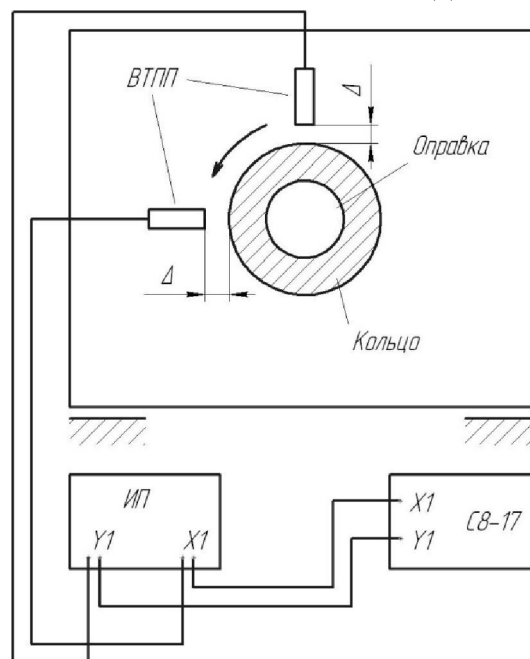


Рис.5 Схема измерения тепловых смещений ШУ

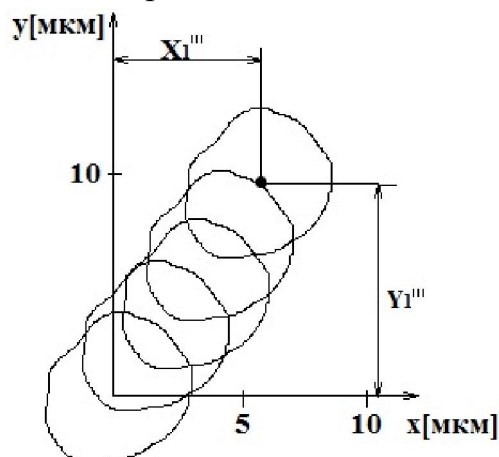


Рис. 6 Параметры теплового смещения ШУ

В технологическом оборудовании с расположением режущего инструмента по схеме, используемой в станках традиционной компоновки,

например, мод. 16K20ВФ1 (в горизонтальной плоскости), тепловое смещение ШУ в вертикальной плоскости, определяемое параметром  $Y_1^{III}$ , оказывает существенно меньшее влияние на размерную точность изготавливаемых деталей. Так установлено, что при диаметре изготавливаемых деталей  $d=100$  мм тепловое смещение ШУ по оси  $y$  может привести к изменению нормируемого размера, например, на 2 мкм только в том случае, если это смещение превысит 315 мкм. Вместе с тем, реальное максимальное смещение, установленное экспериментально, почти в 4 раза меньше. Однако, исследование тепловых смещений по оси  $y$  необходимы для общей оценки теплового состояния ШУ и наиболее полного анализа протекающих в нем тепловых процессов, в результате которых на протяжении длительных периодов времени происходит перераспределение температур в ШУ, обуславливающее непрерывные смещения.

Измерение тепловых смещений ШУ  $X_1^{III}$  и  $Y_1^{III}$  производилось на протяжении длительных периодов времени непрерывной работы оборудования в холостом режиме при конкретных значениях частот вращения шпинделя, выбираемых из всего диапазона ее регулирования на исследуемом станке.

По результатам измерения, представленным в таблицах №1 и №2, построены графики (рис.7).

Таблица №1

Частота вращения шпинделя $n$ , мин <sup>-1</sup>	Величина тепловых смещений ШУ $X_1^{III}$ , мкм										
	Время $\tau$ , мин										
	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220
200	2,9	3,5	4,8	5,0	5,3	5,7	6,1	6,2	5,9	5,9	5,7
400	3,8	5,2	6,5	7,2	7,6	7,3	7,1	6,8	6,6	-	-
800	5,1	6,8	8,0	8,7	8,5	8,2	7,9	8,0	-	-	-
1250	7,1	9,3	9,6	9,2	9,1	8,8	8,6	-	-	-	-

Таблица №2

Частота вращения шпинделя $n$ , мин <sup>-1</sup>	Величина тепловых смещений ШУ $Y_1^{III}$ , мкм												
	Время $\tau$ , мин												
	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260
200	7,2	12,0	18,4	24,3	29,6	34,1	42,8	48,5	52,9	56,4	58,6	61,2	63,4
400	14,4	23,1	32,6	40,5	46,5	52,7	56,3	60,0	63,2	66,1	68,4	70,6	71,1
800	19,7	27,2	45,8	52,7	58,3	64,5	68,4	71,8	73,2	74,0	-	-	-
1250	28,5	43,1	58,4	67,0	73,0	75,2	78,6	79,3	80,1	-	-	-	-



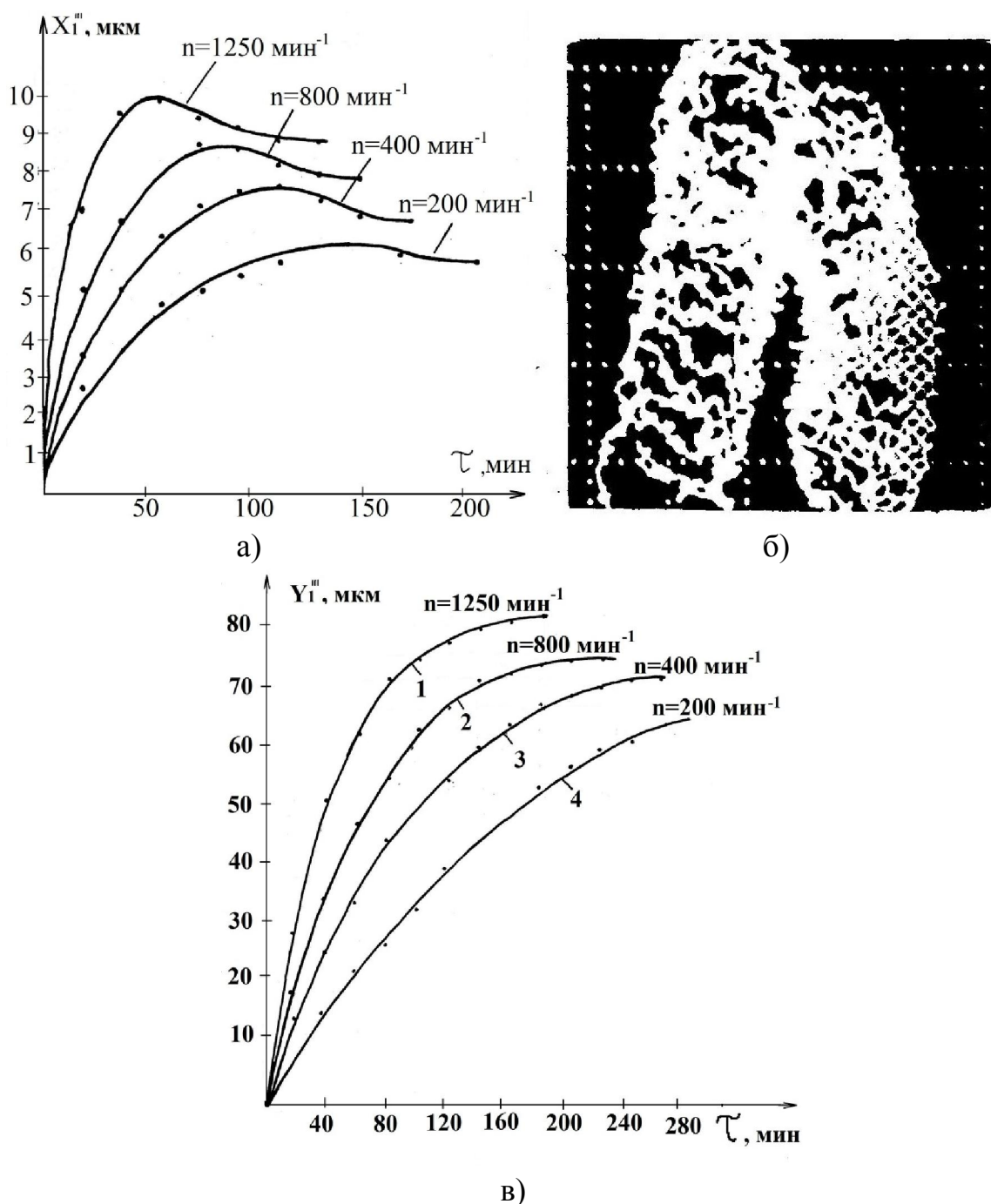


Рис.7 Тепловые смещения ШУ: а) в горизонтальной плоскости  $X_I'''$ ; б) тепловой тренд траекторий движения оси шпинделя при  $n=400 \text{ мин}^{-1}$ ; в) в вертикальной плоскости  $Y_I'''$ .

В результате экспериментального исследования установлено влияние частоты вращения шпинделя при ее изменении в диапазоне  $n=200-1250 \text{ мин}^{-1}$  на величину и продолжительность тепловых смещений ШУ в радиальной плоскости  $XOY$ . Анализ показал, что смещение по осям  $X$  и  $Y$  существенно отличаются по продолжительности и особенно по величине. Так, например, максимальная величина тепловых смещений при  $n=200 \text{ мин}^{-1}$  составила: по

оси X - 6,2 мкм (за 160 мин), по оси Y – 63,4 мкм (за 260 мин). Для других частот вращения результаты приведены на рис.7.

Данные табл.1 и рис.7а свидетельствуют о том, что максимальная величина тепловых смещений по оси X при варьировании частоты вращения шпинделя в пределах  $n = 200 - 1250 \text{ мин}^{-1}$  колеблется от 6,2 мкм (при  $n=200 \text{ мин}^{-1}$ ) до 9,6 мкм (при  $n=1250 \text{ мин}^{-1}$ ). Продолжительность смещений до их стабилизации при  $n=200 \text{ мин}^{-1}$  составляет почти 220мин, при  $n=400 \text{ мин}^{-1}$  – 190 мин, при  $n=800 \text{ мин}^{-1}$  – 160 мин, при  $n=1250 \text{ мин}^{-1}$  – 140 мин. Тепловые смещения по оси X имеют достаточно сложный характер, т.к. после достижения максимального значения наблюдаются смещения в противоположном направлении, величина и продолжительность которых зависят от частоты вращения шпинделя (см. рис 7а,б).

Максимальная величина теплового смещения ШУ в вертикальном направлении при выбранных частотах вращения составила от 63,4 мкм (при  $n=200 \text{ мин}^{-1}$ ) до 80,1 мкм (при  $n=1250 \text{ мин}^{-1}$ ), после чего наступает их относительная стабилизация, соответственно, через 260 и 180 минут (см. рис. 7в).

Тепловое смещение ШУ определяется характером распределения тепловых полей и температур в шпиндельной бабке, основными источниками тепловыделения в которой являются опоры шпинделя. Интенсивность тепловыделения возрастает с повышением частоты вращения шпинделя, что непосредственно сказывается на величине и скорости изменения выходных параметров ШУ, связанных с тепловыми процессами. Для наблюдения за распределением тепловых полей и температур в ШУ был использован тепловизор (рис.8а).

На рис. 8 представлены результаты наблюдения за распределением температур на поверхности передней стенки шпиндельной бабки высокоточного токарно-винторезного станка мод. 16К20ВФ1 при  $n=1600 \text{ мин}^{-1}$ . Фотографии получены с экрана видеоконтрольного устройства при работе прибора в режиме «изотерм». Зафиксированные яркие участки соответствуют одинаковым изотермическим уровням, т.е. нагретым участкам поверхности с разностью температур не более  $2^\circ\text{C}$  (устанавливается по метке), в различные моменты времени  $\tau_1=10 \text{ мин}$  (рис.8 б),  $\tau_2=70 \text{ мин}$  (рис.8в),  $\tau_3=90 \text{ мин}$  (рис.8 г).

Таким образом, определяются скорость и равномерность распределения избыточных температур от источника тепловыделения по всей поверхности передней стенки шпиндельной бабки, в процессе разогрева которой происходит изменение ее характерных размеров (рис.4), вызывающее смещение ШУ. Как следует из рис.8 б-г, при непрерывном

вращении шпинделя с частотой  $n=1600 \text{ мин}^{-1}$  стабилизация теплообмена наступает через 1,5 часа. На рис.8 д показано тепловое смещение (тренд) траекторий движения оси шпинделя за первые 20 мин. непрерывной работы ШУ с  $n=1600 \text{ мин}^{-1}$ .

Анализ траекторий, зафиксированных в начале (рис.9 а) и в конце (рис.9 б) испытаний ШУ при исследовании его тепловых смещений, позволяет выявить корреляцию между динамическими и тепловыми процессами. Она проявляется в том, что вследствие тепловыделения в опорах повышается температура смазочной жидкости, падает ее вязкость и в конечном результате снижается коэффициент демпфирования, определяющий динамическое качество ШУ.

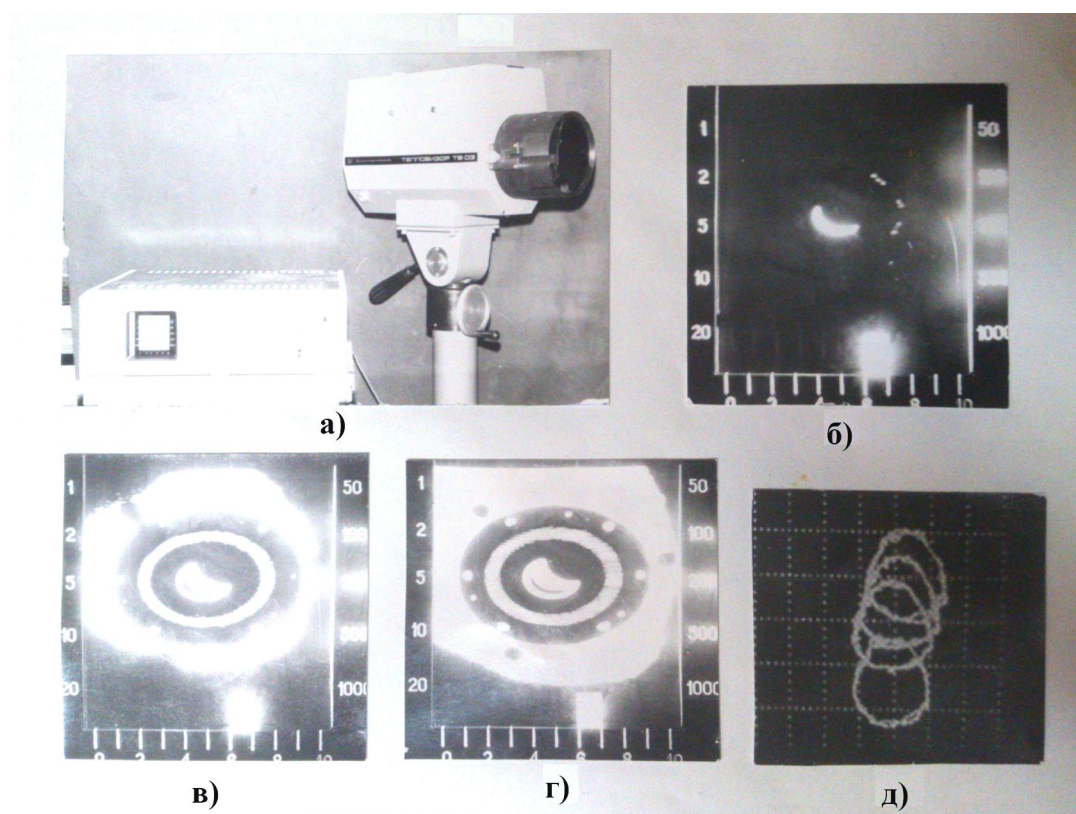


Рис.8 Исследование тепловых процессов в ШУ с помощью тепловизора: а) тепловизор; б-г) изотермические уровни при  $\tau_1=10 \text{ мин}$  (б),  $\tau_2=70 \text{ мин}$  (в),  $\tau_3=90 \text{ мин}$  (г); д) смещение траекторий движения оси шпинделя за  $\tau=20 \text{ мин}$  при  $n=1600 \text{ мин}^{-1}$ .

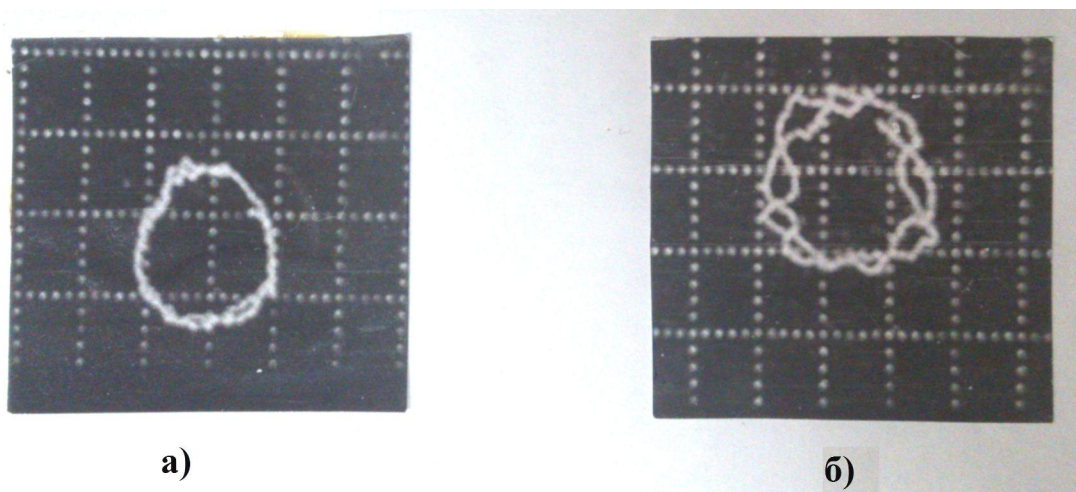


Рис.9 Выявление корреляции между динамическими и тепловыми процессами в ШУ: траектории движения оси шпинделя при низкой (а) и высокой (б) избыточных температурах в ШУ

Для наглядности на каждой из фотографий зафиксированы траектории за два оборота шпинделя, полная идентичность которых (траектории практически совпадают) в одном случае (рис.9 а) и нестабильность параметров которых в другом случае (рис.9 б) свидетельствуют об изменении динамического качества ШУ. Установлено, например, что повышение температуры смазочной жидкости марки И-5А с  $20^{\circ}\text{C}$  до  $50^{\circ}\text{C}$  вызывает снижение коэффициента демпфирования в 1,2 раза.

#### **4. Технические средства диагностики теплового состояния технологического оборудования**

Экспериментальное исследование тепловых процессов и диагностика теплового состояния технологического оборудования тесно связаны с измерением температур на различных участках оборудования. Все методы измерения температуры можно разделить на две большие группы: контактные и бесконтактные. К первой группе относятся методы и устройства, в которых между датчиком температуры и объектом измерения имеется непосредственный контакт. Вторая группа содержит методы, при которых датчики измерительных устройств находятся на некотором удалении от объекта, температура которого подлежит определению. Контактные методы измерения, в свою очередь, могут быть разделены на три группы в соответствии с основными особенностями устройств, с помощью которых их осуществляют: термометры, термопары, термоиндикаторы. Бесконтактные измерения, используемые в экспериментах, осуществляются либо с помощью радиационных устройств, в основе которых лежит регистрация инфракрасного излучения нагретых тел, либо с помощью других устройств, использующих оптические, акустические или пневматические датчики.

##### **4.1 Средства для контактного измерения температур**

При реализации бесконтактного метода измерения температур характерных температурных точек технологического оборудования целесообразно использовать искусственные термопары, позволяющие получать необходимую информацию для определения возможных тепловых смещений в ШУ (см. п.2.3). Искусственная термопара состоит из двух проводников, не имеющих непосредственного отношения к инструменту, заготовке или детали оборудования, температуру которых измеряют; проводники и спай термопары служат только для измерения температуры интересующего объекта. Следует отметить, что для измерения температур на контактных поверхностях элементов технологического оборудования находят применение также полуискусственные и естественные термопары. В полуискусственной термопаре только один из проводников не принадлежит компонентам технологической подсистемы, а второй присутствует в ней естественно, выполняя какую-либо функцию в процессе обработки. Это может быть материал инструмента, заготовки или детали оборудования,

включенный в цепь термопары и находящийся в надежном контакте с первым из проводников. В естественной термопаре оба проводника, образующие спай, естественно присутствуют в технологической подсистеме, участвуя в ней в качестве необходимых компонентов. Таковы, например, металлические инструмент и обрабатываемая заготовка, которые в зоне контакта между ними прижаты друг к другу настолько плотно, что место их соприкосновения мало отличается от спаия.

Все важнейшие характеристики искусственной термопары как инструмента для измерения температур (величина сигнала, чувствительность, диапазон измеряемых температур, стабильность показаний и др.), зависят в основном от свойств материалов проводников, образующих спай термопары. В принципе, для изготовления термопары может быть применена любая пара различных металлов, однако целесообразно использовать лишь определенные из них, так называемые термоэлектродные сплавы, удовлетворяющие следующим требованиям.

1. ТермоЭДС сплава должна быть достаточно большой, для того чтобы ее можно было измерить с нужной точностью; она должна быть непрерывной и однозначной (желательно линейной) функцией температуры.
2. Температура плавления или размягчения сплава должна быть выше, чем температура поверхности, которую измеряет термопара.
3. Термоэлектродные сплавы, особенно для длительно работающих термопар, должны быть коррозионно-стойкими.
4. Сплавы для термопар в процессе эксплуатации и градуировки должны сохранять свои характеристики неизменными.
5. Материалы, из которых изготавливают термопары, должны быть достаточно прочными и пластичными.

В экспериментах применяют искусственные термопары, изготовленные, как правило, из следующих пар материалов: медь-константан, медь-копель, железо-константан, хромель-копель, хромель-константан, хромель-алюмель. Термопары из этих материалов позволяют измерять температуры в пределах, характерных для практики проводимых экспериментальных исследований (в среднем 0... 1000 С), обеспечивая достаточно высокую термоЭДС.

Величину термоЭДС искусственной, как и всякой другой термопары, определяют по результатам градуирования, т. е. установления конкретной

функциональной связи  $E = f(\theta)$  между термоЭДС  $E$  и температурой  $\theta$ . Результаты градуирования часто представляют в виде полиномов первой, реже второй степени. Например, для медноконстантановой термопары в пределах температур  $0 \leq \theta \leq 400$  С  $E \approx 3,84 \cdot 10^{-2} \theta + 3,32 \cdot 10^{-5} \theta^2$  мВ.

Градуирование представляет собой важный этап подготовки термопары к работе. Его выполняют с помощью специальных устройств, в которых нагревают спай термопары при фиксированных температурах и одновременно измеряют термоЭДС.

Современные термопары имеют температурные диапазоны:

- хромель-копелевые – от -40 до +600 °С;
- хромель-алюмелевые – от -40 до +1050 °С;
- платинородий-платиновые – от 0 до +1300 °С;
- платинородиевые – от +300 до +1600 °С.

## **4.2 Средства для бесконтактного измерения температур**

Для повышения эффективности процесса диагностики теплового состояния технологического оборудования необходим постоянный поиск и усовершенствование средств, позволяющих определять температуру элементов оборудования дистанционно, без непосредственного соприкосновения датчика с поверхностью, температура которой контролируется. Успехи техники регистрации инфракрасного излучения создали условия, благодаря которым бесконтактные способы измерения находят все более широкое применение в экспериментальных исследованиях.

При реализации бесконтактных методов измерения температур находят применение различные фотоэлектрические устройства, приборы для измерения температур радиационным методом, пирометры, специальные акустические и пневматические устройства. Применение, например, пирометров (инфракрасных термометров) обуславливается следующим. При всем разнообразии существующих термометров и датчиков температуры возникают задачи, которые не под силу современным контактными приборам и, в частности, цифровым термометрам. Оборудование и различные устройства не позволяют установку контактных датчиков или показывающих приборов для контроля температуры по ряду технических причин, либо установка и монтаж подобных датчиков и приборов затруднена. Ввиду



актуальности такой проблемы были разработаны специальные инфракрасные термометры (пирометры), позволяющие измерять температуру в труднодоступных и вращающихся элементах оборудования.

Принцип действия пирометра основан на измерении мощности теплового излучения объекта измерения преимущественно в диапазонах инфракрасного излучения и видимого света. При этом происходит преобразование потока инфракрасного излучения от объекта, принимаемого чувствительным элементом, в электрический сигнал, пропорциональный спектральной плотности мощности потока излучения. Пирометр имеет ряд преимуществ по сравнению с контактными термометрами, основные из них это - точность и скорость измерения, измерение температуры движущихся и труднодоступных элементов оборудования, отсутствие потери энергии объекта, отсутствие механического воздействия на объект и др.

Особого внимания заслуживают приборы для диагностики теплового состояния технологического оборудования бесконтактным методом, получившие название тепловизоров, позволяющих осуществлять съемку и визуализацию тепловой картины поверхности оборудования. Физической основой для создания тепловизора послужил эффект, связанный со способностью некоторых веществ (материалов) изменять свои электрические свойства (в частности проводимость) под воздействием электромагнитного излучения в диапазоне от 0,75 до 1000 мкм. – инфракрасном диапазоне.

Тепловизоры могут быть с азотным охлаждением, собранными на матрицах полупроводниковых фотоприемников, обеспечивающих нормальное функционирование приемных устройств, а также (новые модели) – с используемыми вместо дорогостоящей охлаждающей аппаратуры неохлажденными микроболометрами из кремния. Они состоят из оптической системы - объектива, фокусирующего тепловой поток от объекта на чувствительный элемент – приемник инфракрасного излучения и блока обработки для представления тепловой карты (термограммы) объекта в виде, удобном для анализа.

Тепловое изображение объекта в этих приборах проецируется на экран, покрытый тонким слоем вещества, меняющего свои оптические характеристики под воздействием теплового излучения. В качестве температурно-чувствительных веществ используют жидкие кристаллы, люминофоры, полупроводниковые пленки и т. д. Распределение температуры может отображаться не только на экране, но и в памяти тепловизора, который в этом случае применяется в комплекте с компьютером и



программным обеспечением, позволяющим осуществлять оперативную обработку информации для ее дальнейшего использования при разработке мероприятий по управлению тепловыми смещениями.

Пример использования тепловизора при исследовании тепловых смещений ШУ приведен выше (п.3).

## **5. Способы управления тепловыми смещениями технологического оборудования**

Для уменьшения тепловых смещений ШУ и снижения их влияния на параметрическую надежность технологического оборудования применяются следующие методы.

- Выбор рациональной компоновки оборудования с учетом направления и значения тепловых смещений ШУ;
- выбор типа опор ШУ по свойству тепловыделения с учетом характеристик их точности, жесткости, демпфирования, быстроходности и долговечности.
- применение систем охлаждения и подогрева ШУ и других элементов оборудования;
- управление взаимным расположением обрабатываемой заготовки и режущего инструмента путем коррекции его положения с помощью управляющих программ на станках с ЧПУ с учетом установленных величин и закономерностей изменения во времени (прогнозирования) тепловых смещений ШУ.
- особого внимания заслуживает метод, основанный на применении тепловых труб, позволяющих отводить теплоту на теплосъемник-холодильник, перераспределять теплоту между элементами оборудования, обеспечивая тепловой баланс и стабильность положения узлов, а, значит, и параметрическую надежность технологического оборудования.
- для эксплуатации прецизионного технологического оборудования, к которому предъявляются повышенные требования по теплоустойчивости, оказывающей доминирующее влияние на параметрическую надежность данного оборудования, создаются термоконстантные цеха.

Согласно [6], все методы можно отнести к двум основным направлениям: 1) организационно-технические, технологические и конструкторские мероприятия, обеспечивающие высокую сопротивляемость технологического оборудования и, в первую очередь, его ШУ тепловым воздействиям; 2) компенсация тепловых смещений.

При применении методов первого направления параметрическая надежность повышается за счет обеспечения высокой сопротивляемости станков тепловым воздействиям (использования инвара для нагреваемых деталей, применения механизмов с высоким КПД- пар качения, безредукторного привода и др.), изоляции их от этих воздействий (использования разделительных экранов, термоконстантных помещений, выноса источников тепловыделений за пределы станка и т.п.), создания

рациональной конструкции элементов станка с минимальным влиянием их нагрева на точность обработки (создания симметричных конструкций, изменения направления деформаций и др.), проектирования технологии обработки с учетом тепловых деформаций (поверхности, связанные точными размерами, нужно обрабатывать непосредственно друг за другом; при обработке – устанавливать деталь с учетом величины и направления деформаций и т.д.). Анализируя методы данного направления, следует отметить, что возможности их ограничены - они могут до некоторой степени уменьшить величину тепловыделений или влияния их на параметрическую надежность, но устранить это влияние полностью подобными методами нельзя. Организационно-технические и технологические мероприятия в большинстве случаев не учитывают случайный характер тепловых смещений, не исключают влияние источников тепла, а конструкторские мероприятия имеют сравнительно узкую область применения, причем поиск рациональных конструкций сложен. В связи с этим все большее внимание уделяется второму направлению повышения параметрической надежности станков – методам компенсации тепловых смещений. В основе этих методов лежит создание саморегулируемых (самоприспосабливающихся) станков, точность работы которых изменяется в заданных пределах при влиянии источников тепла станка и окружающей среды. Компенсацию смещений осуществляют относительными перемещениями обрабатываемой заготовки и режущего инструмента, в первую очередь, с учетом величины и закономерности тепловых смещений ШУ.

## **5.1 Выбор компоновки оборудования**

При выборе компоновки технологического оборудования (особенно прецизионного) необходимо придавать первостепенное значение критерию теплоустойчивости.

В общем случае, при сравнении компоновок технологического оборудования предпочтение должно отдаваться таким вариантам, при которых обеспечиваются минимальные относительные тепловые смещения обрабатываемых заготовок и режущих инструментов. Важным является наиболее полный учет направлений крепления режущих инструментов и тепловых смещений ШУ вместе с обрабатываемыми заготовками.

Величину и направление тепловых смещений ШУ можно регулировать с помощью выбора сочетания направляющих разных профилей. Рассмотрим, например, три возможных варианта установки ШУ на направляющих токарного станка. Первый вариант - передняя направляющая имеет

треугольный профиль (призматическая), а задняя - прямоугольный; второй вариант – обе направляющие призматические; третий вариант – ШУ установлен на трех направляющих: передняя и задняя направляющие имеют прямоугольный профиль, а средняя (треугольного профиля) расположена строго в плоскости, проходящей через ось шпинделя. Тепловые смещения ШУ в горизонтальном направлении, влияющие на размерную точность обработки, принимают максимальные значения в первом случае, снижаются - во втором случае и сводятся к минимуму - в третьем случае, так как тепловые смещения корпуса ШУ будут направлены в обе стороны от средней призматической направляющей, не оказывая существенного влияния на изменение первоначального положения оси шпинделя и обрабатываемой заготовки. Такая конструкция ШУ называется осесимметричной.

Создание рациональных компонок, обеспечивающих параметрическую надежность технологического оборудования, требует применения соответствующих расчетных схем и использования экспериментальных данных о тепловых характеристиках прототипов разрабатываемого оборудования.

Рациональность компоновки технологического оборудования по критерию теплоустойчивости определяется степенью восприимчивости, инвариантности к внешним и внутренним тепловым воздействиям, а также способностью компенсации возникающих тепловых смещений путем легко реализуемой поднастройки оборудования в процессе его эксплуатации.

## **5.2 Выбор типа опор ШУ**

В качестве опор ШУ применяются подшипники, тип, конструкция и параметры которых отличаются весьма широким разнообразием.

Для уменьшения тепловых смещений ШУ и обеспечения параметрической надежности технологического оборудования подбор подшипников должен осуществляться по их тепловым характеристикам и свойству тепловыделения. Именно энергетические потери в опорах различных типов определяют избыточные температуры ШУ и, следовательно, его тепловые смещения в процессе эксплуатации. Так, например, энергетические потери наиболее широко используемых в опорах ШУ подшипников качения определяются собственно трением качения, трением тел качения о сепаратор и бурты колец (у роликоподшипников) и другими свойственными подшипникам качения факторами. Более значительные суммарные энергетические потери в гидростатических опорах складываются из потерь на вязкое трение в масляных слоях опор и затрат мощности, необходимой на прокачивание смазочной жидкости через опору

при установленном давлении. Газостатические и электромагнитные опоры, у которых отсутствует механический контакт между шпинделем и опорой, находят ограниченное применение в ШУ в виду их малой нагрузочной способности (газостатические) и сложности электронных систем управления (электромагнитные).

В настоящее время для снижения энергетических потерь в опорах ШУ и обеспечения его теплоустойчивости предлагается использование керамики для изготовления шариков, используемых в подшипниках качения. Применение в подшипниках ШУ керамических элементов качения, обладающих по сравнению со стальными шариками меньшей (на 60%) массой, позволяет резко увеличить скорость, обеспечить термостойкость и длительный срок службы. Повышенное теплообразование в подшипниках качения со стальными шариками во многом связано с явлением холодного микросваривания материалов шариков и подшипниковых колец, что обуславливает изменение шероховатости поверхностей шариков и колец, приводящее к повышенной генерации тепла и увеличению тепловых смещений ШУ. Применение подшипников с керамическими телами качения устраняет этот недостаток.

Следует подчеркнуть, что при выборе в качестве опор ШУ термоустойчивых подшипников необходимо учитывать предъявляемые к ним требования по точности, жесткости, демпфированию и другим показателям.

### **5.3 Применение тепловых труб [6]**

Применение тепловых труб, помимо их прямого назначения, позволяет на этапе эксплуатации технологического оборудования в определенной степени компенсировать недостатки решений, принятых при разработке конструкции и компоновки оборудования без достаточно полного учета влияния на него тепловых факторов.

Тепловая труба представляет собой замкнутый герметичный сосуд любой формы, боковая поверхность которого выложена капиллярно-пористым веществом, пропитанным рабочей жидкостью. Воздух из трубы удален, объем заполнен парами рабочей жидкости или смесью паров и газов. Если к одному из концов трубы подвести источник тепла  $Q_{\text{подв}}$ , то жидкость внутри нее начнет испаряться и кипеть. При этом часть тепла уйдет на парообразование. Давление у другого (холодного) конца трубы мало, поэтому пар устремится туда, унося с собой тепло. У холодной стенки тепловой трубы пар будет конденсироваться. При этом будет выделяться

тепло  $Q_{\text{отв}}$ . Образовавшаяся жидкость по капиллярам трубы будет возвращаться назад, здесь вновь испаряться и т.д.

Таким образом, теплопередача осуществляется за счет поглощения тепла при испарении и выделении его при конденсации. Это общий принцип действия тепловых труб. В зависимости от условий, в которых происходит тот или иной процесс указанного цикла работы трубы, различают несколько видов конструкций тепловых труб. По способу возврата конденсата в зону испарения трубы подразделяют на фитильные (с использованием капиллярного эффекта), гладкостенные (с использованием магнитных гравитационных, ультразвуковых и других полей) и комбинированные. В тепловых трубах потоки пара и жидкости (конденсата) могут быть встречными (совмещенными) или раздельными. В последнем случае пар перемещается по одной части трубы, а возврат конденсата осуществляется по другой ее части. По связи между зонами испарения и конденсации различают жесткие трубы, не допускающие относительных перемещений этих зон, и гибкие трубы, допускающие такие перемещения. Помимо труб с постоянным термическим сопротивлением, все большее распространение получают регулируемые трубы с переменным термосопротивлением. По рабочему диапазону температур трубы делят на высокотемпературные (свыше 1500 К), умеренного диапазона (300-1500 К) и низкотемпературные (менее 300 К), отличающиеся видом рабочих жидкостей, подбором материалов труб, особенностями теплопереноса. Тепловые трубы не имеют движущихся частей, не потребляют энергии, надежны и долговечны.

Указанные свойства тепловых труб и устройств на их основе позволяют применять их в ШУ для эффективного управления тепловыми смещениями и обеспечения параметрической надежности технологического оборудования.

## **6. Методические указания к лабораторной работе «Исследование тепловых смещений ШУ токарно-винторезного станка»**

Цель работы: исследование тепловых смещений ШУ токарно-винторезного станка путем определения величины и характера изменения параметров траектории движения шпинделя  $X_1^{\text{III}}$  и  $Y_1^{\text{III}}$  при различных частотах вращения шпинделя на протяжении заданных периодов времени в холостом режиме работы станка.

Объект исследования: шпиндельный узел высокоточного токарно-винторезного станка мод. 16К20ВФ1

Применяемые технические средства: в состав испытательного комплекса входят: специальная оправка с контрольной мерой и обрабатываемыми деталями, вихретоковые преобразователи перемещений (ВТПП), приспособление для установки ВТПП, измерительный прибор для измерения малых перемещений и вибраций (ИП), двухлучевой запоминающий осциллограф мод. С8-17.

Специальная оправка состоит из 2-х основных частей: фланца - для закрепления оправки на шпинделе (в полном соответствии способам закрепления патрона) и цилиндрической части - для установки на оправке контрольной меры и обрабатываемых деталей. Контрольной мерой служит изготовленное с регламентированной точностью латунное кольцо, а обрабатываемыми деталями являются стальные кольца. Специальная оправка позволяет производить обработку деталей, изменяя нагрузку на ШУ путем варьирования режимов резания, и одновременно измерять параметры траектории оси шпинделя с помощью ВТПП.

Вихретоковый преобразователь перемещения (ВТПП) конструктивно состоит из обмотки (провода ПЭЛ-0,07, 100 витков) и ферритового сердечника 8 мм. Противоположный относительно обмотки конец сердечника закрепляется в металлическом корпусе, выполненном в виде втулки. Достоинства ВТПП: простота конструкции, высокая чувствительность, высокая динамическая точности, надежность, в данном диапазоне измерения параметров траекторий функция преобразования близка к линейной с заданной точностью.

Для установки двух ВТПП с зазором в пределах до 1мм относительно контрольной меры в вертикальной и горизонтальной плоскостях, проходящих через ось шпинделя, служит приспособление (жесткая рама), которое крепится к направляющим станка. Регулировка положения ВТПП осуществляется с помощью подвижных переходных втулок,

устанавливаемых в отверстиях верхней планки и боковой стойки приспособления.

Изменение зазора между торцевой поверхностью ВТПП и наружной цилиндрической поверхностью латунного кольца (контрольной меры) вследствие перемещений шпинделя под воздействием нагрузок вызывает изменение индуктивности ВТПП, который входит в резонансный контур.

Прибор ИП состоит из стабилизированного блока питания и двух измерительных каналов. Прибор построен по методу измерения амплитуды высокочастотного напряжения на параллельно резонансном контуре.

Контур питается от генератора тока стабильной частоты изменяет модуль своего полного сопротивления на частоте питания при изменении зазора между поверхностью контрольной меры и торцевой поверхностью ВТПП. Катушка ВТПП является катушкой индуктивности резонансного контура.

Структурная схема прибора ИП приведена на рис.10. Высокочастотный сигнал (1 МГц) с задающего генератора поступает через истоковый повторитель на усилитель мощности. Нагрузкой усилителя мощности является параллельный резонансный контур. Изменение индуктивности контура приводит к амплитудной модуляции высокочастотного сигнала низкочастотным сигналом, повторяющим перемещения шпинделя с оправкой и контрольной мерой относительно ВТПП. С резонансного контура амплитудно-модульный сигнал подается через истоковый повторитель на амплитудный детектор. Продетектированный низкочастотный сигнал вместе с постоянной составляющей усиливается в усилителе постоянного тока и поступает на выходы для подключения осциллографа.

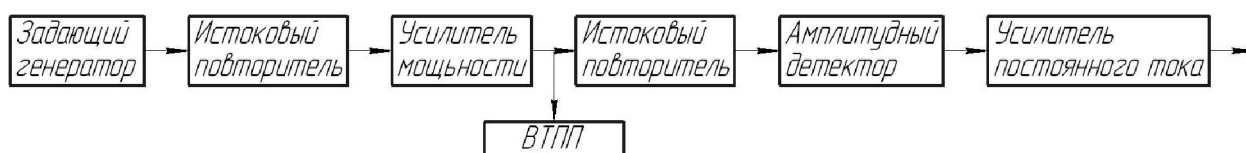


Рис.10 Структурная схема прибора ИП

Двухлучевой запоминающий осциллограф мод. С8-17 выбран в связи с тем, что, во-первых, позволяет исследовать замкнутые кривые – круговые траектории движения (для этого осциллограф может работать в режиме  $yI-xI$ , т.е. выход усилителя  $y2$  подключается к горизонтально отклоняющим пластинам первого луча –  $xI$ ), и, во-вторых, имея помимо двух записывающих прожекторов с отклоняющими пластинами, воспроизводящий прожектор с элементами памяти и покрытия люминофором экран, дает возможность фиксировать на длительное время (запоминать) изображения исследуемых траекторий при любой частоте вращения шпинделя с целью их



последующего анализа; причем после выключения прибора полученное ранее изображение траектории может быть воспроизведено на экране включением осциллографа в сеть питания не позднее, чем через 7 суток.

Измерение параметров тепловых смещений ШУ  $X_1^{\text{III}}$  и  $Y_1^{\text{III}}$  (по траекториям движения оси шпинделя).

При испытании ШУ, в результате перемещения шпинделя в процессе разогрева оборудования происходит изменение первоначально установленного зазора между контрольной мерой и ВТПП. Сигналы об изменении зазора с ВТПП через 1-й и 2-й каналы прибора ИП-22 поступают на входы усилителей вертикального - с ВТПП №1  $y/I$  и горизонтального - с ВТПП №2  $x/I$  отклонения осциллографа С8-17, суммируются и на экране преобразуются в изображение замкнутой кривой - траектории оси шпинделя. Запись траектории за один оборот шпинделя при различной частоте его вращения обеспечивается путем подбора соответствующего коэффициента развертки. Размеры изображений исследуемых траекторий на экране осциллографа зависят от выбранных коэффициентов вертикального и горизонтального отклонения.

Для установления действительной величины параметра траектории оси шпинделя (в мкм) необходимо выполнить следующие операции.

Определить напряжение сигнала на экране осциллографа, соответствующее величине исследуемого параметра на изображении траектории. Для этого исследуемый параметр измеряется по шкале (в делениях) и полученный результат умножается на выбранный при записи коэффициент отклонения ( $V/\text{деление}$ ).

Действительная величина параметра траектории ( $x_i$ ) определяется из соотношения:

$$X_i = x_j / S$$

$x_j$  - величина параметра на изображении траектории (в  $V$ );

$S$  - чувствительность измерительной схемы (в  $V/\text{мкм}$ ).

Характеристика ВТПП при изменении зазора в пределах  $\pm 35 \text{ мкм}$  линейна,

$S = 50 \text{ мВ/мкм}$  (рис. 11). Для описания линейной зависимостью соотношения между изменением зазора и показаниями осциллографа пользуются методом наименьших квадратов.

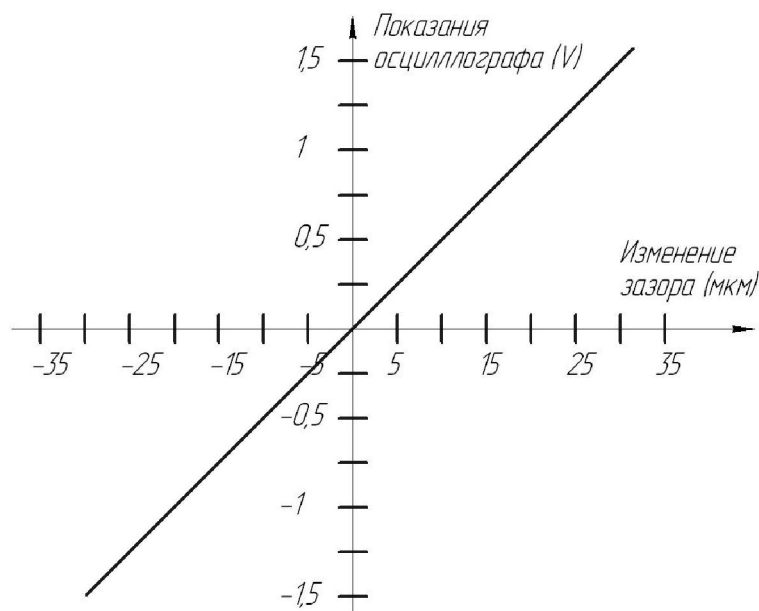


Рис.11 Характеристика ВТПП

Подготовка испытательного комплекса к работе и порядок выполнения исследований.

1. Подключить станок к сети питания.
2. Включить двигатель гидростанции (для подачи смазочной жидкости в ГСО под давлением).
3. Закрепить специальную оправку на шпинделе. Конечный выключатель на передней стенке шпиндельной бабки должен находиться в положении, предотвращающем возможность включения шпинделя.
4. Установить на специальную оправку контрольную меру.
5. Закрепить приспособление (жесткую раму) на направляющих станка.
6. Ввернуть ВТПП в переходные втулки и закрепить в приспособлении: ВТПП №1 в отверстии верхней планки, ВТПП №2 – в отверстии боковой стойки.
7. Установить зазор между торцевой поверхностью ВТПП и цилиндрической поверхностью контрольной меры  $\Delta_0 = 500 \text{ мкм}$ .
8. Подключить ВТПП, прибор ИП в осциллограф С8-17 по схеме указанной на рис. 6: ВТПП №1 – канал №1 (на схеме –  $y1$ ) прибора ИП – усилитель  $y1$  осциллографа С8-17, ВТПП №2 – канал №2 (на схеме –  $x1$ ) прибора ИП – усилитель  $y2$  (на схеме –  $x1$ ) осциллографа С8-17.
9. Перед проведением измерений после включения приборы должны быть прогреты в течение 15-30 минут.
10. Произвести настройку измерительных каналов прибора ИП.
  - 10.1 Нажать кнопку "контроль" соответствующего канала.
  - 10.2 Переключатель "усиление" устанавливается в положение "0"

10.3 Переключателем "зазор" (нажатием кнопок), установить стрелку измерительного прибора в положение, наиболее близкое к нулевой отметке.

10.4 Ручкой "уст.0" установить стрелку на нулевую отметку.

11. Подготовить осциллограф С8-17 к исследованию траекторий оси шпинделя.

11.1 Выполнить операции, изложенные в руководстве по подготовке осциллографа к измерениям.

11.2 Для исследования траекторий оси шпинделя тумблер на верхней панели осциллографа перевести в положение  $y_2-x_1$ .

11.3. Вывести «зайчик» на середину экрана.

11.4 Выбрать коэффициенты отклонения усилителей и коэффициент разверток (в зависимость от частоты вращения шпинделя).

11.5 При исследовании траекторий в обычном осциллографическом режиме нажать кнопку «без запоминания».

а) установить заданную частоту вращения и включить шпиндель;

б) по изображению траектории на экране осциллографа проверить правильность коэффициента отклонения.

11.6 Нажатием соответствующей кнопки на лицевой панели перевести осциллограф в режим запоминания.

а) подготовка экрана к записи траектории производится нажатием кнопки «стирание»;

б) установить заданную частоту вращения и включить шпиндель;

в) нажатием кнопки «готов» произвести однократный запуск развертки получив на экране осциллографа изображение траектория оси шпинделя;

г) нажать кнопку «пуск шкалы», определить параметры траектории оси шпинделя;

12 Провести измерение параметров тепловых смещений ШУ  $X_1^{III}$  и  $Y_1^{III}$ .

12.1 Выбрать частоту вращения шпинделя из верхней части диапазона ее регулирования для ускорения процесса разогрева оборудования.

12.2 Провести наблюдение за изменением начального положения траектории движения шпинделя через установленные интервалы времени; осуществить периодическую запись траекторий на экране осциллографа в режиме запоминания и измерение параметров  $X_1^{III}$  и  $Y_1^{III}$ .

12.3 Полученные значения измеряемых параметров занести в протоколы.

12.4 По результатам измерения построить графики.

12.5 Оценить полученные результаты и сделать выводы.

Ограниченное время выполнения лабораторной работы при большой продолжительности процесса разогрева оборудования даже на максимальных

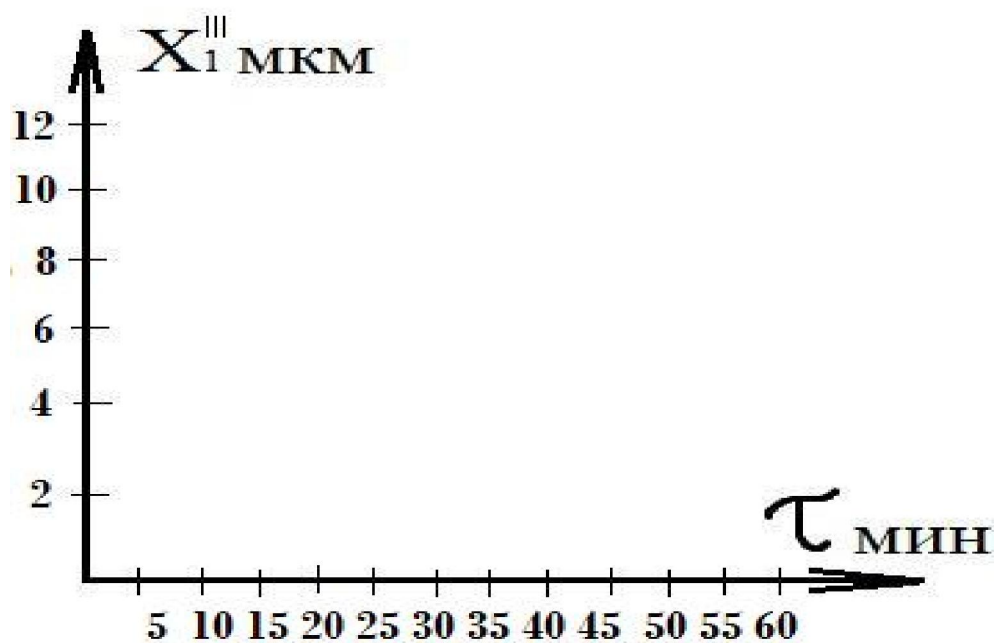
частотах вращения шпинделя не позволяет накапливать объем данных, необходимый для статистической обработки результатов и получения статистической информации о тепловых смещениях ШУ.

Таблица №3

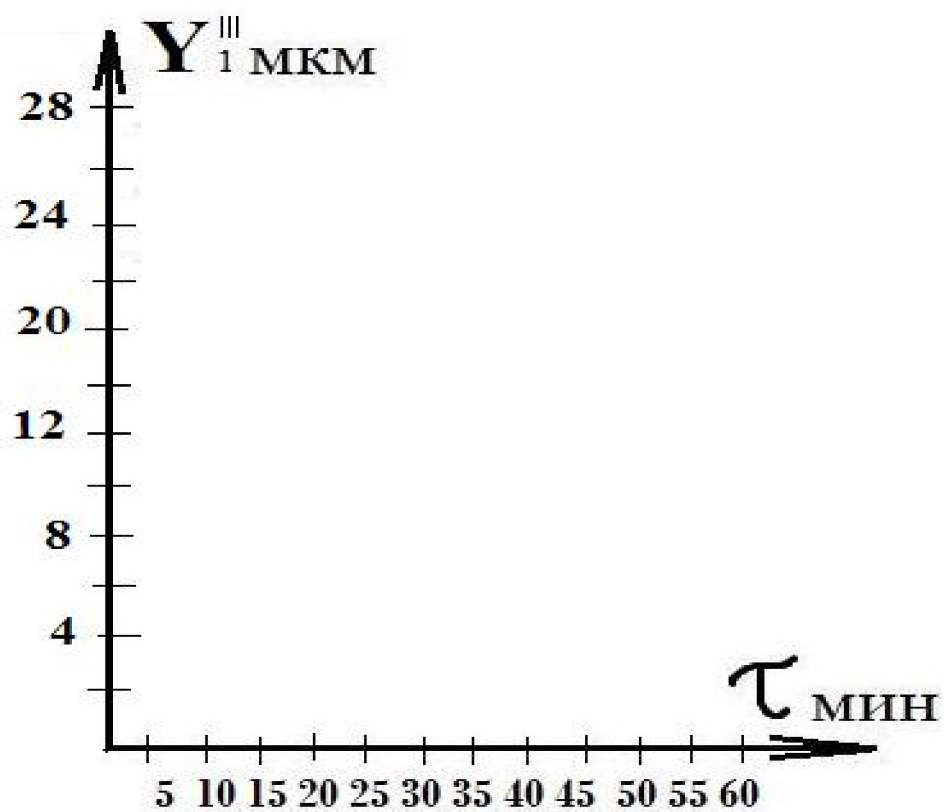
Частота вращения шпинделя $n, \text{мин}^{-1}$	Величина теплового смещения ШУ $X_1^{\text{III}}$											
	Время $\tau$ , мин											
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	

Таблица №4

Частота вращения шпинделя $n, \text{мин}^{-1}$	Величина теплового смещения ШУ $Y_1^{\text{III}}$											
	Время $\tau$ , мин											
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	



а)



б)

Рис.11 Тепловые смещения ШУ в: а) горизонтальном направлении; б) в вертикальном направлении

Выводы по результатам проведенных исследований:

---

---

---

---

---

---

### **Литература**

1. Бушуев В.В. Тенденции развития мирового станкостроения.//Станки и инструмент. – 2000. - №9. – С.20 – 24.
2. Пуш А.В., Иванников С.Н., Пхакадзе С.Д., Телегин Ю.А.. Базы исходных данных для проектирования и исследования станков. // Станки и инструмент. – 1992. – №11. – С. 3-8.
3. Форсейт Дж., Малькольм М., Моулер К. Машинные методы математических вычислений. – М.: Мир. – 1980. – 279 с.
4. Пуш А.В. Исследования шпиндельных узлов методом статистического моделирования. // Станки и инструмент. – 1981. - №1. – С. 9 – 12.
5. Надёжность и диагностика технологического оборудования. Учебное пособие. // Иванников С.Н., Кузьминский Д.Л. – 1-ое издание. – М.: МГТУ «МАМИ». – 2010. – 44 с.
6. Юрин В.Н. Повышение технологической надёжности станков. – М.: Машиностроение. – 1981. – 78 с.

Учебное издание

**Иванников Сергей Николаевич**  
**Манаенков Игорь Владиславович**

**НАДЕЖНОСТЬ И ДИАГНОСТИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО  
ОБОРУДОВАНИЯ. ЧАСТЬ 2 (теплоустойчивость)**

*Под редакцией авторов*  
*Оригинал-макет подготовлен редакционно-издательским отделом*  
*Университета машиностроения*

По тематическому плану внутренних изданий учебной литературы на  
2013 г., доп.

Подписано в печать 19.12.12 Формат 60х90 1/16 Бумага 80 г/м<sup>2</sup>  
Гарнитура «Таймс». Ризография. Усл.печ.л. 2,5  
Тираж 30 экз. Заказ № 1-13

Университет машиностроения  
107023, г. Москва, Б.Семеновская ул., 38