

А. Н. Поляков, К. В. Марусич, И. П. Никитина

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ СМЕЩЕНИЙ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ СТАНКОВ**

Представлены результаты исследований переменных тепловых процессов в фрезерно-сверлильном станке высокой точности. Их анализ позволил разработать метод прогнозирования тепловых характеристик станков, базирующийся на использовании кусочных аппроксимирующих функций для каждого участка циклограммы по тепловым характеристикам, полученным из предварительных натуральных экспериментов на соответствующих частотах вращения шпинделя. На основе метода прогнозирования разработаны средства управления исполнительными органами станка по снижению его температурных погрешностей, обеспечивающие величину тепловых смещений вдоль оси шпинделя в пределах 10 мкм. *Станки; температурные смещения; прогнозирование; тепловые характеристики; Ansys; температурные моды*

**ВВЕДЕНИЕ**

Экспериментальные данные фирм-производителей станков показывают, что температурные перемещения исполнительных органов в современных прецизионных металлорежущих станках могут превышать 100 мкм [1–3], определяя до 70 % значения общей погрешности механообработки [4, 5].

Для достижения стабильной размерной точности механообработки в пределах 10 мкм необходимо оснащение станков системами компенсации температурной погрешности, которые строятся на двух альтернативных подходах: прямое измерение температурной погрешности на станке и прогнозирование температурной погрешности (температурная погрешность станка – доля относительного перемещения инструмента и заготовки, обусловленная только тепловыми процессами в станке – *прим. авторов*).

Первый подход обладает высокой точностью, но требует оснащения станка дополнительным измерительным оборудованием, что приводит к существенному увеличению стоимости станка (не менее, чем на 30 %).

Точность второго подхода полностью определяется качеством реализуемых моделей прогнозирования тепловых характеристик. Представленное исследование направлено на совершенствование именно второго подхода.

**ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

Из практики механообработки было установлено, что любые совершенные технические решения при проектировании и изготовлении

современных прецизионных станков не могут гарантировать необходимую им теплоустойчивость. Поэтому станки дополнительно оснащаются системами термостабилизации и компенсации температурных погрешностей в процессе эксплуатации станков. Однако, как правило, техническая реализация таких систем требует установки температурных датчиков в элементах конструкции станка. В производственных условиях эксплуатации станка, без внесения изменений в конструкцию станка, одним из способов повышения его теплоустойчивости является внесение коррекции в программный код обработки на станке с ЧПУ (ЧПУ – числовое программное управление, принятый термин, прим. авторов). Коррекция программного кода обусловлена величиной корректирующих воздействий и периодичностью их включения по каждой из координатных осей станка. Величина корректирующих воздействий определяется величиной температурных смещений исполнительных органов станка. Анализ существующих работ в этой области показал, что точность компенсации температурной погрешности станка определяется точностью прогнозирования температурных смещений. Это позволило сформулировать актуальную научную задачу – разработка метода прогнозирования тепловых характеристик станков, работающих в условиях переменных тепловых режимов. Решение поставленной научной задачи работы позволит разработать алгоритм компенсации температурной погрешности станка, реализация которого на станках с ЧПУ обеспечит существенное повышение точности обработки.

### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для исследований переменного термодинамического состояния станка был выбран фрезерно-сверлильный станок высокой точности DeckelFP3 (Германия). Испытания проводились с помощью разработанного испытательно-диагностического комплекса, представленного на рис. 1.

В качестве измерительной аппаратуры использовались цифровой многоканальный измеритель температуры МИТ-12ТП-11, оснащенный интерфейсом RS-232. Цифровой измерительный прибор предназначен для проведения высокоточных измерений температуры при помощи термоэлектрических преобразователей по 12 каналам. Получаемая информация по каждому каналу выводилась на цифровом дисплее прибора и в виде таблицы данных передавалась в компьютер. В приборе влияние каналов друг на друга полностью исключено за счет применения в качестве коммутирующих устройств миниатюрных электромагнитных реле.

Для измерения температурных перемещений использовались многооборотные индикаторные головки типа МИГ ГОСТ 9696-75, которые закреплялись в магнитные штативы типа ШМ-ШН, устанавливаемый на столе станка, а ножка индикаторной головки упиралась в неподвижную гильзу шпиндельного узла станка. Датчики температуры с магнитным креплением устанавливались на открытых поверхностях несущей системы станка.

Особое внимание уделялось изменению температуры технической среды. Поэтому термометр типа «Замер» устанавливался на расстоянии 100 мм от торца шпинделя. Его расположение фиксировало изменение температуры, вызываемое: изменением условий конвективного теплообмена в условиях повторно-кратковременного режима работы станка; суточным изменением температуры окружающей среды и изменением температуры технической среды в результате разогрева шпинделя во времени.

На несущей системе станка были установлены двенадцать датчиков: № 10 и 11 – на стойке, № 1–4, 7–9 и 12 – на шпиндельной бабке; № 6 – на выдвижной гильзе и № 5 – электродвигателе привода главного движения (рис. 1).

Индикаторные головки устанавливались в трех точках по трем координатам, с учетом того, что в исходном положении гильза была выдвинута на 80 мм по оси  $Y$ . Индикатор И1

фиксировал температурные перемещения вдоль горизонтальной оси  $X$ ; индикатор И2 – вдоль оси шпинделя  $Y$  (по паспорту станка – прим. авторов); индикатор И3 – вдоль вертикальной оси  $Z$ . Выбор схемы расстановки термодатчиков и индикаторных головок определялся двумя факторами: особенностями измерительной аппаратуры и накопленным опытом тепловых испытаний станков такой компоновки [1–3, 7–10].

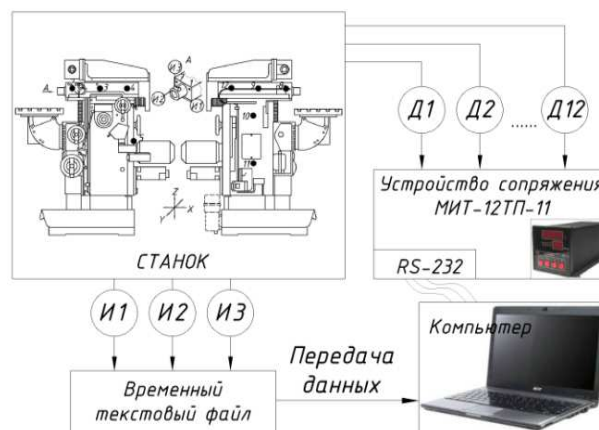


Рис. 1. Испытательно-диагностический комплекс

Экспериментальные исследования термодинамического состояния станка, работающего на холостом ходу, проводились по следующей программе: непрерывный режим работы; режим нагревание-остывание; переменный режим работы.

Тепловые испытания в условиях непрерывной работы станка проводились на следующих частотах вращения шпинделя: 800, 1000, 1250, 1600 и 2000 мин<sup>-1</sup>.

Тепловые испытания станка в режиме нагревание-остывание проводились по следующей программе: нагревание в течение 240 минут на частоте 1000 мин<sup>-1</sup> и остывание в течение 420 минут; нагревание в течение 30 минут на частоте 1600 мин<sup>-1</sup> и остывание в течение 180 минут; нагревание в течение 240 минут на частоте 2000 мин<sup>-1</sup> и остывание в течение 360 минут.

Серия тепловых испытаний в условиях переменного теплового режима работы станка осуществлялась по двум вариантам: повторно-кратковременный и обобщенный или хаотичный.

Здесь под обобщенным или хаотичным вариантом понимается вариант, в котором реализуется сочетание частот вращения шпинделя без периодичности.

Повторно-кратковременный режим представлял собой периодическое чередование работы на фиксированной частоте вращения шпинделя и отключение. Натурные испытания были проведены для двух вариантов интервалов времени работы и отключения станка. В первом варианте тридцатиминутная работа станка сменялась пятнадцатиминутным отключением, при общей длительности испытаний – 315 минут. Во втором варианте интервал работы станка на одной частоте составлял двадцать минут, перерыв между включениями – десять минут. Общая длительность испытания составляла 300 минут.

Серия хаотичных режимов состояла из двух вариантов работы станка: одна смена частот вращения, т. е. два участка частот вращения шпинделя; семь участков частот вращения.

Были проведены две серии натурных испытаний станка. Длительность каждого испытания составляла 300 минут. В первой серии испытаний исследована циклограмма работы станка, представленная двумя частотами вращения шпинделя на двух участках в двух вариантах: 20 минут (первая частота) и 280 минут (вторая частота) – первый вариант; 30 минут / 270 минут – второй вариант, соответственно. Во второй серии чередовались частоты вращения: 200, 500, 800, 1000, 1250, 1600, 2000 и 2500 мин<sup>-1</sup>, в соответствии с заданными циклограммами. Из всего многообразия полученных экспериментальных данных на рис. 2, 3. построены: экспериментальные характеристики температурных смещений  $\delta(t)$  и экспериментально полученные зависимости «температурные смещения – температура»  $\delta(T)$ .

Анализ функциональных зависимостей  $\delta(T)$  показывает, что для различных режимов работы станка одному и тому же значению температуры соответствуют различные температурные смещения. При этом диапазон изменения смещений  $\Delta_\delta$  составляет более 50 % от минимально зафиксированного из экспериментов значения смещения – в представленном варианте 25 мкм при фиксированной температуре.

Это означает, что только по показаниям термодатчиков, без знания циклограммы работы станка, невозможно реализовать адекватный прогноз температурных смещений. В этом случае, реализация алгоритмов компенсации температурной погрешности станка неизбежно приведет к возникновению чрезмерной ошибки.

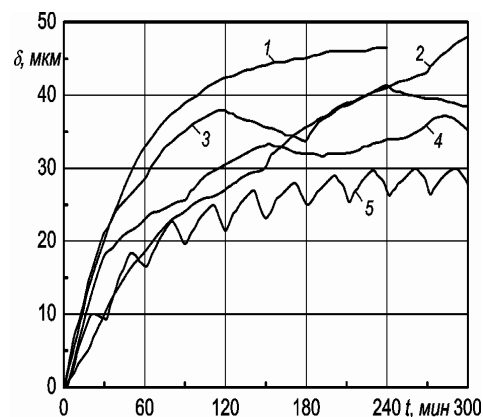


Рис. 2. Экспериментальные характеристики температурных смещений (режимы работы: 1 – непрерывный; 2 – ступенчатый рост частоты вращения; 3, 4 – различные варианты обобщенного типа; 5 – повторно-кратковременный)

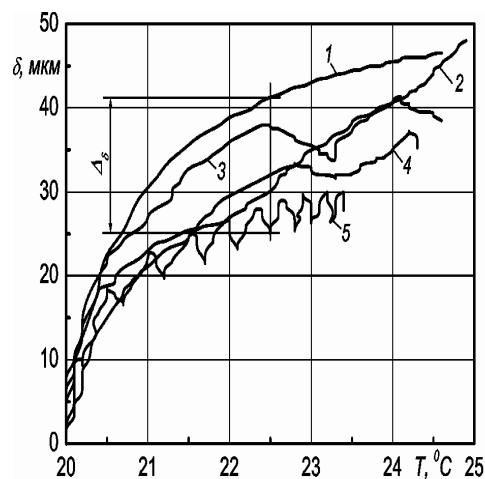


Рис. 3. Экспериментально полученные зависимости «температурные смещения – температура»

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ СТАНКА

Несмотря на незаменимость натурных экспериментов, для исключения случайных и систематических погрешностей, как средств измерений, так и условий проведения испытаний, в работе проводились вычислительные эксперименты на компьютерной модели станка.

Компьютерное моделирование осуществлялось с использованием САЕ-системы Ansys. Для определения температурных смещений было реализовано решение несвязанной задачи термоупругости с последовательным использованием двух расчетных моделей: тепловой и упруго-деформационной. Для сокращения времени моделирования и повышения удобства выпол-

нения анализа получаемых результатов была разработана методика компьютерного моделирования тепловых характеристик станка. Основные этапы показаны на рис. 4: а) разработка геометрической модели несущей системы станка (НСС) в САД-системе; б) формирование расчетной модели НСС для теплового расчета; в) автоматизированное формирование ступенчатой тепловой нагрузки по циклограмме; г) определение температурного поля НСС на основе решения задачи теплопроводности; д) формирование расчетной модели НСС для определения температурных смещений; е) циклическое решение упругодеформационной модели НСС с определением температурных смещений и построением соответствующих характеристик.

Для повышения эффективности использования методика моделирования была оснащена программным средством, разработанным на встроенном языке программирования APDL (Ansys Parametric Design Language).

Для апробации разработанной методики моделирования разработано несколько расчетных моделей в САЕ-системе Ansys (модели несущих систем различных типов станков, в том числе использованного в натурных испытаниях станка DeckelIP3). Для верификации расчетной модели НСС были выполнены расчеты согласно циклограммам работы станка в натурных испытаниях.

Использовались тестовые циклограммы, реализующие: ступенчатое повышение тепловой нагрузки; ступенчатое понижение тепловой нагрузки; повторно-кратковременные режимы с различными периодами. Оценка результатов моделирования показала, что закономерности изменения расчетных и экспериментальных тепловых характеристик в зависимости от циклограммы работы идентичны.

### МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Принципиальным отличием разработанного метода прогнозирования тепловых характеристик станка является отсутствие построения функций температурных смещений от температур. Метод относится к графоаналитическим типам и основан на анализе тепловых характеристик, полученных из натурных и вычислительных экспериментов для различных вариантов циклограмм работы станка. Метод включает математическое, алгоритмическое, программное и методическое обеспечение. Математическую основу метода составляет решение дифференциального уравнения теплопроводности. Особенностью получения аналитического решения для уравнения теплопроводности является использование модального подхода [11].

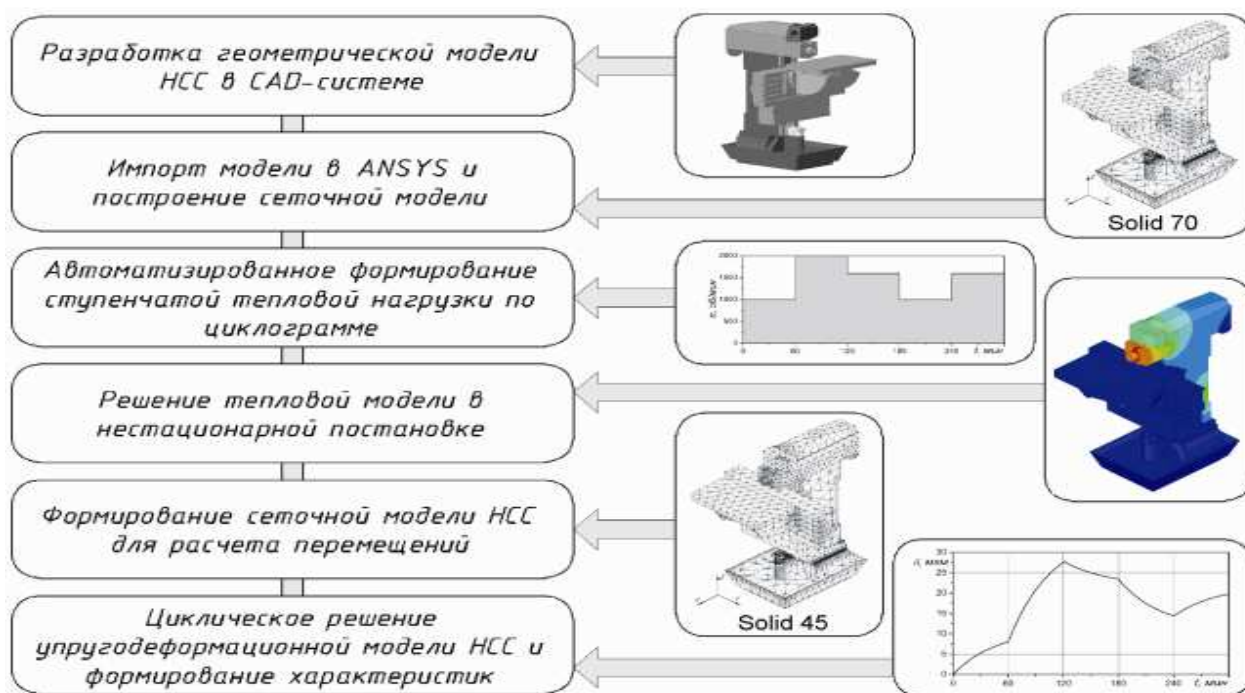


Рис. 4. Схема реализации методики компьютерного моделирования тепловых характеристик станка

В упрощенном виде температурные характеристики в каждой  $i$ -й точке  $T_i(t)$  могут быть представлены в виде [12–13]:

- нагревание:

$$T_i(t) = \sum_{k=1}^n A_{ik} (1 - e^{-t/\tau_k}) + \sum_{k=1}^n B_{ik} e^{-t/\tau_k}, \quad (1)$$

- остывание:

$$T_i(t) = \sum_{k=1}^n B_{ik} (1 - e^{-t/\tau_k}) + \sum_{k=1}^n A_{ik} e^{-t/\tau_k}, \quad (2)$$

где  $n$  – число температурных мод;  $A_{ik}$ ,  $B_{ik}$  – уровни установившихся и начальных температур для каждой температурной моды;  $t$  – время;  $\tau_k$  – тепловая постоянная каждой температурной моды (под температурной модой понимается компонента  $T_i(t)$  в виде экспоненциальной функции с фиксированной тепловой постоянной времени  $\tau_k$  – *прим. авторов*).

Учитывая, что температурные перемещения линейно связаны с температурой, все вышеприведенные зависимости для температуры справедливы и для смещений. Характеристика температурных смещений для случая нескольких температурных мод имеет вид по некоторой  $\xi$ -й координате:

- нагревание:

$$\delta_\xi(t) = \sum_{k=1}^n A_{\xi k}^\delta (1 - e^{-t/\tau_k}) + \sum_{k=1}^n B_{\xi k}^\delta e^{-t/\tau_k}, \quad (3)$$

$$\xi \rightarrow X, Y, Z,$$

- остывание:

$$\delta_\xi(t) = \sum_{k=1}^n B_{\xi k}^\delta (1 - e^{-t/\tau_k}) + \sum_{k=1}^n A_{\xi k}^\delta e^{-t/\tau_k}, \quad (4)$$

где  $A_{\xi k}^\delta$ ,  $B_{\xi k}^\delta$  – уровни установившихся и начальных температурных перемещений для каждой моды.

Основной научной гипотезой метода является: возможность построения прогнозируемой тепловой характеристики для произвольной циклограммы по отдельным участкам экспериментальных тепловых характеристик, полученных из натуральных экспериментов для частоты вращения шпинделя, соответствующей данному участку циклограммы.

По результатам проведенных исследований было установлено:

- все многообразие циклограмм работы станка описывается комбинацией трех базовых типов: дискретное повышение частоты вращения шпинделя; повторно – кратковременный тип работы станка; дискретное понижение частоты вращения шпинделя;

- для каждого базового типа циклограмм реализуется свой алгоритм построения тепловой характеристики;

- выдвинутая научная гипотеза построения тепловой характеристики справедлива для первого и второго типов циклограмм; для третьего типа циклограммы требуется выполнение дополнительных графоаналитических операций.

С использованием результатов натуральных и вычислительных экспериментов были созданы математические модели тепловых характеристик в виде кусочных функций для каждого участка циклограммы. На практике кусочные функции выбираются в виде отдельных участков заранее построенных тепловых характеристик для соответствующих частот вращения шпинделя. Эти тепловые характеристики получают либо из натурального эксперимента, либо по результатам построения аппроксимирующих зависимостей «температурное смещение – частота вращения шпинделя и время»  $\delta(n, t)$ .

Основные этапы разработанного метода и последовательность их выполнения представлены на рис. 5 в виде схемы.

На первом этапе проводят серию тепловых испытаний станка в условиях непрерывного режима на холостом ходу типа: «нагревание – остывание» на фиксированных частотах вращения шпинделя. Для построения тепловых характеристик на промежуточных частотах выполняют построение аппроксимирующих зависимостей вида  $\delta(n, t)$ . В соответствии с технологическим процессом механообработки формируют соответствующую циклограмму для станка. Эти три этапа формируют необходимые исходные данные для построения прогнозируемых характеристик. Следующие три этапа завершают построение прогнозируемых характеристик. В зависимости от выявленных типовых циклограмм работы оборудования выбирается прогнозная модель и осуществляется построение прогнозируемых тепловых характеристик в автоматическом режиме.

На основе полученных математических моделей разработаны алгоритмы и программное средство в системе Matlab, оснащенное графическим пользовательским интерфейсом (рис. 6). В программном средстве формирование моделей прогнозируемых тепловых характеристик осуществляется для различных типов циклограмм. В качестве исходной информации используются текстовые файлы тепловых характеристик.

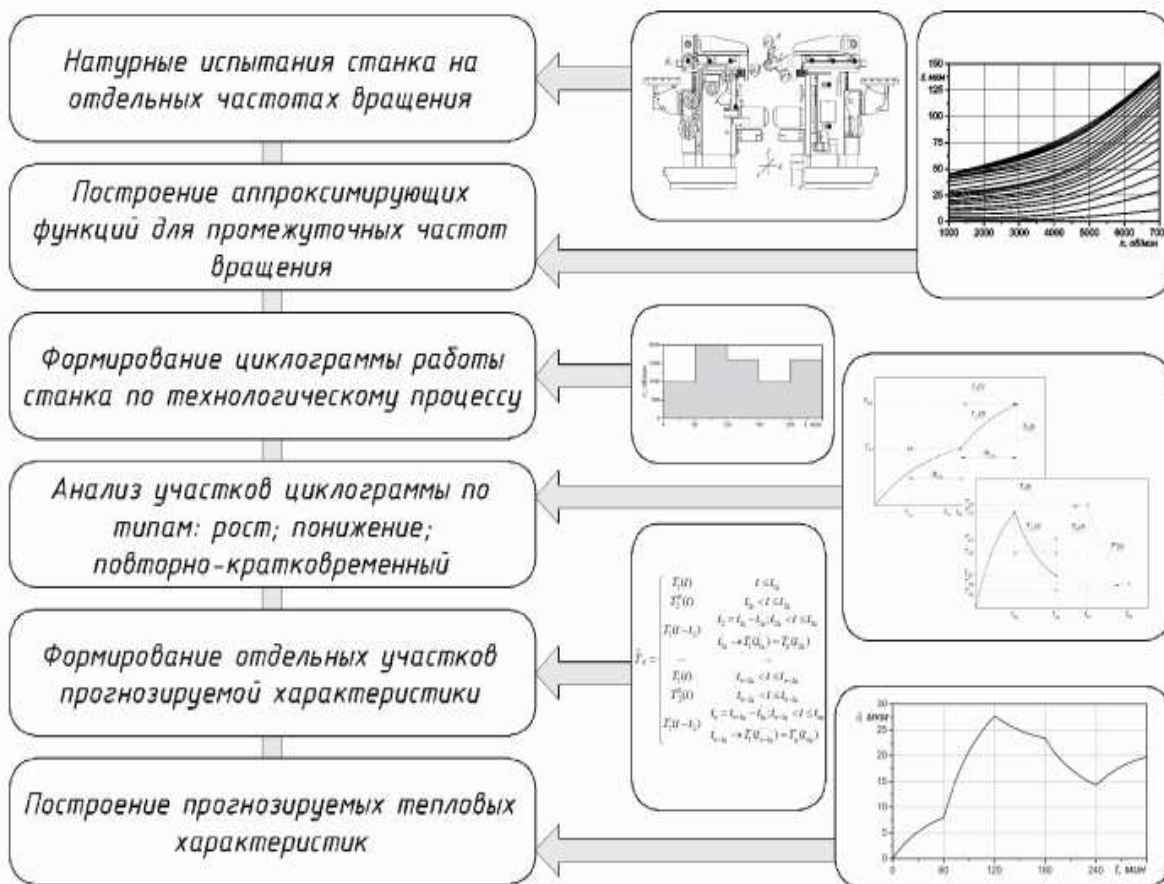


Рис. 5. Схема реализации метода прогнозирования тепловых характеристик



Рис. 6. Экранная форма программного модуля прогнозирования тепловых характеристик станков

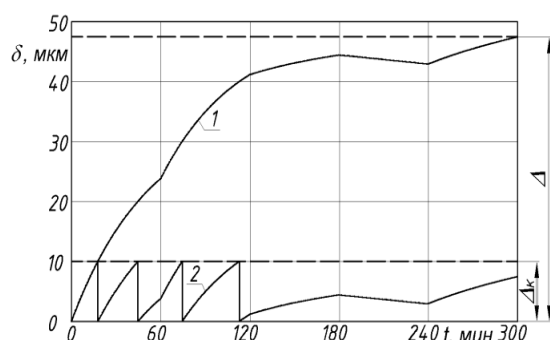
Апробация разработанного метода прогнозирования тепловых характеристик проведена на пятидесяти вариантах циклограмм, полученных из натуральных и вычислительных экспериментов. Было установлено:

- погрешность прогнозирования характеристик температурных перемещений существенно различается по координатным осям: по координате, соответствующей оси шпинделя она является минимальной и не превышает 10 %; по двум другим координатным осям станка погрешность прогнозирования существенно превышает 10 %, поэтому для этих осей станка разработанный метод прогнозирования не может использоваться;

- погрешность прогнозирования существенно зависит от типа циклограмм: минимальная погрешность фиксировалась для циклограмм первого типа; наибольшая погрешность фиксировалась для циклограмм второго типа;

- существенное влияние на погрешность прогнозирования для циклограмм второго и третьего типов оказывает выбор соответствующих участков экспериментальных тепловых характеристик остывания.

На основе разработанного метода прогнозирования тепловых характеристик разработан алгоритм компенсации температурной погрешности для его использования в системах ЧПУ станков (рис. 7). Исходными данными для алгоритма компенсации температурной погрешности являются прогнозируемая характеристика температурных смещений и требуемые показатели точности  $\delta_T$ .



**Рис. 7.** Схема компенсации температурной погрешности станка (характеристики температурных смещений: 1 – без коррекции температурной погрешности; 2 – с коррекцией температурной погрешности)

Результатом алгоритма служит система корректирующих воздействий, формируемая для каждого технологического перехода, вида:

$$R = \begin{cases} n_1; \{t_1\}; \{\delta_1\} \\ \dots \\ n_m; \{t_m\}; \{\delta_m\} \end{cases}, \quad (5)$$

где  $m$  – число технологических переходов;  $n_1, n_m$  и  $\{t_1\} = (t_{11}, \dots, t_{1n_1})$ ,  $\{t_m\} = (t_{m1}, \dots, t_{mn_m})$  – количество корректирующих воздействий на 1-м и  $m$ -м технологических переходах и последовательности интервалов времени, в течение которых действуют корректирующие воздействия;  $\{\delta_1\} = (\delta_{11}, \dots, \delta_{1p_1})$ ,  $\{\delta_m\} = (\delta_{m1}, \dots, \delta_{mp_m})$  – соответствующие последовательности корректирующих воздействий на 1-м и  $m$ -м технологических переходах.

На рис. 7 показатели точности для каждого перехода приняты одинаковыми, равными 10 мкм.

Анализ полученных результатов показал, что при прогнозируемом уровне температурной погрешности и заданном показателе точности достаточно задать корректирующие воздействия только на двух первых технологических переходах. В данном случае алгоритм компенсации температурной погрешности позволил сформировать систему корректирующих воздействий в виде:

$$R = \begin{cases} 3; \{18, 27, 15\}; \{0, 10, 10\} \\ 3; \{15, 40, 5\}; \{0, 10, 10\} \\ 1; \{60\}; \{0\} \\ 1; \{60\}; \{0\} \\ 1; \{60\}; \{0\} \end{cases} \quad (6)$$

## ВЫВОДЫ

Разработан метод прогнозирования тепловых характеристик станков, базирующийся на использовании кусочных аппроксимирующих функций для каждого участка циклограммы по тепловым характеристикам, полученным из предварительных натуральных экспериментов на соответствующих частотах вращения шпинделя.

Разработана методика компьютерного моделирования тепловых характеристик станка, работающего в условиях переменных тепловых режимов, позволяющая выполнять многовариантный анализ в автоматическом режиме за счет использования разработанного программного средства на встроенном в САЕ-систему языке программирования.

Разработаны средства управления исполнительными органами станка по снижению его температурных погрешностей с использованием прогнозных тепловых характеристик, обеспечивающие величину тепловых смещений вдоль оси шпинделя в пределах 10 мкм, независимо от продолжительности технологической операции, выполняемой на данном станке.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Поляков А. Н., Никитина И. П.** Применение термоупругой модели к анализу тепловых процессов в металлорежущих станках // Вестник машиностроения. 1996. № 7. С. 27–30.
2. **Поляков А. Н., Гончаров А. Н., Марусич К. В.** Исследование тепловых деформаций в металлорежущих станках // Технология машиностроения, 2011. № 2. С. 11–16.
3. **Поляков А. Н., Гончаров А. Н.** Исследование тепловых характеристик многоцелевого станка // СТИН. 2011. № 9. С. 2–7.
4. **Бушуев В. В.** Тенденции развития мирового станкостроения // Приводная техника. 2006, № 5. С. 2–6.
5. **Бушуев В. В., Сабиров Ф. С.** Направления развития мирового станкостроения // Вестник МГТУ Станкин, 2010. № 1. С. 24–30.
6. **Бушуев В. В.** Направления конструирования станков // Вестник МГТУ Станкин. 2008. № 1. С. 8–13.
7. **Хомяков В. С., Доськов С. И., Поляков А. Н.** Использование принципа декомпозиции в тепловых расчетах металлорежущих станков // Известия вузов. Машиностроение. 1990. № 5. С. 141–145.
8. **Парфенов И. В., Поляков А. Н.** Идентификация тепловых процессов в металлорежущих станках // Вестник машиностроения. 1995. № 2. С. 19–22.
9. **Поляков А. Н.** Назначение критериальных ограничений тепловой модели станка при идентификации его термодформационной системы // Технология машиностроения. 2004. № 5. С. 28–32.
10. **Поляков А. Н.** Метод коррекции расчетной схемы станка при идентификации его термодформационной системы // Вестник машиностроения, 2004. № 12. С. 43–48.
11. **Поляков А. Н.** Совершенствование теплового моделирования металлорежущих станков при реализации модального подхода // Машиностроитель, 1999. № 12. С. 11–15.
12. **Поляков А. Н.** Прогнозирование температурных характеристик станка в тепловых испытаниях // Сборка в машиностроении, приборостроении, 2001. № 12. С. 33–38.
13. **Марусич К. В.** Прогноз температурных перемещений станков, работающих в условиях переменных тепловых режимов // Обработка металлов, 2011. № 4. С. 74–77.

#### ОБ АВТОРАХ

**Поляков Александр Николаевич**, зав. каф. технол. машиностр., металлообработ. станков и комплексов. Дипл. инженер-механик (ОГУ, 1985). Д-р техн. наук по автомат. и управ. технолог. проц. и производств(ОГУ, 2004). Иссл. в обл. физико-технич. эффектов в станках.

**Марусич Константин Викторович**, магистрант. Дипл. инженер по металлореж. станк. и инструм (ОГУ, 2004). Иссл. в обл. тепловых явлений в металлореж. станках.

**Никитина Инна Петровна**, доц. каф. технол. машиностр., металлообработ. станков и комплексов. Дипл. инженер-механик (ОГУ, 1988). Канд. техн. наук по проц. механ. и физико-технич. обработ., станки и инструм. Иссл. в обл. тепловых явлений в металлореж. станках.