

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра металлообрабатывающих станков и комплексов

А.Н. ПОЛЯКОВ, А.Г. КРАВЦОВ

ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАНКОВ

МЕТОДИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Рекомендовано к изданию Редакционно – издательским советом
государственного образовательного учреждения высшего профессионального
образования «Оренбургский государственный университет»

Оренбург 2006

УДК 681.51/54(075.8)

ББК 32.815я7

П 78

Рецензент

кандидат технических наук, доцент Михайлов В.Н.

П 78

Поляков А.Н., Кравцов А.Г.

Обработка экспериментальных тепловых характеристик станков: методическое руководство к лабораторной работе. Оренбург: ГОУ ОГУ, 2006. – 21с.

Методическое руководство рекомендуется использовать при выполнении лабораторных работ по дисциплинам: «Надежность и диагностика технологических систем», «Математическое моделирование процессов в машиностроении» и «Тепловые деформации станков» для специальности 151002.65 для студентов очной и заочной форм обучения.

ББК 32.815 я 7

© Поляков А.Н., 2006

© ГОУ ОГУ, 2006

Содержание

Введение.....	4
1 Цель лабораторной работы.....	5
2 Теоретические положения.....	5
2.1 Тепловые характеристики станка.....	5
2.2 Построение аппроксимирующих кривых.....	8
2.3 Пример выполнения машинных экспериментов.....	10
3 Порядок выполнения лабораторной работы.....	13
4 Содержание отчета.....	13
5 Контрольные вопросы.....	14
6 Список использованных источников.....	15
Приложение А. Варианты экспериментальных тепловых характеристик для прогнозирования.....	16
Приложение Б Первое рабочее окно автоматизированной системы прогнозирования.....	19
Приложение В Главное рабочее окно модуля экспериментального модального анализа термомодеформационного состояния станка.....	20

Введение

Анализ опыта ведущих отечественных и зарубежных станко-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. Актуальность теплоустойчивости станков подчеркивает тот факт, что по экспертным оценкам американских заказчиков обрабатывающих центров средний показатель приоритетности показателя «термостабильность» (аналог терминов «теплоустойчивость» и «теплостойкость», используемых в отечественной литературе) составляет 64,9% и занимает 16 место из 33 регистрируемых показателей.

Теплоустойчивость станка должна обеспечиваться на различных этапах жизненного цикла станка. Окончательная доводка станка осуществляется по результатам приемо-сдаточных испытаний, когда станок непрерывно функционирует под рабочей нагрузкой. На основе анализа опыта производителей прецизионных станков огромное значение в создании конкурентоспособного оборудования имеет эффективность использования автоматизированных систем испытаний и диагностирования.

Данное руководство иллюстрирует пример реализации методологии прогнозирования тепловых характеристик станков при обработке экспериментальных данных, полученных в ходе натурных тепловых испытаний станков.

1 Цель работы

Изучение автоматизированной системы прогнозирования тепловых характеристик металлорежущих станков и приобретение практических навыков по ее использованию при обработке экспериментальных данных, полученных из натуральных тепловых испытаний станка.

2 Теоретические положения

2.1 Тепловые характеристики станка

Для описания термодформационного состояния станка используют экспериментальные тепловые характеристики в виде двух семейств [1]. Первое семейство составляют температурные характеристики в виде функций температуры и соответствующих интервальных значений скоростей и ускорений изменений температуры в отдельных точках станка во времени, $T(t)$, $\overset{\circ}{T}(t)$ и $\overset{\circ\circ}{T}(t)$, соответственно. Второе семейство составляют подобные характеристики температурных перемещений во времени: $\delta_{x,y,z}(t)$, $\overset{\circ}{\delta}_{x,y,z}(t)$ и $\overset{\circ\circ}{\delta}_{x,y,z}(t)$ для осей X, Y и Z, соответственно. Для лаконичности изложения материала, для температурных характеристик и характеристик температурных перемещений ранее следует использовать термины «кривые температуры и кривые температурных перемещений I-го, II-го и III-го родов» [2-4]. Кривые температуры (температурных перемещений) I-го рода представляют собой функциональную зависимость температуры (температурных перемещений) от времени. Кривые температуры (температурных перемещений) II-го рода представляют функциональные зависимости интервальной скорости изменения температуры (температурных перемещений) во времени. Кривые температуры (температурных перемещений) III-го рода представляют функциональные зависимости интервального ускорения изменения температуры (температурных перемещений) во времени. Если интервальная скорость получается отношением избыточной температуры за фиксированный интервал времени к этому интервалу времени, то интервальное ускорение получается отношением изменения интервальной скорости за фиксированный интервал времени к этому интервалу времени.

Для кривых II-го и III-го родов ординаты вычисляются:

$$\overset{\circ}{T}_i(t_{k+1}) = \frac{T_i(t_{k+1}) - T_i(t_k)}{\Delta t}; \overset{\circ}{\delta}_{x,y,z}(t_{k+1}) = \frac{\delta_{x,y,z}(t_{k+1}) - \delta_{x,y,z}(t_k)}{\Delta t} \quad (1)$$

$$\overset{\circ\circ}{T}_i(t_{k+1}) = \frac{\overset{\circ}{T}_i(t_{k+1}) - \overset{\circ}{T}_i(t_k)}{\Delta t}; \overset{\circ\circ}{\delta}_{x,y,z}(t_{k+1}) = \frac{\overset{\circ}{\delta}_{x,y,z}(t_{k+1}) - \overset{\circ}{\delta}_{x,y,z}(t_k)}{\Delta t} \quad (2)$$

где $\Delta t = t_{k+1} - t_k$ - интервал времени, между двумя измерениями в моменты времени t_{k+1} и t_k , соответственно; $\delta_{x,y,z}$ - температурные перемещения вдоль осей **X**, **Y** и **Z**; **i** - индексация номеров термодатчиков.

На рисунках 1 и 2 приведены кривые температуры и температурных перемещений I-го, II-го и III-го родов для отдельных станков по данным работы [1]. Кривые 1 и 2 построены по результатам экспериментальных исследований плоскошлифовального станка высокой точности мод. ШПХ32.11. Кривая 1 представляет температурную характеристику, снятую для шлифовального суппорта на частоте **3000 мин⁻¹**; кривая 2 - на частоте **1500 мин⁻¹**, соответственно. Кривая 3 иллюстрирует температурную характеристику, снятую на наружном кольце передней опоры (три радиально-упорных подшипника, установленных по схеме «тандем - O») электрошпинделя. Кривая 4 - температурная характеристика станка **6P82Г**, полученная при измерении температуры на подшипниковой крышке передней опоры шпинделя, частота вращения шпинделя **1600 мин⁻¹**. Кривая 5 - температурная характеристика шпиндельной бабки широкоуниверсального станка высокой точности **Deckel FP3** на частоте вращения шпинделя **2500 мин⁻¹**. Кривая 6 – температурная характеристика станины двустороннего торцешлифовального станка мод. **ЗА343АДФ2**. Кривая 7 - температурная характеристика, снятая в ходе стендового эксперимента, имитирующего изменение теплового состояния базовой детали станка. Кривая 8 – температурная характеристика, снятая в ходе эксперимента на многоцелевом станке высокой точности мод. **MC 12-250 M1-2**.

Анализ кривых II-го рода показывает наличие двух участков.

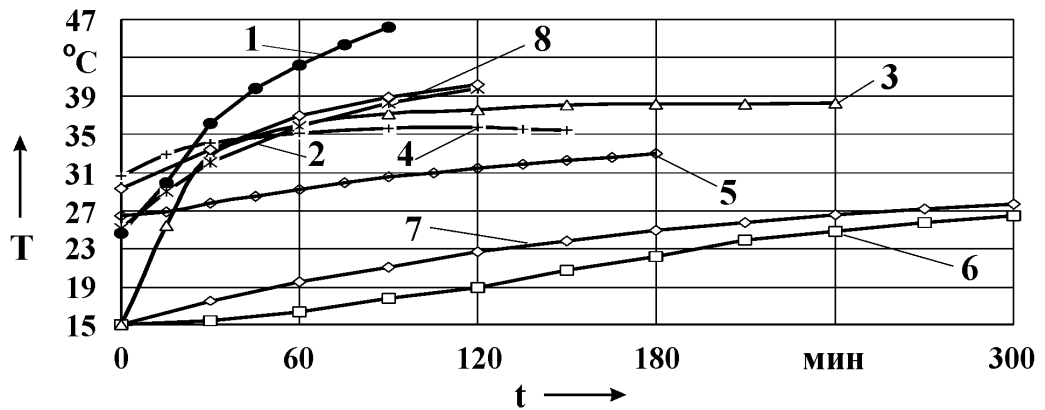
Первый участок – это «колоколообразный» участок с явно выраженным экстремальным значением максимума. Величина этого максимума, отражает интенсивность протекания теплового процесса, и исполняет роль интегрального показателя теплового процесса. Это объясняется тем, что величина максимума пропорциональна: тепловой инерционности станка; мощности теплового воздействия, фиксируемой в этой точке; кондуктивному и конвективному теплообмену.

Второй участок не имеет экстремумов и отражает равномерное изменение температуры. Его наличие характеризует регулярный режим нагревания [1, 5, 6]. Регулярный режим нагревания переходит в установившийся температурный режим. Однако, по кривой II-го рода не всегда удастся точно установить как начало регулярного режима, так и начало режима температурной стабилизации, поэтому используются кривые III-го рода. Точка перегиба для кривой II-го рода соответствует наступлению регулярного режима нагревания, описываемого одной температурной модой. Соответственно, на кривой III-го рода фиксируется экстремальная точка «минимум», по которой фиксируется регулярный режим нагревания. Кривые II-го и III-го родов существенно зависят от качества экспериментальных данных, поэтому не всегда удается построить гладкую кривую III-го рода.

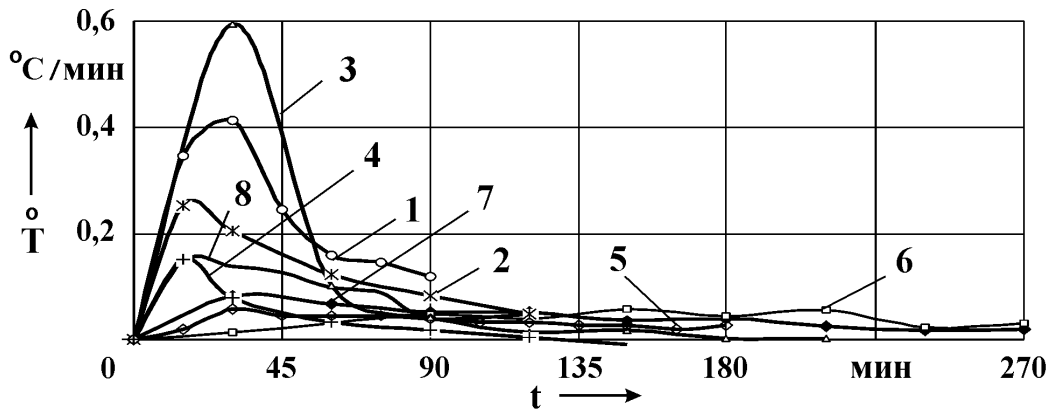
Практика тепловых испытаний станков показывает, что начало режима

температурной стабилизации может быть достаточно точно установлено из анализа кривой III-го рода только в отдельных случаях (кривая 3, рисунок 1, кривая 5Z_2, рисунок 2).

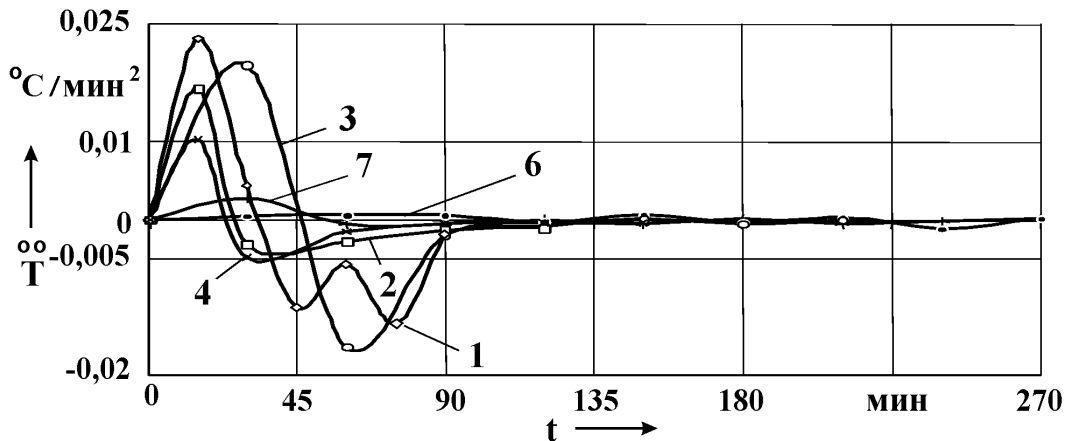
КРИВЫЕ ТЕМПЕРАТУР I-ГО РОДА



КРИВЫЕ ТЕМПЕРАТУР II-ГО РОДА



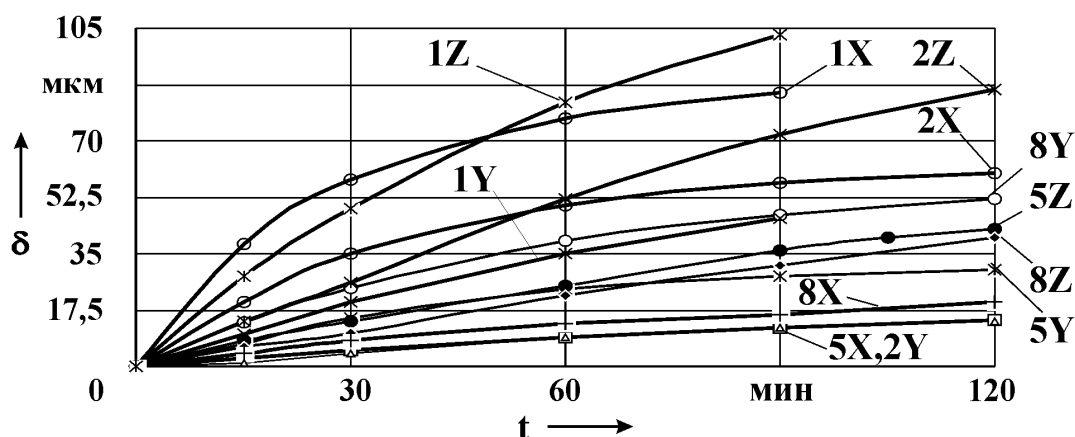
КРИВЫЕ ТЕМПЕРАТУР III-ГО РОДА



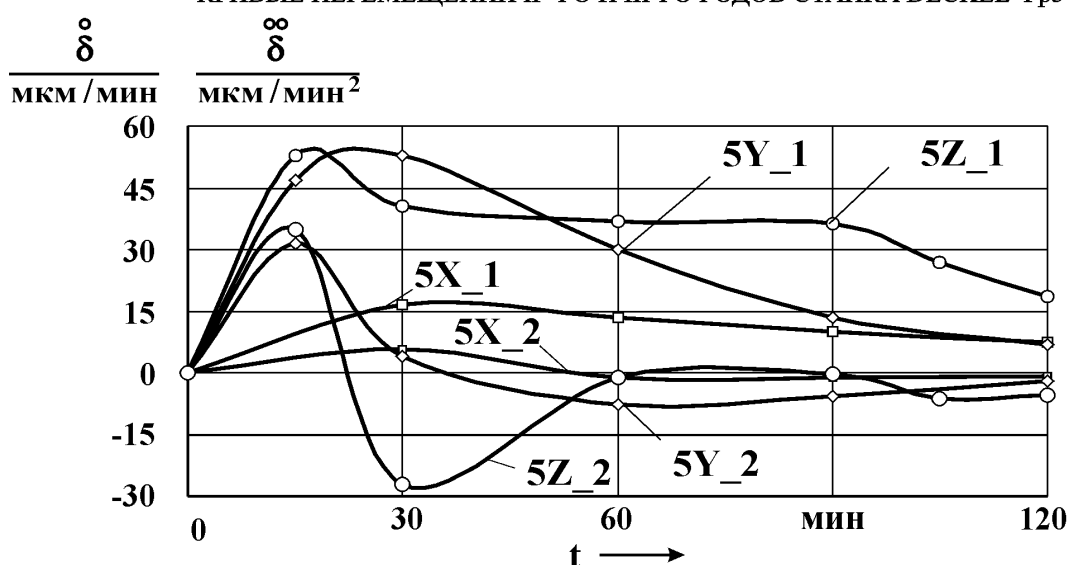
1, 2 – плоскошлифовальный станок ШПХ32.11 для $n=3000$ и $n=1500$ об/мин; 3 – электрошпиндель; 4 – фрезерный станок 6P82Г, $n=1600$ об/мин; 5 – шпиндельная бабка фрезерно-сверлильного станка Deckel Fr3, $n=2500$ об/мин; 6 – станина тоцешлифовального станка 3A343АДФ2; 7 – базовая деталь станка; 8 – многоцелевой станок МС 12-250 М1-2

Рисунок 1 - Экспериментальные температурные характеристики станков [1]

КРИВЫЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ I-ГО РОДА



КРИВЫЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ II-ГО И III-ГО РОДОВ СТАНКА DECKEL Fp3



1X, 1Y, 1Z, 2X, 2Y, 2Z – перемещения шлифовального суппорта плоскошлифовального станка ШПХ32.11 для $n=3000$ и $n=1500$ об/мин; 5X, 5Y, 5Z – перемещения шпиндельной бабки фрезерно-сверлильного станка Deckel Fp3; 8X, 8Y, 8Z – перемещения шпиндельной головки многоцелевого станка MC 12-250 M1-2; 5X₁, 5Y₁, 5Z₁ – кривые II-го рода температурных перемещений шпиндельной бабки станка Deckel Fp3; 5X₂, 5Y₂, 5Z₂ – кривые III-го рода температурных перемещений шпиндельной бабки станка Deckel Fp3.

Рисунок 2 - Экспериментальные кривые температурных перемещений I-го, II-го и III-го родов

2.2 Построение аппроксимирующих кривых

Прогнозирование экспериментальных тепловых характеристик станка в тепловых испытаниях станка включает две процедуры аппроксимации экспериментальных кривых температуры и температурных перемещений: интерполяция и экстраполяция. Интерполяция функции осуществляется в пределах времени проведения теплового испытания станка. Экстраполяция осуществляет построение функции за пределами этого времени.

С математической точки зрения задача аппроксимации кривой тривиальная задача. Но для реализации задачи прогнозирования температурной характеристики станка важно использовать такого вида функцию, которая не только наилучшим образом описывает «заданный участок характеристики», но и с наименьшими ошибками прогнозирует температуру в последующие моменты времени, т.е. решает задачу экстраполяции. Под «заданным участком характеристики» понимается участок температурной характеристики, для которого известны экспериментальные значения температуры.

Задача аппроксимации соответствующих температурных характеристик сводится к оптимизационной задаче нескольких переменных с целевой функцией вида:

$$f(T_i(t)) = \sqrt{(T_{i,m}(t) - T_{i,\varepsilon}(t))^2} \quad (3)$$

- при непрерывном времени:

$$f(T_i(t_j)) = \sqrt{\sum_{j=1}^{nt} (T_{i,m}(t_j) - T_{i,\varepsilon}(t_j))^2} \quad (4)$$

- для дискретного времени, т.е. при фиксации температуры лишь в отдельные моменты времени с некоторой периодичностью.

В уравнениях (3) и (4) индекс *i* индицирует соответствующую температурную характеристику. Число интервалов времени, в которые осуществляется измерение температуры, оценивается величиной *nt*; индекс *j* обозначает текущий интервал времени, соответственно. Индексы *m* и *э* означают модельные и экспериментальные значения температуры, соответственно. На практике непрерывное время в тепловых испытаниях станков, имеет лишь теоретический интерес, поэтому в дальнейшем рассматривалось только дискретное время.

Для достижения поставленной цели важен выбор вида функции температур $T_{i,m}(t_j)$. Полиномиальные функции явно не пригодны в этом случае. В ходе машинных экспериментов были получены прекрасные результаты при использовании полиномов седьмой степени, но только для «заданного участка характеристики». Учитывая, что решение для нестационарной задачи теплопроводности наилучшим образом описывается суперпозицией экспоненциальных функций, то для модельных температур функция $T_{i,m}(t_j)$ принималась в виде:

$$T_{ij,m}(t_j) = \sum_{k=1,4,\dots,m-2} x_k (1 - e^{-t_j/x_{k+1}}) + \sum_{k=1,4,\dots,m-2} x_{k+2} e^{-t_j/x_{k+1}} \quad (5)$$

Вид уравнения (5) по структуре идентичен аналитическому решению уравнения нестационарной теплопроводности, в котором параметры: $x_{1,4,\dots,m-2}$ обозначают уровень установившихся температур; $x_{2,5,\dots,m-1}$ - тепловые постоянные времени температурных мод; $x_{3,6,\dots,m}$ - начальная температура моды. Температура, в соответствии с модальным анализом представляет сумму двух процессов: нагрев от нулевой температуры и остывание от начальной температуры. Температура в каждой i -ой точке станка описывается m -парами экспоненциальных функций: восходящих и нисходящих [1, 7].

Центральной процедурой построения температурного поля для модального подхода является решение задачи о собственных значениях. При использовании модального анализа осуществляется переход от физических координат к нормальным. Это позволяет связанную систему, описывающую тепловой процесс в станках, представить в виде совокупности параллельно соединенных апериодических звеньев.

Учитывая линейную связь температуры с температурным расширением металлов, модальный подход может быть применим к температурным перемещениям.

Аргументы экспоненциальных функций и амплитудные коэффициенты находились из решения задачи условной оптимизации при использовании целевой функции вида (4) для температурных характеристик и аналогичного вида для характеристик температурных перемещений:

$$f_{\delta}(\delta_r(t_j)) = \sum_{j=1}^{nt} (\delta_{r,m}(t_j) - \delta_{r,\varepsilon}(t_j))^2, \quad (6)$$

где $\delta_{r,m}(t_j)$, $\delta_{r,\varepsilon}(t_j)$ - модельные и экспериментальные координатные температурные перемещения рабочего органа станка вдоль осей X, Y, Z , соответственно; $r \rightarrow X, Y, Z$.

Решение задачи условной оптимизации выполнялось с использованием алгоритма решения минимаксной задачи оптимизации, в которой осуществляется минимизация максимальных расхождений экспериментальных и модельных значений температуры, вычисляемых в целевых функциях $f(T_i(t_j))$ или $f_{\delta}(\delta_r(t_j))$.

В этом случае формальная постановка задачи оптимизации имеет вид:

$$\min_x \max_f f(T_i(t_j)) \text{ или } \min_x \max_f f_{\delta}(\delta_r(t_j)) \quad (7)$$

Параметрические ограничения для трех групп параметров:

$$\begin{aligned} x_{\min,1,\dots,4,\dots,m-2} \leq x_{1,\dots,m-2} \leq x_{\max,1,\dots,4,\dots,m-2}; \\ x_{\min,2,\dots,5,\dots,m-1} \leq x_{1,\dots,m-1} \leq x_{\max,2,\dots,5,\dots,m-1}; \end{aligned} \quad (8)$$

$$x_{min,3,\dots,6,\dots,m} \leq x_{1,\dots,m} \leq x_{max,3,\dots,6,\dots,m}$$

Минимаксная задача решалась методом последовательного квадратичного программирования (Sequential Quadratic Programming – SQP) [8].

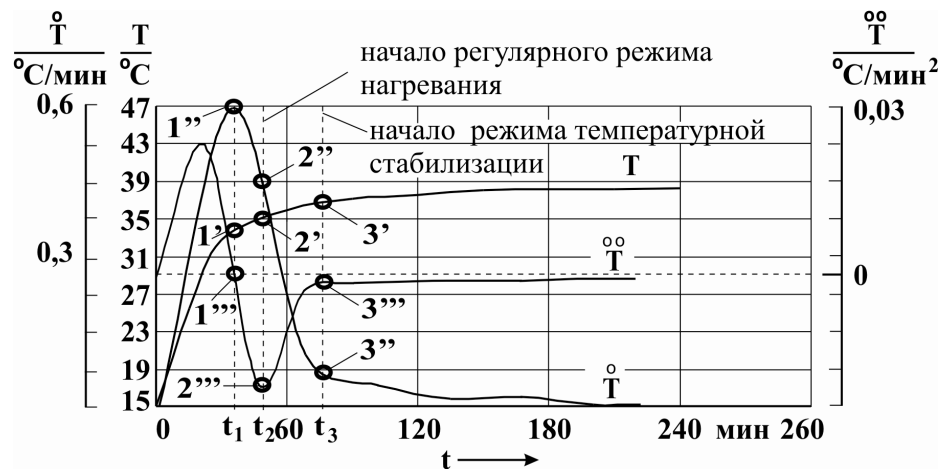
2.3 Пример выполнения машинных экспериментов

На рисунке 3 приведена схема разграничения стадий процесса нагревания по экспериментальным данным, представленным на рисунке 1 (кривая 3). Для разграничения этих стадий определяются экстремальные точки по кривым II-го и III-го родов по зависимостям (1) и (2). Точки «1'''», «2'''» и «3'''» фиксируют моменты времени t_1 , t_2 и t_3 , соответственно:

а) по точке «1'''» устанавливается максимальный рост изменения температуры, фиксируемый на кривой II-го рода; на кривых I-го и III-го родов моменту времени t_1 соответствуют точки «1'» и «1'''»;

б) точка «2'''» - начало регулярного режима; точки «2'» и «2'''» в момент времени t_2 фиксируются на кривых I-го и II-го родов, соответственно;

в) точка «3'''» - начало установившегося режима (режим температурной стабилизации); данная точка фиксирует последний момент времени t_3 , на кривых I-го и II-го рода этому моменту времени соответствуют точки «3'» и «3'''».



1', 1'', 1''', 2', 2'', 2''', 3', 3'', 3''' - экстремальные точки кривых; символы «'», «''», «'''» соответствуют кривым I-го, II-го и III-го родов

Рисунок 3 – Схема разграничения стадий процесса нагревания

Машинные эксперименты для оценки погрешности прогнозирования тепловых характеристик выполняются по следующей программе:

а) аппроксимация экспериментальных тепловых характеристик на всем временном интервале, полученным в натурном эксперименте – полный эксперимент;

б) построение кривых II-го и III-го рода и определение экстремальных точек;

в) формирование различных вариантов неполного эксперимента; проведение интерполяции и экстраполяции и расчет погрешностей построения тепловых характеристик.

На рисунке 4 приведены шесть вариантов прогнозирования температурных характеристик для плоскошлифовального станка ШПХ 32.11, по данным одного датчика. Варианты различаются длиной вектора экспериментальных данных температуры, использованного для аппроксимации и последующего прогнозирования температурной характеристики:

а) в первом варианте длина вектора экспериментальных данных формировалась на временном интервале $t \in [0, t_1]$ (рисунок 4.а);

б) во втором варианте использован временной интервал $t \in [0, t_2]$ (рисунок 4.б);

в) в третьем варианте - временной интервал $t \in [0, t_3]$ (рисунок 4.в);

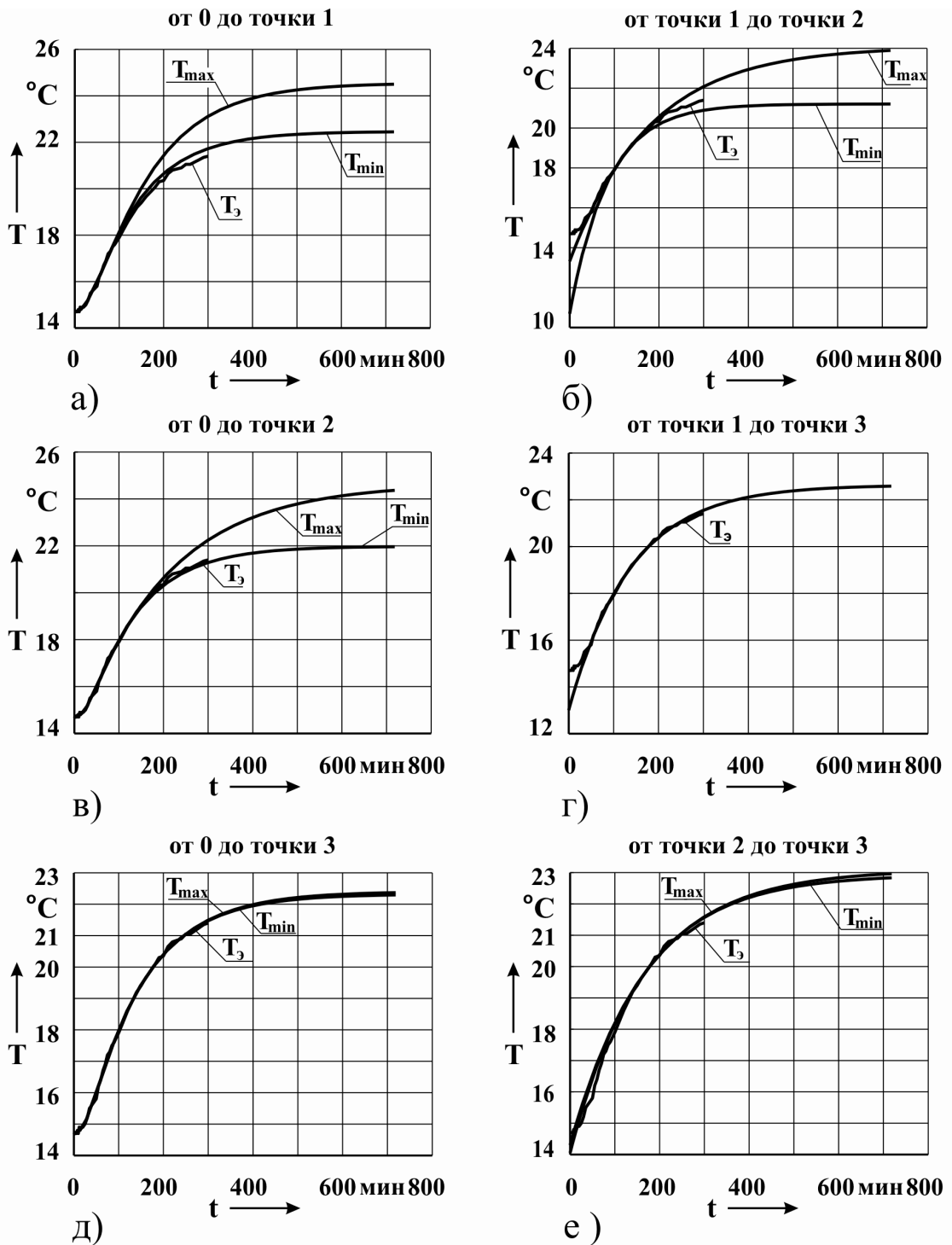


Рисунок 4 – Результаты аппроксимации и прогнозирования температурной характеристики для фиксированного термодатчика плоскошлифовального станка

г) в трех последующих вариантах использовались экспериментальные данные на следующих интервалах $t \in [t_1, t_2]$, $t \in [t_1, t_3]$ и $t \in [t_2, t_3]$ (рисунки 4.г, 4.д и 4.е, соответственно).

Анализ полученных результатов показывает:

а) наибольшая погрешность прогнозирования температуры (на времен-

ном интервале от $t_{э, max} = 300$ мин до $t_{прогн} = 720$ мин) фиксировалась при использовании экспериментальных данных в интервалах времени: $t \in [0, t_1]$, $t \in [0, t_2]$ и $t \in [t_1, t_2]$ (рисунки 4.а, 4.б, 4.г);

б) во всех остальных вариантах задания диапазона аппроксимации экспериментальных данных погрешность прогнозирования получалась минимальная, не превышающая $0,2^\circ C$;

Следует отметить, что во всех вариантах прогнозирования, кроме последнего (рисунок 4.е), в математическом описании температурной характеристики (5) использовались три температурных моды. Для шестого варианта при использовании экспериментальных данных в диапазоне $t \in [t_2, t_3]$ использовалась только первая температурная мода.

3 Порядок выполнения лабораторной работы

Выполнение лабораторной работы осуществляется в следующем порядке:

1) Получить экспериментальные данные для обработки либо от преподавателя, либо согласно номеру выполняемого задания, представленного в приложении А;

2) Провести машинные эксперименты по следующей схеме:

а) аппроксимация экспериментальных тепловых характеристик на всем временном интервале, полученным в натурном эксперименте – полный эксперимент; рассмотреть три варианта длительности полного эксперимента: 50%, 75% и 100% от предельной длины натурального эксперимента;

б) построение кривых II-го и III-го рода и определение экстремальных точек для трех вариантов;

в) формирование различных вариантов неполного эксперимента; проведение интерполяции и экстраполяции и расчет погрешностей построения тепловых характеристик (учесть результаты расчетов, выполненных в пункте «б»);

3) Выполнить анализ полученных результатов прогнозирования тепловых характеристик;

4) Оформить отчет;

5) Ответить на контрольные вопросы.

4 Содержание отчета

Отчет по выполненной лабораторной работе должен включать следующие данные:

1) кривые I-го рода для трех вариантов длительности натурального эксперимента;

2) кривые II-го и III-го родов для трех вариантов длительности натурального эксперимента;

3) шесть систем графиков с результатами вычислительных экспериментов (аналогичных рисунку 4);

4) аналитический анализ точности результатов прогнозирования и положения экстремальных точек.

5 Контрольные вопросы

Зачет по лабораторной работе предусматривает вместе с текстом отчета, выполненным в соответствии с требованиями стандарта университета СТП 101-00, положительные ответы на ряд контрольных вопросов:

а) с какой целью проводятся натурные тепловые испытания станков;

б) что понимается под кривыми I-го, II-го и III-го родов;

в) что такое тепловые характеристики станков;

г) какая связь модальных параметров аппроксимирующей функции тепловых характеристик с длительностью натурального эксперимента;

д) какие факторы влияют на погрешность прогнозирования тепловых характеристик станков.

Список использованных источников

- 1 **Поляков, А.Н.** Компьютерные исследования тепловых деформаций металлорежущих станков. Методы, модели и алгоритмы: Учебное пособие/ А.Н. Поляков.- Оренбург: ГОУ ОГУ, 2003. – 382с.
- 2 **Поляков, А.Н.** Методика сокращенных тепловых испытаний металлорежущих станков/ А.Н. Поляков // Техника машиностроения.- 2002.- №1.- С.4-10.
- 3 **Поляков, А.Н.** Сокращенные тепловые испытания станков/ А.Н. Поляков // СТИН.-2002-№8.-С.15-19.
- 4 **Поляков, А.Н.** Прогнозирование температурных характеристик станка в тепловых испытаниях/ А.Н. Поляков // Сборка в машиностроении, приборостроении.-2001.-№12. - С.33-38.
- 5 Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: справочник // Под общ. ред. Григорьева В.А. и Зорина В.М.-М.: Энергоатомиздат, 1988.- 559с.
- 6 **Лыков, А.В.** Теория теплопроводности/ А.В. Лыков. М.: Высшая школа, 1967.- 600 с.
- 7 **Хомяков, В.С.** Применение теоретического модального анализа к расчету температурных полей в металлорежущих станках/ В.С. Хомяков , С.И. Досько, А.Н. Поляков // Известия вузов. Машиностроение.-1989.-№9.- С.154 - 158.
- 8 **Дьяконов, В.П.** Математические пакеты расширения МАТЛАВ. Специальный справочник.- СПб.:/ В.П. Дьяконов, В.В. Круглов.- Питер, 2001.- 480 с.

Приложение А (обязательное)

Варианты экспериментальных тепловых характеристик для прогнозирования

Таблица А.1 – экспериментальные данные по измерению температур плоскошлифовального станка ШПХ32.11, n=1500 об/мин (5 марта 2002 г.)

время	Номера датчиков										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	13,6	13,9	14,4	13,8	14,1	14,1	13,9	14,2	14,7	14	14,4
2	13,6	14,0	14,4	14,4	14,0	14,1	14,0	14,2	14,7	14,0	14,5
4	13,6	13,8	14,3	14,5	14,8	14,1	14,2	14,8	14,0	14,0	14,6
6	13,6	13,9	14,4	14,5	14,0	14,2	14,2	14,2	14,7	14,0	14,8
8	13,6	14,0	14,5	14,6	14,0	14,1	14,0	14,2	14,8	14,0	15,3
10	13,6	13,9	14,5	14,6	13,9	14,1	14,0	14,3	14,7	14,0	15,9
12	13,7	13,9	14,5	14,7	14,0	14,2	14,0	14,2	14,9	14,0	16,8
14	13,7	14,0	14,5	14,8	14,0	14,2	14,0	14,2	14,8	14,0	16,8
16	13,8	14,1	14,6	14,9	14,1	14,2	14,1	14,2	14,9	14,0	17,3
18	13,8	14,1	14,6	15,1	14,0	14,3	14,1	14,2	14,9	14,0	17,7
20	13,9	14,2	14,8	15,3	14,0	14,3	14,0	14,4	14,9	14,1	18,1
25	14,0	14,3	15,1	15,7	14,2	14,4	14,2	14,4	15,0	14,2	19,0
30	14,1	14,4	15,3	16,0	14,3	14,5	14,3	14,5	15,2	14,2	19,9
35	14,3	14,5	15,7	16,2	14,4	14,7	14,5	14,5	15,5	14,5	20,7
40	14,5	14,8	15,8	16,6	14,5	14,7	14,6	14,7	15,6	14,5	21,3
45	14,6	15,0	16,2	16,8	14,5	14,9	14,7	14,7	15,7	14,6	22,0
50	14,7	15,0	16,4	17,2	14,9	15,0	14,7	15,0	15,8	15,9	22,5
55	14,9	15,2	16,8	17,5	14,9	15,3	14,9	15,2	16,2	15,0	22,9
60	15,3	15,5	17,2	17,9	15,1	15,5	15,3	15,1	16,4	15,0	23,8
65	15,4	15,6	17,5	18,1	15,3	15,6	15,4	15,5	16,7	15,4	24,4
70	15,6	16,0	17,6	18,3	15,6	15,7	15,6	15,7	16,9	15,6	25,0
75	15,8	16,0	18,0	18,5	15,7	16,1	15,8	15,8	17,2	15,9	25,4
80	16,0	16,3	18,3	18,8	15,9	16,1	15,9	16,0	17,3	16,0	26,0
85	16,6	16,6	18,5	19,3	16,1	16,1	16,1	18,1	17,5	16,1	26,5
90	16,3	16,6	18,8	19,3	16,1	16,4	16,3	16,2	17,6	16,2	26,7
100	16,7	16,9	19,2	19,6	16,4	16,7	16,5	16,4	17,9	16,4	27,5
110	16,95	17,15	16,55	19,85	16,65	17,05	16,8	16,65	18,25	16,85	28,3
120	17,35	17,55	20	20,15	16,95	17,25	17,1	16,9	18,6	17,05	29,01
130	17,65	17,75	20,35	20,55	17,25	17,55	17,35	17,15	18,9	17,45	29,85
140	17,9	18,05	20,75	20,75	17,5	17,8	17,6	17,35	19,2	17,6	30,5
150	18,15	18,25	21	20,05	17,75	18,05	17,85	17,55	19,4	17,85	31,1
160	18,35	18,45	21,3	21,25	17,95	18,3	18,05	17,75	19,65	18,1	31,8
170	18,55	18,7	21,5	21,4	18,15	18,45	18,25	17,95	19,85	18,3	32,23
180	18,75	18,85	21,85	21,7	18,4	18,8	18,55	18,15	20,05	18,5	32,7
190	18,9	19	21,9	21,8	18,6	18,85	18,65	18,25	20,3	18,65	33,2
200	19,15	19,15	22,15	22	18,7	19,1	18,8	18,45	20,35	18,85	33,45
210	19,35	19,4	22,4	22,2	18,9	19,3	19,05	18,65	20,65	18,95	33,95
220	19,5	19,55	22,55	22,35	19,1	19,35	19,2	18,75	20,8	19,05	34,2

Продолжение таблицы А.1											
время	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
230	19,6	19,65	22,7	22,35	19,25	19,55	19,25	18,8	20,85	19,25	34,6
240	19,75	19,75	22,75	22,45	19,3	19,7	19,45	18,95	20,9	19,35	34,8
250	19,85	19,85	22,85	22,5	19,4	19,75	19,55	19,05	21,05	19,6	35,1
260	19,95	19,95	22,95	22,55	19,5	19,75	19,65	18,15	20,05	19,6	34,45
270	20	20	23	22,6	19,55	19,9	19,65	19,25	21,15	19,7	35,7
280	20,15	20,15	23,15	22,85	19,75	20,05	19,85	19,3	21,25	19,85	35,9
290	20,2	20,2	23,05	22,85	19,8	20,05	19,95	19,4	20,35	19,95	36,2
300	20,25	20,25	23,25	22,85	19,85	20,15	20,05	19,45	21,4	19,95	36,25

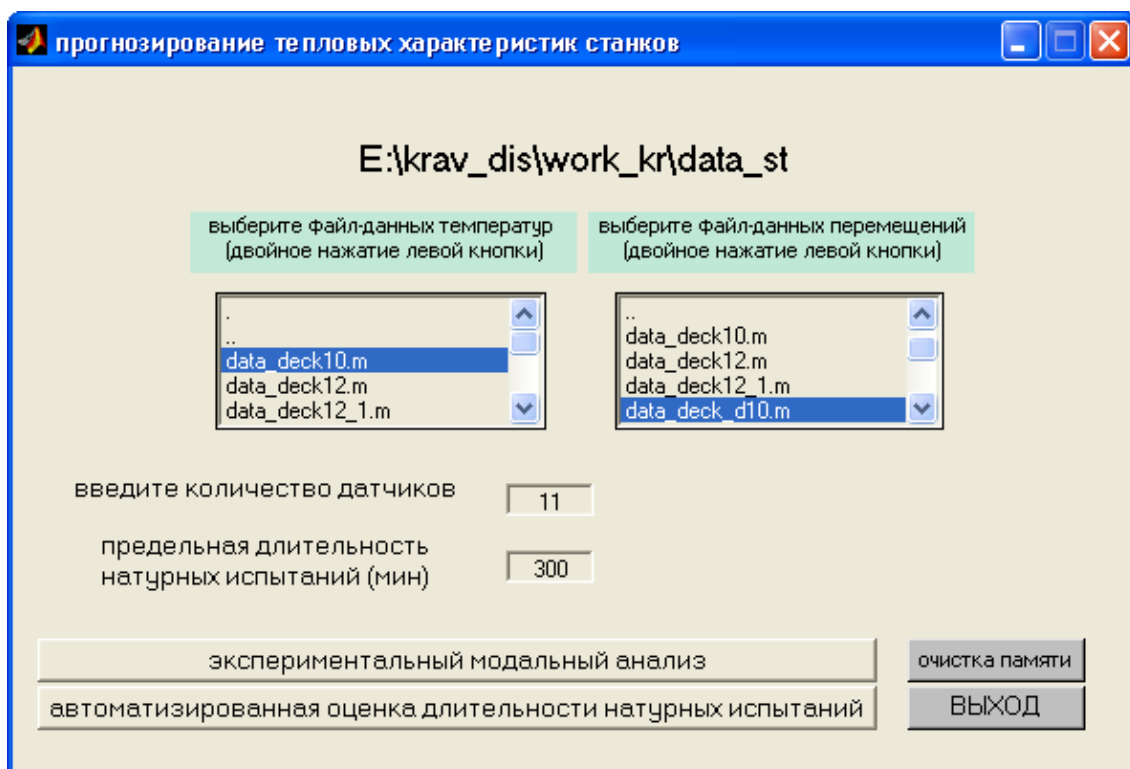
Таблица А.2 – экспериментальные данные по измерению температур плоскошлифовального станка ШПХ32.11, n=1500 об/мин (5 марта 2002 г.)

время	Номера датчиков										
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
0	12,6	12,8	12,9	13,4	13,2	13,2	13,4	13,2	13,3	13,5	12,8
2	12,6	12,8	12,9	13,4	13,3	13,3	13,5	13,2	13,3	13,5	13
4	12,6	12,8	13,2	13,5	13,7	13,3	14	13,2	13,3	13,5	13,3
6	12,6	12,8	13,6	14	14,2	13,3	14,4	13,2	13,3	13,5	13,7
8	12,6	14,2	13,7	14,7	13,3	14,9	13,2	13,3	13,5	14,2	14,3
10	12,6	12,9	14,8	13,9	15,3	13,3	15,4	13,2	13,4	13,6	14,7
12	12,7	12,7	15,3	14,1	15,8	13,4	16	13,2	13,4	13,6	15,3
14	12,7	12,8	13,3	16,3	13,4	16,5	13,2	13,5	13,6	13,7	15,6
16	12,8	12,8	16,3	14,6	16,7	13,5	16,9	13,3	13,6	13,7	16,2
18	12,8	12,8	16,8	14,9	17,1	13,6	17,3	13,3	13,7	13,7	16,7
20	12,9	12,8	17,2	15,2	17,5	13,6	17,7	13,3	13,8	13,8	17,1
25	12,9	12,9	18,2	23,2	18,4	13,9	18,7	13,4	14,1	13,9	18
30	13,2	12,9	19,1	24	19,2	14,1	19,5	13,6	14,3	14,0	18,9
35	13,2	12,9	20,0	24,9	22	14,5	23	13,8	14,7	14,2	19,8
40	13,6	12,9	20,6	25,5	20,9	14,8	20,9	13,9	15,0	14,4	20,4
45	13,8	12,9	21,4	26,3	21,6	15,1	21,5	14,1	15,3	14,6	21,1
50	14,0	12,9	22,1	19,8	22,3	12,5	22,1	14,4	15,7	14,8	21,9
55	14,2	12,9	22,8	21,4	23,0	15,8	22,7	14,6	16,0	13,0	22,6
60	14,5	13,0	23,5	28,4	23,7	16,2	23,5	14,8	16,4	15,3	23,2
65	14,7	13,0	24,1	29,0	24,3	16,5	24,0	15,1	16,8	15,6	24,0
70	14,9	13,0	24,7	29,6	24,9	16,8	24,6	15,3	17,1	15,8	24,5
75	15,1	13,1	25,3	31,0	25,6	17,2	25,2	15,7	17,4	15,9	25,2
80	15,3	13,1	25,9	26,8	26,1	17,5	25,6	15,8	17,7	16,3	25,7
85	15,6	13,1	26,3	31,2	26,5	17,8	26,1	16,1	18,0	16,5	26,3
90	15,7	13,1	27,0	26,9	27,1	18,2	26,5	16,4	18,3	16,5	26,8
95	15,9	13,1	27,4	25,1	27,7	18,5	27,3	16,6	18,6	16,7	27,5
105	16,25	13,15	28,3	25,85	28,5	19	28	17	19	17,1	28,4
115	16,6	13,2	29,2	26,6	29,3	19,5	28,7	17,4	19,4	17,5	29,3
125	17	13,3	30	27,4	30,2	19,9	29,7	17,9	19,9	17,7	30,2
135	17,3	13,4	30,9	28	30,9	20,4	30,3	18,2	20,2	18,1	30,9
145	17,5	13,4	31,7	28,7	31,6	20,8	30,9	18,6	20,8	18,5	31,6
155	17,8	13,5	32,4	29,4	32,3	21,2	31,5	18,9	21	18,8	32,4
165	18	13,5	33	29,9	32,8	21,5	32,3	19,3	21,3	19,2	33,1
175	18,2	13,6	33,7	30,3	33,4	21,9	32,5	19,6	21,6	19,3	33,7
185	18,5	13,7	34,3	30,8	33,9	22,1	33,2	19,8	21,9	19,5	34,3
195	18,6	13,8	34,9	31,2	34,3	22,4	33,5	20,1	22,1	19,4	34,6
205	18,8	13,8	35,3	31,5	34,7	22,7	33,7	20,4	22,3	19,5	35
215	19,1	13,9	35,8	31,8	35,1	22,9	33,9	20,6	22,4	19,6	35,5
225	19,3	14	36,2	32,1	35,6	23,2	34,5	20,9	22,7	19,7	35,5

235	19,4	14	36,6	32,5	35,8	23,3	34,8	21,1	22,8	19,9	36,1
245	19,6	14,1	36,9	32,6	36,1	23,5	34,9	21,3	22,9	19,9	36,3
255	19,7	14,2	37,2	33	36,4	23,7	35,3	21,4	23,1	20	36,7
265	19,8	14,2	37,6	33,1	36,6	23,9	35,7	21,6	23,2	20,1	37
275	19,9	14,3	37,8	33,3	36,8	24	35,85	21,7	23,3	20,2	37,2
285	20	14,4	38,1	33,6	37,1	24,1	36,1	21,8	23,3	20,2	37,6
295	20,1	14,4	38,3	33,4	37,3	24,2	36,6	22	23,5	20,4	37,6
305	20,1	14,5	38,55	33,8	37,5	24,3	36,6	22	23,5	20,4	38

Приложение Б (справочное)

Первое рабочее окно автоматизированной системы прогнозирования



Приложение В (справочное)

Главное рабочее окно модуля экспериментального модального анализа термодиформационного состояния станка

