

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ СТАНКОВ

А.Н. Поляков, А.Г. Кравцов



**ПОЛЯКОВ
Александр
Николаевич**

Доцент, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Металлообрабатывающие станки и комплексы» Оренбургского государственного университета. Специалист в области тепловых исследований металлорежущих станков, численных методов моделирования. Автор более 100 научных трудов, разработчик программных средств теплового моделирования станков и тепловых испытаний.

Введение

Анализ опыта ведущих отечественных и зарубежных станкостроительных фирм показывает, что одним из важнейших резервов обеспечения высокого качества металлорежущих станков является обеспечение их теплоустойчивости. Теплоустойчивость станка позволяет реализовывать современные методы высокоскоростной металлообработки, гарантирует высокие показатели надежности, геометрической точности и обеспечивает размерную точность обработки, приближающейся к микронной отметке.

© Поляков А.Н., Кравцов А.Г., 2005

Теплоустойчивость станка должна обеспечиваться на различных этапах жизненного цикла станка. Опыт производителей прецизионных станков (фирмы: Okuma, Hardinge, Kitamura, Nakamura Tome, Cincinnati Lamb, Fadal, Makino, Yamazak Mazak, DMG-Deckel Maho, Emag, Ex-Cell-O, Sterlitamak M.T.E. и др.) показывает, что большое значение в создании конкурентоспособного оборудования имеет эффективность использования различных систем диагностирования. В данной работе рассмотрено построение и использование автоматизированной системы диагностирования термодформационного состояния станка (АСД ТДСС) на этапах его изготовления и эксплуатации.



**КРАВЦОВ
Александр
Григорьевич**

Старший преподаватель кафедры «Металлообрабатывающие станки и комплексы» Оренбургского государственного университета. Специалист в области тепловых испытаний металлорежущих станков. Автор 18 научных работ.

Основные функции АСД ТДСС

На этапе изготовления станка система диагностирования используется при его доводке и приемо-сдаточных испытаниях. На этапе эксплуатации предусматриваются пуско-наладочные работы, планово-предупредительный ремонт (ППР) и внеплановый ремонт. В общем случае, этап эксплуатации станка может завершаться его капитальным ремонтом. С точки зрения функционального обеспечения разрабатываемой АСД ТДСС последовательность использования данной системы на этих этапах совпадает, поэтому капитальный ремонт может быть объединен с внеплановым ремонтом.

Для обеспечения теплоустойчивости станков на различных этапах жизненного цикла система диагностирования должна осуществлять сбор и обработку экспериментальной информации.

Обработка экспериментальной информации в АСД ТДСС предполагает наличие следующих блоков:

– аппроксимации экспериментальных кривых температур $T(t)$ и температурных перемещений $\delta(t)$;

– прогнозирования функций $T(t)$, $\delta(t)$ и $\delta(T)$ как тепловых характеристик станка;

– идентификации и оптимизации ТДСС.

Аппроксимация экспериментальных кривых позволяет сформировать функции для температур и температурных перемещений $T(t)$ и $\delta(t)$ от времени t , которые затем используются для прогнозирования в алгоритмах идентификации и оптимизации ТДСС.

Прогнозирование функций $T(t)$, $\delta(t)$, $\delta(T)$ представляет собой процедуру экстраполяции этих функций на временной интервал, превышающий длительность натурных испытаний станка. Спрогнозированные функции параметрически отличаются от функций, сформированных при аппроксимации экспериментальных кривых, хотя структура функций при аппроксимации и прогнозировании идентична. Это объясняет необходимость использования в АСД ТДСС блока аппроксимации.

Блок идентификации в АСД ТДСС устанавливает причины возникновения температурных погрешностей, а блок оптимизации формирует возможные варианты обеспечения теплоустойчивости станка.

На основе анализа работ, выполняемых на различных этапах жизненного цикла станка (таблица), можно выделить следующие факторы, определяющие теплоустойчивость станка, и влияние которых можно установить с помощью АСД ТДСС:

- натяг в опорах и направляющих;
- качество обработки подвижных и неподвижных стыков;
- состояние и режимы работы системы смазывания опор и направляющих;
- состояние и режимы работы системы термостабилизации;
- режим компенсации температурной погрешности, реализуемый в устройствах числового программного управления (УЧПУ).

Перечисленные факторы зависят от ряда параметров, диапазон изменения которых определяется этапом жизненного цикла станка и учитывается при идентификации и оптимизации ТДСС в виде параметрических ограничений.

Результаты обработки экспериментальной информации позволяют корректировать температурную погрешность станка путем формирования управляющих команд устройства ЧПУ. Отработка управляющих команд выполняется вне системы диагностирования, но АСД ТДСС формирует функции $T(t)$, $\delta(t)$, $\delta(T)$ и устанавливает величину рассогласования вида:

$$|T - T_{\text{э}}| \leq \varepsilon_T \text{ и } |\delta - \delta_{\text{э}}| \leq \varepsilon_{\delta}, \quad (1)$$

где T , $T_{\text{э}}$ – регламентированные техническими условиями и экспериментальные температуры в фиксированных точках станка соответственно; δ , $\delta_{\text{э}}$ – регламентированные техническими условиями и экспериментальные температурные перемещения соответственно; ε_T , ε_{δ} – допустимые погрешности отклонений по температуре и температурным перемещениям соответственно.

Применение АСД ТДСС

Этапы жизненного цикла станка	Перечень работ с использованием АСД ТДСС
Доводка	Получение требуемого натяга в опорах и направляющих, качества обработки подвижных и неподвижных стыков. Формирование режимов работы систем смазывания опор и направляющих, термостабилизации. Формирование режима компенсации температурной погрешности, реализуемого в УЧПУ.
Пуско-наладочные работы	Проверка режимов работы систем смазывания опор и направляющих, термостабилизации. Проверка режима алгоритма компенсации температурной погрешности, реализуемого в УЧПУ.
Мониторинг	Сбор экспериментальной информации о температурах в фиксированных точках станка и о температурных перемещениях. Обработка экспериментальных данных.
Плановый и внеплановый ремонты	Регулировка натяга в опорах и направляющих. Обслуживание систем смазывания и термостабилизации. Обработка подвижных и неподвижных стыков. Корректировка режимов компенсации температурной погрешности и термостабилизации.
Реконструкция	Обработка подвижных и неподвижных стыков. Разработка системы термостабилизации, режимов компенсации температурной погрешности и термостабилизации.

Исключение рассогласований (1) обеспечивает компенсацию температурной погрешности.

По результатам работы АСД ТДСС можно провести корректировку плана ремонта станка и значит увеличить срок службы станка. План ремонта станка корректируется в том случае, если при мониторинге или в ходе периодических испытаний станка установлено рассогласование температур и температурных перемещений, которое не может быть скомпенсировано предусмотренными алгоритмами коррекции температурной погрешности станка. Своевременно выполненные ремонтные работы позволяют увеличить срок службы станка. Так, например, система мониторинга шпиндельных узлов станков, установленных на заводе Steyr фирмы BMW, позволяет повысить срок службы шпинделей на 25%, а стоимость ремонта снизить на 35% [1].

В настоящее время разработаны два блока системы АСД ТДСС, выполняющие аппроксимацию экспериментальных кривых $T(t)$, $\delta(t)$, $\delta(T)$ и прогнозирование температур и температурных перемещений. Программные модули блоков написаны с использованием математического пакета Matlab.

В качестве базового математического аппарата для решения задач аппроксимации и прогнозирования экспериментальных кривых использовался экспериментальный модальный анализ.

Модальное представление температурной характеристики станка $T_{ij}(t_j)$ в фиксированной i -й точке в j -й момент времени описывается функцией вида:

$$T_{ij}(t_j) = \sum_{k=1,4,\dots,3m-2} x_k (1 - e^{-t_j/x_{k+1}}) + \sum_{k=1,4,\dots,3m-2} x_{k+2} e^{-t_j/x_{k+1}}, \quad (2)$$

где m – число температурных мод; x_k, x_{k+1}, x_{k+2} – модальные параметры ($x_{1,4,\dots,3m-2}$ – уровень установившихся температур; $x_{2,5,\dots,3m-1}$ – тепловые постоянные времени температурных мод; $x_{3,6,\dots,3m}$ – начальные температуры моды).

Модальное представление температурных перемещений $\delta_{ij}(t_j)$ осуществляются в виде аналогичных функций, только в этом случае используется термин «мода температурных перемещений». Поскольку регулярный режим нагревания станка определяется первой температурной модой, то качество прогнозирования термомодеформационного состояния станка полностью определяется точностью прогнозирования модальных параметров x_1, x_2 и x_3 для первой моды.

Определение модальных параметров x_k производилось путем решения задачи оптимизации вида:

$$\min J(U_i) \text{ и } \min J(V_p), p \rightarrow X, Y, Z, \quad (3)$$

$$U_i \in R^n \quad V_p \in R^n$$

где $J(U_i)$ – целевая функция для температурных характеристик $T_i(t)$; $J(V_p)$ – целевая функция для температурных перемещений $\delta_p(t)$; U_i , V_p – векторы соответствующих модальных параметров x_k ; p – индекс оси базовой системы координат.

Целевые функции $J(U_i)$ и $J(V_p)$ для фиксированной температурной характеристики $T_i(t)$ и фиксированной характеристики температурных перемещений станка $\delta_p(t)$ имеют вид:

$$J(U_i) = \sum_{j=1}^{n_t} |T_i(t_j) - T_{эi}(t_j)|; \quad J(V_p) = \sum_{j=1}^{n_t} |d_p(t_j) - d_{эp}(t_j)|,$$

$$p \rightarrow X, Y, Z, \quad (4)$$

где n_t – число интервалов времени, в которые измерялись температуры; i – номер фиксированной точки станка, в которой установлен термодатчик ($i \in [1, n_s]$, n_s – число точек измерения температуры станка); $T_{эi}(t_j)$ – экспериментальное значение температуры в фиксированный момент времени в фиксированной i -й точке станка; $\delta_{эp}(t_j)$ – температурное перемещение в фиксированный момент времени t_j .

В данном модуле предусмотрены следующие расчетные процедуры:

- интерполяция и экстраполяция экспериментальных кривых на фиксированном интервале времени;

- интерполяция и экстраполяция экспериментальных кривых температуры и температурных перемещений по экспериментальным данным в фиксированные моменты времени;

- расчет средних значений первых и вторых производных температур и перемещений по времени в фиксированные интервалы времени и построение по ним соответствующих функциональных зависимостей $T(t)$, $\delta(t)$;

- расчет установившейся температуры по темпу нагревания;

- расчет доверительного интервала температурных координатных перемещений;

- построение поверхностей температурных перемещений при фиксированном значении погрешности измерений;

- построение кривых температурных перемещений $\delta_x(T)$ и $\delta_z(T)$ с доверительными интервалами.

Интерполяция и экстраполяция экспериментальных кривых

При интерполяции экспериментальных кривых учитывается длительность натурного эксперимента, а при экстраполяции – время диагностирования.

Характер экспериментальных кривых (комбинация участков кривой с выпуклостью вверх и вниз) определяется числом учитываемых мод [2]. Наличие двух участков экспериментальных кривых $T(t)$ с выпуклостями вниз и вверх (S-образный характер) [3] требует учета минимум двух мод. Более точная аппроксимация экспериментальных кривых при выполнении условия (1) требует использования трех и более мод. Поэтому в исходных данных при интерполяции и экстраполяции кривых вводится такой параметр, как «число учитываемых мод».

Поскольку поиск модальных параметров производился из решения задачи оптимизации, необходимо назначить начальную точку оптимизации. Ранее проведенные исследования [2, 4] показали, что в наибольшей степени решение такой задачи зависят от выбора тепловой постоянной времени первой моды x_2 . Поэтому начальная точка оптимизации формировалась путем задания совокупности значений параметра x_2 , а для всех остальных принимались фиксированные значения. Для автоматической генерации начальной точки оптимизации в системе использован стохастический подход. Для его реализации использовались такие параметры: $x_{2,min}$ – минимальное значение тепловой постоянной времени; $x_{2,max}$ – максимальное значение тепловой постоянной времени, n_m – число интервалов для поиска первой моды.

При прогнозировании термдеформационного состояния станка важно иметь возможность внесения возмущений в экспериментальные данные, так как это дает возможность учитывать погрешности измерений, вызываемых различными факторами. Поэтому был предусмотрен второй вид расчета: интерполяция и экстраполяция экспериментальных кривых по экспериментальным данным в фиксированные моменты времени. В этом расчете используется до четырех значений температуры T_1, T_2, T_3, T_4 в фиксированные моменты времени t_1, t_2, t_3, t_4 .

Назначение фиксированных экспериментальных точек используется для определения модальных параметров первой температурной моды x_1, x_2 и x_3 . Поэтому все точки температуры (по времени) на тепловой характеристике выбираются на участке регулярного режима нагревания. Наиболее точно этот режим устанавливается по кривым 3-го рода [2, 4], являющихся кривыми интервальных значений вторых производных температуры по времени.

Для предварительной оценки качества интерполяции и экстраполяции экспериментальных кривых предусмотрен расчет и построение средних значений первых и вторых производных температуры и перемещений по времени в каждой i -й фиксированной точке станка для каждого фиксированного момента времени t_j :

$$\bar{V}_{T_i}(t_j) = \frac{T_i(t_j) - T_i(t_{j-1})}{\Delta t},$$

$$\bar{a}_{T_i}(t_j) = \frac{\bar{V}(t_j) - \bar{V}(t_{j-1})}{\Delta t}, j = 1, \dots, n_p,$$

где $\Delta t = t_j - t_{j-1}$ – интервал времени.

Расчет установившейся температуры производился по темпу нагревания [5], вычисляемого по температурной характеристике $T(t)$. Выполнив некоторые преобразования для темпа нагревания, получим формулу для вычисления прогнозируемой установившейся температуры $T_{уст}$ в фиксированной точке станка по трем значениям температуры в различные моменты времени:

$$T_{уст} = (T_2^2 - T_1 T_3) / (2T_2 - T_1 - T_3),$$

где T_1, T_2, T_3 – температуры в первый, второй и третий моменты времени. При расчете задает-

ся только первый момент времени, остальные моменты времени фиксируются с интервалом 30 мин. Изменения значения температуры $T_{уст}$ в зависимости от выбранного первого момента времени выступают дополнительным критерием точности выбора начального времени аппроксимации (НВА).

На практике в термдеформационное состояние работающего станка вносятся случайные воздействия, определяемые, например, изменением температуры окружающей среды, случайными процессами во всех системах, оказывающих влияние на его теплоустойчивость, погрешностями измерительной аппаратуры, установленной на станке. Поэтому при прогнозировании термдеформационного состояния станка необходимо переходить от детерминированных математических моделей к стохастическим. Для этого в программном модуле предусмотрено формирование и построение совокупности случайных реализаций тепловых характеристик. На рис. 1 показаны две поверхности в системе координат « $t - n_{cp} - \delta_p$ » (t – интервал времени; n_{cp} – номер случайной реализации; δ_p – перемещение точки в направлении координатной оси) для плоскошлифовального станка модели ШПХ 32.11, для которого ранее были выполнены натурные тепловые испытания [6–8].

Поверхности получены с использованием функции программы Matlab, формирующей данные, подчиняющиеся нормальному распределению.

По результатам натурных испытаний устанавливается среднее квадратическое отклонение σ (СКО), но при моделировании тепловых характеристик для задания σ используется правило «трех сигм» [9] и учитывается установленный из опыта натурных испытаний станков уровень погрешностей измерений в пределах $\pm 5\%$ в каждый момент времени. Тогда СКО для каждого температурного координатного перемещения определяется согласно зависимости:

$$\sigma = 0,1\delta_p(t)/6,$$

где δ_p – температурное перемещение в направлении координатной оси.

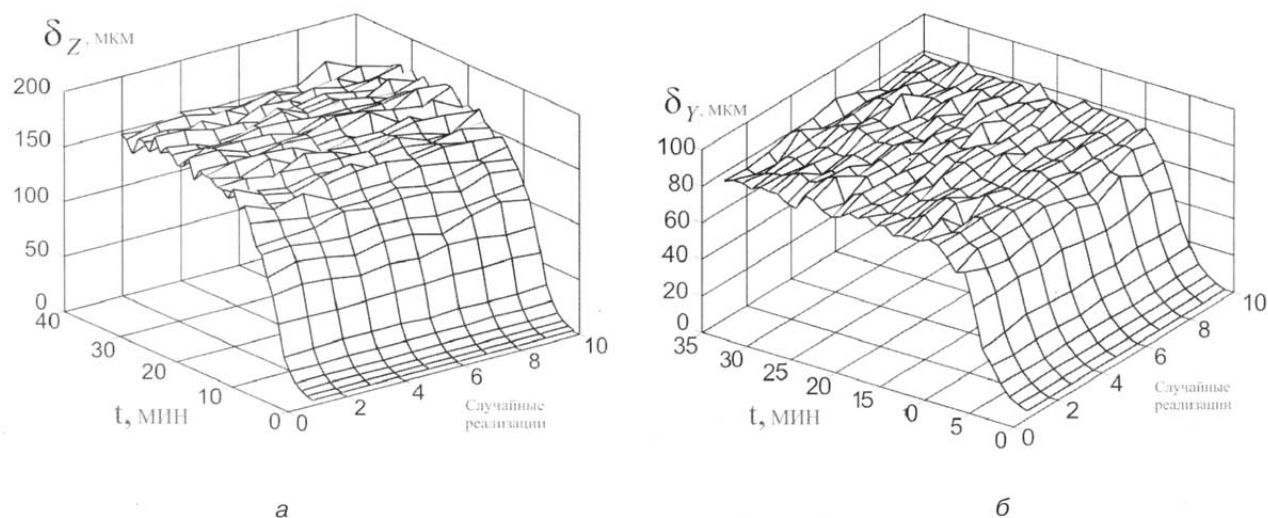


Рис. 1. Случайные поверхности в системе координат « $t - n_{cp} - \delta_p$ » для плоскошлифовального станка:
а – для перемещения δ_z ; б – для перемещения δ_y

Полученные поверхности используются для формирования доверительного интервала температурных перемещений.

Принимая доверительную вероятность $\beta = 0,95$, полуширина доверительного интервала имеет вид [9]:

$$\varepsilon_{\delta} = 1,96\sigma.$$

Вычисленные в каждый момент времени стандартные отклонения используются для формирования доверительных интервалов вида:

$$\Delta T_i(t) = [T_i(t) - \varepsilon_i(t), T_i(t) + \varepsilon_i(t)];$$

$$\Delta \delta_p(t) = [\delta_p(t) - \varepsilon_{\delta}(t), \delta_p(t) + \varepsilon_{\delta}(t)],$$

где ε_i , ε_{δ} – соответственно стандартные отклонения для температуры и перемещений в фиксированные моменты времени.

Зная функциональные зависимости $T_i(t)$, $\delta_p(t)$ и соответствующие им доверительные интервалы $\Delta \delta_p(t)$ и $\Delta T_i(t)$, можно построить пространственные кривые $\delta_p(T_i)$. На рис. 2 приведены варианты пространственных кривых $\delta_x(T_4)$ и $\delta_z(T_4)$ с учетом доверительных интервалов для $\Delta \delta_x(t)$, $\Delta \delta_z(t)$ и $\Delta T_4(t)$. Аналогичные функциональные зависимости можно получить не только для температуры T_4 , но и для всех измеренных температур T_i .

Для использования полученных пространственных кривых в системе диагностирования можно предложить такую последовательность действий:

1) на предприятии-изготовителе станка формируются данные $\delta'_x(T)$, $\delta'_y(T)$, $\delta'_z(T)$ и вносятся в графическом, функциональном и числовом виде в паспорт станка (те же действия могут быть выполнены после пуско-наладочных работ на предприятии, эксплуатирующем данный станок);

2) в соответствии с графиком плановых профилактических осмотров станка осуществляются его тепловые испытания и проводится обработка данных с использованием программного модуля системы, по итогам которых формируется новый набор данных $\delta'_x(T)$, $\delta'_y(T)$, $\delta'_z(T)$;

3) выполняется анализ полученных результатов, устанавливаются причины возникновения параметрических отказов (в ходе идентификации ТДСС) и формируется пакет мероприятий по устранению выявленных причин.

Если станок снабжен системой ЧПУ, поддерживающей режим компенсации температурных погрешностей, то в этом случае последовательность использования разработанного программного модуля выглядит таким образом:

1) на предприятии-изготовителе станка формируются данные $\delta_x(T)$, $\delta_y(T)$, $\delta_z(T)$ и вносятся в соответствующий блок станка с ЧПУ (либо программирование осуществляется по результатам тепловых испытаний после пуско-

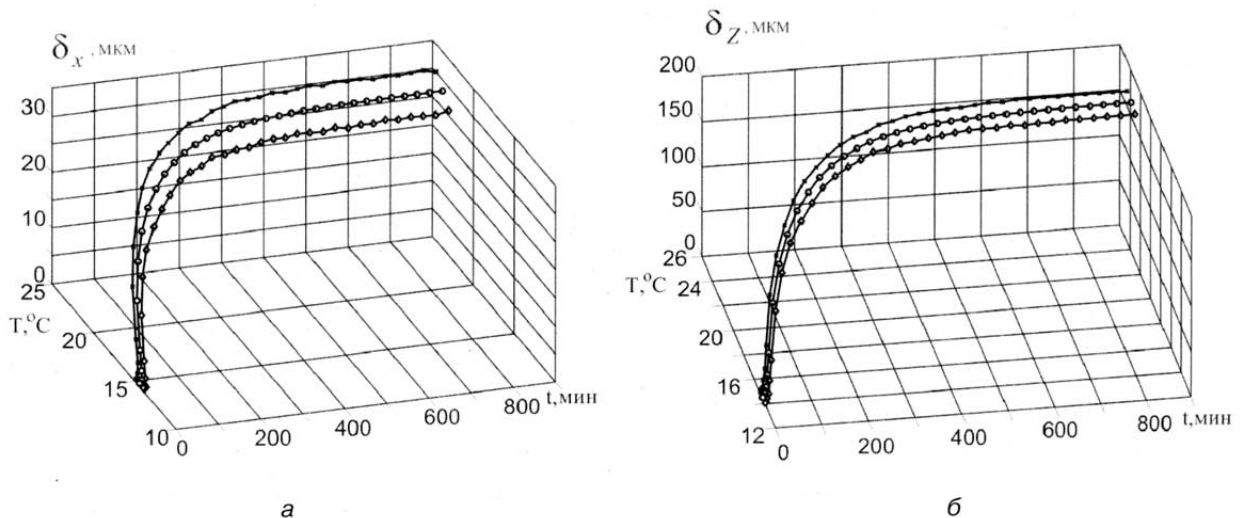


Рис. 2. Пространственные кривые температурных перемещений с доверительными интервалами:
а – $\delta_x(T_4)$; б – $\delta_z(T_4)$

наладочных работ станка на предприятии, эксплуатирующем данный станок);

2) составляется программа управляющих воздействий на все системы станка, влияющих на формирование его термодформационного состояния, чтобы обеспечить попадание фактических температурных перемещений $\delta_x(T)$, $\delta_y(T)$, $\delta_z(T)$ в доверительный интервал, сформированный на первом этапе. Особенность программирования для станка с ЧПУ зависит от технического оснащения станка, обеспечивающего его теплоустойчивость с учетом таких факторов, как технический уровень систем охлаждения и подогрева, систем смазывания, конструктивные особенности станка для компенсации температурных погрешностей.

По результатам проведенных вычислительных экспериментов было установлено, что наибольшее влияние на качество экстраполяции тепловых характеристик станка оказывает выбор моментов времени t_1 и t_4 . Именно для их более точной оценки был разработан второй программный модуль – модуль автоматизированной оценки длительности натурального эксперимента.

Второй модуль принципиально отличается от первого тем, что наряду с применением фиксированного значения НВА (t_1) используются диапазон значений НВА $t_1 \in [t_{1,min}, t_{1,max}]$ и диапазон значений для длительности натурального эксперимента $t_4 \in [t_{4,min}, t_{4,max}]$.

Несмотря на то, что момент времени t_1 может быть установлен по кривым 3-го рода, вычислительные эксперименты показали, что момент времени t_1 в отдельных случаях может быть принят ближе ко времени начала эксперимента t_0 , что позволяет существенно сократить длительность натурального эксперимента. Это особенно существенно при небольшой длительности эксперимента. Такая картина проявляется при доминировании первой температурной моды.

По результатам вычислительного эксперимента была получена поверхность выбора времени начальной аппроксимации t_1 . Методика этого вычислительного эксперимента на основе анализа поверхности, образованной в системе координат «диапазон НВА – интервал времени t_4 – модальный параметр x_2 » заключалась в следующем: 1) назначался диапазон длительности натурального эксперимента $t_4 [t_{4,min}, t_{4,max}]$ и задавались девять временных интервалов из этого диапазона (число интервалов принималось только исходя из удобства визуального анализа поверхности – теоретических ограничений не было); 2) на основе предварительно установленного значения t_1 с использованием первого программного модуля назначался диапазон значений НВА и задавалось число временных интервалов N_{HBA} из этого диапазона; 3) выполнялись интерполяция и экстраполяция

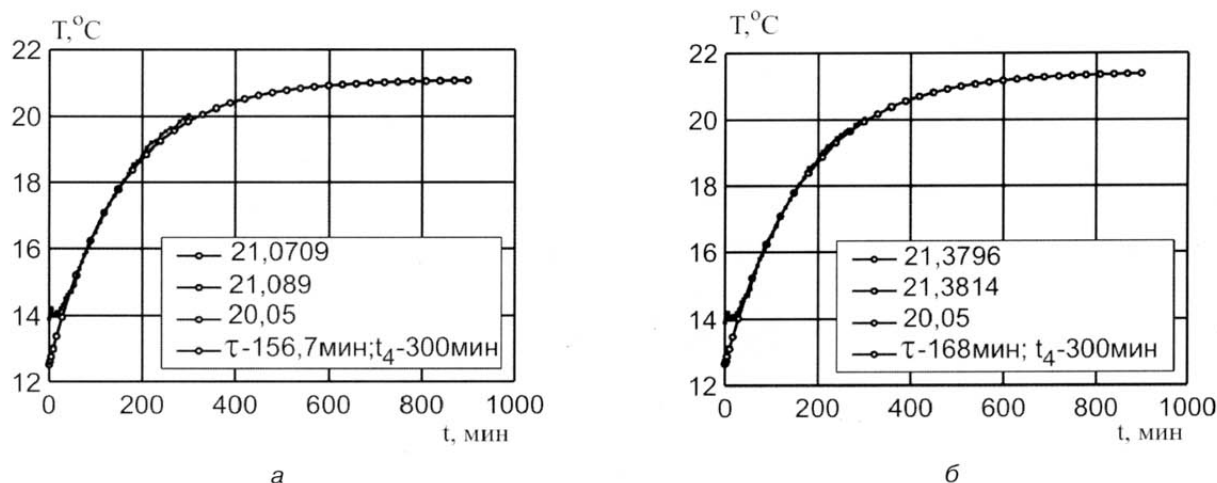


Рис. 3. Результаты интерполяции и экстраполяции в фиксированной точке станка для двух температурных возмущений: а – ($-0,2^{\circ}\text{C}$); б – ($-0,1^{\circ}\text{C}$)

экспериментальных тепловых характеристик для семейства из девяти значений времени t_4 при $N_{\text{НВА}}$ значений времени t_1 и определялись искомые модальные параметры x_k .

В качестве примера на рис. 3 приведены результаты расчетов для двух фиксированных точек станка с температурными возмущениями ($-0,2^{\circ}\text{C}$) и ($-0,1^{\circ}\text{C}$), соответственно. «Легенда» каждого графика включает четыре строчки. Первая и вторая строчки – значения минимальной и максимальной установившейся температуры. Третья строчка – значение зафиксированной температуры натурных испытаний станка. Четвертая строчка – значения тепловой постоянной времени (τ) первой температурной моды и текущей длительности натурального эксперимента (t_4), для которого выполнялась интерполяция и экстраполяция теплового состояния станка. Анализ полученных результатов показывает, что оба возмущения приводят к увеличению погрешности аппроксимации на участке интерполяции тепловой характеристики при некотором уменьшении тепловой постоянной времени. Выполняя аналогичные расчеты для положительных значений возмущений и сопоставляя полученные результаты с результатами при нулевом возмущении, получим среднее значение для модального параметра $x_2 = 180$ мин. При этом средняя прогнозируемая максимальная температура составила $21,6^{\circ}\text{C}$.

Анализ полученной поверхности выбора начального времени аппроксимации для перемещения $\delta_y(t)$ (рис. 4) показывает, что наименьшее значение для тепловой постоянной времени первой температурной моды получается при длительности тепловых испытаний, превышающем 200 мин, и значении НВА, равном 100 мин. В этом случае диапазон изменения параметра $x_2 \in [110, 120]$.

Проведенные вычислительные эксперименты позволили предложить алгоритм, позволяющий гарантированно определять тепловую постоянную времени первой температурной моды и необходимую длительность натурных тепловых испытаний станка для прогнозирования термодформационного состояния станка с заданной точностью.

Алгоритм реализуется следующим образом:

- выполняется интерполяция и экстраполяция по трем модам;
- выполняется анализ кривых 1-го, 2-го и 3-го рода, по которым оцениваются модальные параметры и параметры регулярного режима: критерий инвариантности решений – разброс минимальных и максимальных значений прогнозируемых значений температуры не должен превышать $0,1^{\circ}\text{C}$; однозначное фиксирование НВА;
- если полученные результаты не выявляют первую температурную моду, то выполня-

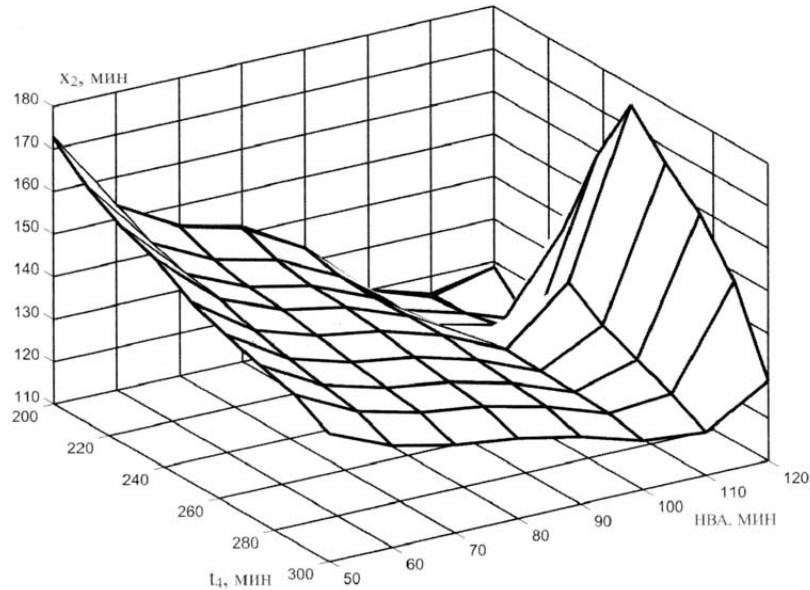


Рис. 4. Поверхность выбора НВА для температурного перемещения $\delta_y(t)$

ется переход к блоку аппроксимации по диапазону НВА с последующим построением поверхностей выбора времени начальной аппроксимации, в противном случае осуществляется переход к следующему блоку;

г) если поверхность выбора НВА (см. рис. 4) позволяет однозначно определить параметры НВА и длительность натурных испытаний t_4 , то используется аппроксимация тепловых характеристик станка без возмущений теплового состояния станка в последний момент времени для фиксированного диапазона времени, в противном случае – аппроксимация тепловых характеристик станка с возмущением теплового состояния станка.

Заключение

Выполненные исследования с использованием автоматизированной системы теплового диагностирования станка позволили сделать следующие выводы.

1. Программный модуль экспериментального модального анализа термодформационного состояния станка позволяет по данным натурного эксперимента с высокой точностью прогнозировать во времени термодформационное состояние станка (погрешность прогно-

зирования до 5 %), а полученные результаты в виде функций перемещений $\delta_x(T)$, $\delta_y(T)$, $\delta_z(T)$ могут использоваться как при диагностике термодформационного состояния станка, так и для компенсации температурных погрешностей при составлении программ для интеллектуальных систем ЧПУ.

2. Вычислительные эксперименты с использованием второго программного модуля показали:

а) для прогнозирования температурных перемещений и установившихся температур с погрешностью до 5% в условиях непрерывного режима работы станка длительность натурных тепловых испытаний составляет удвоенное значение первой температурной моды;

б) для оценки первой температурной моды можно применять метод аппроксимации тепловых характеристик станка, использующий одну моду и экспериментальные значения температур и температурных перемещений при регулярном режиме нагревания станка;

в) на точность определения первой температурной моды и первой моды температурных перемещений станка наибольшее влияние оказывают точность определения начала регулярного режима и длительность натурных тепловых испытаний;

г) определение модальных параметров первой моды с погрешностью 10 % может быть выполнено с использованием алгоритма аппроксимации возмущенного состояния тепловых характеристик.

3. Высокая точность прогнозирования тепловых характеристик станка позволяет в модуле идентификации разрабатываемой АСД ТДСС использовать в качестве экспериментальных данных о термдеформационном состоянии станка спрогнозированные характеристики, полученные по результатам работы двух первых модулей.

Список литературы

1. Потапов В.А. Обзор зарубежных изданий // Вестник машиностроения. 2005. № 3. С. 94-96.
2. Поляков А.Н. Компьютерные исследования тепловых деформаций металлорежущих станков. Методы, модели и алгоритмы: Уч. пособ. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2003. – 382 с.
3. Волосов С.С. Основы точности активного контроля размеров. – М.: Машиностроение, 1969. – 356 с.
4. Поляков А.Н. Сокращенные тепловые испытания станков // СТИН. 2002. № 8. С. 15–19.
5. Лыков А. В. Теория теплопроводности. – М.: Высш. шк., 1967. – 600 с.
6. Поляков А.Н., Терентьев А.А. Тепловые испытания плоскошлифовального станка с горизонтальным шпинделем // Проектирование технологических машин: Сб. науч. тр. Вып. 25 / Под ред. А.В. Пуша. – М., Ростов-на Дону: ГОУ ДПО «ИУИ АП», 2001. С. 66–70.
7. Хомяков В.С., Досько С.И., Поляков А.Н. Анализ эффективности построения термоупругой модели плоскошлифовального станка с использованием объемных призматических элементов // Проектирование технологических машин: Сб. науч. тр. Вып. 25. – М., Ростов-на Дону: ГОУ ДПО «ИУИ АП», 2001. С. 50–61.
8. Поляков А.Н., Кравцов А.Г. Модальный анализ экспериментальных температурных характеристик плоскошлифовального станка // Вестник Оренбургского государственного университета. 2002. № 5. С. 149–152.
9. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1969. – 576 с.